Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

SIĞ TEMELLERDE ŞEKİL FAKTÖRÜNÜN EFEKTİF BİRİM HACİM BİLEŞENİN BELİRLENMESİ

DETERMINATION OF THE EFFECTIVE UNIT VOLUME COMPONENT OF THE SHAPE FACTOR IN SHALLOW FOOTINGS

Kaan YÜNKÜL[1], Ayhan GÜRBÜZ[2], Sarper DEMİRDÖĞEN[3]

ÖZET

Sığ temelleri geometrik şeklinin zeminin taşıma kapasitesi ve yük-deplasman davranışı üzerinde etkili olduğu bilinmesi rağmen, mevcut literatürde tasarımcılar için önerilen şekil faktörünün efektif birim hacim bileşeni (S_γ) eşitlikleri birbirleri ile tutarlı değildir. Bu durum; yönetmeliklerin gerçekçi ve güvenilir temel tasarım için yüksek güvenlik faktörleri kullanmasına neden olmaktadır. Bazı yöntemler şekil faktörünün boy/en (L/B) oranın azalmasına bağlı olarak azaldığını ve maksimum değerinin kare temellerde olduğunu belirmesine rağmen, bazıları ise bu durumun tam tersini önermişlerdir. Benzer tutarsızlıklar dairesel temeller için de geçerlidir. Bu nedenle, yapılan çalışmada PLAXIS 3D ticari yazılım kullanılarak bir dizi sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Analizlerde; %56 rölatif sıkılığa sahip kohezyonsuz zemin üzerine yerleştirilen L/B oranı 1 ile 10 arasında değişen dikdörtgen temeller ve şerit temel ve dairesel temel tercih edilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda şekil faktörünün L/B=1'den L/B=1.5'a kadar artış gösterme trendinde olduğu ve bu değerden sonra ise boy/en oranının artmasına bağlı olarak azaldığı görülmüştür. Fakat azalma eğiliminin L/B=3'den ihmal edilebilir seviyede olduğu elde edilen bir diğer sonuçtur. Şekil faktörlerinde temel geometrisine bağlı olarak gözlenen değişim, oluşan yenilme yüzeylerinin üç boyutlu etkileşimi nedeniyle gelişen pasif kuvvetlerin büyüklüğündeki farklılıklardan kaynaklanmaktadır.
Anahtar Kelimeler: *Şekil faktörü, sığ temeller, boy/en oranı, sonlu elemanlar analizi, kohezyonsuz zemin*

ABSTRACT

It is known that the geometric shape of shallow foundations affects the bearing capacity and load-displacement behavior of the soil; however, the equations for the effective unit volume component (S_γ) of the shape factor suggested to designers in the current literature are inconsistent. This situation leads design codes to utilize high safety factors for realistic and reliable basic designs. Some methods recommend that the shape factor decreases with decreasing aspect ratio (L/B) and then reaches its maximum value in square footings, whereas others have proposed the opposite trend. Similar inconsistencies have also been reported in the case of circular footings. Thus, in the present study, a series of finite element analyses were performed using the commercial PLAXIS 3D software. In these analyses, rectangular footings with various aspect ratios ranging from 1 to 10 and strip footings placed on cohesionless soil with 56% relative density were preferred. The results demonstrated that the shape factor tended to increase from L/B=1 to L/B=1.5, and after this threshold value, it diminished with increasing aspect ratio. However, another result obtained is that the decreasing tendency is negligible from L/B=3. The observed variation in shape factors, depending on the foundation geometry, stems from differences in the magnitude of passive forces developed due to the three-dimensional interaction of the resulting failure surfaces.
Keywords: *shape factor, shallow footing, aspect ratio, finite element analysis, cohesionless soil*

[1] Dr., Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, kaan.yunkul@gop.edu.tr (Sorumlu Yazar)
[2] Prof. Dr., Gazi Üniversitesi, agurbuz@gazi.edu.tr
[3] Dr., Kansas Üniversitesi, sarperdemirdogen@ku.edu

