



Kazıklı radye temellerin oturma tahmini için yeni bir yöntem

Murat HAMDERİ*

Türk-Alman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İstanbul

hamderi@tau.edu.tr ORCID: 0000-0002-9167-8866, Tel: (216) 333 31 22

Geliş: 18.12.2017, Kabul Tarihi: 16.03.2018

Öz

Literatürde kazıklı radye sistemlerin oturması için verilen ampirik formüller oturmayı sadece kaba bir yaklaşımla tahmin edebilmektedir. Kazıklı radye sistemler için hassas oturma tahmini ancak 3-boyutlu sonlu elemanlar yöntemleri ile mümkün olmaktadır. Öte yandan sonlu elemanlar yöntemleri, formül tabanlı yaklaşımlara göre daha karmaşıktır ve bu yöntemlerin yürütülmesi için görece uzun bir süreye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu süreyi kısaltmak amacıyla, bu çalışma kapsamında, 3-boyutlu sonlu elemanlar tabanlı bir kazıklı radye temel oturma formülü tanıtılmış ve formül 2 adet vaka çalışmasına uygulanmıştır. Formül, kazık çapını, boyunu, sıklığını, yanal ve uç direncini; radye kalınlığını, yayılı yükü ve 5 adet zemin tabakasının zemin modülünü bünyesine almaktadır. 3-boyutlu sonlu elemanlar analizi kalitesinde sonuç veren kazıklı radye temel formülünün, kazıklı radye temel sistemlerinin optimize edilmesinde pratik bir çözüm sağlayacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kazıklı radye temel, radye, TNO DIANA, oturma, grup etkisi, grup kazıklar

* Yazışmaların yapılacağı yazar

Giriş

Son zamanlarda, şehirlerimizde yüksek katlı, ağır yapıların artmasıyla birlikte, kazıklı temellerin oturma miktarlarının daha doğru tahmin edilebilmesi ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Son 60 senede birçok araştırmacı kazıklı radye temellerin oturması ile ilgili formüller üretmişlerdir (Meyerhof, 1976; Vesic, 1977; Terzaghi ve Peck, 1967; Fellenious, 1991; Poulos, 1993; Yamashita et.al.; 2015; Poulos ve Davis, 1980; Randolph ve Worth, 1979; Chow, 1986; Clancy and Randolph, 1996). Dung ve diğ., 2010 4 ayrı metotla yaptığı kazıklı radye temel oturma hesabından çıkan değerlerin \pm % 50 sapma aralığının olduğunu bildirmektedir. Kazıklı radye temel oturma tahmininde böyle bir sapma değeri ile karşılaşılması ciddi bir problemi işaret etmektedir.

Son zamanlarda 3-boyutlu zemin-yapı sonlu elemanlar analizleri yapabilecek güçte bilgisayarların yaygınlaşması ile kazıklı radye temellerin oturma tahmini daha hassas yapılabilir hale gelmiştir. Bu yöntemle, Hamderi, 2018 120 farklı konfigürasyondaki 3-boyutlu sonlu elemanlar kazıklı radye sisteminden elde ettiği verileri kullanarak bir oturma formülü geliştirmiştir. Formül kazık çapını, boyunu, sıklığını, yanal sürtünme kuvvetini, uç mukavemetini; radye kalınlığını, yayılı yükü ve 5 zemin tabakasının zemin modülünü bünyesine almaktadır. Bu çalışma kapsamında, 3-boyutlu formül 2 ayrı vaka çalışmasına uygulanmıştır. Formülün uygulanma adımları detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Bu formül yardımıyla, mühendisler, kazıklı radye temellerin oturmasını kolay ve güvenilir bir şekilde hesaplayabileceklerdir.

Materyal ve Yöntem

Kazıklı Radye Temel Oturma Formülü

Hamderi (2018) tarafından önerilen kazıklı radye temel oturma formülü, dikdörtgen şeklindeki radyenin eninin ve boyunun (w_x , w_y), kalınlığının (th); kazıkların çaplarının (d_i), boylarının (l_e), aralıklarının (s_{p_x} , s_{p_y}); radyeye etkileyen 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) oturma hesabında kullanılmasına olanak vermektedir. Bu parametrelerin analitik gösterimi Şekil 1'de verilmektedir. Dikdörtgen şeklindeki kazıklı radyede metre cinsinden meydana gelebilecek en büyük oturma Eşitlik 1'de verilmektedir (Hamderi, 2018).

$$Oturma = S = S_b \left(\frac{s_{p_x} \cdot s_{p_y} + u_1}{u_2} \right)^a \left(\frac{l_e}{u_3} \right)^b \left(\frac{d_i + u_4}{u_5} \right)^c \left(\frac{w_x \cdot w_y}{u_6} \right)^d \left(\frac{0.1E_1 + 0.2E_2 + 0.3E_3 + 0.4E_4 + u_7}{u_8} \right)^e \left(\frac{E_5}{u_9} \right)^f \left(\frac{ld}{u_{10}} \right)^g \left(\frac{fr}{u_{11}} \right)^h \left(\frac{tr}{u_{12}} \right)^i \left(\frac{bed}{u_{13}} \right)^j \left(\frac{th}{u_{14}} \right)^k \left(\frac{Ec}{u_{15}} \right)^l \quad (1)$$

Oturma formülünde yukarıda bahsedilen girdi parametrelerinin dışında a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l gibi birimsiz denklem katsayıları (Tablo 1), bunlara ilaveten denklemin birim tutarlılığını sağlamak için S_b , $u_1 \dots u_{15}$, adları altında birimli sabitler bulunmaktadır (Tablo 2). Formül, özellikle yerinde dökme kazıklar için hassas sonuçlar vermektedir. Ayrıca, radye tabanının zeminle iyi bir teması olmalıdır (İskele tarzı kazık grupları için denenmemiştir). Öte yandan formülün en iyi sonuç verdiği, formülün türetilmesinde kullanılan parametre aralığı da Tablo 3'de verilmektedir. Formülün türetilme aşamaları Ekler bölümünde verilmektedir.

