



# Tamamlayıcı fonksiyonlar yöntemi ile yanal yüklü kazıkların statik analizi

## Static analysis of laterally loaded piles by complementary functions method

Ahmad Reshad Noori<sup>1</sup> , Zahraa Razzaq Kareem Alhachami<sup>2</sup> , Bilge Sultan Demirtaş<sup>3\*</sup> ,  
Suleiman Ali Suleiman Mohamed Khatrush<sup>4</sup> 

<sup>1,2,3,4</sup> İstanbul Gelişim Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34310, İstanbul Türkiye

### Öz

Bu çalışmada, yanal yüklü kazıkların statik analizi için Tamamlayıcı Fonksiyonlar Yöntemi (TFY) uygulanmıştır. Olayı idare eden kanonik denklemler, ince çubuk teorisine göre elde edilerek TFY ile başlangıç değer problemine indirgenmiştir. Kazığın malzemesi izotropik homojen ve kesit geometrik özellikleri ise üniform olarak kabul edilmiştir. Zemin davranışını temsil eden yay modeli lineer ve nonlinear olarak ele alınmıştır. Ele alınan kazık problemler serbest uçlu ve sabit uçlu olarak çözülerek sınır koşullarının deplasmanlar ve iç kuvvetler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yanal yatak katsayısı değerlerinin ve yatak katsayısı sabitinin kumlu zeminler için alacağı değerlerinin yanal yüklü kazıkların eğilme davranışı üzerindeki etkisi parametrik olarak sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar daha önce yapılan araştırmaların sonuçları ile karşılaştırılmıştır ve uyum içinde olduğu görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Tamamlayıcı fonksiyonlar yöntemi, Yanal yüklü kazık, Statik analiz, P-y eğrileri, Kanonik denklemler

### 1 Giriş

Yanal yüklü kazıklar, mühendislik uygulamalarında geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu yapı elemanlarının yük kapasitesi ve statik davranışı çeşitli teknikler yardımıyla hesaplanabilir. Yanal yüklü kazık problemlerinin etkin bir şekilde çözülebilmesi için zeminin mekanik özelliklerine, kazık boyutuna, sınır koşullarına ve uygulanan yükün özelliklerine ihtiyaç vardır. Bu önemli yapı elemanlarının davranışı birçok araştırmacı tarafından hem teorik hem de deneysel olarak araştırılmıştır. Bu çalışmalardan bazıları şöyle özetlenebilir;

Huang vd. [1] inşaat öncesi ve inşaat sonrası CPT ve DMT deneyleri yaparak yanal yüklü kazık gruplarının yapımından sonra zemin özelliklerini nasıl değiştiğini araştırmıştır. Tak Kim vd. [2], Güney Kore'de bulunan Nak-Dong nehrinde kuma gömülü kazıkların yanal yükler altında model testinin sonuçlarını açıklamıştır. Çalışmalarında, yanal yüklü kazıkları için yük deformasyon eğrilerini elde edilmiştir. Wesselink vd. [3] ile Tang ve Yang [4] yanal yüklü kazıkların davranışını deneysel olarak ele almıştır. Fan ve Long [5] kumlu zeminlerde yanal yüklü kazıkların nonlinear analizine üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi uygulamıştır. Achmus [6] eksenel ve yanal yüklemeye altındaki kazıklar için hesap yaklaşımları ile olası tasarım prosedürlerini özetlemiştir ve periyodik yük etkilerini

### Abstract

In this study, the Complementary Functions Method (CFM) is applied for the static analysis of laterally loaded piles. The canonical equations governing the phenomenon are obtained according to the classic beam theory and simplified to an initial value problem by CFM. The material of the pile is assumed to be isotropic homogeneous and the geometrical properties in the cross-section are considered as uniform. The spring model representing the soil behavior is taken as linear and nonlinear. The effect of boundary conditions on displacements and internal forces are investigated by solving pile problems as free- and fixed-head. The effect of the values of the lateral bearing coefficient and the bearing constant for sandy soils on the flexural behavior of laterally loaded piles is presented parametrically. The obtained results are compared with the results of previous studies and found to be in agreement.

**Keywords:** Complementary functions method, Laterally loaded pile, Static analysis, P-y curves, Canonical equations

dikkate alınmıştır. Kim ve Jeong [7] p-y özelliğini doğrulamak için çeşitli parametrik araştırmalar sunmuştur. Basu vd. [8] uç kısmında yatay bir kuvvete ve bir momente maruz kalan ve çok katmanlı elastik bir ortama yerleştirilen dairesel kazığın davranışını ileri bir yaklaşım ile incelemiştir.

Ekici [9] pasif kazık davranışını etkileyen bazı faktörleri, PLAXIS 3D yazılımı kullanarak üç boyutlu sonlu elemanlar analizi ile araştırmıştır. Heidari vd. [10] ile Khari vd. [11] yanal yüklü kazıkların analizi için genelleştirilmiş periyodik p-y eğrisi modellenmesini ele almıştır. Fatahi vd. [12] yanal zemin yatak katsayısının yanal yüklü kazıkların davranışı üzerindeki etkisini araştırmak için parametrik çalışmalar yapmıştır. Rishitha [13] kumlu ve killi zeminlerde yapılan yanal yüklü kazıklar için ayrı ayrı parametrik çalışmalar yapmıştır. Thieken vd. [14] 250 kazık-zemin sistemiyle yapılan kapsamlı bir parametrik çalışma sonucunda, yeni p-y yaklaşımının, yatay yük taşıma davranışının ve kazık-zemin etkileşimini oldukça gerçekçi bir şekilde tahmin edebildiğini ortaya koymuştur. Lin vd. [15] ile Mayoral vd. [16], rijit yanal yüklü kazıkların zemin-yapı etkileşimini araştırmak için deneysel çalışmalar yapmıştır. Haiderali ve Madabhushi [17] killi zeminde yapılan yanal yüklü kazıklar için p-y eğrilerinin türetilme teknikleri ile ilgili çalışmalar yapmıştır.

Gupta ve Basu [18], Turello vd. [19] ile Stacul ve Squeglia [20] yanal yüklü kazık problemlerin çözümü için sayısal yöntemler önermiştir. çok katmanlı zeminlerde yanal yüklü kazıkların davranışını sonlu elemanlar yöntemi ile araştırmıştır. Turello vd. [19] yanal yüklü grup kazık sistemlerin analizi için etkin yöntemler önermiştir. Stacul ve Squeglia [20] yanal yüklü kazık problemlerin çözümü için sınır elemanı yöntemini kullanmıştır. Nie vd. [21] Matlock p-y eğrisi yöntemini, açık deniz kazık temellerine uygulamıştır. Rathod vd. [22] yumuşak kildeki statik yanal yüke bağlı eğimlerin p-y eğrileri üzerindeki etkisini incelemiştir. Li vd. [23] çeşitli zemin koşullarında yanal yüklü kazıkların davranışını elde etmiştir ve p-y eğrileri ile karşılaştırmıştır. Baek vd. [24] çeşitli kumlu zemin koşullarında önceden monte edilmiş alüminyum esnek bir kazık üzerinde bir dizi model kazık testi yapılmıştır. Peng vd. [25] eğimli zeminde yanal yüklü kazıkları incelemiştir.

