



## Radye Temel Oturma Hesabı için Yeni bir Yöntem

**Murat HAMDERİ\***

Türk-Alman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İstanbul

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

Geliş: 27.04.2019, Revizyon: 23.08.2019, Kabul Tarihi: 27.01.2020

### Öz

Literatürde radye temellerin oturması için verilen formüller, elastik bir yaklaşım sağlamakta, temel kalınlığının ve farklı zemin tabakalarının hesaba katılmasına olanak tanımamaktadır. Formüllerdeki bu eksiklikler, uygulamacıları proje verilerinin daha detaylı olarak tanımlanabildiği sonlu elemanlar programlarını kullanmaya yöneltmiştir. Ancak sonlu elemanlar programı kullanımı, 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 radye temel oturma formülü tanıtılmış ve formül iki vaka çalışmasına uygulanmıştır. Formül, radyenin elastisite modülünü, enini, boyunu, kalınlığını, yayılı yükü ve 5 adet zemin tabakasının zemin modülünü ve Poisson oranını bünyesine almaktadır. Önerilen bu yöntem ile mühendisler radye temel oturmasını ve sehimini kolay ve güvenilir bir şekilde hesaplayabileceklerdir.

**Anahtar Kelimeler:** Zemin, Radye, Temel, Oturma, Formül

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

## Giriş

Geçen yüzyılda, sığ temellerin oturma hesabı için birçok formül önerilmiştir. Bu formüller, kullanılan yaklaşım bakımından 3 gruba ayrılabilir: 1-)Elastik yaklaşımlar, (Janbu vd., 1956, Grioud, 1972, Das, 1983, Mayne ve Poulos, 1999, Bowles, 1987, Mohamed vd., 2013), 2-) SPT- tabanlı yaklaşımlar (Terzaghi ve Peck, 1948, Meyerhof, 1956, Burland ve Burbidge, 1985, Erzin ve Gul, 2013), 3-) CPT-tabanlı yaklaşımlar (De Beer, 1965, Schmertmann, 1970, Berardi vd., 1991, Mir vd., 2017).

Lutenegger ve Degroot, 1995, Texas A & M Üniversitesindeki radye temel yükleme deneyinden çıkan sonuçları, değişik oturma formüllerinin verdiği sonuçlar ile karşılaştırmıştır. Yükleme deneyinde 25 mm oturma oluşturan yükü, SPT-tabanlı formüllere girdiklerinde, oturmayı 42 mm (67% sapma), CPT-tabanlı formüllere girdiklerinde ise 53 mm (113% sapma) olarak bulmuşlardır. Hesapla bulunan oturma hassasiyetinin son derece düşük ve oturmaların biri birlerinden çok farklı çıkması, oturma formüllerindeki hassasiyet sorununu işaret etmektedir. Das and Nagaratnam, 2007 mevcut formüllerin oturmaları yüksek, zemin emniyet gerilmelerini ise düşük çıkardığını bildirmektedir.

Öte yandan radye temellerin oturması için verilen mevcut formüller, elastik bir yaklaşım sağlamakta, temel kalınlığının ve farklı zemin tabakalarının hesaba katılmasına olanak tanımamaktadır. Son zamanlarda 3-boyutlu zemin-yapı sonlu elemanlar analizleri yapabilecek güçte bilgisayarların yaygınlaşması ile radye temellerin oturma tahmini daha hassas yapılabilir hale gelmiştir. Bu yöntemle, Hamderi, 2019 90 farklı konfigürasyondaki 3-boyutlu sonlu elemanlar radye sisteminden elde ettiği verileri kullanarak bir oturma formülü geliştirmiştir. Formül, radyenin elastisite modülünü, enini, boyunu, kalınlığını, yayılı yükü ve 5 adet zemin tabakasının zemin

modülünü ve Poisson oranını bünyesine almaktadır. Bu çalışma kapsamında, 3-boyutlu formül 2 ayrı vaka çalışmasına uygulanmıştır. Formülün uygulanma adımları detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Bu formül yardımıyla, mühendisler, radye temellerin oturmasını kolay ve güvenilir bir şekilde hesaplayabileceklerdir.

