

Kum Zeminde p-y Eğrileri için Yeni Bir Yöntem

New Approach for p-y Curves in Sand

Murat HAMDERİ¹

ÖZET

P-y eğrileri yatay kuvvetlere maruz kazıkların zeminin verdiği tepkiyi hesaplamak için kullanılırlar. Birçok p-y eğrisi 1970 yıllarında, petrol şirketlerinin okyanuslar üzerine kurduğu platformları destekleyen kazıkların yanıl kapasitelerini hesaplamak için geliştirilmiştir. Bu eğriler kaba veya ince daneli zeminlerde yapılan yanıl kazık yükleme deneylerinden elde edilen verilere dayanır. Deneysel verileri barındırması sebebiyle güvenilir ancak çok az sayıda deneye dayandıklarından kaba bir yaklaşıma sahiptirler. Öte yandan günümüzde 3 boyutlu yapı zemin etkileşimini modelleyen yazılımların yaygınlaşması ile yanıl kazık kapasitesi ile ilgili bilgisayar ortamında değişik parametreleri içeren sayısız deney yapılabilmektedir. Bu çalışmada, bilgisayar ortamında yapılan kazık yükleme deneyleri sonucunda elde edilen kum zeminler için p-y eğrisi formülü tanıtılacaktır.

Anahtar Kelimeler: p-y eğrisi, kazık, zemin-yapı etkileşimi, deprem

ABSTRACT

P-y curves are used to calculate the response of the ground to piles subjected to horizontal forces. Many p-y curves were developed in the 1970s to predict the lateral capacity of piles supporting ocean petrol platforms installed by oil companies. These curves are based on the data obtained from lateral pile loading experiments in coarse or fine-grained soils. They are reliable since they are based on experimental data, although the number of experiments is quite a few. On the other hand, nowadays, with the advance in use of software that models the 3D structure-soil interaction, numerous experiments including different parameters on lateral pile capacity can be performed in computer environment. In this study, the p-y curve formula for sand soils obtained from computerized pile loading experiments will be introduced.

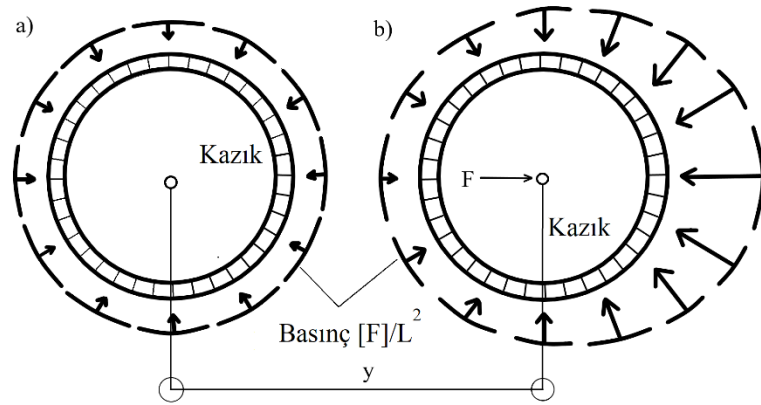
Keywords: p-y curve, pile, soil-structure interaction, earthquake, regression

1. GİRİŞ

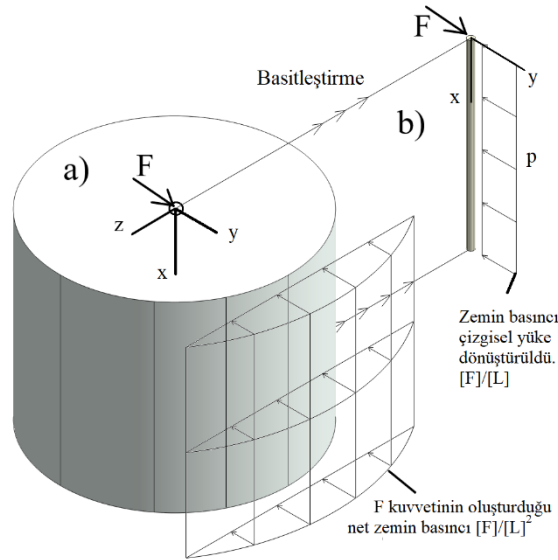
Kazıkların ana görevi ağır yapıların altlarında oluşan gerilmeleri daha alt katmanlara taşıyarak üst katmanların göçmesini engellemek ve oturmalarını azaltmaktır. Kazıkların temele bağlı olduğu hallerde yanıl deprem kuvvetleri kazıklar vasıtasıyla üst yapıya iletilir. İletilen bu kuvvetin miktarını