1. GİRİŞ

Sığ temellerin herhangi bir zemin yenilmesi meydana gelmeden güvenli bir şekilde taşıyacağı maksimum gerilme veya diğer bir ifade ile nihai taşıma gücü (q_{ult}) eşitliği ilk kez Terzaghi (1943) tarafından geoteknik mühendisliği literatürüne kazandırılmıştır (Eş 1). Terzaghi (1943) bu eşitliği düzlem gerilim (plane strain) koşullarındaki homojen bir zemin üzerine oturan merkezi eksenel yükler altındaki tamamen pürüzlü şerit temeller için önermiştir. Araştırmacı eşitliğinde aktif kayma kama, radyal kayma kayması ve Rankine pasif kayma kamasının tamamen mobilize olduğunu kabul etmiştir. Bu eşitlik nihai taşıma gücünü üç farklı bileşene ayırır. Bunlar kohezyon, sürşarj ve birim hacim ağırlık bileşenleridir. Kohezyon bileşeni; temelin zemin yüzeyinde olduğunu ve temel altındaki zeminin kütlesiz ve kohezyonlu olduğunu varsayarken, sürşarj bileşeni; temelin belirli bir derinlikte kütlesiz kohezyonsuz zemin üzerinde olduğunu kabul eder. Birim hacim ağırlık bileşeni ise temelin zemin yüzeyinde birim hacim ağırlığı olan kohezyonsuz zemin üzerinde olduğunu varsayar. Ayrıca, Terzaghi (1943) her bir bileşen için içsel sürtünme açısı (ϕ) parametreleri olan taşıma gücü faktörleri (N_c, N_q ve N_γ) önermiştir. Terzaghi (1943) tarafından önerilen taşıma gücü eşitliği, sonraki yıllarda çeşitli araştırmacılar tarafından geliştirilerek temelin geometrik şekli, gömülme derinliği, yük eğim açısı ve taban eğimi gibi parametrelerin etkilerini dikkate alan düzeltme katsayılarının eklenmesiyle genel taşıma gücü eşitliği haline getirilmiştir. Bu çalışmada, farklı boy/en (L/B) oranlarına sahip temeller için şekil faktörünün efektif birim hacim ağırlık bileşeninin (S_γ) incelenmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle, varsayılan problem merkezi yükleme altında kohezyonsuz zemin üzerine yerleştirilmiş ve gömülme derinliği 0 olan farklı L/B oranlarına sahip temellerden oluşacaktır. Bu koşullar altında kohezyon ve sürşarj bileşenleri taşıma gücü eşitliğine dâhil edilmemiş; gömülme derinliği, yük eğim açısı ve taban eğimine ilişkin tüm düzeltme katsayıları 1 olarak alınmıştır. Böylece taşıma gücü eşitliği Eş 2'de verilen sadeleştirilmiş forma indirgenmiştir. Bu durumda S_γ değeri, herhangi bir dikdörtgen veya dairesel temelin nihai taşıma gücünün aynı zemin koşullarındaki şerit temelin nihai taşıma gücüne oranı ile belirlenmektedir (Eş 3).

$$q_{ult} = cN_c + qN_q + 0.5B\gamma N_\gamma \quad (1)$$

$$q_{ult} = 0.5B\gamma N_\gamma S_\gamma \quad (2)$$

$$S_\gamma = \frac{q_{ult(rc)}}{q_{ult(s)}} \quad (3)$$

Burada c kohezyonu, q sürşarj gerilmesini, B temel genişliği, γ zeminin birim hacim ağırlığını, B temel genişliğini, $q_{ult(rc)}$ dikdörtgen veya dairesel temelin taşıma gücünü, $q_{ult(s)}$ is şerit temelini taşıma gücünü simgelemektedir.

Terzaghi (1943), literatürdeki küçük ölçekli laboratuvar test sonuçlarını inceleyerek; dairesel ve kare temeller için sırası ile sabit 0.6 ve 0.8 değerlerini S_γ değeri olarak önermiştir. Meyerhof (1963), Hansen (1955, 1961), De Beer (1970) ve Perau (1997) küçük ölçekli laboratuvar test sonuçlarına dayalı ampirik S_γ eşitlikleri önermişlerdir. Fakat bu araştırmacıların önerilerinin birbirleri ile tutarlı olmaması ve küçük ölçekli deneylerin boyut etkisinden kaynaklı arazide temelin davranışını tam olarak yansıtamamasından dolayı 2000 yılından sonra araştırmacılar üç boyutlu sonlu elemanları (FE) ve sonlu farklar (FD) yöntemlerine dayanan analizlere yönelmişlerdir.

Sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar, S_γ değerinin yalnızca temel geometrisine değil, aynı zamanda zeminin içsel sürtünme açısına da bağlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca, maksimum S_γ değerinin görüldüğü L/B değerinin içsel sürtünme açısı ile ilişkili olduğunu Zhu ve Michalowski (2005), Lyamin vd. (2007) ve Puzokov vd. (2009) tarafından raporlamışlardır. Söz konusu çalışmalarda, düşük içsel sürtünme açılarında ($\phi<30°$) maksimum S_γ değerlerinin şerit temellerde elde edildiği, buna karşılık yüksek içsel sürtünme açılarında ($\phi>45°$) maksimum S_γ değerlerinin kare temellerde gözlendiği belirtilmiştir. Ayrıca birçok araştırmacı (Zhu ve Michalowski, 2005; Puzokov vd. 2009; Antao vd., 2012; Mohapatra ve Kumar, 2020; Yünkül vd., 2026) orta düzey içsel sürtünme açılarına sahip kumlu zeminlerde ($30° \leq \phi \leq 45°$), S_γ değerinin başlangıçta L/B oranının artması ile arttığını, L/B oranının yaklaşık 1 ile 2.5 aralığında lokal bir maksimum değere ulaştığını ve bu kritik noktadan sonra S_γ değerinin L/B artması ile azalan bir trend gösterdiğini ortaya koymuşlardır. Lyamin vd. (2007) tarafından gerçekleştirilen FE analizlerinde, dairesel temellerin taşıma gücünün kare temellere daha yüksek olduğunu gözlemlemiştir. Loukidis ve Salgado (2009) ile Mohapatra ve Kumar (2020), temel taban pürüzlülüğünün artmasına bağlı olarak S_γ değerinin de arttığını rapor etmişlerdir. Literatürde S_γ eşitlikleri Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Literatürde önerilen S_γ eşitlikleri

