

Donatılı kil zemin üzerine oturan yüzeysel şerit temellerin taşıma kapasitesi

Elif ÇİÇEK^{*1}, Temel YETİMOĞLU², Erol GÜLER³

¹Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Programı, 25240, Erzurum

²Atatürk Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, 25240 Erzurum

³Boğaziçi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, 34342 İstanbul

Özet

Geosentetikler zeminin taşıma gücünü arttırmakta donatı olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada kohezyonlu zeminlerde geosentetik donatıların etkilerini daha iyi anlayabilmek için donatılı kil zemin üzerine oturan yüzeysel şerit temellerin taşıma kapasiteleri analiz edilmiştir. Hesaplamalarda sonlu elemanlar kodu Plaxis kullanılmıştır. Temel zemini Mohr Coulomb ve donatı lineer elastik malzeme olarak modellenmiştir. Analizlerde Phi-c azaltma yöntemiyle güvenlik sayıları bulunarak taşıma kapasiteleri hesaplanmıştır. İlk olarak donatısız kil zeminde temel genişliği, sürşarj yükü ve zemin kohezyonunun etkileri incelenmiştir. Nihai taşıma kapasiteleri hesaplanarak literatürdeki limit analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Daha sonra, donatının etkisini araştırmak amacıyla parametrik bir çalışma yapılmıştır. Donatı sayısı, etkin ilk donatı derinliği, donatılar arası düşey mesafe, donatı genişliği ve zemin kohezyonu parametre olarak seçilmiştir. Analizler sonucunda donatı sayısı arttıkça taşıma kapasitesinin 6 donatı için %17'ye kadar arttığı, etkin ilk donatı derinliğinin 0.4B (B=Temel genişliği) olduğu görülmüştür. Kohezyonlu zeminde donatının çalışmasının zemin kohezyonundan etkilendiği, donatı sayısı 6 iken taşıma kapasitesini kohezyon cinsinden 0.9c kadar arttırdığı görülmüştür. Donatılar arası düşey mesafe arttıkça taşıma kapasitesindeki değişimi gösteren eğrinin eğiminin dikleştiği ve taşıma kapasitesinin büyüdüğü görülmüştür. Donatı genişliğinin temel genişliğinin 3 katından büyük olduğu durumlarda taşıma kapasitesi sabit kalmıştır. Taşıma kapasitesi oranları (BCR) ve etkin donatı derinliği zemin kohezyonundan bağımsız çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler: Şerit temel, taşıma kapasitesi, Sonlu Elemanlar metodu, kil zemin.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Elif ÇİÇEK. elifcicek25@yahoo.com; Tel: (544) 899 09 82.

Makale metni 14.07.2010 tarihinde dergiye ulaşmış, 09.02.2011 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 29.02.2012 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Bu makaleye "Çiçek, E., Yetimoğlu, T., Güler, E., (2011) 'Donatılı kil zemin üzerine oturan yüzeysel şerit temellerin taşıma kapasitesi', İTÜ Dergisi/D Mühendislik, 10: 4, 93-104" şeklinde atıf yapabilirsiniz.

Behavior of shallow strip footings on reinforced clay soil

Extended abstract

Many researchers investigated the behavior of surface foundations constructed on reinforced sand (Omar et al. 1993; Khing et al. 1993; Yetimoglu et al. 1994; Das ve Omar 1994; Adams & Collin 1997). However most of the problematic foundation soils are of cohesive nature. Therefore in this study the effect of reinforcing cohesive foundation soils was investigated. Normally the cohesive soil excavated would be replaced by a granular fill. This means that improvement will be obtained due to the geosynthetic reinforcement but also because of the soil exchange. In order to see the effect of geosynthetic reinforcement alone, in this study the backfill was considered to have the same properties as the natural cohesive soil.

The foundation behavior is assessed using limit equilibrium and finite element method (FEM). In this study the finite element code, Plaxis was used. A parametric study was conducted.

