

KOHEZYONSUZ ZEMİNLER İÇERİSİNDE YATAY YÜKLENMİŞ ÇELİK KAZIKLARIN DEPLASMANLARININ ELASTİK EĞRİ DENKLEMİ YARDIMI İLE BULUNMASI

Ayhan GÜRBÜZ

İnşaat Müh. Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Atılım Üniversitesi, İncek 06836, Ankara
agurbuz@atilim.edu.tr

(Geliş/Received: 03.05.2010; Kabul/Accepted: 26.10.2010)

ÖZET

Yatay yüklenmiş kazıkların uygulama alanlarının başında; köprü ayakları, limanlar ve heyelanları önleme sahaları ön plana çıkmaktadır. Yatay yüklenmiş kazıkların maruz kalacakları yatay deplasmanların doğru ve basit bir şekilde hesaplanması, yapı güvenliği ve doğru tasarım açısından büyük önem taşımaktadır. Kazık tepe noktasından kazık yükü ile aynı doğrultuda olan yatay deplasmanların ilk yön değiştirmesine kadar olan yer yüzeyinden ölçülen kazık boyu, kazık kritik derinliği olarak tanımlanmaktadır. Yatay yüklenmiş bir kazığın kritik derinliği boyunca maruz kalacağı dirençler; kazığın ön tarafında oluşan pasif, arka tarafında oluşan aktif ve kazık yan yüzeylerinde oluşan sürtünme dirençlerinden meydana gelmektedir. Bu çalışmada kohezyonsuz zeminler içinde yatay yüklenmiş çelik kazığın, kazık başına etki eden kuvvetin ve kazığa karşı koyan dirençlerin kazık kritik derinliği boyunca iki boyutlu model ve elastik eğri denklemi yardımı ile kazığın yatay deplasmanları hesaplanmıştır. Kohezyonsuz zeminler içinde test edilmiş üç çelik kazığın yatay deplasman değerleri, bu çalışmada ortaya konulan elastik eğri denklemleri ve p-y eğrileri kullanılarak geliştirilmiş olan LPile bilgisayar programı analiz sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Bu karşılaştırmalar neticesinde, kabullere bağlı olarak ortaya konulan elastik eğri denklemlerinin, kohezyonsuz zeminler içerisinde yatay yüklenmiş çelik kazıkların deplasmanlarının bulunmasında kullanılabileceği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Yatay yüklenmiş kazık, yatay deplasman, elastik eğri.

DETERMINATION OF LATERAL DISPLACEMENTS OF LATERALLY LOADED STEEL PILES IN COHESIONLESS SOILS USING ELASTIC CURVE EQUATION

ABSTRACT

Laterally loaded piles find wide application areas. Some of those application areas of laterally loaded piles are bridge foundations, ports and landslides. Accurate and simple calculation of lateral displacement of laterally loaded piles becomes vital for structure safety. Measured from the ground surface, the distance to the point on the pile where the deformation in the direction of the load (applied at the top of the pile) becomes zero is called the critical depth of pile. Laterally loaded pile faces with passive resistance in front of pile, active resistance at back side of pile and frictional resistance at sides of piles along pile critical length. In this study, pile properties, applied load and resistance forces pile faces are modeled in two-dimensional to determine lateral displacement of pile under lateral load using elasticity curve equations. The measured lateral displacements of three tested laterally loaded steel pipe piles are compared with both the analysis of equations proposed in this study and the analysis results of computer program LPile based on the p-y curves. It is found that the proposed equations to determine lateral displacement of laterally loaded steel piles in cohesionless soils yield to very close result of field measured lateral displacements.

Keywords: Laterally loaded piles, lateral displacement, elastic curve.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

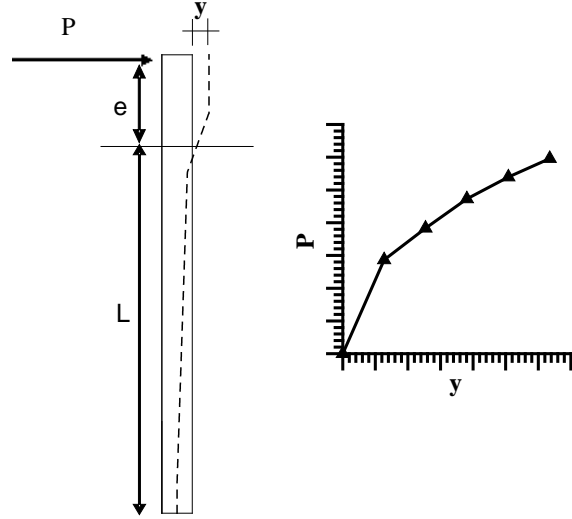
Yanal yüklü kazıklar liman yapılarında, köprü ayaklarında, şev stabilitesi problemi olan bölgelerde,

bina temellerinde ve enerji yapıları temellerinde yükleri, buldukları zeminlere aktarmak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Yatay yüklenmiş kazıklar; uygulanan yüklere karşı dayanımlarını

ytirmeden ve belirlenmiş deplasman limitleri içerisinde fonksiyonlarını yerine getirecek şekilde tasarlanmaktadır. Yatay yüklenmiş kazıklar; uygulanan yüklere (P), zemin şartlarına ve kazık türüne bağlı olarak yatay deplasmanlara (y) maruz kalmaktadırlar. Şekil 1’de kazık tepe noktasına uygulanan yatay yük altında, kazığın tepe noktasında meydana gelen yatay deplasman eğrisi gösterilmektedir. İzin verilen yatay deplasman miktarı yapı türüne bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Yatay yüklenmiş kazıkların uygulama alanlarından biri köprü ayakları olup, deformasyonlara bağlı tasarım yöntemi olan Servis Limit Durumu (SLS)’nda yatay yöndeki deplasmanlar köprü ayakları için 3.8 cm ile sınırlanmıştır [1].