Araştırmacı	Eşitlik
Terzaghi (1943)	$S_{\gamma(r)} = 0.8$ (kare temel için) $S_{\gamma(c)} = 0.6$
Hansen (1955)	$S_{\gamma(r)} = 1 - 0.3B/L$
Hansen (1961)	$S_{\gamma(r)} = 1 - 0.5(0.2 - tan^6\phi)B/L$
Meyerhof (1963)	$S_{\gamma(r)} = 1 + 0.1tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right)B/L$
De Beer (1970)	$S_{\gamma(r)} = 1 - 0.4B/L$
Bolton ve Lau (1993)	$S_{\gamma(c)} = 0.76 + 1.74tan^2\phi$
Perau (1997)	$S_{\gamma(r)} = \frac{1}{1 + B/L}$
Zhu vd. (2001)	$S_{\gamma(c)} = 0.55\left(\frac{\gamma B}{P_a}\right)^{0.04}$
Zhu ve Michalowski (2005)	$S_{\gamma(r)} = 1 + (0.6tan^2\phi - 0.25)B/L$ ($\phi \leq 30°$ için) $S_{\gamma(r)} = 1 + (1.3tan^2\phi - 0.5)\left(\frac{L}{B}\right)^{1.5} e^{-L/B}$ ($\phi > 30°$ için)
Lyamin vd. (2007)	$S_{\gamma(r)} = 1 + (0.0336\phi - 1.0611)B/L$ $S_{\gamma(c)} = [1 + (0.0336\phi - 1.0611)](1 + 0.002\phi)$
Loukidis ve Salgado (2009)	$S_{\gamma(c)} = 1 + \left(0.26\frac{1 + sin\phi}{1 - sin\phi} - 0.73\right)$
Puzokov vd. (2009)	$S_{\gamma(r)} = 1 + (0.6tan^2\phi - 0.25)B/L$ ($\phi \leq 30°$ için) $S_{\gamma(r)} = 1 + (1.3tan^2\phi - 0.5)\left(\frac{L}{B}\right)^{1.55} e^{-0.9L/B}$ ($\phi > 30°$ için)
Antao vd. (2012)	$S_{\gamma(r)} = 1 + (9.74sin^5\phi - 0.19)B/L - 3.82sin^5\phi(B/L)^2$
Shafiqul Islam vd. (2017)*	$S_{\gamma(r)} = 1 + (1.8\phi^2 - 0.29)$ (kare temel için) $S_{\gamma(c)} = 1 + (1.4\phi^2 - 0.36)$
Yünkül vd. (2026)	$S_{\gamma(r)} = 0.74 + 0.34tan\phi + (-1.53 + 8.88tan^2\phi)e^{-12.09L/B - 0.02tan\phi + 8.66}\left(\frac{L}{B}\right)^{17.12}$

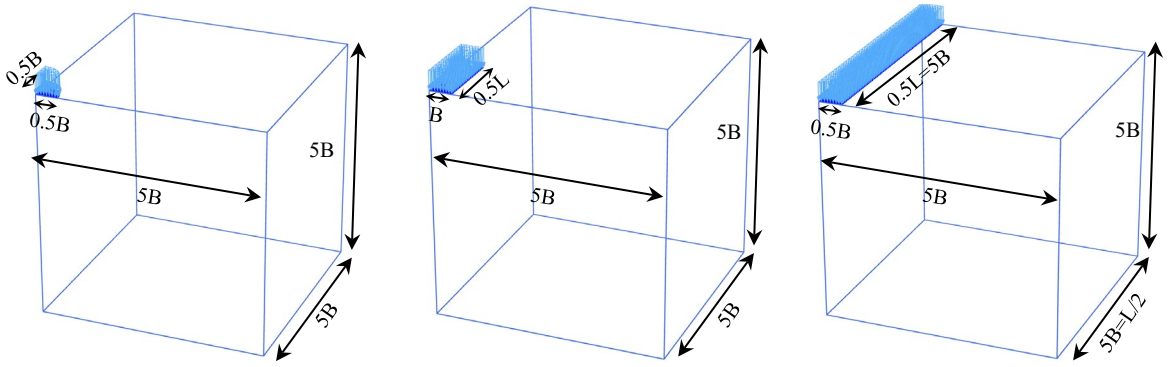
Not: $S_{\gamma(r)}$ dikdörtgen temeller için önerilen şekil faktörünü, $S_{\gamma(c)}$ ise dairesel temeller için önerilen şekil faktörünü simgeler. *: içsel sürtünme açısı değeri radyandır.