Safety factors were calculated by using the “Phi-c reduction” method in the finite element analyses. In the “Phi-c reduction” approach the shear strength parameters $\tan\phi$ and c of the soil are successively reduced until failure occurs. The soil was modeled as Mohr-Coulomb model and the reinforcement as a linear elastic material. In the analyses, no specific interaction model between soil and reinforcement was used. The analyses presented in this study involve strip foundations on clay soil. The problem was analyzed under plane strain condition. The material properties were chosen in accordance with those in the literature to represent a clay soil. The soil parameters adopted were: $\gamma = 15 \text{ kN/m}^3$; $E = 25000 \text{ kPa}$ ($500 * c$); $\nu = 0.30$; $\phi = 0^\circ$; $\psi = 0^\circ$ and $c = 100, 75, 50, 37.5, 25, 12.5 \text{ kN/m}^2$. Footing thickness was chosen as 0.143 m and was placed directly on the surface without any embedment. Geosynthetic axial stiffness per unit width was selected as $J=2000 \text{ kN/m}$ to represent a typical geogrid (Deb et al. 2007). For the finite element analyses, vertical boundary was chosen to have only horizontal fixity and bottom boundary has both horizontal and vertical fixity. The size of the finite element mesh used was the same for all the analyses. It was chosen to be large enough to reduce the boundary effects to a negligible level.

Factor of Safety (GS) for bearing capacities of unreinforced soil were calculated first by Limit Equilibrium analysis and then by FEM. The footing width ($B=2.5, 5, 10$ and 20 m), cohesion of the foundation soil ($c=50$ and 100 kPa), and surcharge load on footing (100 and 200 kPa) were varied to assess their influence on the safety factor of the shallow foundation. A good agreement was achieved between bearing capacity calculated using limit equilibrium approaches and finite element solutions. The finite element analysis gave factor of safety values directly proportional to cohesion of the clay soil as expected.

In order to investigate the influence of the reinforcement on the factor of safety, a parametric study was conducted using different reinforcement configurations. Number of reinforcement layers, depth of the first reinforcement, vertical spacing of reinforcement layers, width of reinforcements and cohesion values of soil were chosen as variables in the analyses. Results obtained are summarized below:

- As the number of reinforcement layer increases (from one to six), the safety factor increases as well. Regardless of total number of reinforcement layers, the foundation width did not have a significant effect on the bearing capacity.
- The depth of the first reinforcement varied between $0.05B$ and $0.7B$. The most efficient initial reinforcement depth was found as $0.4B$.
- The vertical spacing between horizontal reinforcement layers (H) were taken as $0.025B$, $0.05B$ and $0.1B$. When six reinforcement layers were used, increase in the factor of safety values were calculated as: 7.5% , 12% and 17% for H/B values of 0.025 , 0.05 and 0.1 respectively.
- The reinforcement lengths analyzed were $L=B$; $L=2B$; $L=3B$; $L=4B$ and $L=5B$. The increase in bearing capacity after a length of $L=3B$ was negligible.
- BCR and effective reinforcement depth were not affected when cohesion of the soil changed.

Keywords: Strip footing, bearing capacity, Finite Element method, clay soil.

Giriş

Zayıf zeminler üzerindeki yüzeysel temellerin taşıma kapasitesini arttırabilmek amacıyla geosentetik donatılar kullanılmaktadır. Donatılı zeminler üzerindeki yüzeysel temellerin davranışını daha iyi anlayabilmek için pek çok araştırmacı çeşitli model deneyleri yapmıştır (Binquet ve Lee, 1975a,b; Huang ve Tatsuoka, 1990; Yetimoglu vd., 1994; Kurian vd., 1997). Ayrıca analitik ve nümerik yöntemler kullanılarak yapılan incelemeler ile de donatının etkileri belirlenmeye çalışılmaktadır. Bu araştırmaların büyük çoğunluğu granüler zeminler üzerinde olup, kil zeminin kullanıldığı araştırmalar da bulunmaktadır (Mandal ve Sah, 1992; Shin vd., 1993; Bergado vd., 2001). Uygulamada kohezyonlu zeminlerle ilgili problemlerle sık karşılaşılmasına rağmen, donatılı kil zeminler üzerindeki çalışmalar daha sınırlı kalmıştır.