## Materyal ve Yöntem

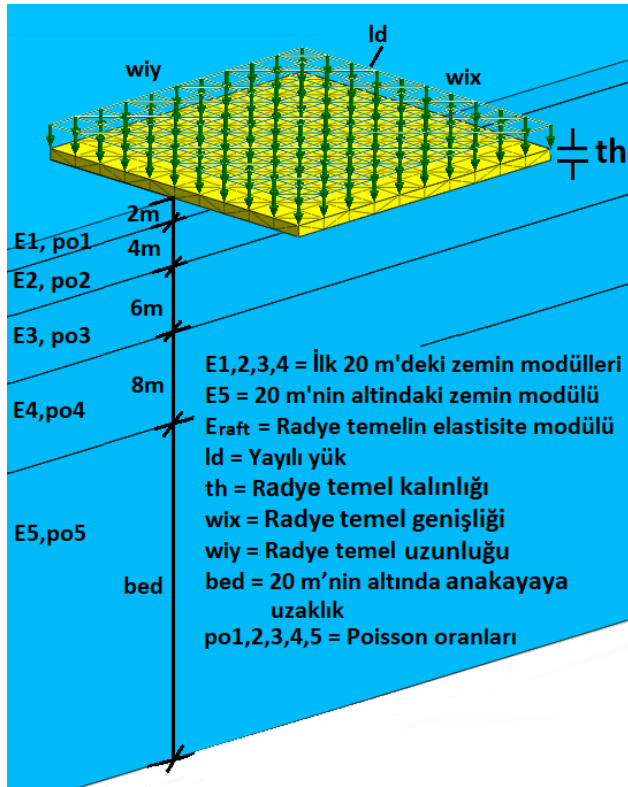
### Radye Temel Oturma Formülü

Hamderi, 2019 tarafından önerilen radye temel oturma formülü, dikdörtgen şeklindeki radyenin eninin ve boyunun ( $w_x, w_y$ ), kalınlığının ( $th$ ), elastisite modülünün ( $E_c$ ); radyeye etkiyen üniform yayılı yükün ( $ld$ ); 5 adet zemin tabakasının zemin modüllerinin ( $E_1, E_2, E_3, E_4, E_5$ ), Poisson Oranlarının ( $po_1, po_2, po_3, po_4, po_5$ ) oturma hesabında kullanılmasına olanak vermektedir. Bu parametrelerin analitik gösterimi Şekil 1'de verilmektedir. Dikdörtgen şeklindeki radyede metre cinsinden meydana gelebilecek en büyük oturma Eşitlik 1'de verilmektedir (Hamderi, 2019).

$$S = S_b \cdot \left(\frac{w_x \cdot w_y}{u_1}\right)^a \cdot \left(\frac{E_1}{u_2}\right)^b \cdot \left(\frac{E_2}{u_3}\right)^c \cdot \left(\frac{E_3}{u_4}\right)^d \cdot \left(\frac{E_4}{u_5}\right)^e \cdot \left(\frac{E_5}{u_6}\right)^f \cdot \left(\frac{ld}{u_7}\right)^g \cdot \left(\frac{bed}{u_8}\right)^h \cdot \left(\frac{th}{u_9}\right)^i \cdot \left(\frac{E_c}{u_{10}}\right)^j \cdot \left(\frac{po_1}{u_{11}}\right)^k \cdot \left(\frac{po_2}{u_{12}}\right)^l \cdot \left(\frac{po_3}{u_{13}}\right)^m \cdot \left(\frac{po_4}{u_{14}}\right)^n \cdot \left(\frac{po_5}{u_{15}}\right)^o \quad (1)$$

Oturma formülünde yukarıda bahsedilen girdi parametrelerinin dışında a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l, m, n, o gibi birimsiz denklem katsayıları (Tablo 1) bulunmaktadır. Birimsiz denklem katsayılarının fiziksel anlamları, Hamderi, 2019 makalesinde detaylı olarak açıklanmaktadır. Bunlara ilaveten denklemin birim tutarlılığını sağlamak için  $S_b, u_1 \dots u_{15}$ , adları altında birimli sabitler bulunmaktadır (Tablo 2). Bu yöntemle, örneğin, betonun elastisite modülü  $E_c = 25000-40000$  [kN/m<sup>2</sup>], birimli  $u_{10} = 25000$  [kN/m<sup>2</sup>] sabitine bölünerek birimsiz ve 1'e yakın yapılmaktadır (Eşitlik 1). Öte yandan formülün en iyi sonuç verdiği, formülün türetilmesinde kullanılan parametre aralığı da Tablo 3'de

verilmektedir. Formül havuzundaki kombinasyonlarda Mohr-Coulomb elasto-plastik zemin modeli kullanılmıştır. Her ne kadar formülün içinde bir miktar nonlineerlik olsa da, aslında formül elastik yaklaşımlara daha yakın sonuç verir. Bunun sebebi formül havuzunda Mohr-Coulomb zemin modelinin iyi modelleyemediği, aşırı plastik davranışa sebebiyet veren düşük modüllü zeminlerin olmayışındır. Formül havuzunda kullanılan en düşük zemin modülü 15 MPa'dır (Tablo 3).



Şekil 1. Radye temel oturma formülünün parametrelerinin analitik gösterimi (Hamderi, 2019'dan yeniden inşa edilerek.)

