



Kazık Gruplarında Eksenel Yük Dağılımının Bulunması için Yeni bir Yöntem

Murat HAMDERİ*

Türk-Alman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İstanbul

hamderi@tau.edu.tr ORCID: 0000-0002-9167-8866, Tel: (216) 332 31 22

Geliş: 30.10.2018, Kabul Tarihi: 28.12.2018

Öz

Literatürde grup kazıklarının eksenel yük dağılımını hesaplayan analitik bir yöntem mevcut değildir. İleri derecede hiperstatik olan bu sistemlerin çözümü bazı nümerik yaklaşımlarla yapılabilmektedir. Uygulamada ise genellikle kazık yükleri eşit alınır ya da kazık yükleri üst yapı modeline eşdeğer yaylar yerleştirilerek hesaplanır. Bu hesaplar radye-zemin teması ile aktarılan kuvveti göz önüne almadıklarından kaba bir yaklaşım sağlarlar. Son zamanlarda kazıklı radye sistemler için zeminin de içinde tanımlanabildiği 3-boyutlu nümerik çözümler kritik projelerde kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemler sıradan projeler için pahalı olmakta ve uzun sürmektedir. Bu pahalı ve uzun süren yaklaşıma alternatif olarak, bu çalışma kapsamında, 3-boyutlu sonlu elemanlar tabanlı bir kazıklı radye temel yük dağılımı formülü tanıtılmış ve formül bir vaka çalışmasına uygulanmıştır. Formül, kazık çapını, boyunu, sıklığını, yanıl ve uç direncini; radye kalınlığını, yayılı yükü ve 5 adet zemin tabakasının zemin modülünü bünyesine almaktadır. Ayrıca, bu formül sayesinde radye-zemin teması ile aktarılan yük de hesaplanabilmektedir. Bu sayede kazıklara gelen yüklerin en az yüzde 20 oranında daha az çıkacağı tahmin edilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kazıklı radye temel, TNO DIANA, eksenel yük, kuvvet, grup etkisi, kazık grupları

* Yazışmaların yapılacağı yazar

Giriş

Büyük şehirlerde yüksek katlı binaların zayıf zeminler üzerine inşasındaki artış nedeniyle, kazıklı-radye temellerin daha ekonomik boyutlandırılması gereği ortaya çıkmıştır. Kazıklı-radye temellerin boyutlandırılması için öncelikle geoteknik mühendisi tarafından tek bir kazığın emniyetle taşıyacağı yük bulunur. Burada kullanılan emniyet katsayısı oldukça yüksek olup 2 ile 3 civarındadır. Üst yapı tasarımcısı emniyetli kazık yükünü tasarımda değişik şekillerde kullanabilir. Eğer yapı görece küçük ise, kazıklara gelen yüklerin eşit dağıldığı kabulü ile kazık başına düşen ortalama yük emniyetli yük ile karşılaştırılır. Daha kritik yapılarda ise, üst yapı modelinde, temel kolonlarının altlarına kazıkları temsil eden yaylar yerleştirilerek, bu yaylardan elde edilen yükler, emniyetli taşıma yükü ile karşılaştırılır ve sonuca varılır. Kolonların altlarına kazıklar yerleştirildiğinden, kazık yerleşimi kolonların yerleşimine genelde çok benzer olmaktadır. Öte yandan, son zamanlarda zemin ile yapının aynı anda modellenmesi ile, kazık yüklerinin kenar kazıklarda yoğunlaştığı ortaya çıkmıştır (Bu durum ayrıntılı olarak açıklanacaktır.). Kazık dağılımı ile ilgili olarak az da olsa literatürde laboratuvar ve saha çalışmaları mevcuttur. Whitaker, 1957 yeniden teşkil edilmiş kil zemin üzerinde yaptığı laboratuvar deneyinde, kazık yüklerinin ortadan kenara doğru giderek arttığını bulmuştur. Sanctis ve Russo, 2008 dairesel tankların kenar kazıklarında yük artışları tespit etmiştir. Katzenbach vd., 2000 Frankfurt'taki Messe-Torhaus binasının altındaki kazıklarda ölçülen köşe kazık yükünün ortadaki kazığın yüküne oranının 3,5 olduğunu bildirmektedir. Mandolini vd., 2005 killi-silt ve kum tabakalarına oturan Garigliano Köprüsünün kazıklarında köşe/orta kazık yük oranını 1,6 olarak vermiştir. Aynı şekilde Shulyat'ev ve Kharichkin, 2009 nehir kenarında alüvyon bir zemine oturan bir binanın temelinde köşe/orta kazık yükü oranını 2,4 olarak vermektedir. Guoliang, vd., 2012 ise siltli-kil ve kum tabakalarında oluşan bir zemin üzerinde 9 kazıklı

yükleme deneyi gerçekleştirmiş ve kenar kazık yüklerinin ortadakinden daha büyük olduğunu bildirmiştir.

Literatürde kazıkların yük dağılımını hesaplayan numerik metotlar bulunmaktadır (Poulos ve Matte 1971, Chow vd., 2001, Small ve Zhang, 2002, Zhu vd., 2017, Ukritchon vd., 2016). Bu metotların icra edilmesi için kodlama gereklidir. Birçok metot araştırma düzeyinde kalmış ve bunlar için kullanıcı dostu ara yüz yazılımı geliştirilmemiştir. Dolayısı ile kritik projelerde, mühendisler kazık yük dağılımını bulmak için maliyetli ve uzun süren sonlu elemanlar yazılımlarına yönelmektedirler. Öte yandan, sonlu elemanlar programında modellenen 120 adet nümerik deneyi kullanarak elde edilmiş, grup kazıkların oturmasını ve yük dağılımlarını veren 2 formül yakın zamanda literatüre geçmiştir (Hamderi, 2018a., 2018b., 2019). Bu formüllerin verdiği sonuçların, sonlu elemanlar programının verdiği sonuçlara yakınlığını gösteren R^2 değeri, 0,98 den daha büyüktür ($R^2=1$, mükemmel uyum). Bu çalışma kapsamında öncelikle kazıklı radye temellerde kenar kazıkların neden daha fazla yük aldıkları bir örnekle anlatılacak ve daha sonra Hamderi, 2019 tarafından önerilen kazık yük dağılımı formülü bir vaka çalışmasına uygulanacaktır.