Araştırmacıların çoğu tek çeşit kil zemini donatılandırarak çeşitli temel sistemlerinin davranışını incelemişlerdir. Mandal ve Sah (1992) geogrid ile donatılandırılmış kil temel zemininin taşıma kapasitesini deneylerle araştırmış, ilk donatı derinliğinin $0-0.25B$ (B =Temel genişliği) değerlerinde taşıma kapasitesinde daha belirgin artışların olduğunu belirtmişlerdir. Shin ve diğerleri. (1993) geogrid donatılı suya doymun kil zeminlerde taşıma kapasitesi ve donatı etkisini laboratuvar deneyleriyle incelemişlerdir. Donatısız durumda taşıma kapasitesi katsayısı değerini $N_c = 5.14$ olarak bulmuşlardır. Bu araştırmacılar etkin ilk donatı derinliğini $0.4B$ olarak bulmuşlardır. Ramaswamy ve Purushothaman da (1992) geogrid ile donatılandırılmış kil zeminlerin taşıma kapasitesini deneylerle araştırmış ve efektif donatı uzunluğunu $4B$, optimum ilk donatı derinliğini $0.5B$ olarak bulmuşlardır. Maharaj (2002) donatılı kil zemin üzerindeki şerit temellere optimum ilk donatı derinliği, donatı boyu ve donatı rijitliğinin etkilerini Sonlu Elemanlarla (SE) analiz etmişler ve etkin ilk donatı derinliğinin $u = 0.125B$ ve etkin donatı boyunun $2B$ olduğunu vurgulamışlardır. Boushehrian ve Hataf (2008) donatılı kil zeminler üzerindeki dairesel temellerin taşıma gücünü laboratuvar

deneyleri ve SE analizleri ile açıklamaya çalışmışlardır. Donatı sayısı arttıkça taşıma kapasitesi artmış, ilk donatının $0.55B$ derinlikte olması durumunda daha iyi sonuçlar alınmıştır.

Mühendislik uygulamalarında temel altındaki zemin zayıf ise çoğunlukla üzerine daha güçlü bir tabaka konularak taşıma kapasitesi arttırılmaya çalışılır. Temel zemini kil ise çoğunlukla üste granüler dolgu konulmaktadır. Uygulamada, kazılan kil zeminin yeniden dolgu olarak kullanılması, zeminin sıkıştırılmasındaki zorluklar ve kil zeminin drenajındaki problemler sebebi ile tercih edilmemektedir. Bu nedenle şantiyelerde üst dolgu malzemesi granüler zemin olmalıdır. Fakat daha önceki çalışmalarla sonuçları karşılaştırabilme ve farklı zemin koşullarının etkilerinden sıyrılıp yalnızca tek bir zemin türünde donatı etkisini parametrik bir çalışma ile görebilmek amacıyla üst dolgu malzemesi aynı zemin çeşidinden seçilerek nümerik analizler yapılmıştır. Böylece kazılan zeminle aynı parametrelere sahip donatılı tabakalar konması halinde zeminde geosentetik donatının etkileri incelenmeye çalışılmıştır.

Bilindiği üzere kohezyonsuz zeminlerde donatının izafi bir kohezyon yaratarak taşıma kapasitesini etkilediğine dair araştırmalar bulunmaktadır (Yetimoglu, 1994). Donatının kohezyonlu zeminlerde de taşıma kapasitesini izafi bir kohezyon etkisi yaratarak arttırabilme ihtimali de incelenmiştir. Bu nedenle zemin üzerindeki donatılı dolgu yine aynı zemin türünden seçilmiştir.

Granüler dolgu olmaksızın kil zeminlerde donatısız ve donatılı SE analizleri yapılmıştır. Donatısız analizlerde; kohezyonu $c=50$ ve 100 kPa olan kil zeminlerde farklı genişliklere ($B=2.5$ m, 5 m, 10 m ve 20 m) ve sürşarj yüklerine (100 kPa ve 200 kPa) sahip şerit temellerin Phi-c azaltma metoduyla Plaxis V.8 programı kullanılarak güvenlik sayıları hesaplanmıştır. Analizlerdeki göçme yüzeyleri incelenmiş, bulunan güvenlik sayıları kullanılarak taşıma kapasiteleri hesaplanmıştır. Sonuçlar literatürde verilen limit denge analizi teorileriyle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Donatılı