Literatürde birçok yarı-ampirik ve sayısal analizlerden elde edilen S_γ eşitlikleri bulunmasına rağmen; mevcut ampirik eşitliklerdeki tutarsızlıklar ve sayısal analizleri oluşturulan modeldeki analiz yöntemindeki, zemin bünye modelindeki, zemin modülünde, ağ

yapısındaki ve sıkılığındaki, dilatasyon açısındaki farklılıklarda dolayı günümüzde halen tam olarak geçerli ve kabul görmüş S_γ eşitliği geoteknik literatüründe halen mevcut değildir. Bu nedenle bu çalışma kapsamında %56 rölatif sıkılığa sahip zemin üzerine yerleştirilmiş L/B değerleri 1 ile 10 arasında değişen dikdörtgen ve kare temeller ile dairesel temeller için S_γ değerler PLAXIS 3D FE programı yazılımı kullanılarak elde edilecek ve mevcut literatür ile karşılaştırılmıştır.

2. SAYISAL ANALİZLER

FE analizlerinde oluşturulan zemin geometrisi Şekil 1'de verilmiştir. Yapılan çalışmada analiz sürelerinin azaltılması, yenilme yüzeyinin gerçekçi gözlemlenmesi, temellerin, yükleme koşullarının ve zemin profilinin simetrisinden dolayı toplam problemin dörtte biri modellenmiştir. Ayrıca, yükleme sonunda temel altında oluşan potansiyel yenilme yüzeyinin model sınırları ile etkileşiminin önüne geçecek bir şekilde zemin modelinin boyutları belirlenmiştir. Bu nedenle modelin genişliği (x ekseni), uzunluğu (y ekseni) ve derinliği (z ekseni) temel genişliğinin 5 katı (5B) olarak seçilmiştir. Yapılan çalışmada temel genişliğinden kaynaklı ölçek etkisini minimize etmek amacı ile temel genişliği veya çapı 1 m olarak belirlenmiştir (Cerato ve Lutenegger, 2007). Ek olarak, L/B=10 durumunda modelinin y ekseninin genişliği L/2'ye eşit olacaktır. Bu şekilde şerit temeller için düzlem gerinim koşulları 3D ortamda gerçekçi bir şekilde simüle edilmiş olacaktır. Yapılan kapsamlı 3D FE analizlerinde dairesel temel ve L/B oranı 1, 1.25, 1.5, 2, 3, 4, 5, 6, 8 olan dikdörtgen temeller ve L/B oranı 10 olan şerit temeller kullanılmıştır.



(a) (b) (c)

Şekil 1. Oluşturulan model geometrileri: (a) dairesel temel, (b) dikdörtgen temel, (c) şerit temel

Oluşturulan 3D modelde, taban sınırında sabit mesnet koşulları uygulanırken, yan sınırlarda zeminin düşey yöndeki hareketine izin veren ancak yanal yöndeki hareketlerini kısıtlayan hareketli mesnet koşulları tanımlanmıştır. Zemin, 10 düğümlü tetrahedral hacim elemanlarıyla; temel ise 6 düğümlü üçgen yüzey elemanlarıyla modellenmiştir. Temel ile zemin arasındaki etkileşim ve sürtünme davranışını gerçekçi bir şekilde temsil edebilmek amacıyla 12 düğümlü arayüz elemanları kullanılmıştır. Ayrıca, gerçekleştirilen ağ hassasiyet analizleri sonucunda optimum ortalama ağ eleman boyutu 0.3031 m olarak belirlenmiştir.

FE analizlerinde kohezyonsuz zeminin doğrusal olmayan davranışını daha gerçekçi simüle ettiği için Pekleşen Zemin (HS) bünye modeli zemin modeli olarak belirlenmiştir. Bu bünye modelindeki malzeme parametreler için Brinkgreve vd. (2010) tarafından kum zeminler için

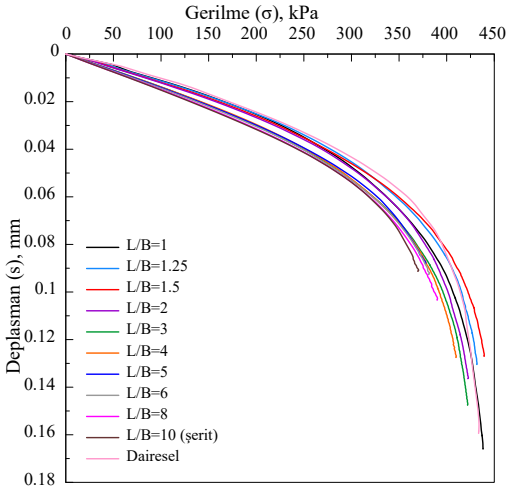
ampirik olarak önerilen eşitliklerden yararlanılmıştır. Brinkgreve vd. (2010) tarafından önerilen eşitlikler ve %56 rölatif sıkılığa sahip kum zemin için kullanılan malzeme parametreleri Tablo 2'de özetlenmiştir. Ayrıca, yakınsama hatalarını ve erken yenilmelerin önüne geçmek için çok düşük bir kohezyon değeri (c=0.1kPa) kullanılmıştır. Temel lineer elastik yapısal eleman olarak modellenmiş ve tipik C30 beton malzeme parametreleri temele atanmıştır. Tamamen pürüzlü temel koşullarının simüle edilmesi amacı ile dayanım azaltma katsayısı (R_{int}) 1 olarak seçilmiştir.