Tablo 1. Oturma formülünün birimsiz denklem katsayıları (Hamderi, 2018)

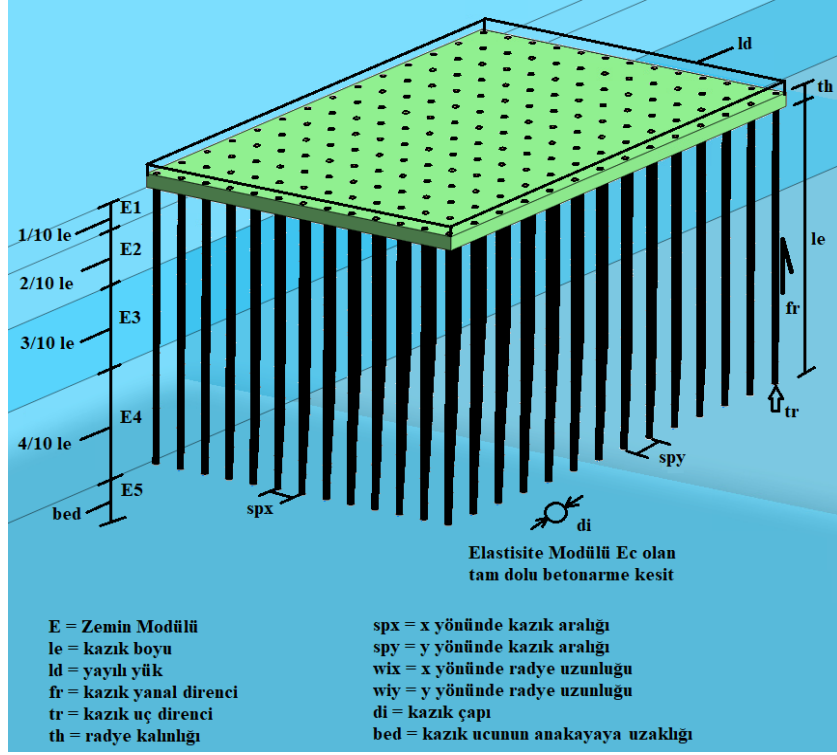
a	b	c	d	e	f
0.1406	-0.2999	-0.2274	0.5286	-0.4275	-0.6229
g	h	i	j	k	l
1.1082	-0.1025	-0.0267	0.1903	-0.1582	-0.0537

Uygulama ve Başarımlar

Kazıklı Radye Temel Oturma Formülü ile Vaka Çalışmaları

Bu bölümde, formülün nasıl kullanıldığını anlatmak ve sahada gözlenen oturmalara ne derece yaklaşıklık sağladığını göstermek için,

formül 2 adet iyi raporlanmış vaka çalışmasına uygulanmıştır. Birinci vaka çalışması konsolidasyon oturması beklenmeyen, genelde kaba daneli, çok katmanlı bir zeminde, ikincisi ise konsolidasyon oturması yoğun bir şekilde beklenen bir kil zeminde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Kazıklı radye temel oturma formülünün parametrelerinin analitik gösterimi (Hamderi, 2018'den yeniden inşa edilerek.)

Tablo 2. Oturma formülünün birimli sabitleri (Hamderi, 2018)

Sembol	Değer	Birim
S_b	0.3287	[m]
u_1, u_2, u_6	1	[m ²]
u_3, u_4, u_5	1	[m]
u_7	10000	[kN/m ²]
u_8, u_9, u_{10}	1	[kN/m ²]
u_{11}	500	[kN/m]
u_{12}	1000	[kN]
u_{13}, u_{14}	1	[m]
u_{15}	25000	[MPa]

Vaka Çalışması 1'in Önerilen Formül ile Çözülmesi (Borsetto ve diğ., 1991)

Borsetto ve diğ., 1991 tarafından iletilen 1. Vaka çalışması, Po Valley, İtalya'da bulunan bir güç santralinin, 200 m yüksekliğindeki bacasının oturma ölçümlerini içermektedir. Baca 30.4 m çapında ve 4.25 m kalınlığındaki bir kazıklı radye temele oturmaktadır. Kazıklı radye temel ise 0.52 m çaplı, 25 m uzunluğunda 281 adet betonarme kazıktan oluşmaktadır. Bu kazıklar, uçları genişletilmiş Franki türü kazıklardır. Daire şeklindeki radye temel üzerine toplam 184 MN yük etmektedir.

Zemin tabakalarının özelliklerinin belirlenmesi için sondaj kuyuları açılmış, örselenmemiş numuneler alınmış, bu numuneler yardımıyla

zeminin kayma direnci, aşırı konsolidasyon oranı, likit ve plastik limitleri bulunmuştur. Buna ek olarak, alınan numuneler üzerinde 3-eksenli ve odometre deneyleri yapılmıştır. Ayrıca, sahada koni penetrasyon deneyi (CPT) yapılmıştır. Baca temeli, yukarıdan aşağıya doğru, killi silt, silt, kum ve sert killi silt tabakalarının üzerine oturmaktadır. Zemin profili ve diğer detaylar Şekil 2'de verilmektedir.

Baca temelinin oturmasının formülle tayin edilme adımları Tablo 4'de verilmektedir. Bu adımların anlatım detayları aşağıda sıralanmaktadır.

Tablo 3. Oturma formülünün en iyi sonuç verdiği parametre aralığı (Hamderi, 2018)

No	Tanım	Sem.	Aralık	Birim
1	x yönündeki kazık aralığı	s_{px}	(1-6)	m
2	y yönündeki kazık aralığı	s_{py}	(1-6)	m
3	kazık boyu	l_e	(5-40)	m
4	kazık çapı	d_i	(0.25-2)	m
5	x yönündeki radye uzunluğu	w_{ix}	(10-50)	m
6	y yönündeki radye uzunluğu	w_{iy}	(10-50)	m
7	kazık elastisite modülü	E_c	$(10-50) \times 10^3$	MPa
8	Kazıkların çevresindeki zemin modülü	E_1, E_2, E_3, E_4	(10-300)	MPa
9	Kazıkların altındaki zemin modülü	E_5	(10-300)	MPa
10	Yayıllı yük	l_d	(100-800)	kPa
11	Kazık yanal direnci	f_r	(150-500)	kN/m
12	Kazık uç mukavemeti	t_r	(50-10000)	kN
13	Kazık ucunun ana kayaya olan uzaklığı	bed	(30-100)	m
14	Radye kalınlığı	th	(0.5-2.5)	m

Adım 1 (fr'nin tayini): f_r (kN/m) kazık yanal kuvvetinin, t_r (kN) ise kazık uç kuvvetinin alabileceği en büyük değerlerdir. Formülün türetildiği programda (TNO DIANA 9.5), kazık yanal kuvveti f_r değerine ulaştığında, arta kalan

kuvvet kazığın diğer bölgelerine, o da kafi gelmezse diğer kazıklara aktarılır. Kazık hesaplarında uygulanan güvenlik katsayıları 2.5-3 civarında olduğundan, çoğu zaman, kazık yanal kuvvetleri, servis yükleri altında kalarak, belirlenen en büyük değere ulaşmazlar. Buna göre, 1 m çaplı bir kazık için, f_r 'ye 500 kN/m gibi makul bir değer atanması (20 m boyundaki bir kazık için yaklaşık 1000 ton) yeterli olacaktır. Bu anlatılanların ışığında, 1 m çaplı kazık için girilecek daha büyük f_r değerinin oturmaya etkisi olmayacaktır. Bu durumda 0.52 m çaplı kazık için f_r değerini orantı uygulayarak, $(0.52 \text{ m}/1 \text{ m}) \times 500 \text{ kN/m} = 260 \text{ kN/m}$ olarak girmemiz uygun olacaktır (Tablo 4, Kolon 1, Satır 1).