temellerde yapılan analizlerde ise; donatı sayısı (N), ilk donatı derinliği (u), donatılar arası düşey mesafe (H), donatı genişliği (L) ve zemin kohezyonu parametre olarak seçilerek analizler yapılmıştır. Donatı sayısı N, 1 ile 6 arasında değiştirilerek, temel genişlikleri B = 20 m, 10 m, 5 m olan yüzeysel şerit temellerin kohezyonu c=50 ve 100 kPa olan zemin koşullarında, taşıma kapasiteleri incelenmiştir. İlk donatı derinliğinin (u) araştırıldığı çalışmada, ilk donatı derinliği u = 0.5 m'den başlayarak u = 7 m'ye kadar 0.25 m arayla, kohezyonu yine c = 50 kPa ve 100 kPa olan killi zeminde analizler yapılmıştır. Donatılar arası düşey mesafenin incelendiği bölümde; H/B = 0.025, 0.05 ve 0.1 alınarak donatı düşey mesafesinin taşıma kapasitesine olan etkisi incelenmiştir. Donatı genişliğinin incelendiği bölümde ise L temel genişliğinin katlarında seçilerek (L = B, 2B, 3B, 4B ve 5B) taşıma kapasitesi değişimleri gözlenmiştir. Son olarak farklı kohezyonlarda (c = 100, 75, 50, 37.5, 25 ve 12.5 kN/m²) donatılı kil kullanılarak SE analizleri yapılmıştır. Donatılı ve donatısız sistemlerdeki kohezyonun taşıma kapasitesine etkileri araştırılmıştır. Taşıma kapasitesi oranları (BCR) hesaplanıp, farklı koşullardaki değerleri gözlemlenmiştir.

Materyal ve yöntem

Malzeme özellikleri ve sınır koşulları

Analizlerde düzlem deformasyon ve 15 düğüm noktalı eleman koşulları seçilmiştir. Kil zemin Mohr-Coulomb, donatılar ise elastik modelle tanımlanmıştır. Zemin parametreleri olarak; kuru birim hacim ağırlık $\gamma_k = 15 \text{ kN/m}^3$; Young modülü $E = 25000 \text{ kN/m}^2$; Poisson oranı $\nu = 0.30$; kayma mukavemeti açısı $\phi = 0^\circ$; dilatasyon açısı $\psi = 0^\circ$ seçilmiştir (Das, 2007; Zhu ve Michalowski, 2005; Atom ve Barakat 2000). Tüm zemin parametreleri ve donatı özellikleri sabit tutularak $\phi=0$ için Poisson oranının çeşitli değerlerinde ($\nu = 0.30, 0.375$ ve 0.45) de aynı analizler tekrarlanmış ve Poisson oranlarının farklı değerlerinde de sonuçlar hep aynı çıkmıştır. Zeminde su olmadığı için drenajsız durum geçerli olmamıştır. Literatürde yayınlanan çalışmalardan Zhu ve Michalowski

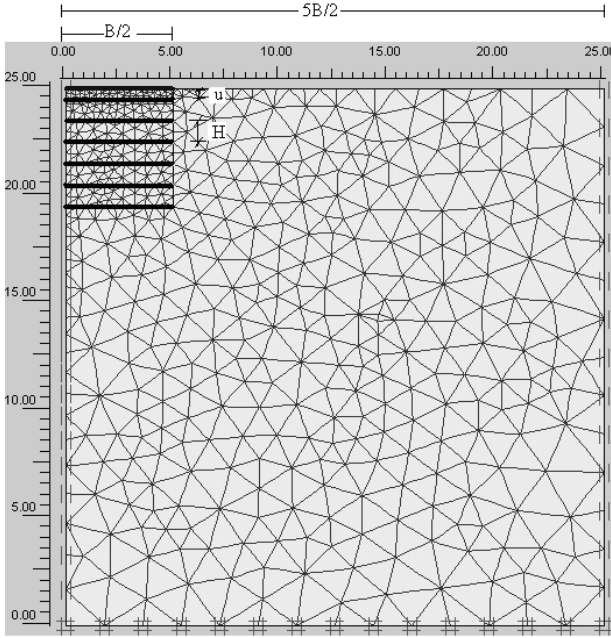
(2005)'de seçildiği gibi Poisson oranı 0.30 alınmıştır. Zemin kohezyonu ilk bölümlerde c = 100 ve 50 kPa, kohezyon etkisinin incelendiği bölümde ise c = 100, 75, 50, 37.5, 25, 12.5 kN/m² alınmıştır. Temel kalınlığı 0.143 m, donatı rijitliği tipik bir geogridi temsil edecek şekilde J=2000 kN/m (Deb vd., 2007) olarak seçilmiştir. Geogrid ile zemin etkileşim mekanizmasından dolayı, servis gerilmeleri altında donatı sıyrılması potansiyelinin çok düşük olması nedeni ile geogrid donatısının modellenmesinde donatı ile zemin arasında yüzey etkileşim elemanı kullanılmamıştır (Yetimoglu, 1994). Yine bazı araştırmacıların yapmış oldukları çeşitli sonlu elemanlar simülasyonlarında yüzey etkileşimi hesaba alınmamıştır (Chou, 1992; Yetimoglu, 1994; Yıldız, 2002; Örnek, 2009). Donatı sayısı (N) 1 ile 6 arasında değiştirilmiştir. Temel genişliği toplamda B ile tanımlanmıştır. Sistem simetrik olduğundan SE analizinde sadece temelin yarısı (B/2) modellenmiştir. Donatısız analizlerde temel genişliği B = 2.5 m, 5 m, 10 m ve 20 m, tüm donatılı analizlerde ise sadece B = 10 m alınmıştır. Sınır koşulların temel davranışını etkilememesi için zemin modelinin uzunluk ve yüksekliği 25 m alınmıştır. Şekil 1'de analiz modeli görülmektedir. Modelin sağ ve sol sınırlarında yatay deformasyon, en alt sınırında ise hem yatay hem düşey deformasyon engellenmiştir. Eleman büyüklüğü 'fine' olarak seçilmiş, donatılar arası elemanlar ise yeniden sıklaştırılmıştır. Analizlerde tek bir model kullanılmış, kohezyon ve donatı sayısı bu model üzerinden değiştirilmiştir. Donatı genişliği (L) ilk modellerde temel genişliği ile aynı (L = B), donatı genişliğinin etkilerinin incelendiği bölümde ise temel genişliğinin katları (L = B, 2B, 3B, 4B ve 5B) uzunluğunda alınmıştır. Burada u: ilk donatı derinliği olup çoğu analizde u/B = 0.05, H: ise donatılar arası düşey mesafe olup H/B = 0.025, 0.05 ve 0.1 değerlerinde alınmıştır.