Tablo 2. Çalışmada kullanılan zemin parametreleri

Parametreler ve birimleri	Önerilen eşitlikler	Çalışmada kullanılan değerler
Kuru birim hacim ağırlık (γ_{dry}), kN/m^3	$15 + 4D_r/100$	17.24
Doygun birim hacim ağırlık (γ_{sat}), kN/m^3	$19 + 1.6D_r/100$	19.90
Referans sekant modülü (E_{50}^{ref}), kPa	$60000D_r/100$	33600
Referans ödemetrik modül (E_{oed}^{ref}), kPa	$60000D_r/100$	33600
Referans yükleme-boşaltma modülü (E_{ure}^{ref}), kPa	$180000D_r/100$	100800
Referans çevre basıncı	100	100
İçsel sürtünme açısı ($\emptyset$),°	$28 + 12.5D_r/100$	35
Dilatasyon açısı (ψ), °	$-2 + 12.5D_r/100 \geq 0$	5
Kohezyon (c), kPa		0.1
Poisson oranı (υ_{ur}), -	0.2	0.2
Üssel katsayı (m), -	$0.7 - D_r/320$	0.525
Yenilme oranı (R_f), -	$1 - D_r/800$	0.93

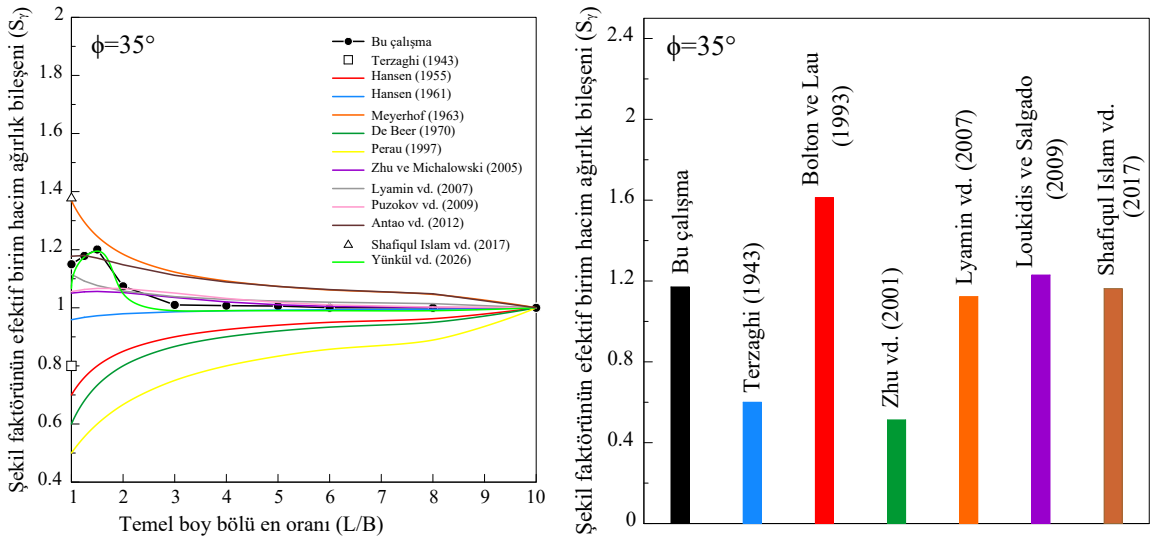
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Gerçekleştirilen 3D FE analizleri sonucu elde edilen gerilme-deplasman (σ-s) eğrileri Şekil 2'de sunulmuştur. Farklı geometriye sahip temellerin nihai taşıma gücü (q_{ult}) değerlerinin belirlenmesi için literatürde sıklık ile tercih edilen Mansur ve Kaufman (1956) tarafından önerilen tanjant kesişim yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntemde σ-s eğrilerinin yarı-elastik ve pekleşen bölgeleri boyunca iki adet teğet çizgi çizilir ve kesişim noktaları q_{ult} olarak kabul edilir. Literatürde sığ temellerin q_{ult} değerinin σ-s eğrileri üzerinde tahmin etmek için minimum eğim, log-log, yarı logaritmik ve 0.1B gibi farklı yöntemlerde de bulunmaktadır. Bu yöntemler kullanılarak farklı taşıma gücü değerleri tahmin edileceği unutulmamalıdır.



Şekil 2. Analizlerden elde edilen gerilme-deplasman grafikleri

Şekil 2'de görüleceği gibi temel geometrisi hem taşıma gücü hem de σ-s eğrilerinin rijitlikleri üzerinde oldukça etkilidir. L/B değeri 3'ten büyük dikdörtgen temellerin σ-s eğrilerinin davranışları birbirlerine ve L/B=10 olan şerit temellere oldukça yakın olduğu görülmektedir.