Tablo 1. Oturma formülünün birimsiz denklem katsayıları (Hamderi, 2019)

a	b	c	d	e
0,4387	-0,1073	-0,1996	-0,2258	-0,2287
f	g	h	i	j
-0,1874	1,0214	0,0957	-0,1338	-0,0616
k	l	m	n	o
-0,0566	-0,0475	-0,0446	-0,0347	-0,0645

Tablo 2. Oturma formülünün birimli sabitleri (Hamderi, 2019)

Sembol	Değer	Birim
$S_b$	0,1294	[m]
$u_1$	400	[m <sup>2</sup> ]
$u_2, u_3, u_4, u_5, u_6$	10000	[kN/m <sup>2</sup> ]
$u_7$	100	[kN/m <sup>2</sup> ]
$u_8$	30	[m]
$u_9$	1	[m]
$u_{10}$	25000	[kN/m <sup>2</sup> ]
$u_{11}, u_{12}, u_{13}, u_{14}, u_{15}$	0,35	[-]

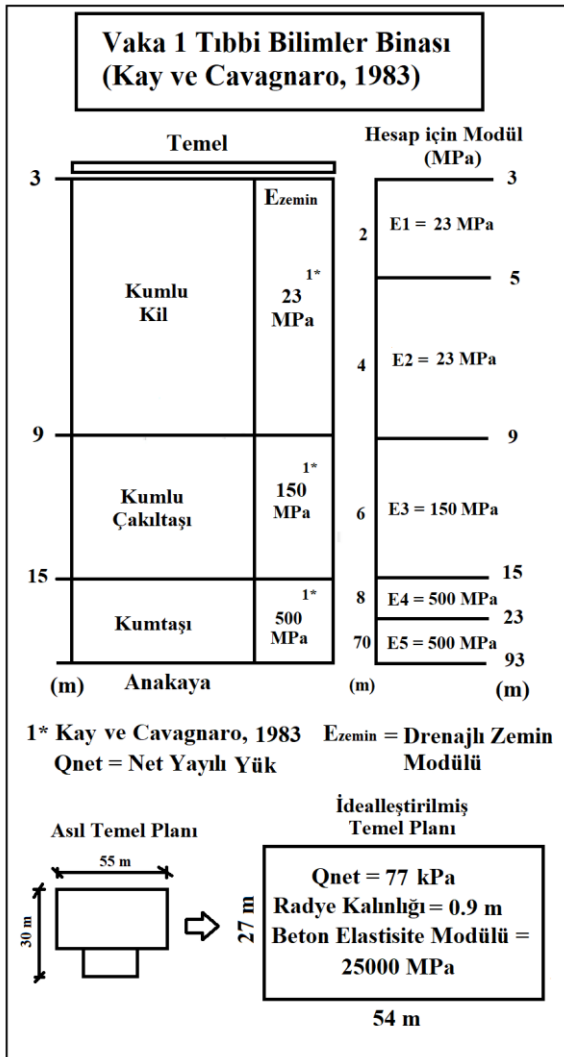
Tablo 3. Oturma formülünün en iyi sonuç verdiği parametre aralığı (Hamderi, 2019)

Tanım	Sem.	Aralık	Birim
x yönündeki radye t. genişliği	$w_x$	(3-54)	m
y yönündeki radye t. uzunluğu	$w_y$	(3-50)	m
İlk 20 m'deki zemin modülleri	$E_1, E_2, E_3, E_4$	(15-600)	MPa
20 m'nin altındaki zemin modülü	$E_5$	(15-600)	MPa
Radye t.'in elastisite modülü	$E_{raft}$	(10-50)	GPa
Zemin tabakalarının Poisson's oranları	$po_1, po_2, po_3, po_4, po_5$	0,2-0,45	-
Yayıllı yük	$ld$	(10-800)	kPa
20 m'nin altında anakayaya olan uzaklık	$bed$	(30-100)	m
Radye temel kalınlığı	$th$	(0,5-3,0)	m

### Vaka Çalışması 1'in Önerilen Formül ile Çözülmesi (Kay ve Cavagnaro, 1983)

Kay ve Cavagnaro, 1983 tarafından iletilen çalışma, Adelaide, Güney Avustralya'da 1979 yılında inşa edilen Tıbbi Bilimler Binası'nın oturma ölçümlerini içermektedir. Bina giriş ve bodrum katları dahil 9 katlıdır. Bina 55 m x 30

m boyutlarında 0.90 m kalınlığındaki bir radye temele oturmaktadır. Referans çalışmada, temel zeminine ortalama 128 kPa yük etkidiği belirtilmektedir. Temelin kazı kotu, yüzeyin 3 m altındadır. Temel altında, 6 m kalınlığında kumlu kil tabakası, onun altında ise 6 m kalınlığında kumlu çakıl taşı tabakası ve 12 m'den sonra ise kumtaşı tabakası vardır. Arazide koni penetrasyon testi (CPT) ve sondaj kuyusu boyunca plaka yükleme testleri yapılmıştır. Anakayanın derinliği ise referans makalede verilen genel jeoloji profilinden elde edilmiştir. Vaka çalışması ile ilgili detaylar Şekil 2'de özetlenmektedir. Bu çalışmada önerilen formül ile oturmanın bulunma adımları aşağıda ayrıntılı olarak verilmektedir.