Materyal ve Yöntem

Kazıklı Radyelerde Yük Dağılımı

Bu bölümde döşeme, kolonlar ve kazıklardan oluşan bir katlı yapıda, kuvvet iletimi esasları MIDAS GTS NX sonlu elemanlar programında modellenecektir. Yapının 1. katındaki 0,3 m kalınlığındaki döşemeye 300 kPa büyüklüğünde yayılı yük etkimekte, bu döşeme de 49 adet kare şeklindeki kolonla desteklenmektedir (Şekil 1). Kolonların alt uçları 1 m kalınlığındaki radyeye bağlanmakta ve radye de 1 m kalınlığındaki kazık başlığına oturmaktadır. Son olarak 49 adet 25 m uzunluğundaki kazık binayı zemine bağlamaktadır. Kazıkların arasındaki zemin tam manası ile kazık başlığı ile temas içindedir. Zemin Mohr-Coulomb zemin modeli ile temsil edilmektedir. Kullanılan zeminin içsel sürtünme

açısı 36° ve kohezyonu ise 5 kPa'dır. Zeminin elastisite modülü ise 25 MPa'dır. Bu sistemde oturma 0.081 m olarak bulunmuştur. Detaylar Şekil 1'de verilmektedir.

Şekil 1'de anlatılan sistemde, kazıklar zeminin içine gömülü 25 m uzunluğunda kirişler olarak modellenmiştir. Şekil 2'deki modelde ise zemin çıkarılarak gömülü kirişlerin yerlerine kare kesitli 1 m x 1 m x 1 m boyutlarında kirişler yerleştirilmiştir. Kirişler alt tabanından düşey ve yatayda sınırlıdır. 1 m x 1 m x 1 m boyutlarındaki kirişler bir çeşit yay olarak görev yapmaktadır. Yaylar ile desteklenen sistemin, yukarıda kazıklar ile desteklenen sistemde bulunan oturmayı yakalaması için, yapıldıkları elastik malzemeye, kN/m^2 boyutunda uygun bir elastisite modülü (E_s) atanmalıdır. Bu değer aşağıdaki formülle bulunabilir.

$$E_s = \frac{\text{Toplam Yük (kN)}}{\text{yay sayısı} \times \text{yay enkesit alanı (m}^2\text{)} \times \frac{\text{yayın boyu (m)}}{1. \text{Sistemin Oturması (m)}} \quad (1)$$

1. sistemde bulunan oturma 0.081 m olduğuna göre

$$E_s = \frac{300 \text{ kPa} \times 20 \text{ m} \times 20 \text{ m}}{49 \times 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}} \times \frac{1 \text{ m}}{0.081 \text{ m}} = 30234 \text{ kN/m}^2 \quad (2)$$

olarak bulunur. Uygulamada kullanılan zemin yatak katsayısı ise, E_s değeri yay uzunluğuna bölünerek bulunabilir:

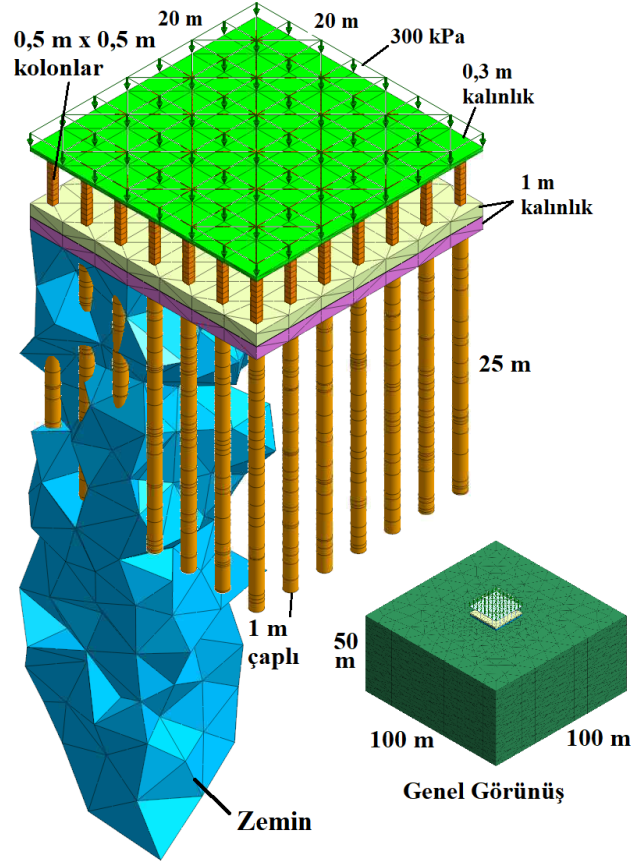
$$\text{Zemin Yatak Kat.} = \frac{30234 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}}{1 \text{ m}} = 30234 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \quad (3)$$

Bu değer üst yapı tasarımcılarının geoteknik mühendislerinden yay sabiti olarak kullanmak üzere talep ettiği değerdir.

Yük Dağılımlarının Karşılaştırılması

Kazıkların zeminin içine giren kirişlerle modellendiği sistemde, kolonların üzerine gelen yükler Şekil 3a.'da gösterilmiştir. Buna göre 2622 kN'luk bir yük merkez kolonda ve 1754 kN'luk daha küçük bir yük ise köşe kolonda oluşmaktadır. Kenar orta kolonda oluşan yük (2147 kN) bu iki değer arasında. Şekil

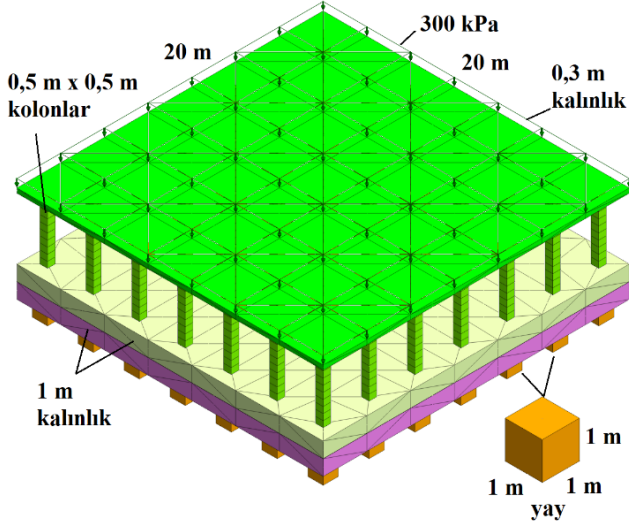
3b.'de ise yaylı sistemdeki kolon yükleri gösterilmiştir. Burada bulunan yükler kazıklı sistemdekilere çok yakın çıkmışlardır. Buradan, bir yapının, zeminin içine giren kirişlerle (kazıklı sistem) ya da eşdeğer yaylarla (yaylı sistem) modellenmesinin, üst yapı kolonlarındaki yük dağılımını etkilemediği söylenebilir.