Yanal yüklenmiş kazıkların analizleri, zemin-kazık etkileşiminden dolayı karmaşık bir şekil alabilmektedir. Bu karmaşıklığın nedeni olarak herhangi bir derinlikteki zemin direncinin o noktadaki kazık deformasyonuna bağlı olması, kazık deplasmanının da yine aynı noktadaki zemin direncine bağlı olması gösterilebilir. Bu nedenle yatay yüklenmiş kazıkların davranışları bazen basit ampirik eşitliklerle bazen de üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak çözülebilmektedir. Her analiz metodundaki belirsizlik oranı kazık türüne, zemin türüne ve kullanılan metoda bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir [2]. Yatak katsayısı yöntemi, “p-y” yöntemi, birim uzama metodu (SWM), elastik analiz yöntemi ve sonlu elemanlar yöntemleri kullanılarak yatay yüklenmiş kazıklar analiz edilebilmektedir. Yatay yüklenmiş kazıkların arazi deneylerinin yapılması pahalı ve zaman kaybına neden olduğundan, birçok çalışmada çeşitli bilgisayar programları kullanılarak kazıkların yatay yükler altındaki davranışları incelenmektedir. P-y metodu ile analizler yapılırken COM624P veya LPile bilgisayar programları, birim uzama kama metodunda ise SWM bilgisayar programları kullanılabilir. Özellikle yatay yüklenmiş kazıkların yapacakları yatay deplasmanlar, insanların bu yapılara bakış açısında önemli etki yaratmaktadır. Dolayısıyla yatay yüklenmiş kazıkların maruz kalacağı yatay deplasmanların doğru olarak hesaplanması son derece önemlidir. Yatay yüklenmiş bir kazığın kritik derinliği boyunca maruz kalacağı dirençler kazığın ön tarafında pasif, arka tarafında aktif ve yan yüzeylerdeki sürtünmeden meydana gelmektedir. Kazık kritik derinliği boyunca oluşan bu dirençlerin, kazığın ve kazık başına etki eden kuvvetin iki-boyutlu modellenmesi ile; kohezyonsuz zeminler içerisinde tasarımı yapılacak olan çelik malzemeden üretilmiş yatay yüklenmiş kazıkların yatay yöndeki deplasmanlarının, elastik eğri denklemi kullanılarak hesaplanabileceği bu çalışmada ortaya konulmuştur. Elastik eğri denklemleri ve p-y eğrileri kullanılarak geliştirilen LPile bilgisayar programı yardımıyla elde edilen analiz sonuçları, Univeristy of Massachusetts arşivinde bulunan ve kohezyonsuz zeminler içine inşa

edilmiş olan üç adet çelik kazığın yatay deplasman değerleri ile kıyaslanmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda, bu çalışmada geliştirilen denklemlerin, kohezyonsuz zeminler içerisindeki yatay yüklenmiş çelik kazıkların deplasmanlarının hesaplanmasında kullanılabileceği ortaya konulmuştur.



Şekil 1. Yatay yük etkisi (P) altında yatay yüklenmiş kazığın tepe noktasında meydana gelen yatay deplasman (y) (Lateral displacement at pile top under lateral lateral load)

2. YATAY YÜKLENMİŞ KAZIKLARIN TASARIMINDA KULLANILAN METOTLAR (METHODS USED FOR DESIGN OF LATERALLY LOADED PILES)

Yatay yüklenmiş kazıkların tasarımında; denge denklemleri metodu (Broms metodu), p-y eğrileri metodu, yatak katsayısı metodu ve birim uzama kama metodu (SWM) kullanılarak analizler yapılmaktadır. Son yıllarda gelişen bilgisayar yazılımları sayesinde, sonlu elemanlar yöntemi de tasarımcılar tarafından kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında, yaygın olarak kullanılan denge denklemi metodu, p-y eğrileri metodu, yatak katsayısı ve birim uzama kama metodu yöntemlerinin kazık davranışını belirlemedeki etkinliği değerlendirilmiştir.

2.1. Denge Denklemi Metodu (Equilibrium Method)

Denge denklemi metodunda, yanal yüklenmiş kazığın etrafındaki zeminin plastik gerilme-deformasyon davranışı gösterdiği kabul edilmektedir. Meydana gelen bu deplasmanın kazık etrafındaki zeminden veya kazığın kendisinden kaynaklandığı varsayılmaktadır. Bu metodda, basit denge denklemleri kullanılarak kazık boyunca zemin reaksiyonları hesaplanabilmektedir. Broms (1964a, 1964b), yanal yüklenmiş kazık davranışını kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde ayrı ayrı incelemiştir [3-4]. Broms ayrıca kazıkları kısa ve

uzun kazık diye iki gruba ayırmış ve buna bağlı olarak eşitlikler önermiştir.