Adım 2 (tr'nin tayini): Yanal sürtünme kuvvetinin öngörülen en büyük değere ulaşmaması durumu kazık uç kuvveti için de geçerlidir. Kazık güvenlik sayılarının yüksek olması sebebiyle, servis yükleri altında, kazıkta oluşan uç kuvveti de oldukça düşük seviyelerde kalmaktadır. Vaka çalışmasında, uçları 30 m derinlikte ve kuma gömülü olan Franki kazıklarının taban çapları 1 m civarındadır. İnce daneli zeminler için en büyük kazık uç direncini, klasik temel taşıma gücü yöntemi ile aşağıdaki gibi hesaplayabiliriz:

$$Q_{uç} = (Nq) \times (\sigma'_z) \times (A_b) = 0.6e^{(0.126 \times 30)} \times (30 \text{ m} \times (18-10) \text{ kN/m}^3) \times (\pi D^2/4) = 1162 \text{ kN} \text{ (Tablo 4, Kolon 2).}$$

Burada Nq değeri için Budhu, 2000 tarafından kazıklar için tavsiye edilen $Nq=0.6e^{(0.126\phi')}$ bağıntısı kullanılmıştır. Burada, σ'_z =düşey efektif gerilme, A_b = kazık taban alanı, ϕ' = içsel sürtünme açısı=30° olarak verilmektedir.

Adım 3-4 (wix ve wiy'nin tayini): Formül sadece dikdörtgen şeklindeki bir raydenin eninin ve boyunun girilmesine izin vermektedir. Bu yüzden 30.4 m çaplı dairesel radye, alanı korunarak, 26.9 m kenar uzunluklu bir kareye dönüştürülmüştür. ($w_{ix}=w_{iy}=26.9$, Tablo 4, Kolon 3-4, Satır 1).

Adım 5-6-7-8-9 (spx ve spy'nin tayini): 281 adet kazık (Kolon 5), $\sqrt{281}=16.76$ adet yatay sırada ve $\sqrt{281}=16.76$ adet düşey sırada kazık olacak şekilde dağıtılmıştır (Kolon 6-7). Bir kenarın uzunluğu bir sıradaki kazık sayısına bölünerek yatay ve düşey yöndeki kazık

aralıkları bulunur ($s_{px}=1.60$, $s_{py}=1.60$, Kolon 8-9, Satır 1).

Adım 10-11-12-13 (le, di, th, bed'in tayini): Kazık uzunluğu le, kazık çapı di, radye kalınlığı th sırasıyla 25 m, 0.52 m ve 4.25 m olarak referans çalışmada verilmiştir (Kolon 10, 11 ve 12, Satır 1). Kazık ucunun dayanma tabakasına olan uzaklığı bed değeri de 21 m'dir (Kolon 13, Satır 1).

Adım 14-15 (E1, E2, E3, E4, E5'in tayini): Kum ve Silt tabakalarının zemin modüllerinin hesaplanması için Bowles, 1997 tarafından önerilen CPT uç mukavemeti korelasyonları kullanılmıştır (Tablo 1A, Şekil 2). Daha sonra bu zemin modülleri E1, E2, E3, E4, E5 zemin modüllerine ekstrapole edilmişlerdir (Şekil 2 ve Tablo 4-Kolon 14-15, Satır 1).

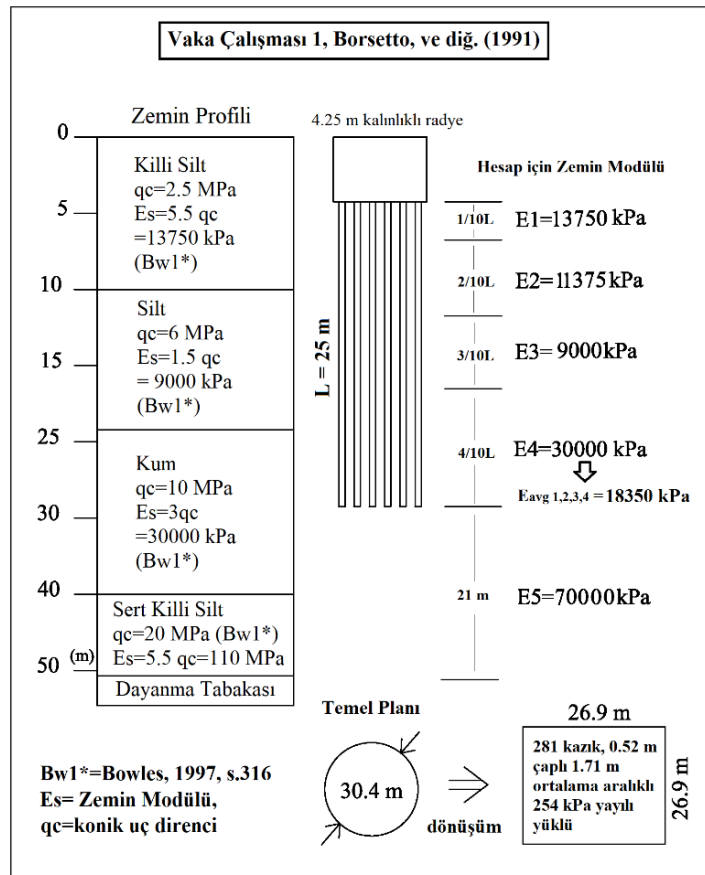
Adım 16 (Ec'nin tayini): Kazıkların imal edildiği betonun elastisite modülünün 25000 MPa olduğu varsayılmıştır (Kolon 16, Satır 1).