¹ Doç. Dr., Türk-Alman Üniversitesi, hamderi@tau.edu.tr (Sorumlu yazar)

belirlemek için kazığın etrafındaki zeminden ne kadar tepki aldığı bulunmalıdır. Reese ve Sullivan, 1980 sükûnetteki durumda kazık çevresindeki basınç dağılımını Şekil 1a'daki gibi eksenel simetrik olarak vermektedir. Kazığa yanal bir kuvvet uygulandığında ise kuvvetin uygulandığı yöne doğru gerilme artarak eksenel simetri bozulmaktadır (Şekil 1b.). Kazığın yanal F kuvvet altında y kadar ilerlemesi sonucunda oluşan net zemin basıncı Şekil 2a'da $[F]/[L]^2$ cinsinden gösterilmiştir. Bu basınç ile kazıkta oluşan moment ve kesme kuvvetini temel mekaniğin yöntemleri ile hesaplamak zordur. Bu yüzden basınç cinsinde ($[F]/[L]^2$) hesaplanan net zemin itkisi, çizgisel yüke ($[F]/[L]$) dönüştürülür ve "p" harfi ile anılır. Kazık boyunca elde edilen p-y eğrilerinden -kiriş teorisi yardımıyla- moment, kesme kuvveti gibi değerler elde edilir. 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde kazık zemin yapı etkileşimini Yöntem 2'ye göre modellemesinde kazıklara belli aralıklarla düğüm noktası atanarak yaylar tanımlanmaktadır. Bu yaylara (p-y) eğrileri atanmaktadır.



Şekil 1. Kazık etrafındaki gerilme dağılımı (Reese ve Sullivan, 1980) a) Sükûnette, b) Yatay bir kuvvet altında.



Şekil 2. Kazığın çevresindeki basınç dağılımının basitleştirilerek çizgisel yüke dönüştürülmesi a) Gerçek basınç dağılımı, b) Basitleştirilmiş çizgisel yük dağılımı

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

P-y eğrilerindeki “p”, zeminin birim kazık boyu üzerine uyguladığı kuvvettir ve yer değiştirmeye bağlıdır. Bu bakımdan “p” ile pasif toprak basınç itkisi arasında bir analogi kurulabilir (Clough ve Duncan, 1991; Hamderi, 2021). Pasif toprak basıncı konusunda olduğu gibi birçok araştırmacı “p” değerinin en büyük değerini veren formüller geliştirmiştir. Brinch Hansen, 1961 geliştirdiği bir toprak basınç katsayısını, derinlik, zemin birim hacim ağırlığı ve kazık çapı ile çarparak “p” nin en büyük değerini hesaplamıştır. Broms, 1964 ise aynı formüldeki katsayıyı Rankine’nin pasif toprak itkisinin 3 katı olarak almıştır. Fleming ve diğ., 1992 ise bu katsayıyı Rankine’nin pasif toprak itkisinin karesi olarak almıştır. Reese ve diğ., 1984 ise bu katsayıyı zeminin içsel sürtünme açısını, Rankine’nin aktif ve sükûnetteki toprak basınç katsayılarını kullanarak hesaplamıştır.

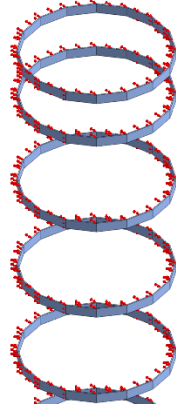
3. ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI

Literatür çalışmasında verilen p-y eğrilerin en büyük değeri büyük ölçüde kaba daneli zeminin içsel sürtünme açısına bağlı olarak verilmiştir. p-y eğrilerinin zeminin elastisite modülü ise sadece gevşek, orta ve sıkı kum için hesaplanmaktadır (Reese ve diğ., 1984). Halbuki günümüzde sonlu elemanlar hesap yöntemleri ile bir kazığın p-y eğrisi, zemin modülünün fonksiyonu olarak hesaplanabilir. Hamderi, 2023, 34 değişik zemin-kazık modeli kullanarak kumlu zeminler için zeminin içsel sürtünme açısına, kazık çapına, zeminin birim ağırlığına, zemin modülüne, derinliğine bağlı olan bir p-y formülü türetmiştir. Bu bildiride bu formül tanıtılacaktır.