Şekil 2. Vaka Çalışması 1'in Detayları (Kay ve Cavagnaro, 1983)

**Adım 1-2 (wix ve wiy'nin tayini):** Asıl temel biri birlerine bitişik iki adet dikdörtgen temelden meydana gelmektedir (Şekil 2). Kay ve Cavagnaro'nun çalışmasında bu iki bitişik temel, boyu 54 m ve genişliği 27 m olan dikdörtgen şeklinde tek bir radye temele dönüştürülmüştür. Referans çalışmadaki bu değerler aynı şekilde kullanılmışlardır (Tablo 4, Kolon 1 ve 2). Tek bir radye temel kabulünde en büyük oturma merkezde olacaktır. Öte yandan biri birlerine bitişik olan iki temelde en büyük oturma ortak kenara yakındır.

**Adım 3 (th'nin tayini):** Radye temelin kalınlığı (th) referans çalışmada 0.9 m olarak verilmiştir (Tablo 4, Kolon 3).

**Adım 4-8 (E1, E2, E3, E4, E5'in tayini):**

E<sub>1</sub>-E<sub>5</sub> değişik derinliklerde karşılaşılan değişik zeminlerin elastisite modüllerini temsil eder (Şekil 1). Formülde, ilk dört tabakanın kalınlığı sabittir. Bu kalınlıklar 2, 4, 6 ve 8 m'dir. Sonuncu tabakanın kalınlığı ise isteğe bağlıdır. Vaka çalışmamızdaki tabakaların formülde belirtilen tabakalara interpolate edilmeleri gereklidir. Bu interpolasyon işleminden sonra elde edilen tabaka zemin modülleri Şekil 2'de verilmektedir. Referans çalışmada, sondaj kuyusu boyunca plaka yükleme deneyinden kumlu kil için elde edilen drenajsız 30 MPa'lık zemin modülü değeri 0.75 ile çarpılarak drenajlı modüle geçiş yapılmıştır (Kay ve Cavagnaro, 1983). Bu değer (23 MPa) değiştirilmeden 1. ve 2. formül tabakası için kullanılmıştır. Bu durumda E1 ve E2, 23 MPa olmuştur. Kumlu Çakıltaşı için zemin modülü bu malzeme için verilen tipik değerlerin ortalamasından elde edilmiştir (Bowles, 1997). Kumlu çakıltaşı tabakası 3. formül tabakasına rastlamaktadır, dolayısı ile E3= 150 MPa'dır. Kumtaşı için Kay ve Cavagnaro 500 MPa'lık bir zemin modülü değeri kullanmıştır. Kumtaşı tabakası, formüldeki 4. ve 5. tabakaya rastlamaktadır, dolayısı ile E4 = E5 = 500 MPa olarak alınmıştır (Tablo 4, Kolon 4-8).

**Adım 9 (ld'nin tayini):** Referans makalede ortalama yapı basıncı 128 kN/m<sup>2</sup> olarak verilmiştir. Ancak temel yeryüzünden 3 m aşağıdadır. Yapı basıncından 3 m'lik toprak basıncını çıkarılarak, net temel basıncı 128

$kN/m^2 - 3 m \times 17 kN/m^3 = 77 kN/m^3$  olarak bulunur (Kolon 9).

**Adım 10 (Eraft'ın tayini):** Radye betonunun elastisite modülü verilmemiştir. Bu değer 30 000 MPa olarak girilmiştir (Tablo 4, Kolon 10).

**Adım 11 (Eraft'ın tayini):** 5. tabakanın kalınlığı "bed", anakaya olan uzaklıktan 20 çıkarılarak bulunabilir. Referans makalede anakaya derinliği yaklaşık 93 m olarak verilmiştir. Bu durumda 5. tabakanın kalınlığı "bed" 73 m olmaktadır (Tablo 4, Kolon 11).

**Adım 12-16 (po1, po2, po3, po4, po5'in tayini):**

Drenajlı oturma hesabı için Poisson oranı bütün zeminler için 0.35 olarak alınmıştır (Tablo 4, Kolon 11-16).