Şekil 1. Döşeme, kolonlar ve kazıklar arasındaki kuvvet iletim esaslarını inceleyen sonlu elemanlar modelinin detayları

Kazıklı sistemde oluşan kazık yükleri Şekil 3c'de gösterilmiştir. Buna göre en büyük kazık yükü (5246 kN) köşede ve en küçük kazık yükü (1201 kN) ise merkez kazıkta oluşmaktadır. Kenar orta kazıkta oluşan yük (3161 kN) bu iki değer arasında. Şekil 3d.'de ise yaylı sistemdeki kazık yükleri gösterilmiştir. Burada bulunan yay yükleri ise biri birlerine çok yakındır (2439 kN ile 2493 kN arasında). Buna göre yaylı sistemde, üniform yaylı yük dağılımı altında üniform yay yükleri çıktığından bahsedebiliriz. Kenarlarda büyük, içerlerde ise daha küçük yük oluşması durumu laboratuvar ve sahada ölçülmüş

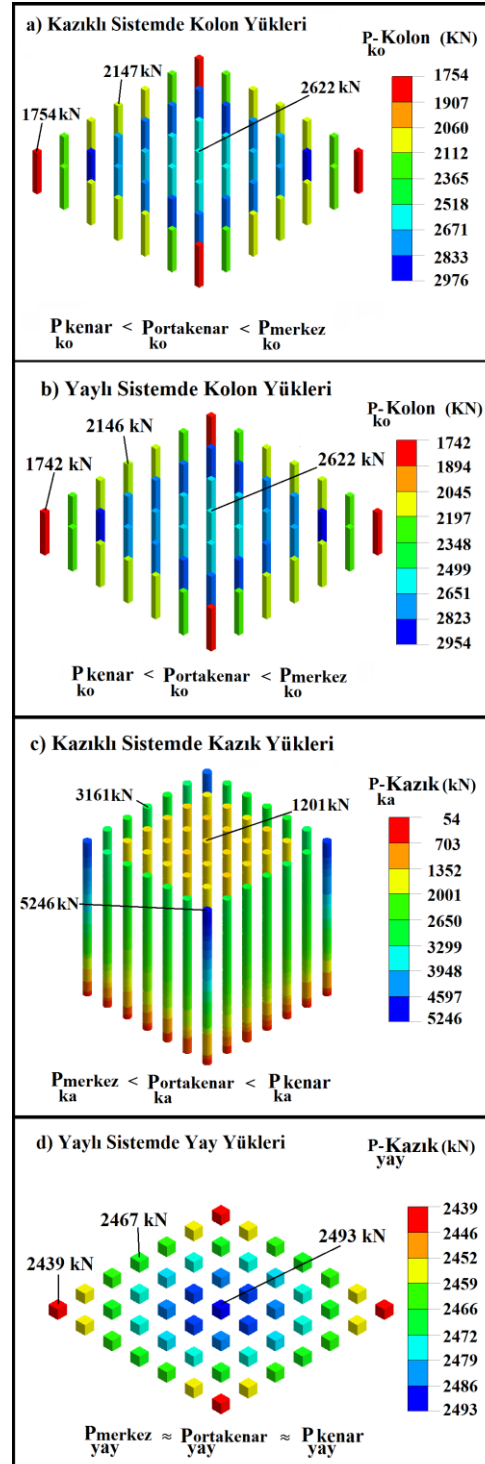
birtakım deneylere uyum göstermektedir (Whitaker, 1957, Sanctis ve Russo, 2008, Katzenbach vd., 2000, Mandolini vd., 2015, Shulyat'ev ve Kharichkin, 2009, Guoliang, vd., 2012).



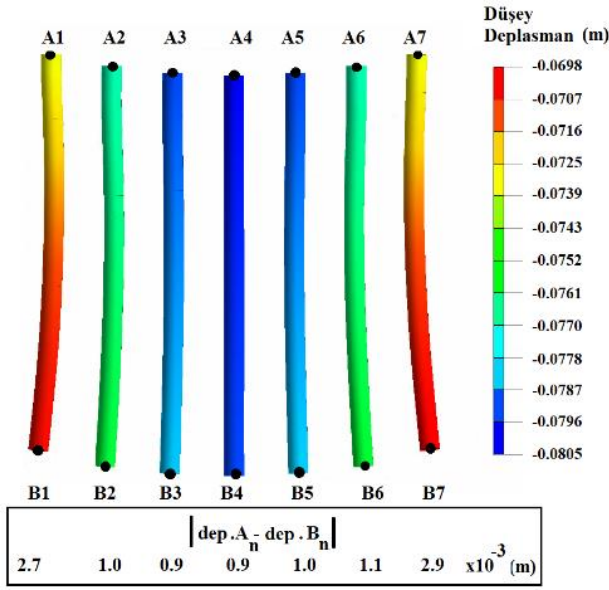
Şekil 2. Sistemin kazık-zemin yerine eşdeğer yaylarla modellenmiş hali

Öte yandan kazıklarda oluşan yük dağılımının neden kolonlardaki gibi olmadığı araştırılmalıdır. Bunun için Şekil 4'de köşegen boyunca sıralanan kazıklar incelenmelidir. Şekil 4'e göre ortadaki kazık ortalama 0.081 m kenardaki kazık ise ortalama 0.075 m düşey yer değiştirmektedir. Kazıkların üzerinde oluşan basınç kuvvetinin, kazığın iki ucu arasındaki bağıl yer değiştirmenin artması ile artacağını Hooke yasasını kullanarak kolaylıkla söyleyebiliriz. Bağıl yer değiştirmeler incelendiğinde köşedeki kazığın 2,7 mm, ortadaki kazığın ise 0.9 mm bağıl yer değiştirdiği ortaya çıkar. Köşe kazıkta bağıl yer değiştirme fazla olduğundan fazla yük almakta, orta kazık ise daha az bağıl yer değiştirme yaptığından daha az yük almaktadır. Bir diğer deyişle kenar kazıkların alt uçları ortalara göre zeminde daha az ilerledikleri ve üst uçları da rijit radye nedeniyle ortadaki kazıkların üst uçlarına göre yaklaşık aynı miktarda hareket ettiği için (zemin kil olsun kum olsun fark etmez) kenar kazıklar sıkışmakta ve dolayısı ile üzerlerine daha büyük yük almaktadırlar. Kenar kazıklarda daha fazla kuvvet oluşması radyenin rijitliği ile doğrudan alakalıdır. Üniform olmayan yük dağılımının

dengelemesi için Messeturm kulesinde kazıkların boyları dışarıdan içeriye doğru artmaktadır (Katzenbach vd., 2000, Kumar vd., 2016).