Kardogan vd. [26] 1964 Niigata depremi sırasında hasar gören "Niigata Aile Adliyesi"nin temelindeki iki kazığın sıvılaştırılmış zemindeki eylemsizlik yükleri altındaki davranışlarını araştırmıştır. Yuan vd. [27] yanal yüklü bir kazığın etrafındaki iç zemin davranışının daha iyi anlaşılabilmesine yardımcı olan, tam üç boyutlu yer değiştirme sisteminin zemin-yapı etkileşimini izlemek için uygun olduğunu göstermiştir. Li vd. [28] toplam-yer değiştirme-yüklemeye ile türetilen teorik p-y eğrisinde bu faktörleri dikkate alacak bir çerçeve genişletmiştir. Zhang vd. [29] element seviyesinde laboratuvar ölçek temel zemin davranışına dayanarak, kilde periyodik yüklemeye altında yanal kazık tepkisini analiz etmiştir. Chortis vd. [30] model kazık duvarı boyunca gömülü şekil değiştirme ölçerlerden p-y eğrilerini türetmiştir. Xu vd. [31] tam ölçekli bir saha deneyi yapmıştır ve çeşitli yanal yüklemeye koşullarında kazık davranışını belirlemiştir.

Zdravković vd. [32] PISA çalışmasının bir parçası olarak Cowden'de yapılan orta ölçekli kazık testleri için üç boyutlu bir sonlu elemanlar modeli geliştirmiştir. geliştirilmesini göstermiştir. Liu vd. [33] Matlock ve hiperbolik p-y modellerini kullanan bir p-y eğrisi analiz yöntemi önermiştir. Yuan vd. [34] gerçek zeminin şeffaf olmamasının neden olduğu ölçüm engellerinin üstesinden gelen şeffaf zemin teknolojisini kullanarak yanal yüklü kazık etrafındaki zeminin yer değiştirme alanını görselleştirmiştir. Bhuiyan vd. [35] yanal yüklü büyük çaplı delikli kazıklarda önemli hale gelen düşey yanal kesme kaynaklı momenti ve uç dirençlerini içeren birleşik bir p-y analizini sunmuştur. Çelik [36] kazıkların farklı derinliklerindeki eğrileri, Reese kumu ve sıvılaştırılmış kuma göre çizilen eğrilerle temsil etmiştir. Lalicata vd. [37] şu anda kazıkları tasarlamak için kullanılan yöntemlerin (yani, p-y eğrileri) doymamış zemin reaksiyonunu tanımlamaya çalışırken yetersiz kaldığını göstermiştir ve bu boşluğu doldurmak için ek deneysel ve sayısal araştırmalara ihtiyaç olduğunu belirtmiştir. Bhuiyan vd. [38] Florida Kireçtaşı ve Vuggy Kireçtaşı gibi kaya malzemeleri için mevcut p-y modellerinden bazılarını değerlendirmiştir.

Arvan ve Arockiasamy [39] yanal yüklü kazıkların davranışını doğru bir şekilde tahmin edebilmek için çeşitli parametrik çalışmalar yapmıştır. Pang vd. [40] drenajsız killi

zeminlerde eğiminin yanal yüklü kazıkların p-y eğrilerinin başlangıç rijitliği üzerindeki etkisini araştırmıştır. Shi vd. [41] periyodik yüklerin yanal yüklü kazıkların davranışına etkisini incelemiştir.

Diferansiyel denklemlerin sayısal çözümleri için literatürde mevcut olan en etkin yöntemler başlangıç değer problemlerine uygulanabilmektedir. Yanal yüklü kazık probleminin statik davranışını idare eden diferansiyel denklem ise iki noktalı sınır değer problemidir. Tamamlayıcı Fonksiyonlar Yöntemi (TFY) ile iki noktalı sınır değer problemlerini başlangıç değer problemlerine indirgeyerek, bu metodların uygulanabilirliğine olanak sağlamaktadır.

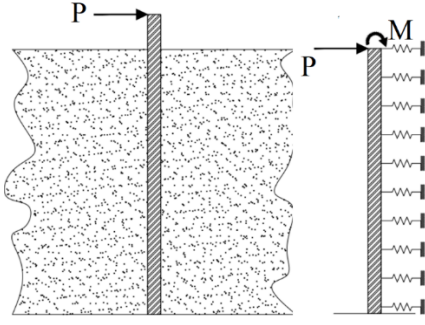
Yazarların bilgisine göre yanal yüklü kazıkların TFY ile analiz eden herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Çeşitli mühendislik problemlerinin etkin çözümünde kullanılan TFY [42-46], yanal yüklü kazıkların statik analizinde ilk defa bu çalışmada uygulanmıştır. Bu yöntem ile çözüm yapılırken sadece bilinmeyen fonksiyonun kendisi değil, aynı zamanda türevleri de hesaplanabilir [42-46]. Bu özellik ile yanal yüklü kazık problemlerinin çözümü sırasında yer değiştirmeler ve iç kuvvetler aynı anda hesaplanabilmektedir. Çözüm bölgesinin az sayıda aralığa bölünmesi yeterlidir ve kesin çözümlere oldukça yakın sonuçlar elde edilebilmektedir [42-46]. TFY'nin uygulanabilmesi için kanonik denklemler ince kiriş teorisine dayalı elde edilmiştir. Sınır şartları olarak serbest uçlu ve sabit uçlu kazıklar ele alınmıştır. Zemin parametrelerinin, farklı yüklemeye durumlarının, kazık boylarının ve zemin yanal yay sabitlerinin iç kuvvetler ve yer değiştirmeler üzerindeki etkileri parametrik olarak araştırılmıştır.

## 2 Materyal ve metod

Birçok araştırmacı tarafından yanal yüklere maruz kalan düşey kazıklar üzerinde kapsamlı teorik ve deneysel araştırmalar yapılmıştır. Yanal yüklü düşey kazıklar için geliştirilmiş çözümler Matlock ve Reese [47] tarafından verilmektedir. Yanal yüklere ek olarak düşey yüklerin etkisi Davisson [48] tarafından boyutsuz parametreler açısından değerlendirilmiştir. Broms [49,50] ve Poulos ve Davis [51] yanal yüklü kazık problemlerini çözmek için farklı yaklaşımlar sunmuşlardır. Yanal yüklü bir kazık için diferansiyel denklemi çözmenin sonlu farklar yöntemi, bilgisayar olanaklarının mevcut olduğu yerlerde çok fazla kullanılmaktadır. Reese vd. [52] ve Matlock [53] yanal yüklü kazık problemlerini çözmek için (p-y) eğrileri kavramını geliştirmiştir.