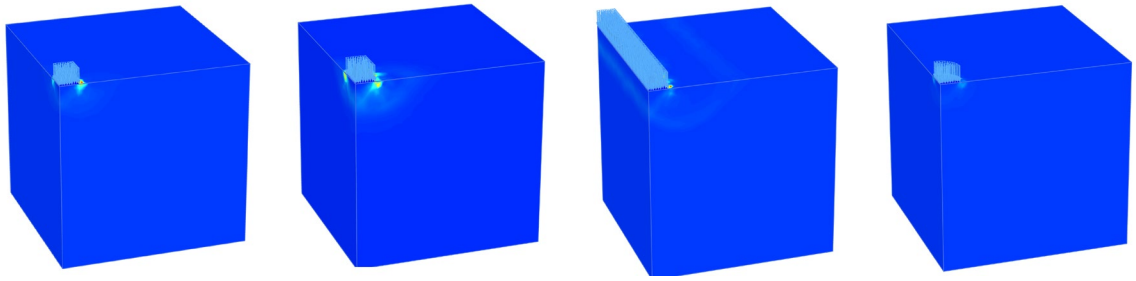


Şekil 3. Elde edilen şekil faktörü değerlerinin literatür ile karşılaştırılması: (a) dikdörtgen temeller, (b) dairesel temeller

Farklı L/B oranlarına sahip dikdörtgen ve şerit temeller (L/B=1, 1.25, 1.5, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10) ve dairesel temel için elde edilen S_γ değerleri sırası ile Şekil 3a ve Şekil 3b'de sunulmuştur. Bu çalışmada elde edilen şekil faktörü değerleri, literatürde deneysel çalışmalar ve sayısal analizler sonucunda önerilen değerler ile karşılaştırılmıştır. FE analizlerden dikdörtgen temeller için elde edilen S_γ değerleri 1 ile 1.20 arasında değişim göstermektedir. Şekil 3a'da görüleceği gibi S_γ değerleri L/B=1.5'a kadar L/B değerinin artmasına bağlı olarak artış göstermiştir ve bu boy/en oranında maksimum değerinin almıştır. Bu kritik noktadan sonra L/B oranın artmasına bağlı olarak S_γ değerleri trendindedir. Ancak L/B≥3 durumunda sonra L/B değerinin S_γ üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir seviyede olduğu gözlemlenmiştir. Bu bulgu güncel sayısal analiz sonuçlarından elde edilen bulgular ile uyumlu olmasına rağmen, minimum S_γ değerinin kare temellerde olduğunu ve L/B oranın artmasına bağlı olarak S_γ değerinin artış gösterdiği yarı-ampirik öneriler (Terzaghi, 1943; Hansen, 1955, 1961; De Beer, 1970; Perau, 1997) ile uyumsuzdur. Dikdörtgen temeller için belirlenen S_γ değerlerinin, Yünkül vd. (2026) tarafından gerçekleştirilen sonlu eleman analizi sonuçları doğrultusunda önerilen eşitlikten elde edilen değerlerle oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca, Hansen (1961), Zhu ve Michalowski (2005), Lyamin vd. (2007) ve Puzokov vd. (2009) tarafından önerilen eşitliklerden elde edilen S_γ değerleri L/B>2 için FE analizi sonuçları arasındaki fark %1.4 ile %6.6 arasında değişim göstermektedir. Dikdörtgen temellere benzer bir şekilde dairesel temeller için önerilen eşitlikler birbirleri ile tutarsızdır. Terzaghi (1943) ve Zhu vd. (2001) 1'den küçük S_γ değerleri önermelerine rağmen; Bolton ve Lau (1993), Lyamin vd. (2007), Loukidis ve Salgado (2009) ve Shafiqul Islam vd. (2017) ise dairesel temellerin taşıma gücünün şerit temellerden yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Yapılan çalışmanda dairesel temeller için S_γ değerleri 1.18 olarak elde edilmiş olup, Lyamin vd. (2007), Loukidis ve Salgado (2009) ve Shafiqul Islam vd. (2017) ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca

dairesel temelden elde edilen taşıma gücü değeri kare temelden 1.02 kat daha yüksektir. Benzer sonuçlar Lyamin vd. (2007) tarafından da gözlemlenmiştir. Ayrıca, Pantelidis vd. (2025) literatürde kare temeller için önerilen şekil faktörü eşitliklerinin $4/\pi$ ile çarpılması ile dairesel temellerin şekil faktörünün tahmin edilmesinin basit bir mühendislik yaklaşımı olduğunu belirtilmiştir. Yapılan FE analizinden elde edilen S_γ değerleri ile mevcut literatürdeki farklılıklarının nedeni, deneysel çalışmaların küçük ölçeklerde gerçekleşmesinden, test tankında homojen zemin rölatif sıkılığının tayin edilememesinden, içsel sürtünme açısının etkisinin görülebileceği yeterli sayıda deneysel çalışma yapılmamasından ve tamamen pürüzlü temel koşullarının sağlanamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, literatürdeki sayısal analizlerde kullanılan zemin bünye modeli, sayısal analiz türü (alt ve üst sınır limit analiz, sonlu elemanlar, sonlu farklar vb.), gerilme–deplasman eğrilerinden taşıma gücünün belirlenmesinde tercih edilen yöntem, zemin modülü, dilatasyon açısı ile ağ türü ve ağ yoğunluğundaki farklılıklar literatürdeki öneriler ile elde edilen değeler arasındaki farklılığın nedenlerindendir.