Şekil 3. Sistemlerin aksel yük karşılaştırması: a) kazıklı sistem-kolonlar, b) yaylı sistem-kolonlar, c) kazıklı sistem-kazıklar, d) yaylı sistem-yaylar

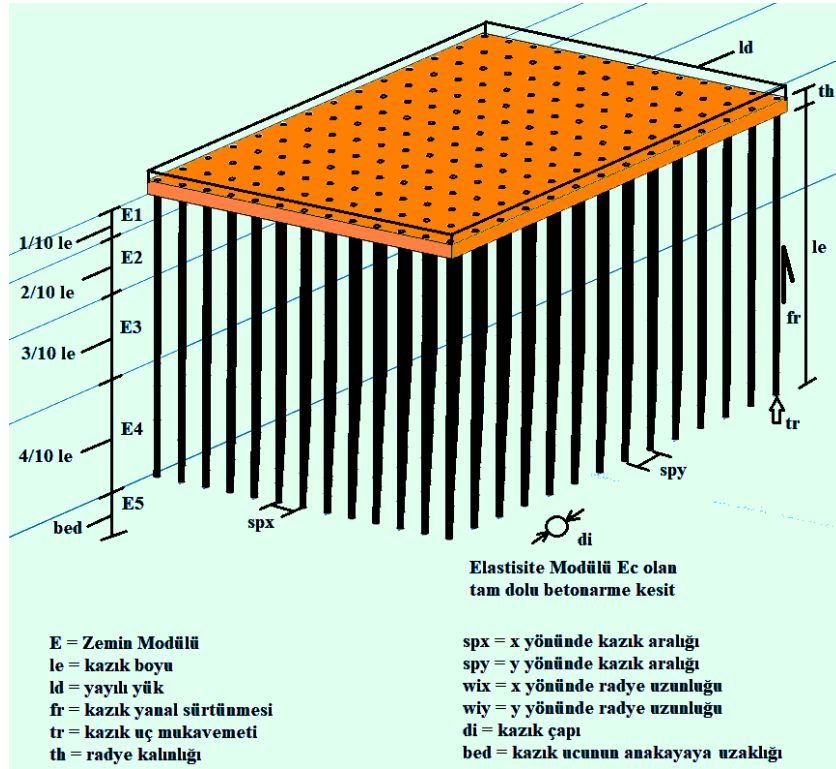


Şekil 4. Köşegen boyunca sıralanan kazıkların total ve bağıl yer değiştirmeleri

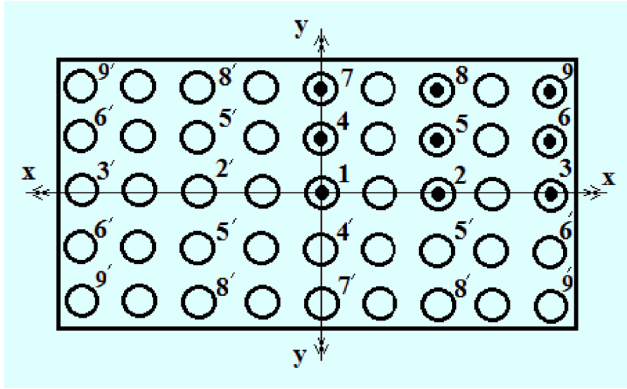
Kazıklı Radye Temel Yük Dağılımı Formülü

Hamderi (2019) tarafından önerilen kazıklı radye

temel yük dağılımı formülü, dikdörtgen şeklindeki radyenin eninin ve boyunun (w_x , w_y), kalınlığının (th); kazıkların çaplarının (di), boylarının (le), aralıklarının (spx , spy); radyeye etkiyen üniform yayılı yükün (ld); 5 adet zemin tabakasının zemin modülünün (E_1 , E_2 , E_3 , E_4 , E_5), en büyük kazık yanal direncinin (fr), en büyük kazık uç direncinin (tr) kazık yük hesabı da kullanılmasına olanak vermektedir. Bu parametrelerin analitik gösterimi Şekil 5'de verilmektedir. Dikdörtgen şeklindeki kazıklı radyede, formülün yükü hesaplayabildiği kazık lokasyonları 1'den 9'a kadar numaralanarak Şekil 6'da verilmiştir. Sistemdeki simetriden dolayı kazık yüklerinde de simetri söz konusudur. Simetrik yüklü kazık numaralarına <> işareti eklenmiştir. Simetrik kazıklarla birlikte dikdörtgen şeklindeki bir radyenin 25 ayrı noktasında kazık yükü bulunabilir. Bu kazıklar köşeleri, kenarları ve ortaları taramaktadır. Aralarındaki diğer kazık yükleri formülle bulunanların arasında bir değerdedir.



Şekil 5. Kazıklı radye temel oturma formülünün parametrelerinin analitik gösterimi (Hamderi, 2019'den yeniden inşaa edilerek.)



Şekil 6. Kazık yük dağılımının hesaplandığı lokasyonlar (Hamderi, 2019'den yeniden inşa edilerek.)

Sözü edilen kazık formülü aşağıdaki verilmiştir (Hamderi, 2019):

$$L_n = L_{bn} \cdot \left(\frac{sp_x \cdot sp_y + u_1}{u_2}\right)^{a_n} \cdot \left(\frac{l_e + u_3}{u_4}\right)^{b_n} \cdot \left(\frac{d_i + u_5}{u_6}\right)^{c_n} \cdot \left(\frac{wi_x \cdot wi_y}{u_7}\right)^{d_n} \cdot \left(\frac{0.1E_1 + 0.2E_2 + 0.3E_3 + 0.4E_4 + u_8}{u_9}\right)^{e_n} \cdot \left(\frac{E_5}{u_{10}}\right)^{f_n} \cdot \left(\frac{l_d}{u_{11}}\right)^{g_n} \cdot \left(\frac{f_r}{u_{12}}\right)^{h_n} \cdot \left(\frac{t_r}{u_{13}}\right)^{i_n} \cdot \left(\frac{bed}{u_{14}}\right)^{j_n} \cdot \left(\frac{th}{u_{15}}\right)^{k_n} \cdot \left(\frac{E_c}{u_{16}}\right)^{l_n} \quad (4)$$

Burada n 0 ile 9 arasında bir indistir. L_1, L_2, \dots, L_9 değerleri ise Şekil 6'de verilen kazık yükleridir. Toplam yükün kazıklar ve radye-zemin teması vasıtasıyla taşındığı farz edilirse, L_0 kazıklar vasıtasıyla taşınan yükün yüzdesini verir. $a_n, b_n, c_n, d_n, e_n, f_n, g_n, h_n, i_n, j_n, k_n$ and l_n birimsiz eşitlik katsayıları (Tablo 1), L_{bn} ise kN biriminde olup temel yük sabiti olarak adlandırılır (Tablo 2). Birimsiz eşitlik katsayıları regresyon analizi ile elde edilmektedir. u_1, u_2, \dots, u_{16} ise birimli sabitleri gösterir (Tablo 3). Formülde kullanılan parametre aralıkları Tablo 4'de verilmiştir. Bu aralıklar aynı zamanda formülün en sonuç verdiği aralık olarak da tanımlanabilir.