Çalışma yöntemi

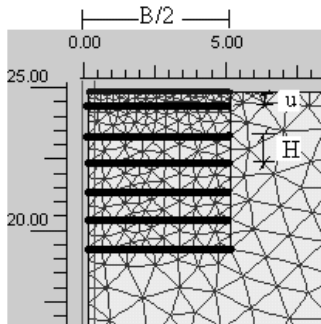
Analizlerde SE yazılımı olan Plaxis V.8 programı kullanılmıştır. Analizlerde, Phi-c azaltma metodu kullanılarak modellerin güvenlik sayısı (GS) belirlenmiştir. Bu güvenlik sayıları temel

plakasının üzerine uygulanan yük (q) çarpılarak modellerin nihai taşıma kapasiteleri (q_s) hesaplanmıştır.

$$q_s = GS * q \quad (1)$$



(A)



(B)

Şekil 1. A- Analiz modeli B-Donatılı bölgenin detaylı gösterimi

Donatısız durum için hesaplanan nihai taşıma kapasitesi q_u olup, donatılı analizlerde donatıların etkisini temsil eden taşıma kapasitesi artışı q_{us} ile gösterilirse, toplam taşıma kapasitesi aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$q_s = q_u + q_{us} \quad (2)$$

Donatı kullanılmasının ve geosentetik sayısının artırılmasının taşıma gücünde meydana getirdi-

ği iyileştirmeyi görebilmek için Taşıma Kapasitesi Oranları (BCR) aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır;