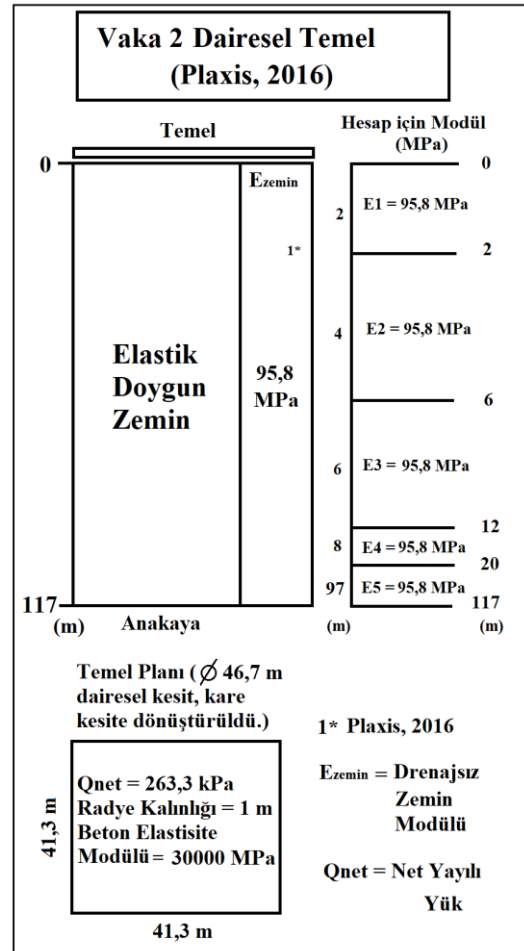
**Tablo 4.** Oturma hesabı için girdiler ve oturma değerleri

	1	2	3	4
<b>Vaka No</b>	<b>wix - radye gen. (m)</b>	<b>wiy - radye uzun. (m)</b>	<b>th - radye kalı. (m)</b>	<b>E1 zemin mod. (kPa)</b>
1	54	27	0,9	23000
2	41,3	41,3	1	95800
	5	6	7	8
<b>Vaka No</b>	<b>E2 zemin mod. (kPa)</b>	<b>E3 zemin mod. (kPa)</b>	<b>E4 zemin mod. (kPa)</b>	<b>E5 zemin mod. (kPa)</b>
1	23000	150000	500000	500000
2	95800	95800	95800	95800
	9	10	11	12
<b>Vaka No</b>	<b>ld - yük (kPa)</b>	<b>Eraft - radye elas. mod. (MPa)</b>	<b>bed = anak. derin. - 20 (m)</b>	<b>po1 Poisson Oranı</b>
1	77	30000	73	0,35
2	263,3	30000	96,75	0,49
	13	14	15	16
<b>Vaka No</b>	<b>po2 Poisson Oranı</b>	<b>po3 Poisson Oranı</b>	<b>po4 Poisson Oranı</b>	<b>po5 Poisson Oranı</b>
1	0,35	0,35	0,35	0,35
2	0,49	0,49	0,49	0,49

### Vaka Çalışması 2'nin Önerilen Formül ile Çözülmesi (Plaxis, 2016)

Günümüzde radye temel oturma hesapları sıklıkla sonlu elemanlar programları ile yapılır

hale gelmiştir. Dolayısı ile önerilen radye temel oturma formülünden elde edilen sonuçların, sonlu elemanlar programlarının verdiği sonuçlar ile ne derece tutarlı olduğu araştırılmalıdır. Bunun için Plaxis 2D ve Plaxis 3D programlarının oturma tahmini doğrulaması için kullandığı silindirik tank oturma modeli, bir kez de önerilen formülle çözülmüştür (Plaxis, 2016). Doğrulama çalışmasında, 46,7 m çapında, zemine 263,3 kPa'lık ortalama basınç uygulayan silindirik bir tank, elastik ve doymun bir zemine oturmaktadır. Vaka çalışması ile ilgili detaylar Şekil 3'de özetlenmektedir. İlgili referansta, Plaxis 2D ve 3D programlarından çıkan oturma değerleri, Lancellota, 2008 tarafından silindirik tanklar için verilen oturma formülü sonucuyla karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada önerilen formül ile oturma bulunma adımları aşağıda ayrıntılı olarak verilmektedir.



**Şekil 3.** Vaka Çalışması 2'nin Detayları (Plaxis, 2016)

**Adım 1-2 (wix ve wiy'nin tayini):** Referans çalışmada silindirik tankın çapı 46,7 m olarak verilmiştir. Dairesel kesitin formülde kullanılabilmesi için, dairesel kesit 41,3 m kenar uzunluklu kareye dönüştürülmüştür. Bu yöntemle  $wix = wiy = 41,3$  m olarak bulunmuştur (Tablo 4, Kolon 1 ve 2).

**Adım 3 (th'nin tayini):** Plaxis, 2016'daki örnekte silindirik tankın bir temeli olmadığı, zemin üzerine doğrudan oturduğu varsayılmıştır. Bu varsayımın ana nedeni, Plaxis ile karşılaştırma yapılan elastik yöntemde (Lancellota, R., 2008) temel kalınlığının girilememesidir. Öte yandan bu çalışmada önerilen formüle bir radye kalınlığı girilmelidir. Regresyon analizine dayalı formülün çıkarılışındaki 90 adet kombinasyonun 81'inde 1 m'lik radye kalınlığı kullanılmıştır. Ayrıca formül data havuzundaki en düşük temel kalınlığı 0.5 m'dir (Tablo 3). Normalde tanımsız olan radye kalınlığının girilmesinden dolayı oluşacak sapmaları en aza indirmek için formüle, data havuzunda en sık kullanılan temel kalınlığı girilmiştir ( $th=1$  m, Tablo 4, Kolon 3).