Tablo 1. Birimsiz eşitlik katsayıları (Hamderi, 2019)

n	a_n	b_n	c_n	d_n	e_n	f_n
0	-0.1942	0.1205	0.6728	0.0074	-0.2582	0.0688
1	1.006	0.1003	0.5915	0.1262	-0.1703	0.0834

2	1.0144	0.0767	0.5126	0.1406	-0.1972	0.1185
3	0.844	0.0907	1.1049	-0.0141	-0.3557	0.0274
4	1.0077	0.0419	0.5544	0.1244	-0.2185	0.1291
5	1.0498	0.0303	0.3481	0.1567	-0.2206	0.1495
6	0.8689	0.1016	1.0447	-0.0017	-0.3065	0.014
7	0.8478	0.0966	1.051	-0.018	-0.3285	0.0104
8	0.8541	0.0581	0.9959	0.0147	-0.271	-0.0083
9	0.7514	0.0739	1.4738	-0.1046	-0.3815	-0.0938

n	g_n	h_n	i_n	j_n	k_n	l_n
0	0.0279	0.0202	0.0108	-0.0066	0.017	0.0514
1	0.9645	0.0232	0.0162	0.0387	-0.2871	-0.0146
2	0.9768	0.0361	0.0209	-0.0395	-0.2585	-0.0355
3	0.8917	0.0333	0.0338	-0.0354	0.2121	0.1072
4	0.982	0.0116	0.0118	-0.0697	-0.2567	-0.0238
5	0.9999	0.0136	0.0321	-0.0911	-0.2156	-0.0618
6	0.9053	0.0151	0.0344	-0.0789	0.314	0.091
7	0.895	0.0209	0.0425	-0.0296	0.2363	0.1101
8	0.9204	0.0131	0.0305	-0.0586	0.3204	0.0952
9	0.9098	0.0461	0.0521	-0.0712	0.6583	0.1964

Tablo 2. L_{bn} Temel yük sabiti (Hamderi, 2019)

n	0	1	2	3	4
L_{bn} [kN]	0.71	1257.55	1254.05	2007.83	1274.06

n	5	6	7	8	9
L_{bn} [kN]	1370.49	1815.1	2092.62	1875.07	2510.44

Tablo 3. Birimli sabitler (Hamderi, 2019)

sabit	u_1	u_2	u_3	u_4
değer	1	9	20	20
birim	[m ²]	[m ²]	[m]	[m]

sabit	u_5	u_6	u_7	u_8
değer	1	1	400	10000
birim	[m]	[m]	[m ²]	[kN/m ²]
değer	10000	10000	250	500
birim	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m]

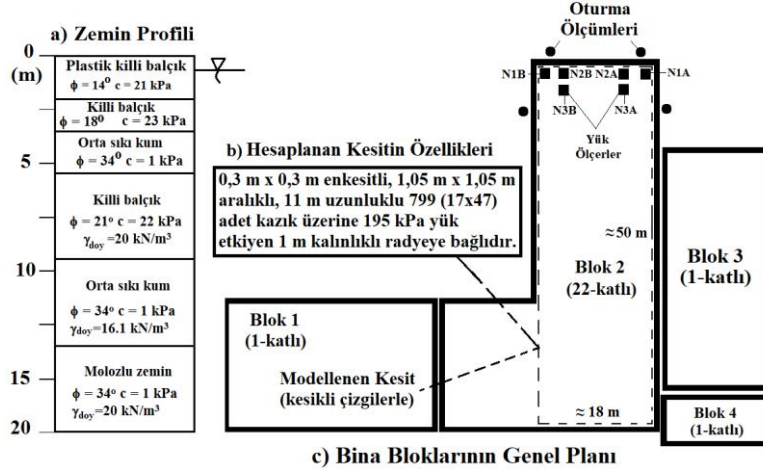
sabit	u_{13}	u_{14}	u_{15}	u_{16}
değer	1000	30	1	25000
birim	[kN]	[m]	[m]	[MPa]

Tablo 4. Oturma formülünün en iyi sonuç verdiği parametre aralığı (Hamderi, 2019)

No	Tanım	Sem.	Aralık	Birim
1	x yönündeki kazık aralığı	s_{px}	(1-5)	m
2	y yönündeki kazık aralığı	s_{py}	(1-5)	m
3	kazık boyu	le	(5-30)	m
4	kazık çapı	di	(0.3-1.2)	m
5	x yönündeki radye uzunluğu	w_{ix}	(15-50)	m
6	y yönündeki radye uzunluğu	w_{iy}	(15-50)	m
7	kazık elastisite modülü	E_c	(10-50) x 10^3	MPa
8	Kazıkların çevresindeki zemin modülü	E_1, E_2, E_3, E_4	(10-600)	MPa
9	Kazıkların altındaki zemin modülü	E_5	(10-600)	MPa
10	Yayıllı yük	ld	(10-800)	kPa
11	Kazık yanal direnci	fr	(100-1000)	kN/m
12	Kazık uç mukavemeti	tr	(50-2000)	kN
13	Kazık ucunun ana kayaya olan uzaklığı	bed	(20-100)	m
14	Radye kalınlığı	th	(0.5-3.0)	m

Formülün Bir Vaka Çalışmasına Uygulanması

Shulyat'ev ve Kharichkin, 2009 Moskova'nın Pavshinsk Nehri bölgesinde balçık bir zemine oturan 22 katlı bir konutun inşaatı sırasında ölçülen kazık yüklerini bildirmektedir. Kazık yükleri 2,5 sene boyunca ölçülmüştür. 22 katlı bina, birbiri yanına yapılmış 4 bloğun ikincisidir. Blok 1 30 katlı, Blok 3 ve 4 tek katlı binalardır. L-şeklindeki 22 katlı bina 1037 adet 0.3 m x 0.3 m prekast betonarme kazığa oturmaktadır. Bu çalışmada L-şeklindeki binanın 18 m x 50 m boyutlu, içinde 799 tane (17 x 47) kazık bulunan kısmındaki yük dağılımı formül yardımıyla bulunacaktır (Şekil 7). Formülün bu çalışmaya uygulanışı ise Tablo 5'de özetlenmekte ve bu uygulama adımları da aşağıda sıralanmaktadır.



Şekil 7. Ele alınan kazıklı radye sisteminin özellikleri (Shulyat'ev ve Kharichkin, 2009)

Adım 1 (fr'nin tayini): Referans çalışmada (Shulyat'ev ve Kharichkin, 2009), 0,3 m x 0,3 m boyutlarında prefabrik betonarme kazıkların birim boyunun taşıyacağı en büyük yanal kuvvet bildirilmemektedir. Bu değer Budhu, 2010'da prekast kazıklar için verilen ortalama değerler

kullanılarak 200 kN/m (metrede 25 ton) olarak hesaplanmıştır (Tablo 5, Kolon 1).

Adım 2 (tr'nin tayini): Uç kazığı olarak tasarlanmamış 0,3 m x 0,3 m boyutlarındaki kazıklar için küçük bir uç direnci girilmiştir (50 kN) (Tablo 5, Kolon 2).