PLAXIS 3D FE programında temel altında meydana gelen yenilme yüzeyi; kayma birim şekil değiştirme konturları kullanılarak belirlenmiştir. L/B değeri 1 ve 1.5 olan dikdörtgen temeller, L/B=10 olan şerit temel ve dairesel temelin yenilme yüzeyi geometrisi Şekil 4'te sunulmuştur. Bütün analizlerde yenilme yüzeyinin aktif kayma kaması, radyal kayma kaması ve pasif kayma kaması gözlemlenmiştir. Dikdörtgen ve şerit temellerde birim şekil değiştirmeler temelin köşelerinde yoğunlaşırken, dairesel temellerde temelin kenarında yoğunlaşmaktadır. Ayrıca, dikdörtgen ve şerit temellerde oluşan yenilme yüzeyi konturları temelin orta noktasında maksimum olurken, temel köşelerine doğru daralan üç boyutlu eliptik bir geometridedir. Buna karşılık dairesel temellerde yenilme yüzeyi temel kenarından dairesel bir formda yayılmaktadır. Kare temellerde yenilme yüzeyi sınırları temelin her iki doğrultusunda hemen hemen aynı iken, L/B değerinin büyümesi ile temel uzunluğun bulunduğu eksendeki yenilme yüzeyi sınırları daralırken, temel genişliğini bulunduğu eksendeki yenilme yüzeyi genişlemiştir. Bu nedenle temel altında oluşan yenilme yüzeyinin üç boyutlu geometrisi ve temel ile etkileşiminin yenilme yüzeyinde meydana gelen pasif kuvvetlerin büyüklüğüne ve dolayışla taşıma gücü üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir. Ek olarak, L/B veya temel geometrisine bağlı S_γ değerlerindeki değişimin nedeninin oluşan yenilme yüzeyinin ve yer değiştiren zemin hacminin temelin alana oranı ile ifade edilen hacimsel kırılma oranı (r_v) ile ilişkili olduğu Zhu ve Michalowski (2005) ve Yünkül vd. (2026) tarafından belirtilmiştir.



(a) (b) (c) (d)

Şekil 4. Yenilme yüzeyleri: (a) L/B=1, (b) L/B=1.5, (c) L/B=10, (d) dairesel temel

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, kumlu zeminler üzerine yerleştirilen yüzeysel temellerin geometrisinin şekil faktörünün birim hacim ağırlık bileşeni (S_γ), gerilme-deplasman eğrileri (σ-s) ve taşıma gücü (q_{ult}) üzerinde etkilerinin incelenmesi amacı ile PLAXIS 3D sonlu elemanlar (FE) yazılımı kullanılarak toplam 11 adet analiz gerçekleştirilmiştir. Zeminin rölatif sıkılığı (D_r) %56 olarak kabul edilmiş ve temelin boy-en (L/B) 1 ile 10 arasında değişen dikdörtgen ve şerit temeller ve dairesel temeller analizde kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Temelin geometrik şekli q_{ult} ve S_γ değerleri ve σ-s eğrilerinin davranışı üzerinde kritik öneme sahip bir parametre olduğu gözlemlenmiştir. Dikdörtgen temellerde L/B değerinin artmasına bağlı olarak S_γ değeri artış göstermiş ve L/B=1.5 anında maksimum değerine ulaşmıştır. Bu kritik değerden sonra L/B'nin artmasına bağlı olarak S_γ değerleri kademi olarak azalmıştır. Fakat L/B≥3'den sonra azalma hızı önemli miktarda düşerek S_γ değerleri 1'e yaklaşmıştır. Bu davranış, mevcut tasarım yönetmelikleri ve ders kitaplarında önerilen yarı ampirik eşitliklerde (Terzaghi, 1943; Hansen, 1955, 1961; De Beer, 1970; Perau, 1997) en yüksek S_γ değerlerinin şerit temellerde, en düşük S_γ değerlerinin ise kare temellerde meydana geldiği yönündeki yaklaşımların, dikdörtgen temellerin davranışını temsil etmede yetersiz kaldığını göstermektedir.

- Dairesel temellerde S_γ değerleri kare temellerden daha yüksek olduğu görülmüş ve 1.18 olarak elde edilmiştir. Bu sonuç; mevcut Terzaghi (1943) tarafından önerilen yarı-ampirik 0.6 değerinin ve Zhu vd. (2001) tarafından önerilen eşitliğinin dairesel temel için yetersiz kaldığını göstermektedir. Ayrıca, Lyamin vd. (2007), Loukidis ve Salgado (2009) ve Shafiqul Islam vd. (2017) tarafından önerilen eşitliklerden elde edilen S_γ değerlerin 3D-FE analizinden elde edilenler ile uyum gösterdiği elde edilen bir diğer sonuçtur.

- Dikdörtgen temellerde temel kenarlarından eliptik bir geometride yenilme yüzeyi oluşurken, dairesel temelde yenilme yüzeyi dairesel bir geometride yayılmaktadır. L/B değerinin artmasına bağlı olarak temel uzunluğun bulunduğu eksendeki yenilme yüzeyi sınırları daralırken, genişliğinin ekseninde yenilme yüzeyi sınırları genişlemiştir. Bu nedenle; S_γ değerleri ve σ-s eğrilerinin davranışı üzerinde temel altında meydana gelen üç boyutlu yenilme yüzeyi geometrisinin önemli olduğu düşünülmektedir.