Adım 17 (ld'nin tayini): Ortalama yayılı yük ise 184 MN'luk yükün kare şeklindeki radyeye eşit dağıtılması ile 254 kPa olarak bulunmuştur (Kolon 17 Satır 1).

Yukarıdaki hesaplanan girdi parametrelerini formüle yerleştirdiğimizde merkezdeki oturma 0.037 m olarak bulunur. Bu değer, sahada ölçülen oturma değeri 0.04 m ile karşılaştırıldığında sadece % 7.5 sapma gözlenmektedir (Kolon 18-19-20, Satır 1).

Vaka Çalışması 2'nin Önerilen Formül ile Çözülmesi (Katzenbach ve diğ., 2000)

Katzenbach ve diğ., 2000 tarafından iletilen 2. Vaka çalışması, Frankfurt'da bulunan, 1983-1985 arasında inşa edilmiş Messe-Torhaus Binasının oturmasını ve kazıklara gelen yük ölçümlerini içermektedir.



Şekil 2. Vaka Çalışması 1'in Detayları (Borsetto ve diğ., 1991)

Tablo 4. Oturma hesabı için girdiler ve oturma değerleri

Adım	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Vaka No	fr (kN/m)	tr (kN)	w _x (m)	w _y (m)	kazık sayısı	x yönündeki kazık sayısı	y yönündeki kazık sayısı	ort. sp _x (m)	ort. sp _y (m)	le (m)
1	260	1162	26.9	26.9	281	16.76	16.76	1.60	1.60	25
2	395	50	45.0	24.5	84	12	7	3.75	3.50	20

Adım	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Vaka No	di (m)	th (m)	bed (m)	Kazık çevresinde ağ. ort. E1-E4 (MPa)	E5 (MPa)	Econc (MPa)	ld (kPa)	merkezde oturma		
								Ölçülen (m)	Formül (m)	% fark
1	0.52	4.25	21	18.35	70	25000	254	0.040	0.037	7.5%
2	0.90	2.5	120	50	50	25000	363	0.150	0.120	20.0%
								Ort. Sapma-->		13.8%

Messe-Torhaus'un Almanya'nın ilk kazıklı radye temelli binası olması ve binaya ait detaylı oturma ölçümlerinin bulunması sebebiyle birçok araştırmacı tarafından binanın temel sistemi ele alınmıştır (Katzenbach, diğ. 2000, Reul ve Randolf, 2003, Sales ve diğ., 2010). 30 katlı betonarme binanın ortasından yol geçmesi sebebiyle, bina, her biri 17.5 m x 24.5 m boyutunda, biri birine uzaklığı 10 m olan iki kazıklı radye temel üzerine oturmaktadır (Şekil 3). Her bir radyede, 20 m uzunluğunda, 0.9 m çapında betonarme 42 adet kazık bulunmaktadır. Bina her bir radyeye yaklaşık 200 MN yük uygulamaktadır. Binanın temellerinin altından anakayaya (Kireçtaşı) kadar yaklaşık 120 m kalınlığında bölgenin büyük bir kısmına hakim olan Frankfurt kili uzanmaktadır. Öte yandan referans çalışmada Messe-Torhaus binası için herhangi bir zemin profili verilmemiştir. Bu sebeple Messe-Torhaus binası için bu binaya yakın Messe Tower binasının zemin parametreleri kullanılmıştır. Messe Tower binasının altında zemin endeks testleri ve tek eksenli serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Bu zemin parametreleri Tablo 2A'da verilmektedir. Messe-Torhaus binasının temel oturmasının formülle tayin edilme adımları Tablo 4'de verilmektedir. Bu adımların anlatım detayları aşağıda sıralanmaktadır.

Adım 1 (fr'nin tayini): Katzenbach ve diğ., 2000, temel kazıklarında gözlenen en büyük yanal kuvvetin 140 kN/m² olduğunu bildirmektedir. Dolayısı ile fr = 140 kN/m² x 0.9π m = 395 kN/m olarak alınmıştır (Tablo 4, Kolon 1, Satır 2).

Adım 2 (tr'nin tayini): Frankfurt kili içerisinde bulunan kazıkların sürtünme kazığı olduğu varsayımı ile, uç direnci olarak 50 kN gibi küçük bir değer girilmiştir.

Adım 3-4 (w_x ve w_y'nin tayini): Formül sadece dikdörtgen şeklindeki bir raydenin eninin ve boyunun girilmesine izin vermektedir. Messe-Torhaus'un biri birine yakın iki adet radyesi mevcuttur ve bu radyelerin tek parça bir eşdeğer radyeye çevrilip hesap yapılması gerekmektedir. Bunun için, Şekil 3'de olduğu gibi 17.5 m x 24.5 m boyutlarında ve 10 m aralıklı iki radye birleştirilerek 24.5 m x 45 m eşdeğer boyutuna getirilmiştir (w_x=45 m, w_y=24.5 m Tablo 4, Kolon 3-4, Satır 2).

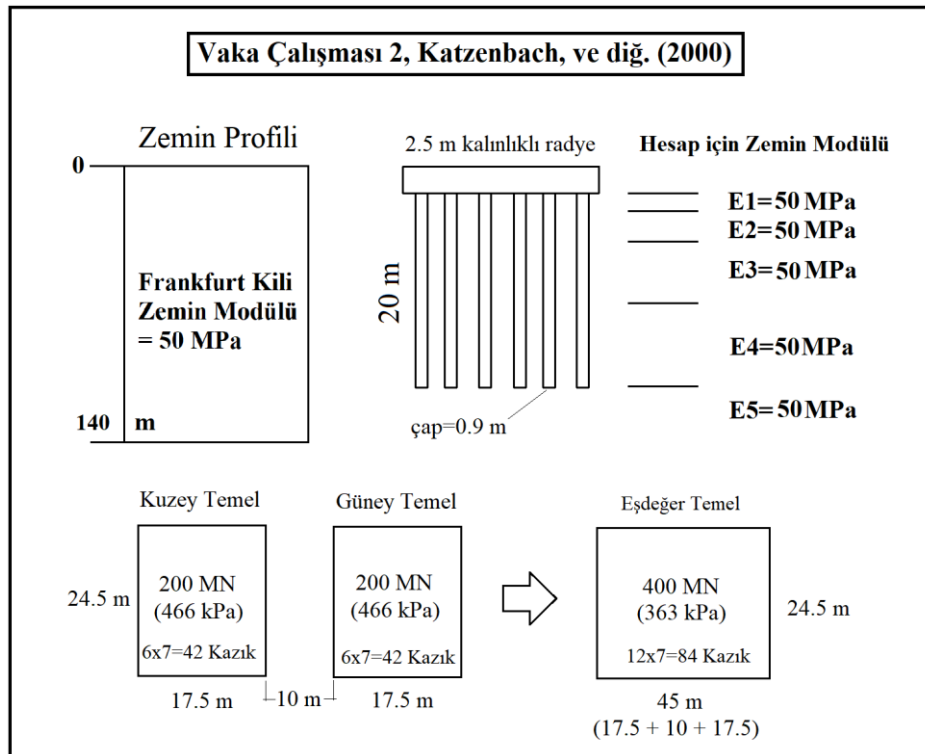
Adım 5-6-7-8-9 (spx ve spy'nin tayini): Eşdeğer radyede, 42x2=84 adet kazık (Kolon 5, Satır 2) bulunmaktadır. Düşey yönde 7 sıra kazık mevcuttur (Kolon 7, Satır 2). Yatay yönde ise 12 sıra kazık mevcuttur (Kolon 6, Satır 2). Bu durumda yatay yöndeki aralık sp_x = 45/12=3.75 m ve düşey yöndeki aralık ise sp_y=24.5/7=3.5 m olmaktadır (Kolon 8-9, Satır 2).