Adım 3-4 (spx ve spy'nin tayini): Kazıkların aralıkları her iki yönde de 1,05 m'dir (Tablo 5, Kolon 3-4).

Adım 5-6 (le ve di'nin tayini): Kazık uzunluğu le 11 m olarak referans çalışmada verilmiştir. 0,3 m x 0,3 m boyutlarındaki kazık kesiti buna alanca eşdeğer 0.33 m çaplı daire kesiti olarak girilmiştir (Tablo 5, Kolon 5 ve 6).

Adım 7-8 (wix ve wiy'nin tayini): Dikdörtgen şeklindeki raydenin eni ve boyu 49,3 ve 17,8 m'dir (Tablo 5, Kolon 7 ve 8).

Adım 9-10 (bed ve th'nin tayini): Kazık uçlarının anakayaya olan uzaklığı (bed) bilinmemektedir. Bu değer 50 m olarak alınmıştır. Kazıkların bağlı olduğu radye temelin kalınlığı (th) 1 m'dir (Tablo 5, Kolon 9 ve 10).

Adım 11: Tablo 5'de kazık çevresindeki ortalama zemin modülüne yer verilmiştir. Bu değer E1, E2, E3, E4 zemin modüllerinin ağırlıklı ortalamasıdır (Tablo 5, Kolon 11).

Adım 12-16 (E1, E2, E3, E4, E5'in tayini):

Bu kazıkların değişik derinliklerde karşılaştıkları zeminlerin elastisite modüllerini temsil eder (Şekil 5). Shulyat'ev ve Kharichkin, 2009 bu değerlerin tespiti için kullanılabilecek herhangi bir laboratuvar veya saha deneyi sonucu bildirmemiştir. Öte yandan binanın inşası sırasında ölçülen oturma değerlerini kullanarak da zemin modülü tersten hesaplanabilir. Hamderi, 2019 bunun için bu sistemi TNO-DIANA programında 3-Boyutlu olarak modellemiş, sistemdeki oturma değerleri,

ölçülen değere gelinceye kadar zemin modülünü değiştirmiştir. Bunun sonucunda görünen oturma modülünü ortalama 55 MPa olarak bulmuştur (Tablo 5, Kolon 12-16). Ölçülen oturma değerlerinden ters hesapla elde edilen zemin modülü, balçık bir zemin için fazlaymış gibi algılanabilir. Ancak bu modül sadece 1 sene sonraki saha oturma ölçümlerine göre hesaplanmıştır. Eğer Moskova nehrinin kenarında bulunan ve konsolidasyon oturmasına tabi olan binanın 10 sene sonraki oturma değeri elimizde olsa idi, hesaplanan bu modül daha küçük çıkacak ve hesaplanan kazık yükleri de farklı bulunacaktı.

Adım 17 (ld'nin tayini): Referans makalede radye basıncı hariç ortalama yapı basıncı 195 kN/m² olarak verilmiştir (Kolon 17).

Adım 18 (Ec'nin tayini): Kazık betonunun elastisite modülü verilmemiştir. Bu değer 25 GPa olarak girilmiştir (Kolon 18).

Adım 19 (L₀): Eşitlik 4'de verilen formülün içinde Tablo 1'de verilen n=0 katsayıları kullanılarak kazıkların yük taşıma yüzdesi L₀ bulunur. Vaka çalışmasında toplam yükün % 79'u kazıklarca taşınmış, geri kalan % 21'lik bölümü radye zemin arasındaki temas vasıtası ile taşınmıştır (Kolon 19).

Adım 20-28 (L₁₋₉): Eşitlik 4'de verilen formülde Tablo 1'de verilen n=1,..., n=9 katsayıları kullanılarak, Şekil 6'da numaraları verilen kazıklara ait L₁,..., L₉ yükleri bulunur (Kolon 20-28).

Tablo 5. Kazık Yük Dağılımı Hesabının Adımları

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
fr - En bü. yanal diren. (kN/m)	tr - En bü. uç diren. (kN)	spx - kaz. ara. @x (m)	spy - kaz. ara. @y (m)	le - kaz. uzun. (m)	di - kaz. çapı (m)	wix - radye eni (m)	wiy - radye uzun. (m)	bed - dip. derin. (bed) (m)	th - rad. kalı. (m)	kaz. ken. ort. zem. mod. (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E3 (MPa)
200	50	1.05	1.05	11.0	0.33	49.3	17.8	50	1.0	55000	55	55	55

15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
E4 (MPa)	E5 - kazık altı zemin mod. (MPa)	ld - yük (kPa)	Ec - kazık elas. mod. (GPa)	L0 - kazık. taş. yük. %	Kazık Yükleri (kN)								
					Kazık No 1	Kazık No 2	Kazık No 3	Kazık No 4	Kazık No 5	Kazık No 6	Kazık No 7	Kazık No 8	Kazık No 9
55	55	20	25	79%	250	227	308	231	215	284	317	309	321

Vaka Çalışmasının Sonuçlarının Yorumlanması

Shulyat'ev ve Kharichkin, 2009 binanın yapımı sırasında 2 köşe (N1A, N2B), 2 kenar (N2A, N2B) ve 2 iç kazık (N3A, N3B) üzerinde oluşan aksel yükleri rapor etmiştir (Şekil 7). Bu kazıkların yerleri ikişer ikişer simetrik ve bu yüklerin ortalamaları alınmıştır. Genel olarak köşedeki kazıkta en büyük, kenar kazıkta daha küçük ve orta kazıkta ise en küçük yük ölçülmüştür (Tablo 6). Hamderi, 2019 Shulyat'ev ve Kharichkin, 2009' in çalışmasını TNO-DIANA programının kazık yükü dağılımını hesaplamadaki performansını değerlendirmek için kullanmıştır. Bu çalışma kapsamında ise TNO-DIANA programından ve formülden çıkan kazık yükleri, ölçülmüş kazık yükleri ile karşılaştırılmıştır (Şekil 8). Karşılaştırma sonucunda formül ile ve TNO-DIANA ile bulunan kazık yüklerinin köşe kazık için çok benzer çıktığı görülmektedir (%7 fark) (Şekil 8a). İç ve kenar kazıklarda ise formül ve TNO-DIANA programında elde edilen kazık yüklerinin ortalama % 40 oranında daha büyük çıktığı görülmektedir. Bulunan bu değerlerin geoteknik mühendisliğindeki yaklaşıklık sınırları içinde bulunduğu düşünülmektedir.