2.2. P-y Eğrileri Metodu (P-y Curve Method)

Genellikle yatay yüklenmiş kazıklar lineer olmayan bir davranış sergilerler. Zeminin elasto-plastik davranışının nümerik açıklamasını en iyi şekilde zemin reaksiyonunun ve şekil değiştirmenin bir fonksiyonu olarak tanımlayan “p-y” eğrileri sağlayabilir. P-y metodu ilk kez McClelland ve Focht (1958) ve ardından diğer araştırmacılar tarafından yıllar içinde geliştirilmiştir [5]. P-y metodunda lineer olmayan zemin direnci (p) ve kazık deplasmanı (y) derinliğe bağlı olarak oluşturulmaktadır. Eğriler, zemin direnci ve yük tekrar sayısı gibi bir çok değişkene bağlı olmaktadır. Bu yüzden farklı zemin ve kazık özellikleri için “p-y” eğrilerinin tahmin edilmesi gereklidir. P-y eğrileri elde etmek için geliştirilmiş olan LPile veya COM624P programları tasarımcılar ve araştırmacılar tarafından kullanılmaktadır. Paikowsky ve Lu (2006) tarafından yapılan çalışmada, yatay yüklenmiş kazıkların analizlerinde en çok kullanılan yöntemin p-y eğrileri metodu olduğu belirtilmiştir [1].

2.3. Yanal Yatak Katsayısı Metodu (Subgrade Reaction Method)

Yatak katsayısı yönteminde, kazık elastik zemin üzerine oturmuş bir kiriş gibi kabul edilerek çözüm gerçekleştirilebilmektedir. Bu yöntemde zemin yaylarla modellenerek yatak katsayıları kullanılmaktadır. Yayların rijitliğinin zemin yanal yatak katsayısına (k_h) eşit olduğu kabul edilmektedir:

$$k_h = \frac{P}{y} \quad (1)$$

Kohezyonlu zeminlerde (normal konsolide olmuş killerde), zeminin yatak katsayısı derinlikle birlikte artmaktadır. Aşırı konsolide killerde ise yatak katsayısının derinlikle sabit kaldığı varsayılmaktadır. Bu varsayım, elastik davranış gösteren kiriş çözümünde büyük önem arz etmektedir. Yatak katsayısı yönteminde kazık ötelenmesi “y” ise kazık davranışı eşitlik (2) ile ifade edilebilmektedir. Terzaghi (1955) tarafından yatak katsayısı sabitinin kumlu zeminler için alacağı değerler hesaplanmış ve Tablo 1’de sunulmuştur [6].

$$\frac{d^4 y}{dz^4} + \frac{k_h(z) \times y}{EI} = 0 \quad (2)$$

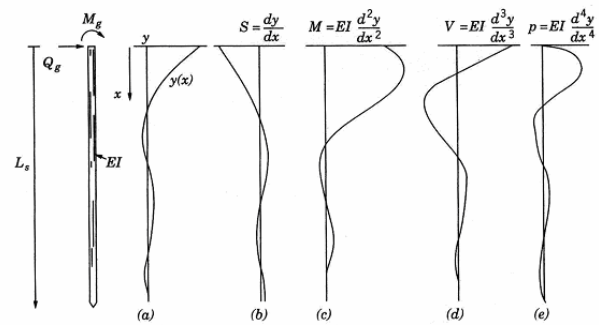
Burada; E: Kazığın elastik modülü; I: Kazığın atalet momenti; y: x derinliğindeki yanal deplasmanı; k_h : Yatak katsayısı değerleridir.

Kazık boyundaki herhangi bir noktadaki deplasman değeri; zeminin özelliklerine, kazığın özelliklerine ve uygulanan yüke bağlı olarak değişim

gösterebilmektedir. Eşitlik (2)’nin çözümü Matlock ve Reese (1960) [7], Prakash ve Sharma (1990) [8], ve Poulos ve Davis (1990) [9] tarafından detaylı olarak verilmiştir. Eşitlik (2)’nin çözümü ile kazık boyunca yatay deplasmanlar (y), dönme miktarı ($S=dy/dz$), moment değeri ($M=EI d^2y/dz^2$), kesme kuvveti ($V=EI d^3y/dz^3$) ve zemin reaksiyonu ($p=EI d^4y/dz^4$) bulunabilmektedir (Şekil 2).

Tablo 1. Kumlar için yatak katsayısı, k_h (kN/m³) değerleri [6] (Subgrade reaction for cohesionless soil)

Kum	Gevşek	Orta	Sıkı
Kuru	1800-2200	5500-7000	15000-18000
Suya Doygun	1000-1400	3500-4500	9000-12000



Şekil 2. Yatay yüklenmiş kazık boyunca; (a) yatay deplasmanlar, (b) dönme miktarı, (c) moment değeri, (d) kesme kuvveti ve (e) zemin reaksiyonu (Reese and Wang, 1993 [10]) [(a) lateral displacements, (b) slope of elastic curve (c) moment (d) shear force and (e) Soil reaction)]

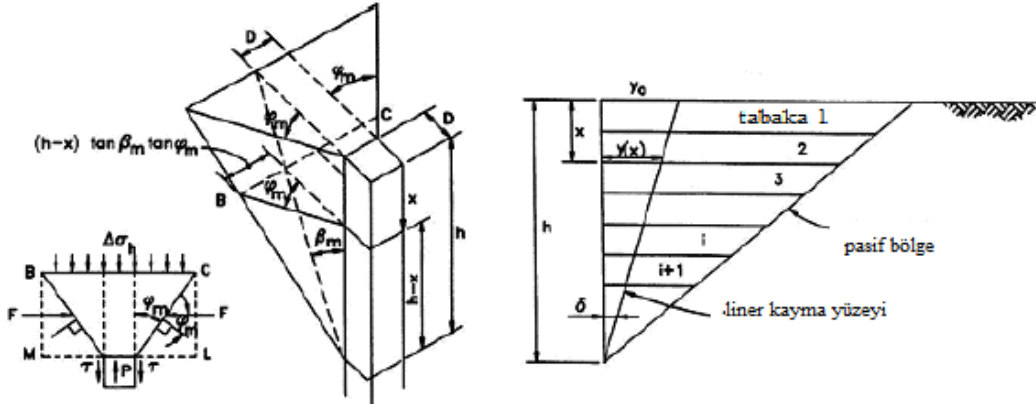
2.4. Birim Uzama Kama Metodu (SWM) (Strain Wedge Method)