Şekil 1'de görüldüğü gibi zemine gömülü yanal yüklü kazıklar elastik zemine oturan kirişlere benzer. Yanal yüklü kazıklara dış yükler ve momentler yalnızca zemin yüzeyinde veya üstünde uygulanabilir.

Ele alınan yanal yüklü kazıkların davranışını idare eden kanonik denklemler bu bölümde elde edilecektir. Bu amaç ile kazığın eğimi (s), dönme momenti (M) ve kesme kuvveti (V) sırasıyla Denklem (1-3) arasında verilmiştir [54]. Denklemlerde x eksenini kazık aksından geçen eksen temsil ederken, kazığın sapması bu eksene dik olan eksen olarak ifade edilmiştir.



Şekil 1. Yanal yüklü kazık modeli

$$s = \frac{dy}{dx} \quad (1)$$

$$M = EI \frac{d^2y}{dx^2} \quad (2)$$

$$V = EI \frac{d^3y}{dx^3} \quad (3)$$

Burada  $y$  kazığın sapmasını,  $EI$  kazığın eğilme rijitliğini,  $E$  kazığın elastisite modülünü,  $I$  ise kazığın atalet momentini [ $m^4$ ] ifade etmektedir. Kazığın birim uzunluğundaki zemin tepkisinin denklem ise Denklem (4)'te verilmektedir [54].

$$P = EI \frac{d^4y}{dx^4} \quad (4)$$

Kazık aksı boyunca herhangi bir  $x$  mesafesindeki zemin tepkisi aynı zamanda aşağıdaki şekilde ifade edilebilmektedir.

$$P = -E_s \cdot y \quad (5)$$

Burada  $E_s$  zeminin elastisite modülüdür. Bu durumda Denklem (4) yeniden düzenlenirse;

$$-E_s \cdot y = EI \frac{d^4y}{dx^4} \quad (6)$$

$$EI \frac{d^4y}{dx^4} + E_s \cdot y = 0 \quad (7)$$

$$E_s = -\frac{P}{y} \quad (8)$$

$$E_s = N_h \cdot x^n \quad (9)$$

$$E_s = N_h \cdot x \quad (10)$$

(Lineer davranış durumunda  $n=1$  olarak alınır.)

Burada  $N_h$  yatay yatak modülünün derinliğe bağlı değişim çarpanını [ $kN/m^3$ ] ve  $n$  kullanılan yay modelinin

davranışını etkileyen ve zemin türüne göre değişen bir katsayısını ifade eder.

Zemin elastisite modülü olan  $E_s$  değeri Denklem (4)'te yerine yazılınca yanall yüklü kazıkların elastik eğri denklemini verecektir:

$$EI \frac{d^4y}{dx^4} + N_h \cdot x^n \cdot y = 0 \quad (11)$$

TFY'nin uygulanabilmesi için elde edilen bu denklemin, TFY'nin uygulanabilmesi için 4. Mertebeden olan denklem (11)'in, 4 adet kanonik denklem formunda elde edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, yanall yüklü kazıkların kanonik denklemleri ilk defa elde edilmiştir.

Denklem (16-19)'de verilen kanonik denklemlerde,  $Z_1$  yanall deplasman,  $Z_2$  dönme,  $Z_3$  eğilme momenti ve  $Z_4$  ise kesme kuvvetini göstermektedir.

$$y = Z_1 \quad (12)$$

$$y' = Z_2 \quad (13)$$

$$y'' = Z_3 \quad (14)$$

$$y''' = Z_4 \quad (15)$$

$$Z'_1 = Z_2 \quad (16)$$

$$Z'_2 = Z_3 \quad (17)$$

$$Z'_4 = Z_3 \quad (18)$$

$$Z'_4 = -Z_1 \cdot N_h \cdot x^n / EI \quad (19)$$

Yukarıdaki denklemlerde,  $S$  dönmeyi,  $y$  yanall yer değiştirmeyi,  $M$  eğilme momentini,  $E$  kazığın elastisite modülünü,  $I$  kazığın atalet momentini [ $m^4$ ],  $E_s$  zemin elastisite modülünü,  $N_h$  yatay yatak modülünün derinliğe bağlı değişim çarpanını [ $kN/m^3$ ] ve  $n$  kullanılan yay modelinin davranışını etkileyen ve zemin türüne göre değişen bir katsayısını ifade eder.

Yukarıda verilen 4 adet kanonik diferansiyel denklemin (Denklem (16-19)) çözülebilmesi için 4 adet sınır şartı gerekmektedir. Bu sınır şartları kazığın yükleme ve mesnet türüne göre değişiklik göstermektedir. Bu çalışmada ele alınan sınır şartları Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Sınır koşulları

Sınır koşulu	Yükleme Durumu	Kazığın en üst noktası ( $x = 0$ )	Kazığın en alt noktası ( $x = L$ )
Serbest uçlu	Yanall yük ( $P$ ) ve moment ( $M$ )	$Z_3 = M/EI$ $Z_4 = P/EI$	$Z_1 = 0$ $Z_2 = 0$
Sabit uçlu	Yanall yük ( $P$ )	$Z_2 = 0$ $Z_4 = P/EI$	$Z_1 = 0$ $Z_2 = 0$

Bu bölümde geometrisi ve özellikleri esken eksen boyunca üniform yanal yüklü kazık problemlerinin davranışını yanal yer değiştirmesini idare eden diferansiyel denklemlerin çözümüne için TFY uygulanmıştır. TFY ile çözüm yapılırken yer değiştirmeler ile birlikte kesit tesirleri de aynı anda elde edilmektedir. Bu metot ile sınır değer problemleri başlangıç değer problemine dönüştürülmektedir. Fortran dilinde bilgisayar program yazılmıştır. Hazırlanan program yardımıyla analizlerde 5. Mertebe Runge-Kutta (RK5) metodu uygulanmıştır. Birinci mertebeden 4 adet diferansiyel denklem çözülecektir. Bu denklemler matris formunda yazılırsa;

$$d \frac{\{y(x)\}}{dx} = [A(x)]_{4 \times n} [Y(x)]_{4 \times 1} + [F(x)]_{4 \times 1} \quad (20)$$

Burada x bağımsız değişken, {y} bilinmeyen değişkenleri içeren matris, [A] geçiş matrisi, {F} yüklem matrisidir.