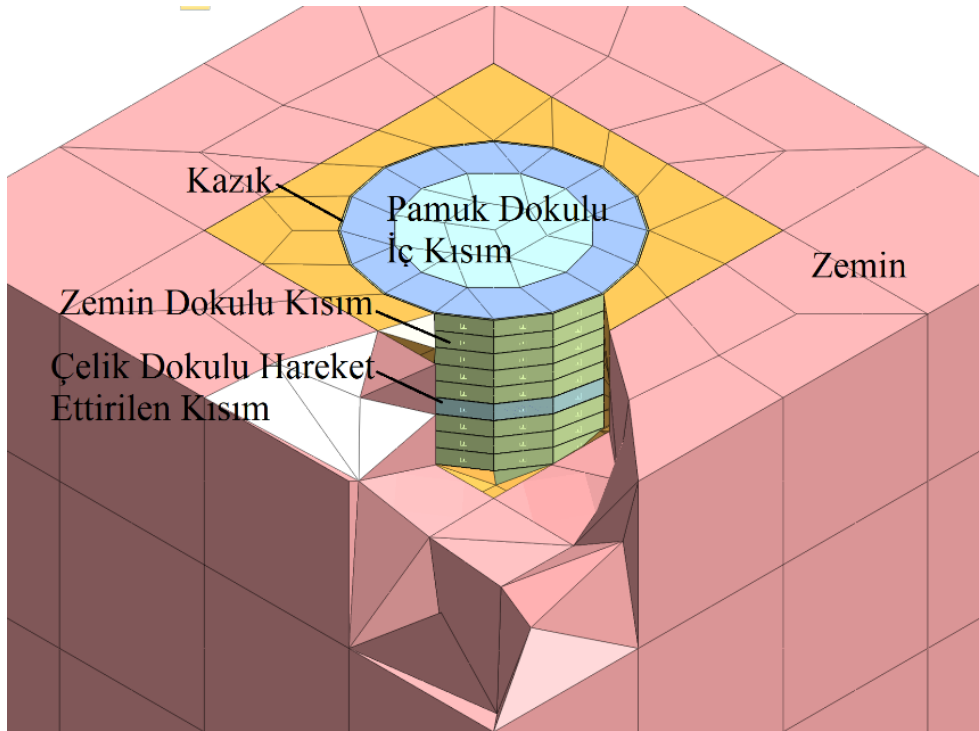
4. FORMÜLÜN OLUŞTURULMASI

Hamderi, 2023, Midas GTS NX sonlu elemanlar programında 34 adet farklı kazık-zemin kombinasyonu oluşturularak p-y formülünü türetmiştir. Formül kombinasyonları, 10 MPa ile 100 MPa arasında değişen değerlerde zemin modülünü, 26° ile 42° arasında değişen içsel sürtünme açısını, 0.25 m ile 1.5 m arasında değişen kazık çapını, 14 kN/m³ ile 22 kN/m³ arasında değişen birim zemin ağırlığını içermektedir. Ayrıca formüle zemin birim hacim ağırlığından suyun ağırlığını çıkararak yer altı su tablası tanımlanabilmektedir.