Birim uzama kama metodunda kazık, elastik zemin üzerine oturan kiriş olarak üç-boyutlu zemin-kazık etkileşimi kullanılarak modellenmiştir. SWM’de kazık ön tarafında pasif bir zemin bölgesinin oluştuğu kabul edilmektedir [11-12]. Bu metoddaki üç-boyutlu zemin-kazık etkileşimi Şekil 3’te gösterilmiştir. Bu metodun kullanımı için geliştirilen SWM bilgisayar programı bulunmaktadır.

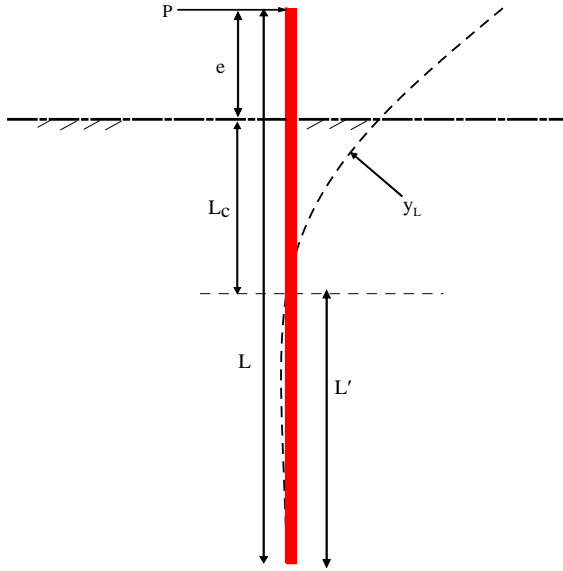
3. KAZIK KRİTİK DERİNLİĞİNİN

BULUNMASI (L_c) (DETERMINATION CRITICAL DEPTH OF PILE)

Yatay yüklenmiş bir kazığın kazık boyunca maruz kalacağı deplasman eğrisi (y_L) Şekil 4’te verilmiştir. Kazık yanal deplasmanı kazık tepe noktasına uygulanan kuvvetle aynı yönde olup kazık boyunca derinlere inildikçe; zemin direncine, kazık çapına, kazık tepe noktasına etki eden kuvvete bağlı olarak yön değiştirebilmektedir. Bu çalışmada, kazık tepe noktasından kazık yükü ile aynı doğrultuda olan yatay deplasmanların (y) ilk yön değiştirmesine kadar olan yeryüzünden itibaren ölçülen kazık boyu, kazık kritik derinliği (L_c) olarak tanımlanmaktadır (Şekil 4).



Şekil 3. SWM’de kazık-zemin etkileşiminin modellenmesinde kullanılan geometri ve parametreler (Geometry and parameters used to show soil-pile interaction in SWM) [11]



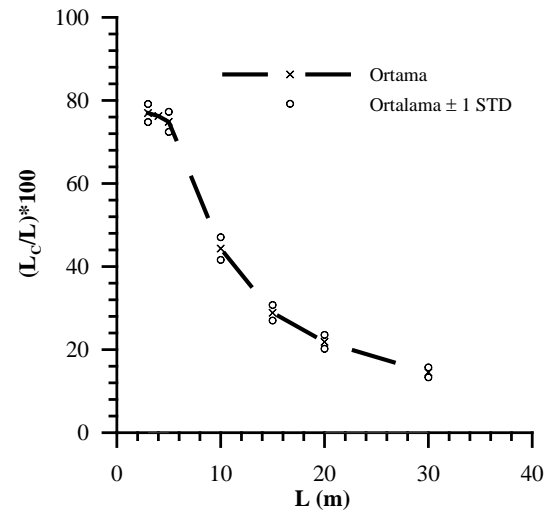
Şekil 4. Yanal yük altındaki kazığın maruz kalacağı deplasmanlar ve kazık kritik derinliğinin belirlenmesi (Lateral displacements of laterally loaded pile and definition of pile critical depth)

Bu çalışmada, LPile programı kullanılarak kohezyonsuz zeminlerde yanall yüklenmiş yaklaşık 160 kazık modellenerek, L_c derinliğinin kazık boyunca değişimi incelenmiştir. Analizlerde; kazığın elastisite modülü (E), kazığın atalet momenti (I), zeminin içsel sürtünme açısı (ϕ), kazık boyu (L), kazığın çapı (d) ve kazığa uygulanan yük (P) değerlerinin L_c üzerindeki etkileri ayrı ayrı göz önünde bulundurulmuştur. Kullanılan bu değişkenler Tablo 2’de özetlenmektedir. Yapılan bu model analizlerin ve arazi test sonuçlarının incelenmesi ile kritik derinliğin kazık boyuna, kazık çapına ve kazık elastisite modülüne göre büyük değişiklik gösterdiği tespit edilmiştir. Kazık uygulamalarında kullanılan çelikten imal edilmiş kazıkların elastisite değerleri birbirine yakın olduğundan, kazık elastisite modülü değerindeki varyasyon doğal olarak küçüktür. Bu

nedenle kazığın kritik derinliğini belirleyen ana parametrelerin; kazık boyu, kazık çapı ve uygulanan kazık yükü olduğu görülmüştür. 160 kazığın analiz sonuçlarının ve arazide yapılmış kazık yükleme test sonuçlarının değerlendirilmesi neticesinde; L_c/L oranı ve ± 1 standart sapma değeri Şekil 5’te sunulmuştur. Yukarıda belirtilen parametrelere (kazık çapı, kazığa uygulanan yük ve kazık elastisite modülü) bağlı olarak bu oran yaklaşık $\pm 1.5-3$ civarında bir değişiklik göstermektedir. Kazık boyu uzadıkça L_c azalmaktadır.