Sınır şartından 2 adeti başlangıçta 2 adeti ise çözüm bölgesi sonundadır

$$\sum_{j=1}^4 b_{ij} y_j(a) = \alpha_i \quad (i=1, \dots, 2) \quad (21)$$

$$\sum_{j=1}^4 d_{ij} y_j(b) = \beta_i \quad (i=1, \dots, 2) \quad (22)$$

**Özet** Yanal yüklü kazıkların yatay yer değiştirmesini idare eden diferansiyel denklemin çözümü şöyle olur.

$$\{Y(x)\} = \sum_{m=1}^4 C_m \left( U^{(m)}(x) \right) + \{V(x)\} \quad (23)$$

Cm sabitleri sınır şart ile hesaplanır. U<sup>(m)</sup>(x) Homojen homojen çözüm olup çözüm 4 adet homojen sınır şartının elde özel homojen çözümdür. yardımıyla elde edilmektedir.

$$[U(x)]_{4 \times n} = [\{U^{(1)}(x)\}_{4 \times 1}, \{U^{(2)}(x)\}_{4 \times 1}, \dots, \{U^{(m)}(x)\}_{4 \times 1}] \quad (24)$$

Böylece,

$$\{Y(x)\} = [U(x)] \{C\} + \{V(x)\} \quad (25)$$

İntegrasyon sabitleri bulunduktan sonra, çözüm bölgesinde istenilen yerdeki bağımlı değişkenlerin değerleri kolaylıkla Denklem (26) yardımıyla hesaplanabilir.

$$\frac{d\{U^4(x)\}}{dx} = [A]\{U^4(x)\} \quad (26)$$

Bu denklem ile homojen çözüm bulunur.

{U<sup>(m)</sup>(x)}, {U} bilinmeyen vektörünün çözüm bölgesi başlangıcında m'inci elemanına 1, diğerlerine 0 olması durumunda elde edilen çözüm demektir (Tablo 2).

**Tablo 2.** TFY tablosu

m=1	m=2	m=3	m=4
U <sub>1</sub> (a)=1	U <sub>2</sub> (a)=0	U <sub>3</sub> (a)=0	U <sub>4</sub> (a)=0
U <sub>1</sub> (a)=0	U <sub>2</sub> (a)=1	U <sub>3</sub> (a)=1	U <sub>4</sub> (a)=0
....	....	....	....
U <sub>1</sub> (a)=0	U <sub>2</sub> (a)=0	U <sub>3</sub> (a)=0	U <sub>4</sub> (a)=1

Böylece bu şekilde elde edilmiş olan [U] kare matrisinin, çözüm bölgesi başlangıcındaki değerleri birim matrise karşılık gelmektedir.

$$[U(a)] = [I] \quad (27)$$

Özel çözümün elde edilmesi

$$\frac{d\{V(x)\}}{dx} = [A]\{V(x)\} + \{F(x)\} \quad (28)$$

Denklem (23)'te verilen genel denklemin homojen çözümü Denklem (29)'da verilmiş olup sınır şartları ile bir defa çözülmesi yeterlidir.

$$\{V(a)\} = \{0\} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} m=4 \\ V_1(a)=0 \\ V_2(a)=0 \\ \dots \\ \dots \\ V_n(a)=0 \end{aligned}$$

### 3 Bulgular ve tartışma

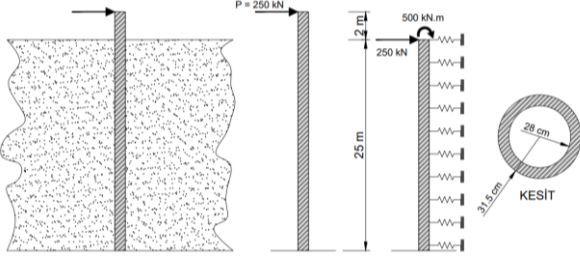
Bu bölümün ilk aşamasında, TFY ile elde edilen sonuçların doğrulanması gerekmektedir. Bu amaç ile Murthy [54] tarafından çözülen üç örnek için sonuçlar TFY ile de elde edilerek Tablo 3'te karşılaştırılmıştır. Murthy [54]'te yer alan örneklerde ele alınan kazığın dış çapı 61 cm, cidar kalınlığı 2.5 cm, derinliği ise 20 m olup çelikten yapıldığı kabul edilmiştir. N<sub>b</sub> değeri 6 MN/m<sup>3</sup> ve n katsayısı ise 1 olarak alınmıştır. Kazığa etki eden yanal yükün değeri ise 268 kN'dir. Serbest uçlu (yanal yüklü + moment) durumunda ise yanal yükün kazığa yerden iki metre yukarıdan etki ettiği varsayılmıştır.

Çözülen örnekler ile ilgili detaylar ilgili kaynak kitabında bulunmaktadır. Burada sadece sonuçların sunulması yeterli görülmüştür. Sonuçlar karşılaştırıldığında (Tablo 3) TFY sonuçlarının Murthy [54] ile uyumlu olduğu görülmektedir.

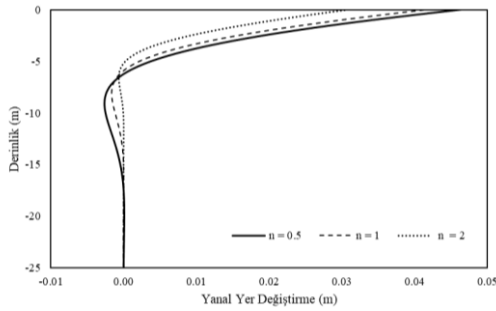
**Tablo 3.** Yanal yer değiştirmelerini karşılaştırılması

Kazık tipi	Murthy [54]	TFY
Serbest uçlu	1.94 cm	1.9385 cm
Sadece yanal yüklü		
Serbest uçlu	3.09 cm	3.0873 cm
Yanal yüklü + Moment		
Sabit uclu	0.75 cm	0.7498 cm
Sadece yanal yüklü		

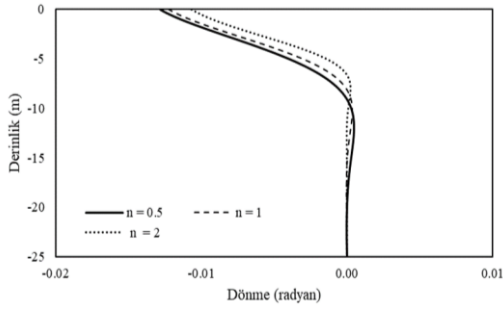
Önerilen metot doğrulandıktan sonra geometrik özellikleri Şekil 2’de verilen serbest uçlu kazık probleminin  $n=0.5$ ,  $n=1$  ve  $n=2$  ile  $N_h=3 \text{ MN/m}^3$  değerleri için statik analiz sonuçları elde edilmiştir. Elde edilen yer değiştirme değerleri Şekil 3’te, dönme değerleri Şekil 4’te, eğilme momenti değerleri Şekil 5’te ve kesme kuvveti sonuçları ise Şekil 6’da sunulmuştur.