Literatürdeki yatay kazık yükleme deneylerinde kuvvet kazığın baş kısmından uygulanmaktadır. Kazığın baş kısmından kuvvet uygulandığından kazığın en çok hareket eden kısmı en üstteki birkaç metrelik kısımdır. Daha alt kısımlarındaki hareket miktarı kısıtlıdır. Eğer alt kısımlara ait p-y eğrileri elde edilmek isteniyorsa kazık başının oldukça büyük bir deplasman yapması gerekmektedir. Söz konusu deplasmana gelindiğinde kazık çoktan yanal taşıma kapasitesini kaybetmiş ve izin verilen yatay deplasman sınırı aşılmış olmaktadır. Bu yüzden Hamderi, 2023 sonlu elemanlar deneyinde kazığın başına kuvvet uygulayıp alt kısımlarındaki deplasmanları ve zemin direnci ölçmek yerine kazık boyunca çelik halkalar tanımlamış ve halkaları hareket ettirmiştir. Şekil 3’de verilen halkalar bir modelde aynı oranda hareket ettirilmekte ve çevresinde oluşan net zemin direnci kaydedilmektedir. Bu suretle kazık boyunca 1 m aralıklarla p-y eğrileri oluşturulmaktadır. Bu halkaların sonlu elemanlar modelindeki yerleşimi Şekil 4’deki gibidir. Halkaların üstünde, altında ve çevresinde zemin bulunmaktadır. Halkaların içinde ise elastisite modülü çok düşük olan pamuk gibi bir doku mevcuttur. Pamuk dokusunun birim ağırlığı, çevredeki zeminin birim ağırlığına eşit olup bu pamuk dokusu sonlu elemanlar programında jeolojik gerilmelerin düzenli oluşmasını sağlar. Kazık dokusunun çevresinde 2 boyutlu arayüz tanımlanmıştır. Bu arayüz kazık çevresinde oluşan zemin tepkilerinin bulunmasında önemli rol oynamaktadır.



Şekil 3. Kazığın hareket ettirilen çelik parçaları



Şekil 4. P-y formülünün çıkarılmasında kullanılan sonlu elemanları modeli

5. FORMÜL

Hamderi, 2023 tarafından kum zeminlerdeki kazıklar için önerilen formül aşağıda verilmiştir:

$$p = \frac{x^a * y^b}{(c+d*x^e*y^f)} * D^{(g+1)} * \left(\frac{E_n}{10^5}\right)^h * \left(\frac{\phi_n}{34}\right)^i * \left(\frac{\gamma}{16}\right)^j \quad (1)$$

Burada a, b, c, d, e, f, g, h, i ve j denklem katsayıları (Tablo 1), x (m) kazık derinliği, y (m) kazığın belli bir derinlikteki yanal deformasyonu, E_n (kN/m²) zemin modülü, n tabaka numarası, ϕ_n n no'lu tabakaya ait kumun içsel sürtünme açısı, γ (kN/m³) zeminin birim hacim ağırlığıdır. Eğer zemin su altında ise, efektif birim hacim ağırlığı kullanılmalıdır.

6. FORMÜLÜN LİTERATÜRDEKİ DİĞER FORMÜLLER İLE KARŞILAŞTIRILMASI

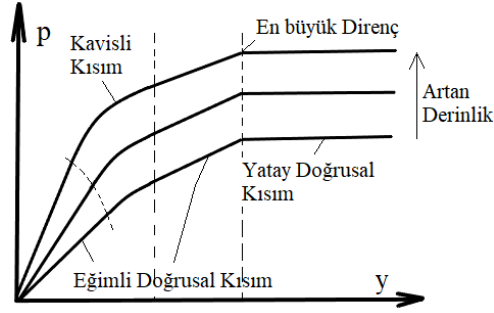
Literatürde kaba daneli zeminler için Reese ve diğ., 1984 tarafından önerilen p-y eğrileri Şekil 5'de verilmektedir. Bu eğrilerin her biri değişik bir derinliğe karşılık gelmektedir. Artan derinlik ile kaydedilen en büyük p değeri de artmaktadır. Eğrilerin, eğimli, kavisli ve doğrusal olan kısımları mevcuttur. Eğriler belli bir y değerinden sonra en büyük değere ulaşmakta ve plato yapmaktadırlar. Bu y değeri bütün derinlikler için sabittir. Şekil 6'da ise Hamderi, 2023 tarafından verilen p-y eğrileri verilmektedir. Bu eğrilerin en büyük değeri artan kazık derinliğine göre artmakla beraber artış hızı derinlik ile azalmaktadır. Küçük derinlikler için eğriler belli bir y değerinde plato yapmaktadır. Daha büyük derinliklerde eğrilerin plato bölgesine geçişi ötelenmektedir. Bir başka deyişle en büyük değere ulaşmak için küçük derinliklerde küçük y değerlerine, büyük derinliklerde daha büyük y değerlerine ihtiyaç vardır. Derinlik arttıkça doğrusal olmayan davranış azalmaktadır.