$$BCR = \frac{q_s}{q_u} \quad (3)$$

Donatısız zemin için güvenlik sayısı analizleri

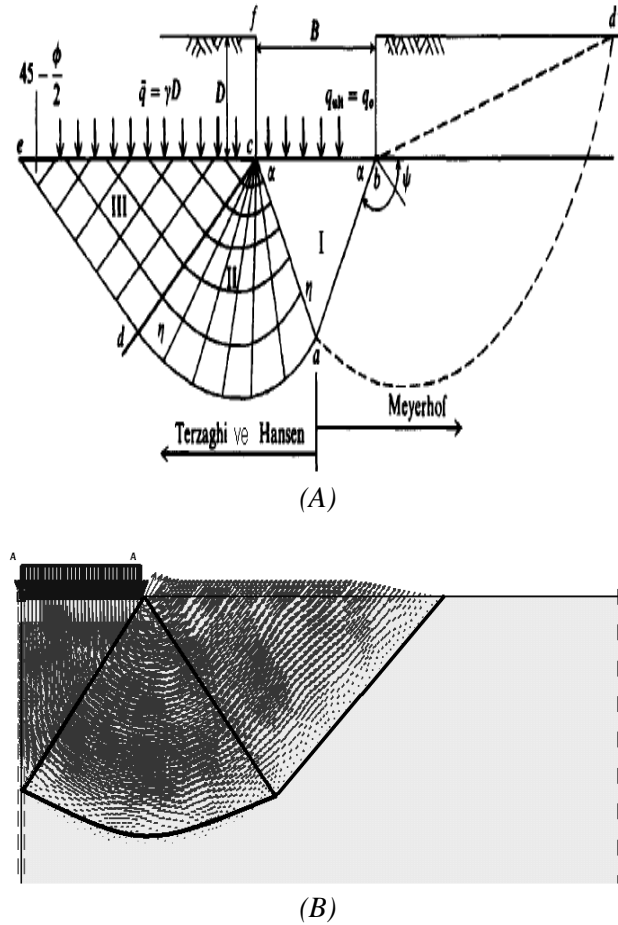
Zemin kohezyonu $c = 50$ ve 100 kN/m^2 , temel genişliği $B = 2.5 \text{ m}$, 5 m , 10 m ve 20 m olan yüzeysel şerit temellerin 100 kN/m^2 ve 200 kN/m^2 sürşarj yükleri altındaki güvenlik sayıları SE programında Phi-c azaltma metoduyla analiz edilmiştir. Bulunan güvenlik sayıları ile donatısız kil zeminin taşıma kapasiteleri hesaplanmıştır.

Taşıma gücü kapasitesinde sadece zeminin kohezyonunun etkili olduğu, diğer parametrelerin etkin olmadığı görülmüştür. Yapılan çalışma nümerik bir analiz olduğundan ortalama bir değer seçilmeye çalışılmıştır. Ayrıca bilindiği üzere kil zeminlerin taşıma gücüne kuru birim hacim ağırlığının etkisi olmamaktadır. Bu nedenle seçilen $\gamma_k = 15 \text{ kN/m}^3$ değeri sonuçları etkilememiştir.

Terzaghi (1943) donatısız zeminler üzerindeki yüzeysel temellerin taşıma gücünü limit analiz teorisiyle ifade etmiştir. Şekil 2.b incelendiğinde SE analizlerinden bulunan sonuçların Şekil 2.a'da Terzaghi (1943) tarafından tanımlanan göçme davranışına benzediği ve zeminde 3 zonu (aktif, pasif ve radyal olmak üzere) oluştuğu görülmektedir.

Vesic (1973) laboratuvar deneyleri yaparak taşıma kapasitesi teorisini yeniden açıklamıştır. Prandtl (1921), Meyerhof (1963) ve Hansen (1970) gibi araştırmacıların çalışmalarını derleyerek drenajsız koşullarda ve $\phi = 0^\circ$ için taşıma gücü katsayı değerinin $N_c = 5.14$ olduğunu belirtmiştir. Şekil 2.a'da görülen α açısının $\alpha = \phi$ değerinden ziyade, $\alpha = 45 + \phi/2$ değerine daha yakın olduğu vurgulanmıştır. Plaxis analizlerinden bulunan sonuçlarda donatısız kil zemin için (Şekil 2b) $\alpha = 45$ olduğu görülmüştür. Bu ne-

denle işlem sonuçlarının, Vesic (1973)'in taşıma gücü teorisiyle daha fazla bağdaşabileceği düşünülmüştür.



Şekil 2. Donatısız zeminin göçme yüzeyi. A- Literatür taraması (Bowles, 1988); B- Plaxis analiz sonucu

Plaxis analizleriyle bulunan donatısız kil zemindeki yüzeysel şerit temellerin güvenlik sayıları ile taşıma kapasiteleri hesaplanmış ve donatısız durumda kohezyonlu zeminin taşıma kapasite katsayıları SE analiz sonuçlarıyla incelenmiştir. Tablo 1 incelendiğinde; sürşarj yükü arttıkça güvenlik sayısı azalmış, fakat taşıma kapasitelerinde herhangi bir değişiklik olmamıştır. Zemin kohezyonu iki katına çıkınca taşıma kapasitesi ve güvenlik sayısı da aynı oranda artmıştır. SE analizinde de Terzaghi (1943) çözümünde olduğu gibi temel genişliği taşıma kapasitesinde önemli bir değişikliğe neden olmamıştır. Taşıma kapasite katsayısı SE analizi sonuçlarında ağırlıklı olarak $Nc^* = 5.2$ olarak hesaplanmıştır

($Nc^* = SE$ analizinden hesaplanan taşıma gücü katsayısı). Bu değer Vesic (1973) teoremindeki taşıma gücü katsayısı $Nc = 5.14$ ve Fellenius (Kumbasar ve Kip, 1999) tarafından verilmiş $Nc = 5.5$ değerlerine çok yakın olduğu sonucuna varılmıştır.