**Adım 4-8 (E1, E2, E3, E4, E5'in tayini):**

$E_1-E_5$  değişik derinliklerde karşılaşılan değişik zeminlerin elastisite modüllerini temsil eder (Şekil 1). Referans çalışmada, 95,8 MPa'lık sabit drenajsız bir zemin modülü verilmiştir. Dolayısı ile  $E_1=E_2=E_3=E_4=E_5 = 95,8$  MPa olarak girilmiştir (Tablo 4, Kolon 4-8).

**Adım 9 (ld'nin tayini):** Referans çalışmada ortalama yapı basıncı 263,3 kN/m<sup>2</sup> olarak verilmiştir (Kolon 9).

**Adım 10 (Eraft'm tayini):** Adım 3'te verilen düşüncelere benzer olarak, tanımsız radye betonu elastisite modülü için formül havuzunda en sık kullanılan 30 000 MPa değeri kullanılmıştır (Kolon 10).

**Adım 11 (Eraft'm tayini):** 5. tabakanın kalınlığı "bed", anakayaya olan uzaklıktan 20 m çıkarılarak bulunabilir. Referans makalede anakaya derinliği yaklaşık 116,75 m olarak verilmiştir. Bu durumda 5. tabakanın kalınlığı "bed" 96,75 m olmaktadır (Kolon 11).

**Adım 12-16 (po1, po2, po3, po4, po5'in tayini):**

Referans çalışmada, suya doymuş drenajsız zeminin oturma hesabı için Poisson oranı bütün

tabakalarda 0,49 olarak alınmıştır (Kolon 11-16).

## Vaka Çalışmasının Sonuçlarının Yorumlanması

Kay ve Cavagnaro, 1983 tarafından iletilen 1. Vakada, Tıbbi bilimler binası için sahada ölçülen oturma değeri 14,5 mm olarak verilmektedir. Önerilen formül ile bu oturma değeri 15,7 mm olarak tahmin edilmiştir. Tahmin edilen değer, ölçülen değerden % 8 sapmıştır.

2. Vaka çalışmasında ise silindirik tankın oturması Plaxis 2D ve Plaxis 3D programlarıyla sırasıyla 74,2 mm, 75,6 mm olarak hesaplanmıştır. 3 Boyutlu sonlu elemanlar çözümüne dayanan formülün verdiği oturma ise 78,0 mm'dir. 3 Boyutlu formülün verdiği değer, Plaxis 3D'nin sonucundan % 3 fazladır. Sonuçların karşılaştırılmasından da görüleceği üzere, önerilen formül ölçülen veya teorik değerlere çok yakın sonuçlar vermektedir.

## Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışma kapsamında 3-Boyutlu sonlu elemanlar analizi tabanlı radye oturma formülü sunulmuştur. Formül, radyenin elastisite modülünü, enini, boyunu, kalınlığını, yayılı yükü ve 5 adet zemin tabakasının zemin modülünü ve Poisson oranını bünyesine almaktadır.

Yapılan bu çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- Formül 3-Boyutlu sonlu elemanlar tabanlı olduğu için oldukça yaklaşık sonuçlar vermektedir.
- Vaka Çalışması 1'de yapımı sırasında oturma ölçümü yapılan bir binaya ait veriler kullanılarak, binanın oturması, önerilen formülle hesaplanmıştır. Drenajlı zemin modüllerinin kullanıldığı Vaka çalışması 1'de formül, ölçülen veriden % 8 sapma göstermiştir.
- Önerilen formül sonuçlarının sonlu eleman programında çıkan sonuçlarla karşılaştırıldığı

Vaka Çalışması 2’de ise Plaxis 3D sonlu elemanlar programı sonucu ile formülün verdiği sonuç arasındaki fark % 3 kadardır.

- Formül ile yukarıda elde edilen oturma miktarları ölçülen ve teorik olarak hesaplanan değerlere çok yakın çıkmışlardır.
- Bu çalışmada sunulan yöntemin radye temellerin oturmasının bulunmasında pratik ve güvenilir bir araç olacağı düşünülmektedir.