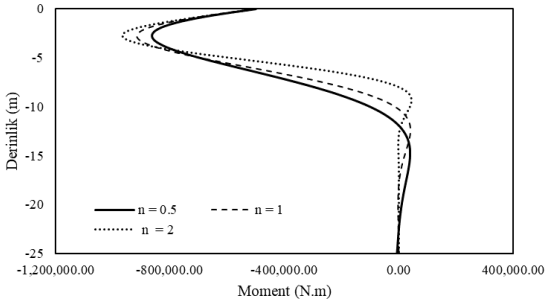
Şekil 2. Yanal yük etkisindeki serbest uçlu kazık



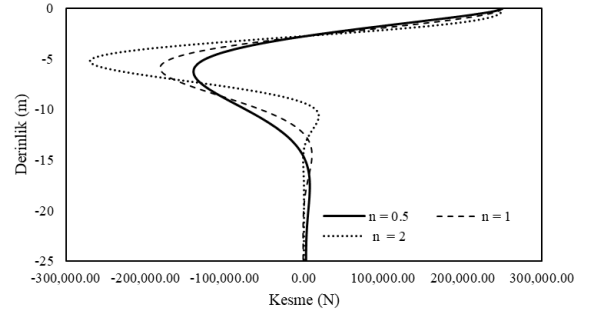
Şekil 3. Serbest uçlu kazık için elde edilen yer değiştirme değerleri ( $N_h=3 \text{ MN/m}^3$ )



Şekil 4. Serbest uçlu kazık için elde edilen dönme değerleri ( $N_h=3 \text{ MN/m}^3$ )

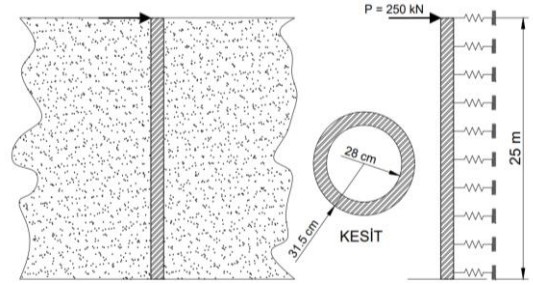


Şekil 5. Serbest uçlu kazık için elde edilen eğilme momenti değerleri ( $N_h=3 \text{ MN/m}^3$ )

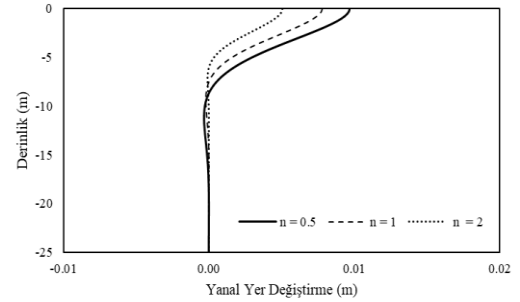


Şekil 6. Serbest uçlu kazık için elde edilen kesme kuvveti değerleri ( $N_h=3 \text{ MN/m}^3$ )

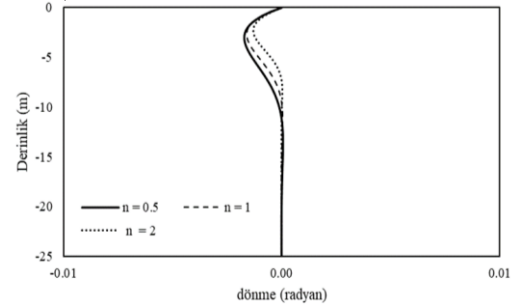
İkinci örnek olarak  $n=0.5$ ,  $n=1$  ve  $n=2$  ile  $N_h=5 \text{ MN/m}^3$  değerleri için Şekil 7’de verilen sabit uçlu kazık ele alınacaktır. Ele alınan bu yanal yüklü kazık için elde edilen yanal yer değiştirme, dönme, eğilme momenti ve kesme kuvveti değerlerinin derinlik ile değişimi Şekil (8-11)’de çizilmiştir.



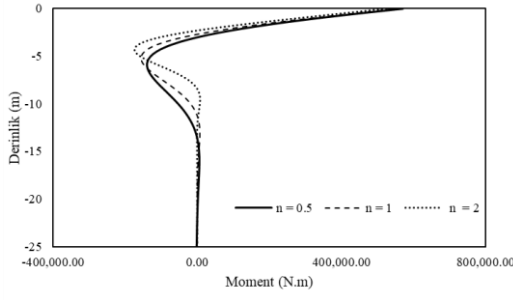
Şekil 7. Yanal yük etkisindeki sabit uçlu kazık



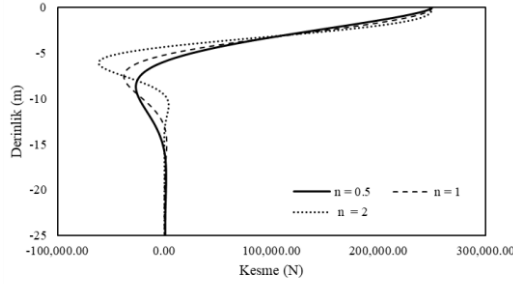
Şekil 8. Sabit uçlu kazık için elde edilen yer değiştirme değerleri ( $N_h=5 \text{ MN/m}^3$ )



Şekil 9. Sabit uçlu kazık için elde edilen dönme değerleri ( $N_h=5 \text{ MN/m}^3$ )



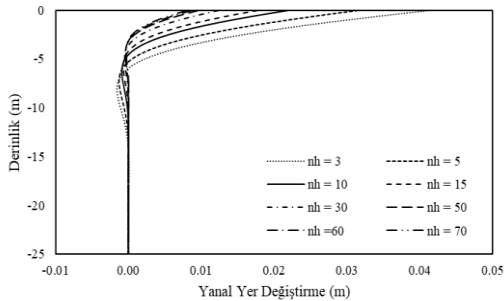
Şekil 10. Sabit uçlu kazık için elde edilen eğilme momenti değerleri ( $N_h = 5 \text{ MN/m}^3$ )



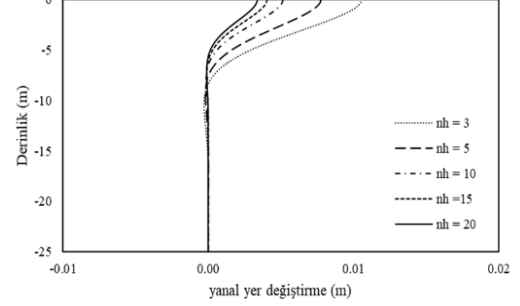
Şekil 11. Sabit uçlu kazık için elde edilen kesme kuvveti değerleri ( $N_h = 5 \text{ MN/m}^3$ )

Şekil (3-4) ve Şekil (8-9) incelendiğinde  $L=25$  metre bir kazık için  $n=0.5$  parametresine ait yer değiştirme ve dönme değerlerinin  $n=1$  ve  $n=2$  parametrelere göre daha büyük olduğu görülmektedir,  $n=2$  durumunda ise yer değiştirmeler ve dönmeler en küçük değerleri almaktadır. Benzer şekilde  $n=0.5$  değeri için eğrilerden eğim değişiminin daha belirgin olduğu anlaşılmaktadır. Şekil (5-6)'da ve Şekil (10-11)'de ise  $n$  değerinin artmasıyla eğilme momentinin ve kesme kuvvetinin de arttığı gözlemlenmiştir.