Tablo 1. Güvenlik sayıları, taşıma kapasiteleri ve taşıma kapasite katsayıları

B (m)	c (kPa)	q (kPa)	GS	q_s (kPa)	Nc^*
2.5	50	100	2.75	275	5.50
2.5	50	200	1.37	274	5.48
2.5	100	100	5.46	546	5.46
2.5	100	200	2.75	550	5.50
5	50	100	2.64	264	5.28
5	50	200	1.33	266	5.32
5	100	100	5.30	530	5.30
5	100	200	2.64	528	5.28
10	50	100	2.60	260	5.20
10	50	200	1.30	260	5.20
10	100	100	5.19	519	5.19
10	100	200	2.60	520	5.20
20	50	100	2.60	260	5.20
20	50	200	1.30	260	5.20
20	100	100	5.20	520	5.20
20	100	200	2.60	520	5.20

Donatılı zemin için güvenlik sayısı analizleri

Donatı sayısının etkisi

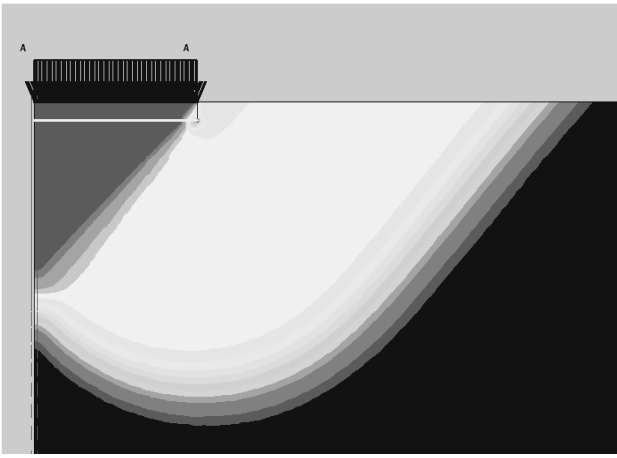
Kil zeminde donatı sayısı (N) 1 ila 6 arasında değiştirilerek şerit temel genişliği $B = 10$ m için güvenlik sayıları hesaplanmıştır. Analizlerde ilk donatının temel plakası alt yüzeyine olan mesafesinin temel genişliğine oranı $u/B = 0.05$ ve donatılar arası mesafenin temel genişliğine oranı $H/B = 0.1$ olarak alınmıştır. Yukarıda verilen değerlerle zemin kohezyonunun $c = 50$ kN/m² ve 100 kN/m² olduğu durumlar için bulunan güvenlik sayıları ile taşıma kapasiteleri hesaplanmıştır. Tablo 2'de analiz sonuçları verilmiştir.

Tablo 2 incelendiğinde donatı sayısı arttıkça taşıma kapasitesinin de arttığı görülmektedir. Donatılı zemindeki göçme yüzeyleri donatısız durumdakilerle karşılaştırıldığında farklılıklar gö-

rülelebilmektedir. Donatı kullanılması ve sayısının artırılması kayma yüzeyi açısını da değiştirmektedir. Şekil 3'te tek donatılı zemindeki yüzeysel temelin göçme yüzeyi görülmektedir.

Tablo 2. Donatılı kil zeminde yüzeysel şerit temel için taşıma kapasiteleri (kPa)

N	1	2	3	4	5	6
c=100 (kPa)	527	539	556	575	593	611
c= 50 (kPa)	263	270	278	288	297	306