Tablo 2. Kazık kritik derinliğinin bulunmasında kullanılan parametreler ve değer aralıkları (The pile and soil parameters used in analysis to determine pile critical depth)

d (mm)	L (m)	P (t)	E (t/m^2)	ϕ
20-36	3-30	1-23	21×10^5 - 21×10^6	20-35



Şekil 5. Kazık kritik derinliğinin (L_c) kazık boyu (L) oranına bağlı değişimi (The ratio of pile critical length (L_c) of pile length (L)).

4. ELASTİK EĞRİ DENKLEMİ İLE YATAY DEPLASMANLARIN BULUNMASI (DETERMINATION OF LATERAL DISPLACEMENTS USING ELASTIC CURVE EQUATIONS)

Kohezyonsuz zeminde yatay yüklenmiş çelikten imal edilmiş kazık, uygulanan kuvvet etkisi ile yatay deplasmanlara maruz kalacaktır. Kazığın L_c boyunca maruz kaldığı yatay deplasmanlar, kazığın L' boyunca maruz kaldığı yatay deplasmanlardan genellikle büyük olmaktadır (Şekil 4). Dolayısıyla tasarımlarda, kazığın L_c derinliğince karşılaşılabileceği yatay deplasmanların doğru hesaplanması büyük önem arz etmektedir. Kazık kritik derinliği boyunca kazığın tepe noktasına uygulanan kuvvete karşı oluşan dirençler; kazık ön tarafında oluşan pasif direnç (P_p), kazık arka yüzeyinde oluşan aktif direnç (P_a) ve kazık yan yüzeyleri boyunca oluşan sürtünme dirençleri (f)'dir (Şekil 6). Yatay yüklenmiş kazığın maruz kalacağı yatay deplasmanlar; kazık kritik derinliği boyunca kazığa uygulanan kuvvete karşı koyan zemin dirençleri, kazık özellikleri ve kazığa tatbik edilen yük, elastisite eğrisi denklemi kullanılarak iki boyutlu modellenerek hesaplanmıştır. Kazık modellenirken, iki bölgeye ayrılıp elastik eğri denklemi yardımıyla yatay deplasmanları verecek denklemler ortaya konulmuştur. Birinci bölge yer yüzeyinden kritik derinliğe kadar olan bölgeden, ikinci bölge ise kazık tepe noktasından uygulanan P yükünden yer yüzeyine kadar olan bölgeden oluşmaktadır. Her bölge için moment denge denklemi (eşitlik 3) yazılmış olup birinci integral (eşitlik 4) istenilen yerdeki dönmeyi (θ), ikinci integral (eşitlik 5) ise yatay deplasmanı (y) vermektedir:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{Mx}{EI} \quad (\text{Moment denklemi}) \quad (3)$$

$$\frac{dy}{dx} = \theta y \quad (\text{Burkulma denklemi}) \quad (4)$$

$$y(x) = y_L \quad (\text{Deplasman denklemi}) \quad (5)$$

1. bölgede moment denklemi (eşitlik 3) yazılarak integrali alındığında bu bölgeye ait elastik eğri denklemi eşitlik (7) yardımı ile bulunabilmektedir. Mesnet koşulları göz önüne alınarak c_1 ve c_2 katsayıları hesaplanmaktadır:

$$EI \frac{d^2y_1}{dx_1^2} = -P(e + x_1) + \frac{x_1^3 a}{2L_c} \quad (0 \leq x_1 \leq L_c) \quad (6)$$

$$EI \cdot y_{L1} = -\frac{Pe x_1}{2} - \frac{P x_1^3}{6} + \frac{a x_1^5}{120 L_c} + c_1 x_1 + c_2 \quad (7)$$

$$\frac{d^2y_1}{dx_1^2} = 0 \quad \text{ve} \quad \frac{dy_1}{dx_1} = 0 \quad x_1 = L_c \text{ iken} \quad (8)$$

$$c_1 = PeI + \frac{PL_c^2}{2} - \frac{aL_c^3}{24} \quad (9)$$

$$c_2 = \frac{-PeL_c^2}{2} - \frac{PL_c^3}{3} + \frac{aL_c^4}{30} \quad (10)$$

Aynı şekilde 2. bölgede de moment denklemi yazılıp integral edilerek bu bölgeye ait elastik eğri denklemi eşitlik (12) yardımı ile bulunabilmektedir. Mesnet koşulları göz önüne alınarak c_3 ve c_4 katsayıları hesaplanmaktadır:

$$EI \frac{d^2y_2}{dx_2^2} = -Px_2 \quad (0 \leq x_2 \leq e) \quad (11)$$

$$EI \cdot y_{L2} = \frac{-Px_2^3}{6} + c_3 x_2 + c_4 \quad (12)$$

$$\frac{dy_2}{dx_2} = \frac{dy_1}{dx_1} \quad \text{ve} \quad y_{L2} = y_{L1} \quad x_2 = e, x_1 = 0 \text{ iken} \quad (13)$$

$$c_3 = \frac{Pe^2}{2} + PeL_c + \frac{PL_c^2}{2} - \frac{aL_c^3}{24} \quad (14)$$

$$c_4 = -PeL_c^2 - \frac{PL_c^3}{3} + \frac{aL_c^4}{30} - \frac{Pe^3}{3} - Pe^2L_c + \frac{aeL_c^3}{24} \quad (15)$$

$$f = \sigma'_y \tan(2/3)\phi' \quad (16)$$

$$\sigma'_y = \gamma'z \quad (17)$$

$$K_p = \tan^2\left(45 + \frac{\phi'}{2}\right) = \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \quad (18)$$