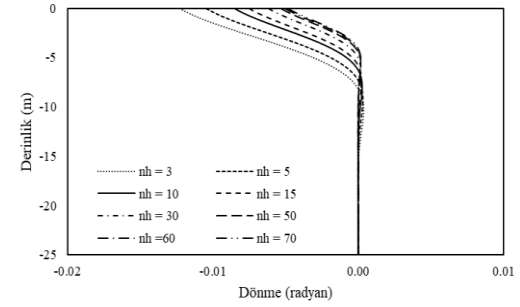
Üçüncü olarak  $N_h$  değerlerinin statik davranışa etkisi serbest uçlu (Şekil 2) ve sabit uçlu (Şekil 7) kazıklar için TFY ile araştırılmıştır. Farklı  $N_h$  değerleri için elde edilen yanıl yer değiştirme değerleri Şekil (12-13)'te, dönme değerleri Şekil (14-15)'te, eğilme momenti değerleri Şekil (16-17)'de ve kesme kuvveti değerleri ise Şekil (18-19)'da grafik formunda çizilmiştir.



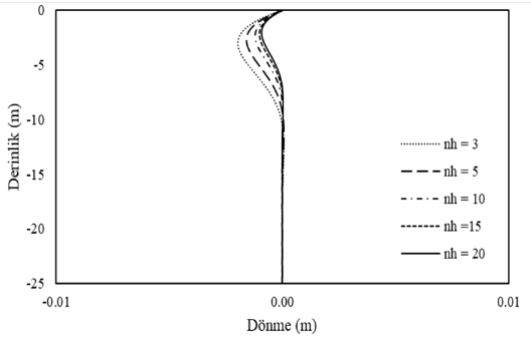
Şekil 12. Serbest uçlu kazık için elde edilen yanıl yer değiştirme değerleri ( $n=1$ )



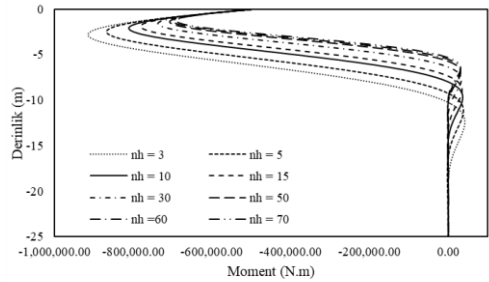
Şekil 13. Sabit uçlu kazık için elde edilen yanıl yer değiştirme değerleri ( $n=1$ )



Şekil 14. Serbest uçlu kazık için elde edilen dönme değerleri ( $n=1$ )



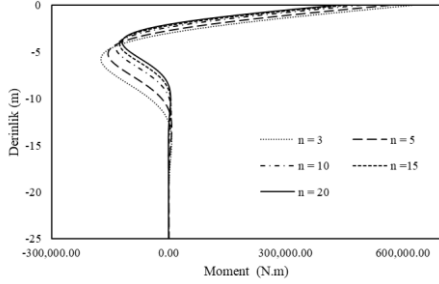
Şekil 15. Sabit uçlu kazık için elde edilen dönme değerleri ( $n=1$ )



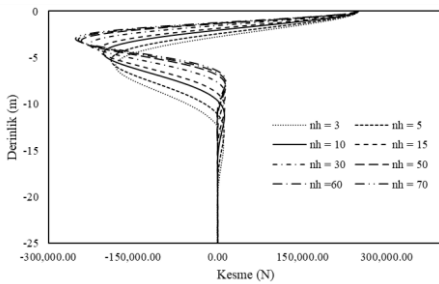
Şekil 16. Serbest uçlu kazık için elde edilen eğilme momenti değerleri ( $n=1$ )

Şekil (12-15) incelendiğinde  $N_h$  değerinin yüksek olduğu (sıklığın artması) durumlarda yanıl yer değiştirme ve dönme değerlerinin küçük olduğu gözlemlenmiştir. Buna karşın Şekil (16-17)'den de görüldüğü gibi düşük  $N_h$  değerleri

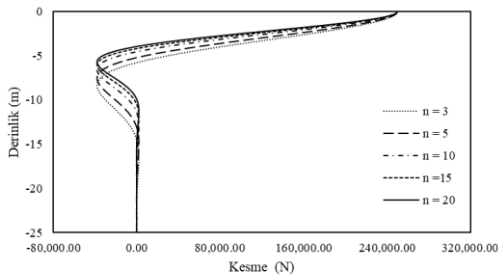
zeminlerde eğilme momenti değerlerinin daha yüksek olduğu ortaya çıkmıştır.



Şekil 17. Sabit uçlu kazık için elde edilen eğilme momenti değerleri (n=1)



Şekil 18. Serbest uçlu kazık için elde edilen kesme kuvveti değerleri (n=1)



Şekil 19. Sabit uçlu kazık için elde edilen kesme kuvveti değerleri (n=1)

Şekil (18-19)'dan  $N_h$  değerleri arttıkça kesme kuvveti değerlerinin de arttığı görülmektedir. Ele alınan problemler ilgili parametrik çalışmaların sayıları artırabilir ve çeşitli sonuçlar sunulabilir ( bkz. Alhachami [55]).

#### 4 Sonuçlar

Bu çalışmada, yanal yüklerin etkisinde olan kazıkların statik analizi için etkin bir sayısal yöntem uygulanmıştır. Bu yapı elemanlarının statik yükler altındaki davranışını idare eden temel denklemler özetlenmiş, kanonik formda elde edilen dördüncü mertebeden adi diferansiyel denklem takımlarının çözümleri Tamamlayıcı Fonksiyonlar Yöntemi (TFY) ile yapılmıştır. Yöntemin sonuçlarının doğruluğu gösterildikten sonra lineer ve lineer olmayan zemin yay parametre için birtakım parametrik çalışmalar sunulmuştur. Ele alınan kazıklar serbest uçlu ve sabit uçlu olarak çözülmüştür. Bu araştırmanın en önemli sonuçları şöyle özetlenebilir:

• Kazıklar için en büyük yer değiştirme değerleri en düşük n parametresinde olduğu görülmüştür. Ayrıca  $N_h$  değeri ile kazıkların yanal yer değiştirme değerlerinin ters orantılı olduğu gözlemlenmiştir.

• Dönme değerleri karşılaştırıldığında ise, yanal yer değiştirme değerlerine benzer bir durum olduğu görülmüştür. Şöyle ki, düşük n değerleri için dönme değerlerinin daha büyük olduğu ve yüksek  $N_h$  değerleri için dönme değerlerinin daha küçük olduğu gösterilmiştir.