Tablo 1. p-y formülünün denklem katsayıları (Hamderi, 2023)

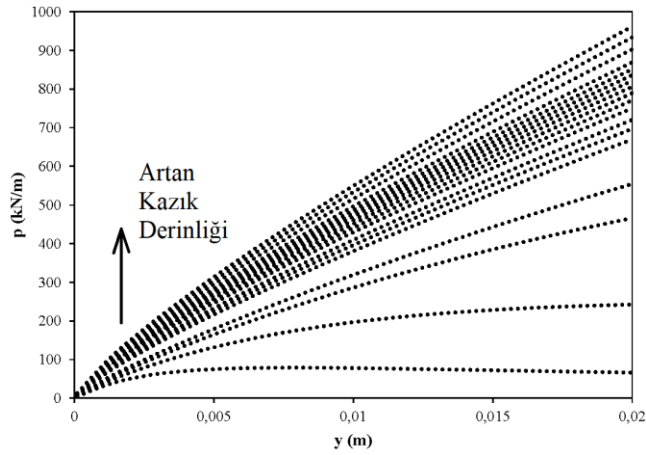
n	x'in aralığı	a	b	c	d	e
1	$0.0001 \leq x < 3$	0.174376	0.846639	0.000038	0.009134	- 2.376373
2	$3 \leq x < 6$	0.205362	0.807185	0.000036	0.005577	- 5.268525
3	$6 \leq x < 9$	0.202343	0.807301	0.000034	0.005577	- 5.268525
4	$9 \leq x \leq 20$	0.253022	0.810901	0.000038	0.005577	- 5.268525
n	x'in aralığı	f	g	h	i	j
1	$0.0001 \leq x < 3$	1.382370	- 0.424825	0.464454	1.088613	0.514760
2	$3 \leq x < 6$	5.903368	- 0.279820	0.600173	1.132096	0.256712
3	$6 \leq x < 9$	5.903368	- 0.211116	0.580252	0.977143	0.140122
4	$9 \leq x \leq 20$	5.903368	- 0.193878	0.579500	0.825870	0.146984

Şekil 7'de $D=0.5$ m, $\phi=35^\circ$, $\gamma=18$ kN/m³, $E= 50$ MPa, ve 3 değişik y değeri için Hamderi, 2023'ün formülü ile hesaplanan p değerlerine yer verilmiştir. Şekil 7'de ayrıca Broms, 1964, Fleming ve diğ., 1982, Brinch Hansen, 1964 tarafından önerilen en büyük p değerleri de bulunmaktadır. Hamderi, 2023 'ün formülüne göre hesaplanan en büyük değerler %1, %2 ve %6 uzamaları içindir (y/D). Temel

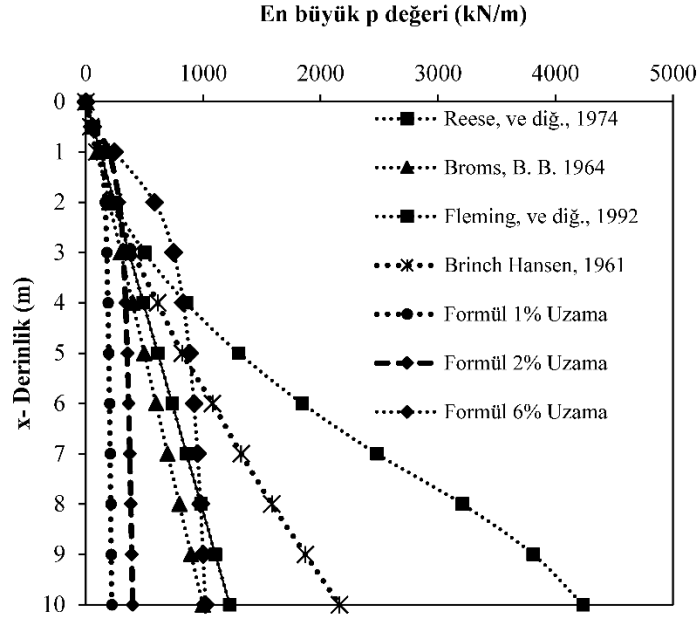
olarak sonlu elemanlar tabanlı formül, ilk 3 metre için diğer formüller ile aşağı yukarı aynı değerleri verse de daha büyük derinlikler için Hamderi'nin p değerlerinde sabitlenme, diğerlerinde ise artış görülmektedir. Hamderi formülünü 1 metre derinliğinde kazık yükleme deneyi ile doğrulamıştır (Meyerhof ve Sastry, 1985). Öte yandan daha büyük derinliklerde kazık direncinin ne olacağını deneysel olarak bulmak pek mümkün değildir. Çünkü tam ölçekli kazık deneylerinde kazığın ilk birkaç metresi esasen yük almaktadır. Daha çok yük verildiğinde kazığın üst kısımları göçme bölgesine geldiğinden, alt kısımların davranışı incelenmeden deney sonlandırılır. Her ne kadar tam ölçekli deneyle kanıtlamak mümkün olmasa da sonlu elemanlar ile elde edilen p - y dağılımının daha gerçekçi olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5. Reese ve diğ., 1984 tarafından verilen p - y eğrilerinin karakteristik görünümü