Adım 10-11-12-13 (le, di, th, bed'in tayini): Kazık uzunluğu le, kazık çapı di, radye kalınlığı th sırasıyla 20 m, 0.90 m ve 2.50 m olarak referans çalışmada verilmiştir (Kolon 10, 11 ve 12, Satır 2). Kazık ucunun dayanma tabakasına olan uzaklığı bed değeri de 120 m'dir (Kolon 13, Satır 2).

Adım 14-15 (E1, E2, E3, E4, E5'in tayini): Frankfurt kili için ortalama zemin modülü 50 MPa olarak verilmektedir (Katzenbach ve diğ., 2000). Buna göre $E1=E2=E3=E4=E5 = 50$ MPa alınmıştır. (Şekil 3 ve Tablo 4-Kolon 14-15, Satır 2).

Adım 16 (Ec'nin tayini): Kazıkların imal edildiği betonun elastisite modülünün 25000 MPa olduğu varsayılmıştır (Kolon 16, Satır 2).

Adım 17 (ld'nin tayini): Ortalama yayılı yük ise $200 \times 2 = 400$ MN'luk yükün 24.5 m x 45 m boyutundaki eşdeğer raydeye dağıtılması ile 363 kPa olarak bulunmuştur (Kolon 17, Satır 2). Yukarıda hesaplanan girdi parametrelerini formüle yerleştirdiğimizde merkezdeki oturma 0.12 m olarak bulunur. Bu değer, sahada ölçülen oturma değeri 0.15 m ile karşılaştırıldığında % 20 sapma gözlenmiştir (Kolon 18-19-20, Satır 2).



Şekil 3. Vaka Çalışması 2'in Detayları (Katzenbach ve diğ., 2000)

Vaka Çalışmalarının Eşdeğer Kazık Yöntemi ile Çözülmesi

Bu bölümde, vaka çalışmalarında gözlenen oturma, uygulamada çokça kullanılan diğer pratik bir kazıklı radye temel oturma formülü ile hesaplanacaktır. Poulos ve Davids, 1980 ve Poulos, 1993, 2001 ve 2006) tarafından geliştirilen formül, kazıkların bir blok halinde oturduğunu varsaymakta ve kazıklı radye temelleri de eşdeğer çaplı tek bir kazığa dönüştürerek ele almaktadır. Eşdeğer kazığın boyu (L) kazıklı radye temellerininki ile aynıdır.

Eşdeğer çap, aşağıdaki formül ile hesaplanır (Poulos, 1993 ve 2006):

$$d_e = (1.13 \text{ to } 1.27) \cdot (A_G)^{0.5} \quad (2)$$

Burada, A_G = kazık grubunun plan alanı, "1.13" genellikle uç kazıkları için kullanılan ve "1.27" ise genellikle sürtünme kazıkları için kullanılan sabitlerdir. Bu çalışmada bu iki değer ortalaması olan "1.20" değeri kullanılmıştır. Eşdeğer çap de hesaplandıktan sonra aşağıdaki formül kullanılarak oturma hesaplanabilir (Poulos, 2001):

$$S = \frac{PI_s}{d_e E_s} \quad (3)$$

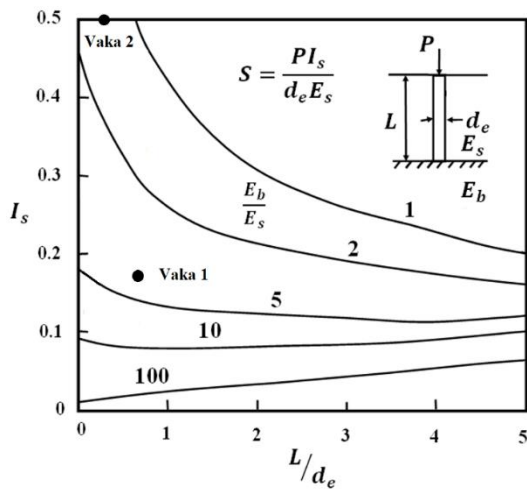
Burada P = kazıklı radye temellere etkiyen toplam yük (kN), Is= oturma katsayısı ve Es=kazıklar çevresindeki zeminin modülüdür. Kazığın altındaki ortalama zemin modülü ise Eb'dir. Poulos'un formülü hesap adımları Vaka 1 ve Vaka 2 için Tablo 5'de adım adım verilmiştir. Bu tabloya göre 1 ile 6 arasındaki adımlar Şekil 3 ve 4'de verilen bilgiler ve Eşitlik

2 kullanılarak kolayca bulunabilir. 7. adımdaki Es değeri, 3-Boyutlu sonlu elemanlar tabanlı formüldeki kazık çevresindeki ortalama zemin modülüne (0.1E1+0.2E2+0.3E3+0.4E4) karşılık gelmektedir. 8. Adımdaki Eb ise 3-Boyutlu sonlu elemanlar tabanlı formüldeki E5'e karşılık gelmektedir. 9. Adımda bulunan Eb/Es değerleri ve 5. Adımda bulunan L/de değerleri Şekil 4'de kesiştirilerek Is değerine ulaşılabilir (10. Adım). 11. Adımda, bulunan bu değerler Eşitlik 3'e yerleştirilerek oturma hesaplanır.