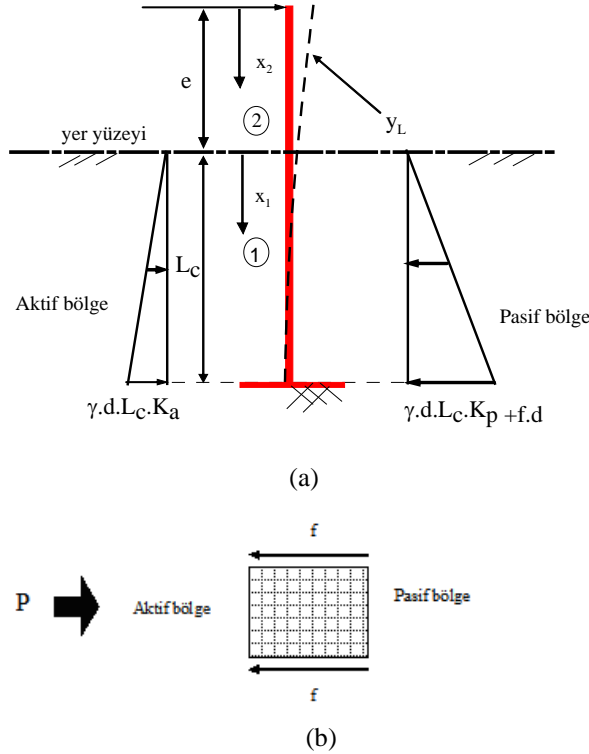
$$K_a = \tan^2\left(45 - \frac{\phi'}{2}\right) = \frac{1 - \sin \phi'}{1 + \sin \phi'} \quad (19)$$

$$a = (\gamma \cdot d \cdot L_c \cdot K_p - \gamma \cdot d \cdot L_c \cdot K_a) = \gamma \cdot d \cdot L_c \cdot (K_p - K_a) \quad (20)$$

Burada; E : Kazığın elastisite modülü; I : Kazığın atalet momenti; y_{L1} : Birinci bölgenin yatay deplasmanı; y_{L2} : İkinci bölgenin yatay deplasmanı; f : Kazık yan yüzeyi ile zemin arasındaki sürtünme değeri; σ'_y : Düşey yöndeki efektif gerilme; K_p : Zemin pasif gerilme katsayısı ve K_a : Zemin aktif gerilme katsayısıdır.

Eşitlik (7) ve eşitlik (12)'nin çözümünden, kazık kritik derinliği boyunca oluşan yatay deplasmanlar

hesaplanabilmektedir. Bu çalışmada görülmüştür ki bulunan bu yatay deplasmanların 1.7~2.3 aralığında bir değer ile bölünmesiyle, arazide gerçekleşecek yatay deplasmanlar doğru bir şekilde tahmin edilmektedir



Şekil 6. (a) Yatay yüklenmiş kazığın, kritik kazık uzunluğu boyunca maruz kalacağı aktif ve pasif dirençler, (b) Kazığın yan yüzeylerine etki eden sürtünme dirençleri [(a) Laterally loaded pile faced with active and passive resistance along critical depth (b) Friction forces at pile surfaces]

5. ANALİZ SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI (COMPARISON OF ANALYSIS RESULTS)

Geoteknik mühendisliğinde, teorik olarak geliştirilen bağıntıların başarı derecesi ancak arazide yapılan test sonuçları ile karşılaştırılınca ortaya çıkmaktadır. Bu amaçla, Gürbüz (2007) tarafından detayları verilen University of Massachusetts arşivinde bulunan kohezyonsuz zeminler içerisinde test edilmiş olan üç adet çelik boru kazık verileri ile arazi ölçümleri

kullanılarak ortaya konan elastik eğri denklemlerin başarı dereceleri araştırılmıştır.

Bu analizler yapılmadan önce, kazıkların test edildiği zeminlerin mühendislik özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Kazık testlerinin yapıldığı alanın zemin profilini belirlemek amacıyla açılan sondajlar sırasında, Standart Penetrasyon Testleri (SPT) yapılarak ve darbe sayıları (N) bulunmuştur. Bulunan N değerleri delgi çapına, delgi derinliğine, numune alıcıya iletilen enerji seviyesine ve efektif gerilme değerlerine bağlı olarak düzeltme katsayıları uygulanarak, enerji oranı % 60'e göre düzeltilmiş SPT sayıları $(N_1)_{60}$ bu çalışmada bulunmuştur. Analizlerde kullanılacak zeminin içsel sürtünme açısı (ϕ) zeminlerin özelliğini belirleyen en önemli parametre olduğundan, bütün analizlerde aynı şekilde hesaplanmış ϕ değerinin kullanılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, Peck ve arkadaşları (1974) tarafından SPT-N değeri kullanılarak ve eşitlik (21) yardımıyla ϕ değeri hesaplanmış ve analizlerde kullanılmıştır [13].