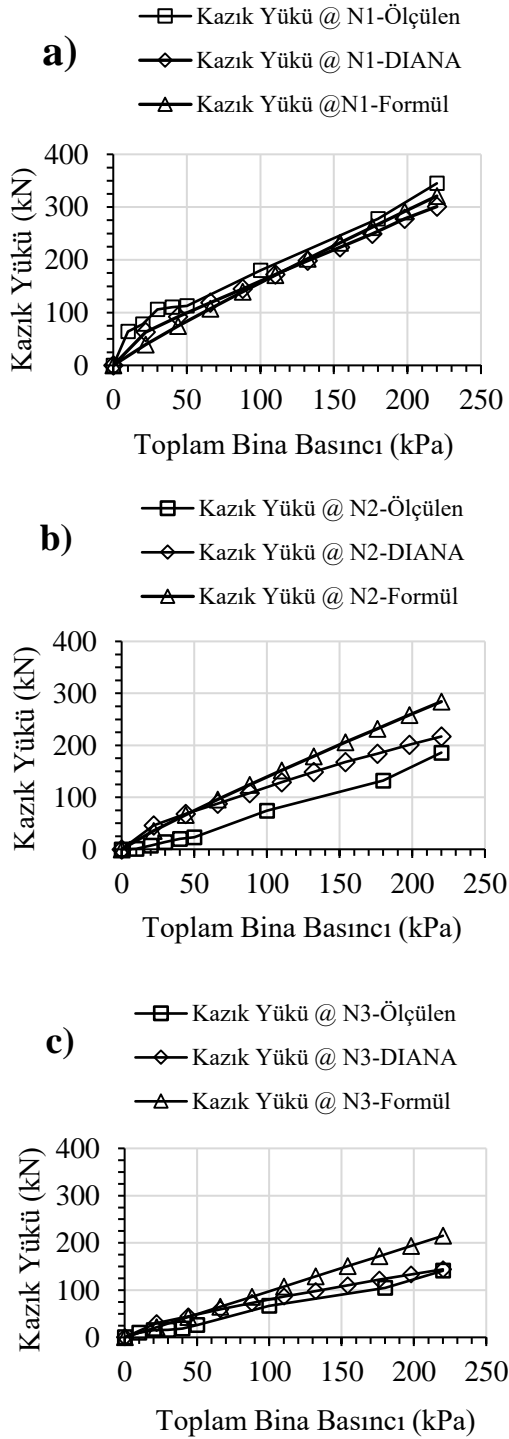
Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışma kapsamında yapı ağırlığının kazıklar üzerindeki dağılım mekanizması incelenmiş, bu konuda 3-Boyutlu sonlu elemanlar analizi tabanlı bir formül tanımlanmış ve bu formül bir vaka çalışmasına uygulanmıştır. Kazık yük dağılımı formülü kazık çapını, boyunu, sıklığını, yanal sürtünme ve uç direncini; radye kalınlığını, yayılı yükü ve 5 adet zemin tabakasının zemin modülünü bünyesine almaktadır. Yapılan bu çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- Tanıtılan formül, kazıklı radyelerdeki yük dağılımını hesaplayan literatürdeki yegâne formüldür.
- Formül bir vaka çalışmasına uygulanmıştır ve çıkan sonuçlar, ölçülen değerlere Geoteknik açıdan kabul edilebilir yakınlıkta bulunmuştur.
- Gerek formülden çıkan sonuçlar, gerekse deneysel sonuçlar, kenardaki kazıkların iç

kazıklardan daha fazla yük aldığını göstermektedir. Dolayısı ile ilk bakışta kazık boyunun daha olumsuz sonucu verecek olan kenar kazık yüklerine göre seçilmesi gerektiği sonucuna varılır. Öte yandan, kazıkların taşıma güçleri hesaplanırken güvenlik katsayısı 3 alındığından kazık hesabında bir "aşırı tasarım" durumu söz konusudur. Bu tür bir aşırı tasarımı biraz olsun normalleştirmek için kazık boyunun, sayıca az üzerindeki yükü fazla olan kenar kazıklara göre değil de, sayıca fazla üzerindeki yükü az olan iç kazıklara göre boyutlandırılmasına izin verilmelidir.

- Birçok yönetmelikte tüm yükün kazıklarca taşındığı, zemin radye teması vasıtasıyla yük taşınmadığı kabul edilmektedir. Halbuki birçok sistemde yükün ortalama % 80'i kazıklar tarafından taşınmaktadır. Geriye kalan % 20'lik kısmı hesaba katılmadığından bir aşırı tasarım söz konusudur. Önerilen formül, kazıkların taşıdığı yükü de hesapladığı için bu tür bir aşırı tasarımın giderilmesinde fayda sağlayacaktır.
- Tek katlı yapının 1. katına her ne kadar üniform yük etkimiş de olsa, temelin kenarlarına, kolonlardaki üniform olmayan yük dağılımdan dolayı daha az yük etkimiştir. Nitekim bu yaylı sistemde yay kuvvetlerinin - ufak bir fark da olsa- kenarda az çıkmasına neden olmuştur. Kazıklı sistemde ise kazıkların alacağı yükü, kazıkların bağlı oturması kontrol etmiş ve kolonların üniform olmayan yük dağılımının etkisi pek hissedilmemiştir.
- Bu çalışmada sunulan yöntemin kazıklı temellerdeki kazık yükü dağılımlarının bulunmasında pratik ve güvenilir bir araç olacağı düşünülmektedir.



Şekil 8. Formülden, TNO-DIANA'dan elde edilen kazık yüklerinin Shulyat'ev ve Kharichkin, 2009'nin bildirdiği yüklerle karşılaştırılması, a) N1 köşe kazığı, b) N2 kenar kazığı, c) N3 İç Kazığı

Tablo 6. Vaka Çalışmasında kaydedilen kazık yükleri (Shulyat'ev ve Kharichkin, 2009)

Yük (kPa)		Kazık Yükleri (kN)		
		N1	N2	N3
0 kPa	A	0		0
	B		0	0
	Orta.	0	0	0
10 kPa	A	64		18
	B		1	1
	Orta.	64	1	9.5
20 kPa	A	78		24
	B		7	7
	Orta.	78	7	15.5
30 kPa	A	106		1
	B		14	31
	Orta.	106	14	16
40 kPa	A	110		3
	B		20	34
	Orta.	110	20	18.5
50 kPa	A	113		15
	B		23	37
	Orta.	113	23	26
100 kPa	A	180		58
	B		74	75
	Orta.	180	74	66.5
180 kPa	A	278		86
	B		132	123
	Orta.	278	132	104.5
195 kPa	A	345		135
	B		186	147
	Orta.	345	186	141

Soldaki Kazıklar: N1A Köşe, N2A Kenar, N3A İç
Sağdaki Kazıklar: N1B Köşe, N2B Kenar, N3B İç
Aynı rakamı içeren kazıklar simetrik ve ortalamaları alınmıştır.