Tablo 5. Eşdeğer kazık yönteminin (Poulos, 1993, 2001 ve 2006) hesap adımları

	1	2	3	4	5	6	7	8
Vaka No	AG	d	de	L	L/de	P	Es	Eb
-	m ²	m	m	m	-	MN	MPa	MPa
1	724	0.52	32.3	23.5	0.73	184	18.4	70
2	1103	0.9	39.8	20.0	0.50	400	50.0	50

	9	10	11	12	13	14	15
Vaka No	Eb/Es	Is	S _{Poulos}	S _{yazar}	S _{ölçülen}	Sapma _{Poulos}	Sapma _{yazar}
-	-	-	m	m	m	%	%
1	3.81	0.18	0.056	0.038	0.040	40%	6%
2	1.00	0.5	0.100	0.120	0.150	33%	20%
			Ort. Sapma-->			40%	6%



Şekil 4. Eşdeğer kazık yönteminde Is (Poulos, 2001'den yeniden inşa edilerek)

Vaka Çalışmalarındaki oturma tahminlerinin yorumlanması

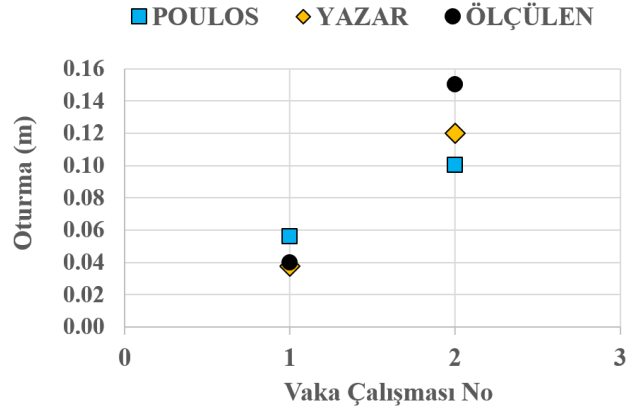
Vaka çalışması 1'de sahada ölçülen oturma değeri 0.04 m'dir. Bu değer, 3-Boyutlu sonlu elemanlar tabanlı formül ile 0.038 m, Poulos'un eşdeğer kazık yöntemi ile 0.056 m olarak hesaplanmıştır (Tablo 5, Sütun 11-15). Diğer bir ifade ile 3-Boyutlu sonlu elemanlar tabanlı formül ile hesaplanan oturma ölçülen değerden sapması % 6, buna karşın eşdeğer kazık yönteminin sapması % 40 olmuştur. Bu sonuçlara göre bu vakada 3-Boyutlu tabanlı kazık formülünün iyi bir performans sergilediği söylenebilir. Öte yandan, uygulamada sıkça kullanılan Poulos'un eşdeğer kazık yönteminin neden böyle yüksek bir sapma verdiği araştırılmalıdır. Vaka çalışması 1 incelendiğinde 0.52 m çapındaki kazıkların kendilerinden yaklaşık 8 kat daha kalın bir radyeye (4.5 m)

bağlandıkları görülmektedir. 3-Boyutlu sonlu elemanlar tabanlı formülde diğer parametreler sabit bırakılarak radye kalınlığı (4.25 m) kazık çapına (0.52 m'ye) eşitlendiğinde, oturmanın 0.38 m'den 0.052 m'ye çıkararak hatanın arttığı görülür (% 30 sapma). Bu da oturma hesabında radye kalınlığının ne kadar etkili olduğunu gösterir. Diğer bir deyişle, rijit radye, oturmayı kazıklara daha iyi dağıtarak oturmanın azalmasına yardımcı olmaktadır. Poulos'un formülüne radye kalınlığı girilemediği için, radye kalınlığının kazık çapından kat kat fazla olduğu durumlarda, formülün yaklaşıklığı düşmektedir.

Vaka çalışması 2'nin özelliği de konsolidasyon oturması yapan bir zemini içermiş olmasıdır. Öte yandan bu çalışma kapsamında konsolidasyon parametreleri kullanılmadan hesap yapılmıştır. Dolayısı ile bu hesabın sonucunda oturmayı bir miktar az bulabileceğimizi söyleyebiliriz. Nitekim Vaka 2'de ölçülen oturma 0.150 m iken 3-Boyutlu tabanlı formül ile oturma 0.120 m (20 % sapma), Poulos'un eşdeğer kazık yöntemi ile de 0.100 m (% 33 sapma) bulunmuştur (Şekil 5). Geoteknik açıdan, 0.150 m oturma yapan bir binanın oturmasının 0.120 m olarak tahmin edilmesinin fena bir yaklaşıklık olmadığı söylenebilir. Öte yandan, Poulos'un da içinde bulunduğu bir grup araştırmacı, Messe-Torhaus binasının oturmasını nümerik analiz programları kullanarak da hesaplamıştır (Sales ve diğ., 2010). Bu grup, kazık etkileşimi esasına göre çalışan GARP ve konsolidasyon oturması hesabı yapan CONS3D program kombinasyonları kullanarak oturmayı 0.118 m olarak bulmuştur (% 21 sapma).

Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında 3-Boyutlu sonlu elemanlar analizi tabanlı kazıklı radye oturma formülü sunulmuştur. Formül, kazık çapını, boyunu, sıklığını, yanal sürtünme ve uç direncini; radye kalınlığını, yayılı yükü ve 5 adet zemin tabakasının zemin modülünü bünyesine almaktadır.



Şekil 5. Vaka çalışmalarında tahmin edilen ve ölçülen oturmalar

Yapılan bu çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- Formül 3-Boyutlu sonlu elemanlar tabanlı olduğu için oldukça yaklaşık sonuçlar vermektedir.
- Konsolidasyon oturması riski düşük olan Vaka çalışması 1'de formül sadece % 6 sapma göstermiştir. Buna göre, konsolidasyon oturması riski düşük olan zeminlerde formülün performansının oldukça yüksek olduğunu söyleyebiliriz.
- Kazıklı radyelerde, radye kalınlığını arttırmak oturmayı azaltmaktadır. Önerilen formüle radye kalınlığı girilebildiğinden, projeci – daha ekonomik ise- radye kalınlığı artırarak oturmayı azaltabilir. Vaka Çalışması 1'de, 0.52 m çaplı kazıkların yaklaşık 8 katı kalınlığındaki radyeye (4.25 m) bağlı olduğu durumda, formül oturmayı sadece % 6 sapma ile tahmin edebilmektedir. Aynı vaka çalışmasındaki oturma, radye kalınlığının girişine izin vermeyen formül ile (Poulos, 1993, 2001 ve 2006) hesaplandığında sapma % 40 olmuştur.
- Formül konsolidasyon oturması yapması beklenen zeminlere de uygulanabilmektedir. Formül, Frankfurt kilinin üzerine oturan Almanya'nın ilk kazıklı radye temelinde sahip Messe-Torhaus binasına uygulandığında 15 cm'lik toplam oturmayı % 20 sapma ile 12 cm olarak tahmin edebilmiştir. Aynı binanın oturması Sales ve diğ., 2010 tarafından GARP

ve CONS3D programları kullanılarak 11.8 cm olarak tahmin edilmiştir.