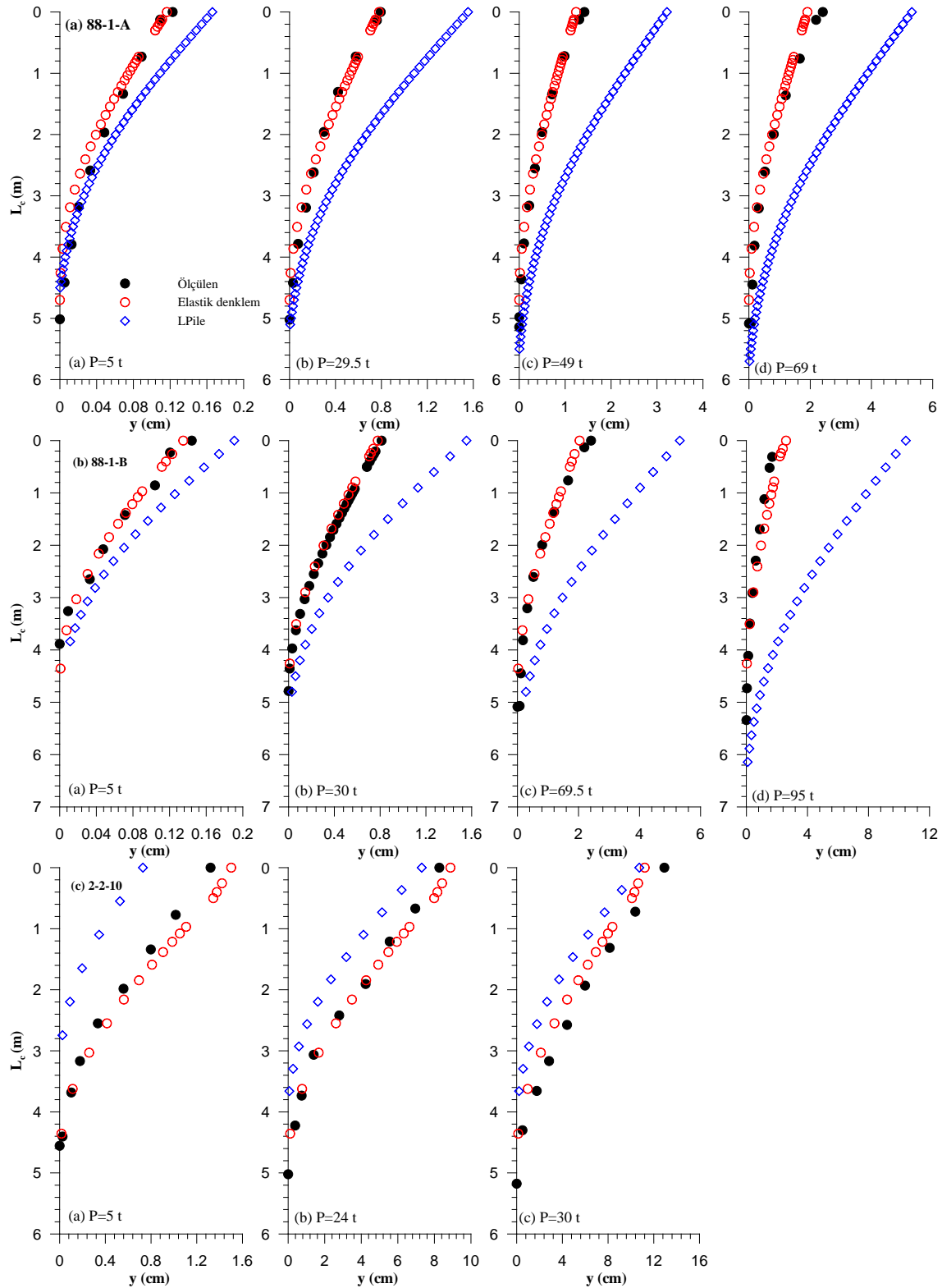
$$\phi = 27,1 + 0,3(N_1)_{60} - 0,00054[(N_1)_{60}]^2 \quad (21)$$

Analizlerde kullanılan kazıklara ve kazıkların içinde bulunduğu kohezyonsuz zeminlere ait özellikler Tablo 3'te özetlenmiştir. Tablo 3'teki veriler kullanılarak ilk etapta bu çalışmada ortaya konulan eşitlik (7) ve eşitlik (12)'deki değerler, daha sonra p-y eğrilerine bağlı geliştirilen LPile bilgisayar programı kullanılarak kazıkların analizleri yapılmıştır. Bu analiz sonuçları üç kazık için Şekil 7'de karşılaştırılmıştır. Şekil 7 incelendiğinde, bu çalışmada ortaya konulan bağıntıların, arazide kazık kritik derinliğince (L_c) ölçülmüş yatay deplasman değerlerine çok yakın olduğu görülmektedir. Arazi ölçüm değerleri; bu çalışma verileri ve p-y eğrilerine dayalı geliştirilen LPile bilgisayar programı analiz sonuçları ile karşılaştırılmış ve kazık çapı büyüdükçe p-y eğrileri analiz sonuçlarının ölçülmüş verilerden farklı olduğu görülmüştür.

Bu çalışmanın temel amacı LPile programı ile yapılan analizlerin doğruluğunu test etmek olmasada, LPile programı kullanılarak yapılan analiz sonuçları gösterdi ki LPile programından kazık boyu uzadıkça arazide ölçülen yatay deplasmanlara benzer deplasmanlar tahmin edilmektedir.