• Eğilme momenti değerleri incelendiğinde; Yüksek n değerleri için eğilme momentlerinin de yüksek olduğu gösterilmiştir. Ancak,  $N_h$  değerinin artmasıyla eğilme momenti değerlerinin düştüğü görülmüştür.

• Kesme kuvveti değerlerine bakıldığında; yüksek n ve  $N_h$  değerleri için kesme kuvveti değerlerinin de yüksek olduğu ortaya çıkmıştır.

• Daha önce çeşitli mühendislik mekaniği problemlerine etkin bir şekilde uygulanan TFY'nin geoteknik mühendisliği alanındaki iki noktalı sınır değer problemlerine de etkin bir şekilde uygulanabilirliği gösterilmiştir.

#### Çıkar çatışması (

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

**Benzerlik oranı (iThenticate):** % 14

#### Kaynaklar

- [1] A. B. Huang, C. K. Hsueh, M. W. O'Neill, S. Chern and C. Chen, Effects of construction on laterally loaded pile groups. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(5), 385-397, 2001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:5\(385\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:5(385)).
- [2] B. Tak Kim, N. K. Kim, W. Jin Lee and Y. Su Kim, Experimental load transfer curves of laterally loaded piles in Nak-Dong River sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(4), 416-425, 2004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)10900241\(2004\)130:4\(416\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)10900241(2004)130:4(416)).
- [3] B. D. Wessellink, J. D. Murff, M. F. Randolph, I. L. Nunez and A. M. Hyden, Analysis of centrifuge model test data from laterally loaded piles in calcareous sand. *Engineering for Calcareous Sediments*, 261-270, 1988. <https://doi.org/10.1201/9781003211433-35>.
- [4] X. Tang and M. Yang, Analysis of laterally-loaded piles in weathered rock slopes based on p-y curve method. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 14(7), 809-819, 2020. <https://doi.org/10.1080/19386362.2018.1498199>.
- [5] C.C. Fan and J. H. Long, Assessment of existing methods for predicting soil response of laterally loaded piles in sand. *Computers and Geotechnics*, 32(4), 274-289, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2005.02.004>.
- [6] M. Achmus, Design of axially and laterally loaded piles for the support of offshore wind energy converters. *Proceedings of the Indian Geotechnical Conference GEOTrendz-2010*, pp. 16-18, Mumbai, India, 2010.
- [7] Y. Kim and S. Jeong, Analysis of soil resistance on laterally loaded piles based on 3D soil-pile interaction.

- Computers and Geotechnics, 38(2), 248-257, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2010.12.001>.
- [8] D. Basu, R. Salgado and M. Prezzi, A new model for analysis of laterally loaded piles. *Geo-Frontiers 2011*, American Society of Civil Engineers, 122-131, Reston, VA, 2011. [https://doi.org/10.1061/41165\(397\)14](https://doi.org/10.1061/41165(397)14).
- [9] A. Ekici, Three dimensional finite element modeling for the laterally loaded passive pile behavior. Master Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Türkiye, 2013.
- [10] M. Heidari, H. El Naggar, M. Jahanandish and A. Ghahramani, Generalized cyclic p-y curve modeling for analysis of laterally loaded piles. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 63, 138-149, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.04.001>.
- [11] M. Khari, K.A. Kassim and A. Adnan, Development of p-y curves of laterally loaded piles in cohesionless soil. *The Scientific World Journal*, 2014, 1-8, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/917174>.
- [12] B. Fatahi, S. Basack, P. Ryan, W. H. Zhou and H. Khabbaz, Performance of laterally loaded piles considering soil and interface parameters. *Geomechanics and Engineering*, 7(5), 495-524, 2014. <https://doi.org/10.12989/gae.2014.7.5.495>.
- [13] A. L. Rishitha, Numerical modelling of laterally loaded single pile. Ph.D. Thesis, Indian Institute of Technology Hyderabad, Telangana, India, 2015.
- [14] K. Thieken, M. Achmus and K. Lemke, A new static p-y approach for piles with arbitrary dimensions in sand. *Geotechnik*, 38(4), 267-288, 2015. <https://doi.org/10.1002/gete.201400036>.
- [15] H. Lin, L. Ni, M. T. Suleiman and A. Raich, Interaction between laterally loaded pile and surrounding soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(4), 04014119, 2014. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001259](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001259).
- [16] J. M. Mayoral, J. M. Pestana and R. B. Seed, Multi-directional cyclic p-y curves for soft clays. *Ocean Engineering*, 115, 1-18, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.01.033>.
- [17] A. E. Haiderali and G. Madabhushi, Evaluation of curve fitting techniques in deriving p-y curves for laterally loaded piles. *Geotechnical and Geological Engineering*, 34(5), 1453-1473, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10706-016-0054-2>.
- [18] B. K. Gupta and D. Basu, Analysis of laterally loaded short and long piles in multilayered heterogeneous elastic soil. *Soils and Foundations*, 57(1), 92-110, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2017.01.007>.
- [19] D. F. Turello, F. Pinto and P. J. Sánchez, Analysis of lateral loading of pile groups using embedded beam elements with interaction surface. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 43(1), 272-292, 2019. <https://doi.org/10.1002/nag.2863>.
- [20] S. Stacul and N. Squeglia, Analysis method for laterally loaded pile groups using an advanced modeling of reinforced concrete sections. *Materials*. 11(2), 300, 2018. <https://doi.org/10.3390/ma11020300>.
- [21] S. Nie, X. Zou and Q. He, A modified p-y curve method for offshore pile foundations under cyclic lateral loading in soft clay. *Proceedings of the 2nd International Symposium on Asia Urban GeoEngineering*, 485-496 Singapore, 2018. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-6632-0\\_37](https://doi.org/10.1007/978-981-10-6632-0_37).
- [22] D. Rathod, K. Muthukkumaran and T. G. Sitharam, Effect of slope on p-y curves for laterally loaded piles in soft clay. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(3), 1509-1524, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0405-7>.
- [23] H. Li, L. Tong, S. Liu, H. Liu and M. Zhang, Construction and verification of a unified p-y curve for laterally loaded piles. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77(3), 987-997, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1111-7>.
- [24] S. H. Baek, J. Kim, S. H. Lee and C. K. Chung, Development of the cyclic p-y curve for a single pile in sandy soil. *Marine Georesources & Geotechnology*, 36(3), 351-359, 2018. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2017.1318986>.
- [25] W. Peng, M. Zhao, Y. Xiao, C. Yang and H. Zhao, Analysis of laterally loaded piles in sloping ground using a modified strain wedge model. *Computers and Geotechnics*, 107, 163-175, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.12.007>.
- [26] P. S. O. Kardogan, N. S. Isik, M. I. Onur and S. Bhattacharya, A study on the laterally loaded pile behaviour in liquefied soil using p-y method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 471, 042015, 2019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/471/4/042015>.
- [27] B. Yuan, M. Sun, Y. Wang, L. Zhai, Q. Luo and X. Zhang, Full 3D displacement measuring system for 3d displacement field of soil around a laterally loaded pile in transparent soil. *International Journal of Geomechanics*, 19(5), 04019028, 2019. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.19435622.0001409](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.19435622.0001409).
- [28] S. Li, J. Yu, M. Huang and C. F. Leung, Application of T-EMSD based p-y curves in the three-dimensional analysis of laterally loaded pile in undrained clay. *Ocean Engineering*, 206, 107256, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107256>.
- [29] Y. Zhang, K. H. Andersen and P. Jeanjean, Verification of a framework for cyclic p-y curves in clay by hindcast of Sabine River, SOLCYP and centrifuge laterally loaded pile tests. *Applied Ocean Research*, 97, 102085, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102085>.
- [30] G. Chortis, A. Askarinejad, L. J. Prendergast, Q. Li and K. Gavin, Influence of scour depth and type on p-y curves for monopiles in sand under monotonic lateral loading in a geotechnical centrifuge. *Ocean Engineering*, 197, 106838, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106838>.
- [31] D. Xu, X. Xu, W. Li and B. Fatahi, Field experiments on laterally loaded piles for an offshore wind farm. *Marine Structures*. 69, 102684, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2019.102684>.