- Bu çalışmada sunulan yöntemin kazıklı temellerin oturmasının bulunmasında pratik ve güvenilir bir araç olacağı düşünülmektedir.

Kaynaklar

- Borsetto M, Barbera G, Colleselli F, Colombo P, Corti G, Faillella D, Tripiciano L, Giuseppett G, Mazza G and Varagnolo P, 1991. Settlement analysis of main buildings in power plants by means of 2-D and 3-D models. Proceedings of the 10th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Florence vol. 1, 323–328.
- Bowles, J. E. 1997. Foundation Analysis and Design, McGraw-Hill Inc., 5th edition.
- Budhu, M. 2010. Soil Mechanics and Foundations, John Wiley & Sons, Inc., 3rd edition
- Chow Y.K., 1986. Analysis of vertically loaded pile groups. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, vol. 10(1), 59–72.
- Clancy, P. and Randolph, M. F., 1996. Simple design tools for piled raft foundations, Geotechnique 46, No.2, 313-328.
- Diana User's Manual, 2014. Release 9.5, TNO DIANA BV, Netherlands.
- Dung N.T., Chung S.G. and Kim S.R., 2010. Settlement of large-scale piled foundations using equivalent raft approach, ICE Proceedings Geotechnical Engineering, 163.
- Fellenius B.H., 1991. Pile foundations. In Foundation Engineering Handbook, 2nd ed. Chapman & Hall, New York, 511–536.
- Hamderi M., 2018, "Comprehensive Group Pile Settlement Formula based on 3D Finite Element Analyses" Soils and Foundations, Japanese Geotechnical Society, 10.1016/j.sandf.2017.11.012.
- Katzenbach, R., Arslan, U. ve Moormann, C., 2000. Piled raft foundation projects in Germany. In Design Applications of Raft Foundations, 323–391.
- Meyerhof, G.G., 1976. Bearing capacity and settlement of pile foundations. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE 102(GT3), 195–228.
- Poulos, H.G. and Davis, E.H., 1980. Pile Foundation Analysis and Design. Wiley & Sons, New York.
- Poulos, H.G., 1993. Settlement prediction for bored pile groups. Proceedings of the 2nd Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, Ghent, 103–117.
- Poulos, H.G., 2001. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Handbook, R.K. Rowe (Ed.)- Newyork, 278-279.
- Poulos, H.G., 2006. Pile Group Settlement Estimation - Research to Practice, Innovative Methods. GSP 153.
- Randolph, M.F. and Wroth, C.P., 1979. An analysis of the vertical deformation of pile groups. Geotechnique vol. 29(4), 423–439
- Reul, O. ve Randolph, M. F., 2003. Piled rafts in overconsolidated clay: comparison of in situ measurements and numerical analyses, Geotechnique, 53(3), 301-315.
- Sales, M.M., Small, J.C. ve Poulos, H.G., 2010. Compensated piled rafts in clayey soils: behaviour, measurements and predictions, Can. Geotech. J., 47, 327-345.
- Terzaghi, K. and Peck, R.B., 1967. Soil Mechanics and Foundation Engineering Practice. Wiley, New York.
- Vesic, A.S. ,1977. Design of Pile Foundations. National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Practice No. 42. Transport Research Board, Washington, DC.
- Yamashita, K., Tanikawa, T. and Hamada, J., 2015. Applicability of Simple Method to Piled Raft Analysis in Comparison with Field Measurements, Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA, vol. 46(2), 4

New Method for Settlement Estimation of Pile-Raft Foundations

Extended abstract

The formulas offered so far on the settlement of pile-raft foundations provide only a limited proximity to the actual settlement. One of the best ways to make an accurate settlement estimation is to conduct finite element analyses. On the other hand, finite element analyses are more complex compared to formula-based approximations and therefore they require relatively more implementation time. In efforts to reduce this duration, a 3-dimensional finite element based (3-D FE) pile-raft formula is presented in this study (Hamderi, 2018). The pile-raft settlement 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 (tr).

The formula was applied to two well-documented case studies. The first case study by Borsetto et al., 1991 included the settlement of a 200 m long chimney in a power plant complex located in Po Valley, Italy. The chimney was founded on a raft in 30.4 m diameter and 4.25 m thickness. The pile-raft was composed of 281 reinforced concrete piles in 25 m length and in 0.52 m diameter. The Frankie type piles had an expanded bottom tip diameter of 1 m. The underlying soil, in a descending order, was composed of clayey silt, silt, sand and hard clayey silt. The total load acting on the circular raft was 184 MN. The circular raft was converted to equal-area square raft so that it complied with the formula input standards (Formula accepts only rectangular shaped-rafts). The formula predicted the settlement with a 7.5 % deviation. The prediction performance in this case was quite high, due to the fact that the formula could incorporate the thickness of the raft (4.25 m), which is quite influential on settlement.

In the second case study, the formula was used to estimate the settlement of Messe-Torhaus building in Frankfurt, Germany (Katzenbach et al., 2000). The building was founded on two separate pile-raft foundations. Each raft was 17.5 m x 24.5 m in size and 2.5 m in thickness. The distance between rafts was 10 m. Two raft pieces were merged into a single-piece raft of 45 m x 24.5 m in size, in order to comply with the formula input standards (Formula accepts only one raft). The single-piece raft had $42 \times 2 = 84$

piles, which were 20 m in length and 0.9 m in diameter. The total load acting on the rafts (400 MN) was evenly distributed on a single-piece raft with an average load of 363 kPa.

The underlying soil was Frankfurt-clay which is known to have experienced consolidation settlement in the past. The measured settlement of this building was 0.150 m, whereas the same settlement turned out to be 0.120 m using 3-D FE based formula. This corresponds to a deviation of 20 %. Sales et al., 2010 reports the same settlement as 0.118 m, which was found through a set of numerical analyses using GARP and CONS3D programs.