## Kaynaklar

- Berardi, R., Jamiolkowski, M. and Lancellotta, R. (1991), “Settlement of shallow foundations in sands selection of stiffness on the basis of penetration resistance”, Proceedings of the Geotechnical Engineering Congress, Boulder, Colorado, U.S.A., June.
- Bowles, J.E. (1997), Foundation Analysis and Design, McGrawHill Inc., New York, U.S.A.
- Burland, J.B. and Burbidge, M.C. (1985), “Settlement of foundations on sand and gravel”, Proc. Inst. Civ. Eng., 78(1), 1325-1381.
- Das, B.M. (1983), Principles of Foundation Engineering, Wadsworth, Inc., Belmont, California, U.S.A.
- Das, B.M. and Nagaratnam, S. (2007), “Settlements of shallow foundations on granular soil-an overview”, Int. J. Geotech. Eng., 1(1), 19-29.
- DeBeer, E.E. (1965), “Bearing capacity and settlement of shallow foundations on sand”, Proceedings of the Symposium on Bearing Capacity and Settlement of Foundations, Duke University, Durham, North Carolina, U.S.A., April.
- DIANA FE User’s Manual (2014), Release 9.5, TNO DIANA BV, The Netherlands.
- Erzİn, Y. and Gul, T.O. (2013), “The use of neural networks for the prediction of the settlement of pad footings on cohesionless soils based on standard penetration test”, Geomech. Eng., 5(6), 541-564.
- Giroud, J.P. (1972), “Settlement of rectangular foundation on soil layer”, J. Soil Mech. Found. Div., 98(SM1),149-154.
- Hamderi, M. (2019), “Footing Settlement Formula Based on ulti-Variable Regression Analyses”, Geomechanics and Engineering, 17(1), 11-18.
- Janbu, N., Jerrum, L. and Kjaemli, B. (1956), Vetledning ved Losning au Fundamentering Soppgauer, Norwegian Geotechnical Institute, 16.
- Kay, N. and Cavagnaro, R.L. (1983), “Settlement of raft foundations piles”, J. Geotech. Eng., 109(11), 1367-1382.
- Lancellotta, R. (2008). Geotechnical engineering. Balkema.
- Lutenegger, A.J. and Degroot, D.J. (1995), “Settlement of shallow foundations on granular soils”, Report of research conducted for Massachusetts Highway Department transportation research project, Contract #6332, Task Order #4.
- Mayne, P.W. and Poulos, H.G. (1999), “Approximate displacement influence factors for elastic shallow foundations”, J. Geotech. Geoenviron. Eng., 125(6), 453-460.
- Meyerhof, G.G. (1956), “Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils”, J. Soil Mech. Div., 82(SM1), 1-12.
- Mir, M., Bouafia, A., Rahmani, K. and Aouali, N. (2017), “Analysis of load-settlement behaviour of shallow foundations in saturated clays based on CPT and DPT tests”, Geomech. Eng., 13(1), 119-139.
- Mohamed, F.M.O., Vanapalli, S.K. and Saatcioglu, M. (2013), “Generalized Schmertmann Equation for settlement estimation of shallow footings in saturated and unsaturated sands”, Geomech. Eng., 5(4), 343-362.
- Plaxis 2016, Validation - Flexible tank foundation on elastic saturated soil, <https://www.plaxis.com/support/verifications/flexible-tank-foundation-on-elastic-saturated-soil/>
- Schmertmann, J.H. (1970), “Static cone to compute static settlement over sand”, J. Soil Mech. Found. Div., 96(SM3), 1011-1043.
- Terzaghi, K. and Peck, R.B. (1948), Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley & Sons, New York, U.S.A.

## New method for estimating Raft Foundation Settlement

### Extended abstract

In the past century, numerous formulas have been offered for the settlement prediction of foundations. Based on their approaches, these formulas can be categorized into 3 groups: 1-)Elastic approaches, (Janbu et al., 1956, Grioud, 1972, Das, 1983, Mayne and Poulos, 1999, Bowles, 1987, Mohamed et al., 2013), 2-) SPT- based approaches, (Terzaghi and Peck, 1948, Meyerhof, 1956, Burland and Burbidge, 1985, Erzin and Gul, 2013), 3-) CPT- based approaches, (De Beer, 1965, Schmertmann, 1970, Berardi et al., 1991, Mir et. al., 2017).

Lutenegger ve Degroot, 1995 obtained settlement values from foundation loading tests in the University of Texas A & M. They compared these settlement values with the settlements predicted by various settlement formulas. As for the formula load input, they used a load level that produced 25 mm settlement in the actual test. The deviations of the settlement prediction turned out to be 67 % and 113 %, when SPT and CPT based formulas respectively were used. According to comparison, the difference between the measured and predicted results indicates a major problem with the accuracy of the current approaches. Similarly, Das and Nagaratnam, 2007, reported that the current formulas overestimate the settlements, whereas they underestimate the allowable soil pressures.

Current raft settlement formulas adopt an elastic approach, and they usually don't allow the inclusion of multiple soil layers. Nowadays, engineers employ 3-dimensional finite element analyses in order to enhance the accuracy of their settlement predictions. By employing a 3-dimensional finite element approach, Hamderi, 2019 created a settlement database for 90 different finite element model combinations. Using this database, Hamderi, 2019 derived a settlement formula, which included the dimensions and the elastic modulus of a rectangular raft, vertical uniform pressure and soil moduli and Poisson's ratios up to 5 layers. In the scope of this study, formula was applied to two well-document case studies.