- Gelecekte gerçekleştirilecek çalışmalarda, farklı içsel sürtünme ve dilatasyon açıları, temel pürüzlülüğü ve zemin modülünün S_γ üzerindeki etkilerinin kapsamlı bir şekilde incelenerek geliştirilmiş S_γ eşitliklerinin türetilmesinin, daha gerçekçi ve güvenilir tasarımların yapılmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Ayrıca, şekil faktörünün kohezyon ve sürşarj bileşenleri (S_c ve S_q) kapsamlı bir biçimde araştırılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

Antao, A.N., da Silva, M.V., Guerra, N. ve Delgado, R. (2012). "An Upper Bound-Based Solution for the Shape Factors of Bearing Capacity of Footings Under Drained

Conditions Using a Parallelized Mixed F.E. Formulation With Quadratic Velocity Fields", Computers and Geotechnics, Vol 41, 23-35.

Bolton, M.D. ve Lau, C.K. (1993), "Vertical Bearing Capacity Factors for Circular and Strip Footings on Mohr–Coulomb Soil", Canadian Geotechnical Journal, Vol 30(6), 1024-1033.

Brinkgreve, R., Engin, E. ve Engin, H.K. (2010). "Validation of Empirical Formulas to Derive Model Parameters for Sands." 7th the European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Trodheim, Norway, 137-142.

Cerato, A.B. ve Lutenegger, A.J. (2007), "Scale Effects of Shallow Foundation Bearing Capacity on Granular Material", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 133(10), 1192-1202.

De Beer, E.E. (1970). "Experimental Determination of the Shape Factors and the Bearing Capacity Factors of Sand", Géotechnique, Vol 20(4), 387-411.

Hansen, J.B. (1955), "Simpel Beregning af Fundamenters Bæreevne", Ingeniøren, Vol 22(1) 95-100.

Hansen, J.B. (1961), "A General Formula for Bearing Capacity", Bulletin No. 11, Danish Geotechnical Institute, Copenhagen, Denmark.

Loukidis, D. ve Salgado, R. (2009), "Bearing Capacity of Strip and Circular Footings in Sand Using Finite Elements", Computers and Geotechnics, Vol 36(5), 871-879.

Lyamin, AV., Salgado, R., Sloan, S.W. ve Prezzi, M. (2007). "Two-and Three-Dimensional Bearing Capacity of Footings in Sand", Géotechnique, Vol 57(8), 647-662.

Mansur, C.I. ve Kaufman, R.I. (1956), "Pile Tests, Low-Sill Structures, Old River, La", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Vol 82(4), 1079.

Meyerhof, G.G. (1963), "Some Recent Research on the Bearing Capacity of Foundations", Canadian Geotechnical Journal, Vol 1(1), 16-26.

Mohapatra, D. ve Kumar, J. (2020), "Bearing Capacity of Embedded Foundations Using Quasi- Kinematic Limit Analysis", Computers and Geotechnics, Vol 117.

Pantelidis, L., Assefa, E. ve Sachpazis, C.I. (2025), "The Effect of Footing Shape on the Bearing Capacity of Shallow Foundations: A Review", Archives of Computational Methods in Engineering, Vol 32(3), 1597-1617.

Perau, E.W. (1997), "Bearing Capacity of Shallow Foundations", Soils and Foundations, Vol 37(4), 77-83.

Puzakov, V., Drescher, A. ve Michalowski, R.L. (2009). "Shape Factor Sγ for Shallow Footings", Geomechanics and Engineering, Vol 1(2), 113-120.

Shafiqul Islam, M., Rokonuzzaman, M. ve Sakai, T. (2017). "Shape Effect of Square and Circular Footing Under Vertical Loading: Experimental and Numerical Studies", International Journal of Geomechanics, Vol 17(9), 06017014.

Terzaghi, K. (1943), "Theoretical Soil Mechanics", 1st ed., New York, USA, Wiley.

Yünkül, K., Gürbüz, A. ve Demirdöğen, S. (2026), "The Effect of Aspect Ratio on the Shape Factors of Rectangular Footings on Sandy Soil", Turkish Journal of Civil Engineering, Vol 37(1), 35-63.

Zhu, F., Clark, J.I. ve Phillips, R. (2001), "Scale effect of strip and circular footings resting on dense sand", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 127(7), 613-621.

Zhu, M. ve Michalowski, R.L. (2005), "Shape Factors for Limit Loads on Square and Rectangular Footings", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 131(2), 223-231.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
D_r	Rölatif sıkılık	σ	Temel gerilmesi
FE	Sonlu elemanlar	q_{ult}	Nihai taşıma gücü
L/B	Temelin boy/en oranı	ϕ	Zeminin içsel sürtünme açısı
S_γ	Şekil faktörünün birim hacim ağırlık bileşeni	3D	Üç boyutlu
s	Temel deplasmanı		