- [32] L. Zdravković, D. M. G. Taborda, D. M. Potts, D. Abadias, H. J. Burd, B. W. Byrne, K. G. Gavin, G. T. Houlsby, R. J. Jardine, C. M. Martin, R. A. McAdam and E. Ushev, Finite-element modelling of laterally loaded piles in a stiff glacial clay till at Cowden. *Geotechnique*, 70(11), 999-1013, 2020. <https://doi.org/10.1680/jgeot.18.PISA.005>.
- [33] X. Liu, G. Cai, L. Liu, S. Liu, W. Duan and A. J. Puppala, Improved p-y curve models for large diameter and super-long cast-in-place piles using piezocone penetration test data. *Computers and Geotechnics*, 130, 103911, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103911>.
- [34] B. Yuan, Z. Li, Z. Zhao, H. Ni, Z. Su and Z. Li, Experimental study of displacement field of layered soils surrounding laterally loaded pile based on transparent soil. *Journal of Soils and Sediments*, 21, 3072-3083, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11368-021-03004-y>
- [35] F. M. Bhuiyan, R. Motamed, R. V. Siddharthan and D. H. Sanders, Evaluation of a unified p-y method for lateral analysis of large-diameter drilled shafts using NVShaft. *Transportation Geotechnics*, 36, 100813, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100813>.
- [36] F. Çelik, A comparative analytical investigation on the effects of different p-y curves for a laterally loaded single pile design in saturated sandy soil. *European Journal of Science and Technology* (34), 474-478, 2022. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1082906>.
- [37] L. M. Lalicata, G. M. Rotisciani, A. Desideri and F. Casini, A numerical model to study the response of piles under lateral loading in unsaturated soils. *Geosciences*, 12(1), 1, 2021. <https://doi.org/10.3390/geosciences12010001>.
- [38] F. M. Bhuiyan, R. V. Siddharthan and R. Motamed, Evaluation of existing p-y models for caliche based on numerical analysis of raiders stadium lateral load tests. DFI 47th Annual Conference on Deep Foundations, pp. 297-309, National Harbor, Maryland, 2022. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7187512>.
- [39] P. A. Arvan and M. Arockiasamy, Energy-based approach: analysis of a laterally loaded pile in multi-layered non-linear elastic soil strata. *Geotechnics*, 570-598, 2(3), 570-598, 2022. <https://doi.org/10.3390/geotechnics2030028>.
- [40] L. Pang, C. Jiang and L. Chen, Nonlinear predictive framework of the undrained clay slope effect on the initial stiffness of p-y curves of laterally loaded piles by FEM. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(11), 1684, 2022. <https://doi.org/10.3390/jmse10111684>.
- [41] Z. Shi, L. Liu, M. Huang, K. Shen and B. Wang, Simulation of cyclic laterally-loaded piles in undrained clays accounting for soil small-strain characteristics. *Ocean Engineering*, 267, 113268, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113268>.
- [42] B. Temel, F. F. Çalim and N. Tütüncü, Quasi-static and dynamic response of viscoelastic helical rods. *Journal of Sound and Vibration*, 271(3-5), 921-935, 2004. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(03\)00760-0](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00760-0).
- [43] A. R. Noori, B. Temel, On the vibration analysis of laminated composite parabolic arches with variable cross-section of various ply stacking sequences. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 27(19), 1658-1672, 2020. <https://doi.org/10.1080/15376494.2018.1524949>.
- [44] T. A. Aslan, A. R. Noori ve B. Temel, Çift yönlü fonksiyonel derecelenmiş malzemeli timoshenko kirişlerinin serbest titreşim analizi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(3), 30-36, 2019. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.621183>.
- [45] S. Yildirim, Free vibration analysis of sandwich beams with functionally-graded-cores by complementary functions method. *AIAA Journal*, 58(12), 5431-5439, 2020. <https://doi.org/10.2514/1.J059587>.
- [46] H. Rasooli, A. R. Noori and B. Temel, On the static analysis of laminated composite frames having variable cross section. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 43(5), 258, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40430-021-02973-y>.
- [47] H. Matlock and L. C. Reese, Generalized solutions for laterally loaded piles. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 86(5), 63-92, 1960. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0000303>.
- [48] M. T. Davisson, Behavior of flexible vertical piles subjected to moments, shear and axial load. Ph.D. Thesis, University of Illinois, Illinois, USA, 1960.
- [49] B. B. Broms, Lateral resistance of piles in cohesive soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 90(2), 27-63, 1964. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0000611>.
- [50] B. B. Broms, Lateral resistance of piles in cohesionless soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 90(3), 123-156, 1964. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0000614>.
- [51] H. G. Poulos and E. H. Davis, *Pile Foundation Analysis and Design*. Wiley, 1990.
- [52] L. C. Reese, W. R. Cox and F. D. Koop, Analysis of laterally loaded piles in sand. *Proceedings of the 6th Annual Offshore Technology Conference*, pp. 473-480, Houston, Texas, 1974. <https://doi.org/10.4043/2080-MS>.
- [53] H. Matlock, Correlation for design of laterally loaded piles in soft clay. *Offshore Technology Conference*, pp. 577-588, Houston, Texas, 1970. <https://doi.org/10.4043/1204-MS>
- [54] V. N. S. Murthy, *Geotechnical Engineering- Principles and Practices of Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Taylor & Francis, 2003.
- [55] Z. R. K., Alhachami, Tamamlayıcı Fonksiyonlar Yöntemi ile Yanal Yüklü Kazıkların Statik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Gelişim Üniversitesi, İstanbul, 2023.