Tablo 3. Analizlerde kullanılan kazıkların ve bu kazıkların test edildikleri kohezyonsuz zeminlerin özellikleri (Pile properties and soil properties used in the analysis)

Kazık ismi	Kazık Boyutu (cm)	L (m)	e (m)	E (t/m^2)	I (m^4)	ϕ (derece)	γ (t/m^3)
88-1-A	60,96x1,27	10	0,5	5309345	0,00911963	33	1,8
88-1-B	60,96x1,27	8,5	1,5	5309345	0,00911963	33	1,8
2-2-10	32,38x0,95	18,3	0,3	6331878	0,00062143	34	1,8



Şekil 7. Kazıkların ölçülmüş yatay deplasmanlarının, bu çalışmadaki analiz sonuçları ve LPile bilgisayar programındaki analiz sonuçları ile karşılaştırılması (Lateral displacements of piles compared with both analysis results of this study and LPile).

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Kazığın kritik derinliğinin büyük oranda kazık çapına ve boyuna bağlı olarak bir değişim gösterdiği saptanmıştır. Bu çalışmada ortaya konulan elastik eğri denklemlerinin analiz sonuçları ile arazide test

edilmiş yatay yüklenmiş çelik kazıkların yatay deplasmanlarının verileri karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak bu çalışmada ortaya konulan denklemlerin, çelik malzemeden oluşturulmuş kazıkların kritik derinlik boyunca yatay deplasmanlarının doğru olarak

hesaplanmasında güvenle kullanılabilceği tespit edilmiştir.

SEMBOLLER (SYMBOLS)

c:	Sınır koşulları katsayıları
E:	Kazık elastisite modülü, (t/m ²)
P:	Kazık tepe noktasına uygulan yatay yük, (t)
y:	Kazığın tepe noktasının yapmış olduğu yatay deplasman, (cm)
y _L :	Kazık boyunca yatay deplasmanlar, (cm)
e:	Yer yüzeyi ile kazık tepe noktasına uygulanan kuvvet arasındaki mesafe, (m)
k _n :	Yatak katsayısı, (t/m ³)
I:	Kazık atalet momenti, (m ⁴)
L:	Kazık toplam boyu, (m)
L _c :	Kazık kritik derinliği, (m)
θ _y :	Kazığın boyunun herhangi bir noktasındaki dönme miktarı
M:	Moment, (t.m)
a:	Pasif direnç ile aktif direnç arasındaki fark, (t/m)
x ₂ :	Kazık tepe noktasından yer yüzeyine olan mesafe, (m)
x ₁ :	Yer yüzeyinden kazık L _c derinliği mesafesine olan uzaklık, (m)
f:	Kazık yan yüzeyleri ile zemin arasındaki sürtünme, (t/m ²)
K _p :	Pasif zemin basınç katsayısı
K _a :	Aktif zemin katsayısı
σ _v :	Düşey efektif gerilme, (t/m ²)

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Paikowsky, S.G., ve Lu, Y., "Establishing Serviceability Limit State in the Design of Bridge Foundations", **Foundation Analysis and Design Innovative Methods**, Shanghai, China, ASCE, GSP no. 153, pp.49-58, 2006.
- Gürbüz, A. , **The Uncertainty in Displacement Evaluation of Deep Foundations**, PhD Dissertation, University of Massachusetts at Lowell, Lowell, Massachusetts, USA, 2007.
- Broms, B., "Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils." **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, ASCE, Vol. SM3, pp. 123-156,1964a.
- Broms, B., "Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils." **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, ASCE, Vol. SM2, pp. 27-63,1964b.
- McClelland, B., and Focht Jr., J.A., "Soil Modulus for Laterally Loaded Piles", **Trans.**, ASCE, 123, pp. 1049-1063,1958.
- Terzaghi, K., "Evaluation of Coefficient of Subgrade Reaction", **Geotechnique**, Institution of Civil Engineering, Vol. V, London, pp. 297-326,1955
- Matlock, H., and Reese, L.C., "Generalized Solutions for Laterally Loaded Piles", **Journal of Soil Mechanics and Foundation Division**, ASCE, 86(5), pp. 63-91,1960.
- Prakash, S., and Sharma, H.D., **Pile Foundations in Engineering Practice**, John Wiley and Sons, Inc., New York, USA, 1990.
- Poulos, H.G., and Davis, E.H., **Pile Foundation Analysis and Design**, 2nd Edition, Robert E. Krieger Publish Company, Malabar, Florida, 1990.
- Reese, L.C. and Wang, S.T., "Laterally Loaded Pile Program for the Microcomputer, Version 2, User's Guide, Theoretical Background and System Maintenance", Report No. **FHWA-SA-91-048**,USA, 1993.
- Norris, G.M., "Theoretically Based BEF Laterally Loaded Pile Analysis", **Proc., 3rd Int. Conf. on Numerical Methods in Offshore Piling**, TECHNIP Ed., Paris, pp. 361-386,1986.
- Ashour, M., Norris, G. and Piling, P., "Strain Wedge Model Capability of Analyzing Behavior of Laterally Loaded Isolated Piles, Drilled Shafts, and Pile Group", **Journal of Bridge Engineering**, ASCE, Vol. 7, No. 4, pp. 245-254,2002.
- Peck, R.P., Hanson, W.E., and Thornburn, T.H., (1974), **Foundation Engineering**, 2nd Edition, John Wiley and Sons, Inc., New York, USA, 1974.