Şekil 6. Hamderi, 2023 tarafından verilen p - y eğrilerinin karakteristik görünümü



Şekil 7. Hamderi, 2023 tarafından verilen p-y eğrilerinin en büyük değerinin diğer kaynaklarda verilen değerler ile karşılaştırılması

7. SONUÇ

Bu bildiri kapsamında kazıklara ait p-y eğrilerinin bulunmasında kullanılacak sonlu elemanlar yöntemi tabanlı bir formül tanıtılmıştır. Formül içerisinde zemin modülünü doğrudan içermesinden dolayı sınırlı deneylere göre türetilmiş mevcut formüllere göre daha hassastır. Ayrıca mevcut formüllerde kazık derinliğindeki artış ile p değerlerinde daimi bir artış görülmektedir. Halbuki önerilen formülde bu artış belli bir derinlikten sonra sınırlanmaktadır. Mevcut formüllerde kazığın en büyük p değerine değişik derinliklerde hep aynı yatay deplasmanda ulaşılmaktadır. Önerilen formülde ise en büyük deplasmanın oluştuğu deplasman derinlik ile artmaktadır.

KAYNAKLAR

- Brinch Hansen, J. (1961), "The ultimate resistance of rigid piles against transversal forces", Bulletin No. 12, Danish Geotechnical Institute, Copenhagen, Denmark, 5–9
- Broms, B.B. (1964), "Lateral resistance of piles in cohesive soils" J. Soil Mech. Found. Div. Vol 90(2), 27–64.
- Clough, G. W. ve Duncan, J. M. (1991), "Earth pressures. In: Foundation engineering handbook", edited by H. Y. Fang, 223–235, 2nd ed. New York: Chapman and Hall
- Fleming, W.G.K., Weltman, A.J., Randolph, M.F. ve Elson, W.K., (1992), "Piling engineering", Surrey University Press, London
- Hamderi, M. (2021), "Finite element-based coefficient of lateral earth pressure for cohesionless soil" Int. J. Geomech., Vol 21(5), 04021045.
- Hamderi, M. (2023), "Finite Element-Based p-y Curves", Arabian Journal for Science and Engineering", <https://doi.org/10.1007/s13369-023-08121-z>

Meyerhof, G.G. ve Sastry, V.V.R.N. (1985), "Bearing capacity of rigid piles under eccentric and inclined loads" Can. Geotech. J. Vol 22, 267–276.

Reese, L. C. ve Sullivan, W.R. (1980), "A Documentation of Computer Program COM624, Parts I and II, Analysis of Stresses and Deflections for Laterally Loaded Piles Including Generation of p-y Curves", Geotechnical Engineering Software GS80–1, Geotechnical Engineering Center, Bureau of Engineering Research, University of Texas at Austin

Reese, L. C., Cox, W. R. ve Koop, F. D. (1984), "Analysis of laterally loaded piles in sand" Proc., 6th Offshore Technology Conf., Vol 2, Houston, 473–483