The raft settlements of the case studies were also estimated by the well-known equivalent pier method (Poulos and Davids, 1980 and Poulos, 1993, 2001 and 2006). The equivalent pier method considers the pile group as a single pile of an equivalent diameter. The length of the equivalent pile stays the same. The settlement is estimated using the input parameters such as the equivalent diameter, length, load and average moduli around and below the piles. The formula does not consider the thickness of the raft.

The raft settlements estimated using equivalent pier method turned out to be for the first and the second cases studies, 40% and 33%, respectively. If we recall, when the 3-D FE formula was used, the deviations for the first and second cases were 6% and 20%, respectively. The high deviations in settlements when equivalent pier method used are attributed to the fact that the equivalent pier method doesn't incorporate the raft thickness. In other words, the raft was quite thick in the first case (thickness=4.5 m) and this was overlooked by the equivalent pier method.

The following conclusions can be drawn from the study:

- The formula performs quite well with soils where there is low risk of consolidation. The formula is also valid in consolidating soils with a slightly reduced accuracy. On the other hand, in general, it is not very straight-forward to estimate the settlement accurately in cases where the soil undergoes an excessive consolidation settlement.
- The formula allows the input of foundation thickness, and therefore engineers can iterate and find the optimal foundation thickness that satisfies the target settlement.

Keywords: Pile raft foundation, TNO DIANA, settlement, group effect, group piles

EKLER

Tablo 1A. SPT ve CPT korelasyonları (Bowles, 1997)

Zemin	SPT	CPT
Kum (normal konsolide)	$E_s = 500 (N_{55}+15)$	$E_s = (2 \text{ ile } 4) q_c$
Çakıllı Kum	$E_s = 1200 (N_{55}+6)$	-
Killi Kum	$E_s = 320 (N_{55}+15)$	$E_s = (3 \text{ ile } 6) q_c$
Siltler, Kumlu silt	$E_s = 300 (N_{55}+6)$	$E_s = (1 \text{ ile } 2) q_c$
Yumuşak kil veya killi silt	-	$E_s = (3 \text{ ile } 8) q_c$

N55= düzeltilmiş SPT düşüm sayısı/ft, q_c = CPT uç direnci (kPa)

Tablo 2A. Frankfurt çevresinde Main Tower Binasının altından alınan numunelere göre belirlenen zemin özellikleri (Katzenbach et. al., 2000)

Özellikler	Birim	Frankfurt Kili	Frankfurt Kireçtaşı
Sürtünme Açısı	derece	20	32.5
Kohezyon	kPa	20	15
Tek eksenli basınç direnci	MPa	0.28	84
Zemin Modülü	MPa	50	20000
Sükunetteki toprak basıncı katsayısı	-	0.6	0.5
Birim hacim ağırlık	kN/m ³	18.5	20
Su altındaki birim hacim ağırlık	kN/m ³	9	10
Doğal su muhtevası	%	34	-
Likit limit	%	74	-
Kıvam Endeksi	-	0.82	-

Formülün Türetilme Aşamaları

Formülün türetilme aşamaları Hamderi, 2018'de detaylı olarak verilmiştir. İlk adım olarak, bir grup giriş parametresi (spx, spy, le, di, wix, wiy,... th, Ec) 2-15 sütunlarına girilir (Tablo 3A). Bu grup için TNO DIANA'dan elde edilen oturma değeri sütun 16'ya girilir. Bir sonraki adım, birinci grubun bir veya iki değerini değiştirmek ve yeni grup için TNO DIANA'yı kullanarak başka bir oturma değeri elde etmektir. Ardından, ikinci grup giriş parametrelerine karşılık gelen oturma değeri ardışık sırada sütun 16'ya girilir. Bu prosedür, yeterli miktarda sonlu eleman tabanlı oturma verisi elde edilene kadar yaklaşık yüz yirmi kez tekrarlanır. Bir sonraki

adım, oturma formülünü (Eşitlik 1) sütun 17'ye girmektir. Bu durumda, sütun 17, 2-15 ve 20-32 sütunlarına bağımlı hale gelir. Bu prosedür tekrar yaklaşık 120 kez tekrarlanır. Hücre 20-32'deki değerlerin "1" gibi bir başlangıç değerine sahip olması gereklidir, böylece sütun 17'de gerçek bir sayı belirir. Sonuç olarak, yaklaşık 120 adet sonlu elemanlar tabanlı ve 120 adet formüle dayalı oturma değerlerinden oluşan bir veri kümesi elde edilir (Bu değerler henüz itere edilmemiş ve düzeltilmemişlerdir). Bir sonraki adım, bu iki oturma değeri arasındaki farkın karesini sütun 18'e girmektir. Bu değer bizim "hatamız" olacaktır. Son olarak, sütun 18'deki hatalar sütun 19'da alt alta toplanır ve global bir

hata değeri bulunur. Şimdi hedefimiz, 20-32 sütunlarında verilen birimsiz katsayıları değiştirerek global hata değerini en aza indirmektir. Excel'deki “Çözücü eklentisi” sayesinde, bu birimsiz katsayılar otomatik olarak iterasyon ile belirlenir. Paylarında birimli

parametreler bulunan parantezleri birimsiz yapmak için paydaya birimli sabitler eklenmiştir. Bu yöntemle birimsiz hale gelen parantez ifadeleri, metre birimli “Sb” katsayısı ile çarpılarak metre birimli “S” oturması hesaplanır.

Table 3A. Formülün türetildiği Excel® dosyasının genel görünümü

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No	spx (m)	spy (m)	le (m)	di (m)	wix (m)	wiy (m)	0.1E ₁ +0.2E ₂ +0.3E ₃ +0.4E ₄ (MPa)	E ₅ (MPa)	ld (kPa)
1	2	2	20	1	20	20	100	100	100
....
....
11	12	13	14	15	16	17	18	19	
fr (kN/m)	tr (kN/m)	bed (m)	th (m)	Ec (MPa)	DIANA Oturma (m)	Formül Oturma (m)	16 ve 17'nin farkı	18'in toplamı	
250	50	50	1	10000	x.xx	?	?	?	
....	?	?	?	
....	?	?	?	
19'un toplamı ----->								?	
20	21	22	23	24	25	26			
S _b	a	b	c	d	e	f			
?	?	?	?	?	?	?			
27	28	29	30	31	32				
g	h	i	j	k	l				
?	?	?	?	?	?				