Kaynaklar

- Budhu, M., 2010. Soil Mechanics and Foundations. 3rd ed. John Wiley & Sons Inc.
- Bowles, J. E., (1997). Foundation Analysis and Design., McGraw-Hill Inc., 5th edition.
- Chow, Y.K., Yong, K.Y., and Shen, W. Y. (2001). "Analysis of Piled Raft Foundations Using a Variational Approach" Int. J. of Geomechanics, 1(2), 129-147.
- Diana User's Manual, (2014). Release 9.5, TNO DIANA BV, Netherlands.
- Guoliang, D., Saldago R., Gong W., and Zhang, Y., (2012). Load tests on full-scale bored pile groups. Canadian Geotechnical Journal, 49, 1293-1308, Canada
- Katzenbach, R., Arslan, U., and Moormann C., (2000). Piled raft foundation projects in Germany, Design Applications of Raft Foundations, 323-392, Thomas Telford, London
- Hamderi, M., (2018a). Comprehensive Group Pile Settlement Formula based on 3D Finite Element Analyses, Soils and Foundations, Tokyo, 58(1), 1-15, Japan
- Hamderi, M., (2018b). Kazıklı radye temellerin oturma tahmini için yeni bir yöntem, DÜMF Mühendislik Dergisi, 9(2), 881-893, Turkey
- Hamderi, M., (2019). New Approach to Pile Load Estimation, Int. J. of Geomechanics, ASCE, Kabul Tarihi: 14.09.2018, USA
- Mandolini, A., Russo, G., and Viggiani, C., (2005). Pile foundations: Experimental investigations, analysis, and design, Proceedings of the Sixteenth International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 177-213, Osaka, New Press
- Midas GTS NX User's Manual, http://manual.midasuser.com/en_common/GTS%20NX/150/GTX.htm
- Poulos, H.G., and Mattes, N. S., (1971). Settlement and Load Distribution Analysis of Pile Groups, Geomechanics J., 18-28.
- Sanctis, L., and Russo, G. (2008). Analysis and Performance of Piled Rafts Designed Using Innovative Criteria, J. of Geotech. and Geoenvironmental Eng., 134(8), 477-493.
- Shulyat'ev, O. A., and Kharichkin, A. I., (2009). In-situ measurement of pile-to-pile load distribution in foundations, Soils Mechanics and Foundation Engineering, 46(6), 239-246.
- Small, J.C., and Zhang, H.H., (2002). Numerical investigations of pile load distribution in pile group vertical loading foundation subjected to vertical load and large moment, Int. J. of Geomechanics, ASCE, 2(1), 29-45, USA
- Ukritchon, B., Faustino, J.C, and Keawsawasvong S., (2016). Behavior of piled raft foundations under lateral and vertical loading, Geomechanics and Engineering, 10(5), 577-598.
- Whitaker, T., (1957). Experiments with model piles in groups, Geotechnique 7, 147-165.
- Zhu, M., Zhang, Y., Gong, W., Wang, L., and Dai, G., (2017). Generalized Solutions for Axially and Laterally Loaded Piles in Multilayered Soil Deposits with Transfer Matrix Method, Int. J. of Geomechanics, ASCE, 17(4), USA.

New method for estimating the pile axial loads in piled-rafts

Extended abstract

In the current literature, there is yet no analytical method offered for calculating the axial load distribution of the group piles. The main reason is that such systems are highly hyperstatic. These systems can be analyzed using some numerical approaches. In practice, pile loads are usually assumed to distribute equally along the raft. Alternatively, the distribution is calculated using structural finite element programs in which the piles are introduced as spring elements. The latter provides a rough estimation because it does not account for the force transmitted via raft-ground contact. Recently, in critical projects, 3-dimensional numerical approaches have been introduced to analyze piled-raft systems. However, these methods are expensive and cumbersome for ordinary projects. As an alternative, in this study, a 3-dimensional finite element based pile load distribution formula is introduced and applied to a case study. The group pile load formula allows the input of the dimensions of the rectangular raft (w_x , w_y); the diameter (d_i), length (l_e) and spacing of piles (s_{px} , s_{py}); vertical uniform pressure (l_d); soil moduli up to 5 layers (E_1 , E_2 , E_3 , E_4 , E_5); ultimate pile-soil friction (f_r) and the pile-tip resistance (t_r). The formula is capable of calculating pile loads at 25 different locations. Additionally, the portion of load carried by the piles as well as through the raft-soil contact can be estimated. By this way, at least a 20 % reduction in amount of piles can be achieved.

There is a small number of laboratory and field studies in the literature related to pile load distribution. Whitaker, 1957 conducted laboratory experiments on reconstituted clay soil and found that the pile loads gradually increased towards the side. Sanctis and Russo 2008 identified load increases in the edge piles of circular tanks. Katzenbach et al., 2000 reported that the corner pile load measured in piles manufactured in the Frankfurt clay at the bottom of the Messe-Torhaus building in Frankfurt was 3.5 times that of the central pile. Mandolini et al., 2005 reported the corner to middle pile load ratio of the Garigliano Bridge as 1,6. In the same way, Shulyat'ev and Kharichkin report the corner to middle pile load ratio as 2.4 at the base of a building seated on an alluvial ground near the river. Guoliang, et al., 2012 carried out 9 piled loading

tests on a raft composed of silty-clay and sand layers and reported that lateral pile loads were larger than the center.

To investigate the pile load transfer, two different versions of a one-story-structure composed of columns, slabs and a piled-raft have been modeled in MIDAS GTS NX program. In the first model (embedded beam model), the piles were modeled with beam elements embedded into soil. In the second model (spring element model), the piles have been replaced with spring elements, in which the modeling the soil is ignored. In both models, the largest column load developed in the center and the smallest column load was in the corner. The ranges of column load values developed in both models were similar. In the spring element model, the pile load distribution was quite uniform, whereas in the embedded beam model, the pile load was the greatest in the corner, the smallest in the center. This has been attributed to the fact that the piles at the corners have limited mobility due to a smaller settlement on the sides, which leads to elevated compressive loads on side piles.

In addition, the formula has been applied to a case study by Shulyat'ev, and Kharichkin, 2009. The application steps of the formula have been explained in details. It has been found out that the formula could predict the pile load distribution in an acceptable accuracy.

The following conclusions can be drawn from the study:

- *The offered formula is the only formula in the literature, which calculates the pile load distribution in piled-rafts.*
- *The reliability of the formula was investigated by applying it to a case study and it was concluded that the formula produces geotechnically acceptable results.*
- *In most piled-raft systems, piles carry about 80% of the building load. However, in many building codes, it is dictated that the piles should carry the entire building load excluding the part carried by raft-ground contact. This leads to an over-design. The proposed formula will be useful in eliminating such over-designs, because one can accurately calculate the load carried by the raft-ground contact. However, the codes should still adopt to the new way of calculation pile loads. It is considered that the method presented in this study will be a practical and reliable tool for estimating the pile load distributions of piled-rafts.*

Keywords: *Pile-raft foundation, TNO DIANA, axial load, force, group effect, pile groups*