The first case study reported by Kay and Cavagnaro, 1983 includes the settlement measurements of the Medical Science Building built in 1979, Adelaide, South Australia. The building has 9 floors including the ground and basement. The building is seated on a 55 m x 30 m raft with a 0.9 m thickness. The reference study reports a building load of 128 kPa

on the ground, whereas the net pressure becomes 77 kPa with the exclusion of the pressure due to the foundation depth of 3 m. A layer of sandy clay with 6 m thickness underlays the foundation. Beneath this layer, there is a sandy gravel layer with 6 m thickness. Finally, the sandy gravel layer is followed by a sandstone layer which is 78 m in thickness. In summary, the firm bedrock is reached at the depth of 90 m below the foundation level. CPT and Downhole Plate Loading Test (DHPL) have been performed in the site. The depth of these tests are only 10 m therefore, the rest of the soil profile has been obtained from the general geological profile. In the reference study, the DHPL results have been used to calculate the undrained soil modulus of the sandy clay. By multiplying this value by 0.75, it is converted to drained modulus (Kay and Cavagnaro, 1983). The soil modulus of the sandy gravel layer has been determined using the charts reported by Bowles, 1997. The soil modulus of the sandstone is provided by the reference study by Kay and Cavagnaro, 1983. Using such input parameters, formula gave a settlement result about 8 % greater than the observed value. In the second case study, the formula results have been compared with the ones obtained from finite element programs, Plaxis 2D and Plaxis 3D. The verification example of the Plaxis program, "The flexible tank foundation on elastic saturated soil" has been recalculated by the offered formula. In the Plaxis example, a cylindrical tank is seated on a uniform elastic undrained soil. All the input parameters for the formula were straight forward, expect that the thickness and elastic modulus of the raft below the tank were undefined. In the offered formula, these values were taken as the most frequently used values in the process of formula derivation. Namely, a thickness of 1 m and an elasticity modulus of 30 GPa were used for the raft. Finally, the difference of the formula and Plaxis 3D results ended up being 3 %.

The following conclusions can be drawn from the study:

- The settlement formula is quite accurate, because it is based on 3D Finite Element results.
- The formula achieved an 8 % deviation in the first case study, whereas the deviation was only 3 % in the second case.
- It is believed that the offered settlement formula will be a good alternative for finite element based settlement calculations.

**Keywords:** soil, raft foundation, settlement, footing formula



## Ekler

### Formülün Türetilme Aşamaları

Formülün türetilme aşamaları Hamderi, 2019'de detaylı olarak verilmiştir. İlk adım olarak, bir grup giriş parametresi (wix, wiy, bed,... th, Ec) 2-20 sütunlarına girilir (Tablo 1A). Bu grup için DIANA'dan elde edilen oturma değeri sütun 21'ya girilir. Bir sonraki adım, birinci grubun bir değerini değiştirmek ve yeni grup için DIANA'yı kullanarak başka bir oturma değeri elde etmektir. Ardından, ikinci grup giriş parametrelerine karşılık gelen oturma değeri ardışık sırada sütun 21'ya girilir. Bu prosedür, yeterli miktarda sonlu eleman tabanlı oturma verisi elde edilene kadar yaklaşık doksan kez tekrarlanır. Bir sonraki adım, oturma formülünü (Eşitlik 1) sütun 22'ye girmektir. Bu durumda, sütun 22, 2-20 ve 24-39 sütunlarına bağımlı hale gelir. Bu prosedür yaklaşık 90 kez tekrarlanır. Hücre 24-39'daki değerlerin "1" gibi bir başlangıç değerine sahip olması gereklidir,

böylece sütun 22'de gerçek bir sayı belirir. Sonuç olarak, 90 adet sonlu elemanlar tabanlı ve 90 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 23'e girmektir. Bu değer bizim "hatamız" olacaktır. Son olarak, sütun 23'deki hatalar alt alta toplanır ve global bir hata değeri bulunur. Şimdi hedefimiz, 24-39 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.

**Tablo 1A.** Formülün türetildiği Excel® dosyasının genel görünümü

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
No	wix (m)	wiy (m)	bed (m)	th (m)	E <sub>1</sub> (MPa)	E <sub>2</sub> (MPa)	E <sub>3</sub> (MPa)	E <sub>4</sub> (MPa)	E <sub>5</sub> (MPa)	p <sub>01</sub>	p <sub>02</sub>
1	20	20	30	1	20	20	20	20	20	0.3	0.3
....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....	....
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
p <sub>03</sub>	p <sub>04</sub>	p <sub>05</sub>	ld (kPa)	Ec (MPa)	bed (m)	th (m)	Ec (MPa)	DIANA Oturma (m)	Formül Oturma (m)	21 ve 22'nin farkının karesi	
0.3	0.3	0.3	100	10000	50	1	10000	x.xx	?	?	
....	....	....	....	....	....	....	....	....	?	?	
....	....	....	....	....	....	....	....	....	?	?	
23'ün Toplamı--->										?	
24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
S <sub>b</sub>	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
36	37	38	39								
l	m	n	o								
?	?	?	?								