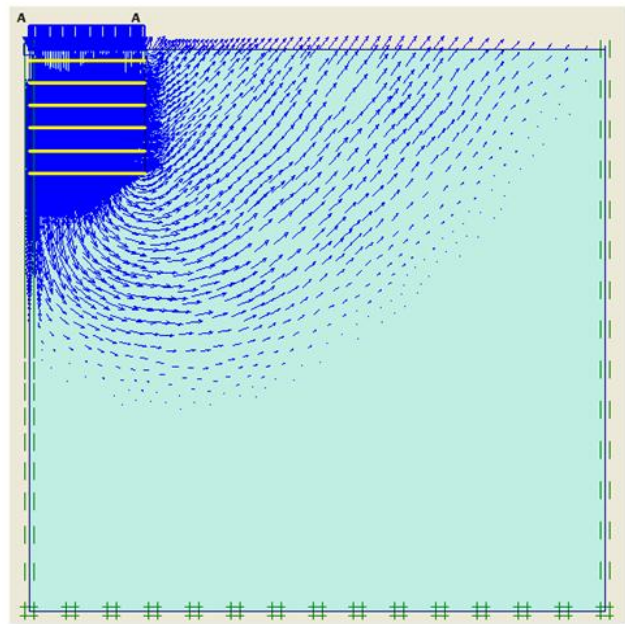
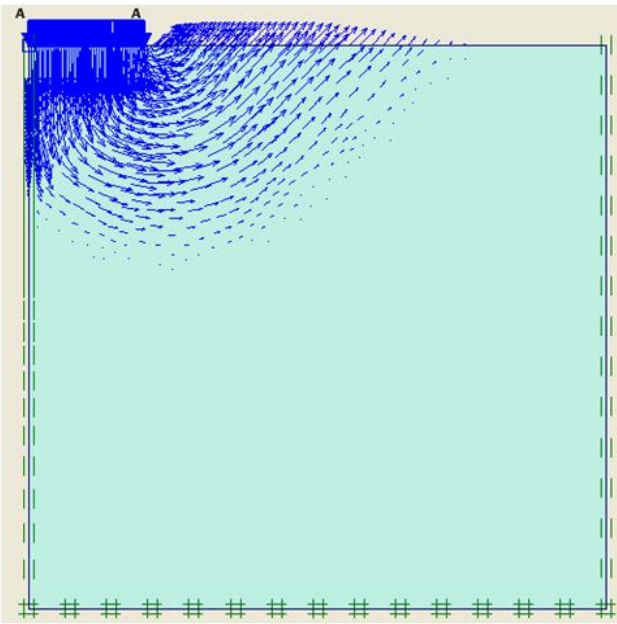


Şekil 3. Donatılı zeminde göçme yüzeyi (N=1)

Şekil 4 donatısız ve donatılı durumda, sistemde göçme anında zemin hareketini belirten vektörlerin davranışını göstermektedir. Donatı sayısının artmasının, zemin hareketini gösteren vektörlerin derinlere yayılmasını sağladığı ve taşıma gücünün arttığı gözlenmiştir. Benzer bir değerlendirmeyi El Sawwaf (2007)'da şevlerle ilgili yapmış olduğu çalışmada ifade etmiş ve donatı konulduğu durumda zeminin üzerine gelen yükleri daha derinlere ilettiğini belirtmiştir.

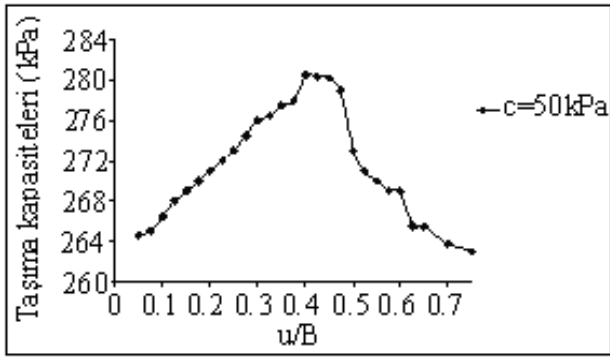
İlk donatı derinliğinin etkisi

Bu analizlerde donatılı zemine oturan şerit temellerde ilk donatı derinliğinin etkisi incelenmiş ve modellerin güvenlik sayıları bulunmuştur. Bu işlemlerde özellikleri aynı olan tek donatı kullanılarak sadece donatının temel plakası alt yüzeyine olan mesafesi değiştirilmiştir. İlk donatı derinliği $u = 0.5$ m den başlayarak $u = 7$ m'ye kadar 0.25 m arayla analizler yapılmıştır. Şerit temel genişliği $B = 10$ m ve aynı kil zemin koşullarında $c = 50$ kN/m² ve 100 kN/m² için etkin ilk donatı derinliği (u_e) SE analizi ile incelenmiştir. Şekil 5'te zemin kohezyonu $c = 50$ kN/m² ve $c=100$ kN/m² için SE analizlerinden bulunan taşıma kapasiteleri verilmektedir. İlk donatı derinliği arttıkça güvenlik sayısı da artmış, fakat belli bir değerden sonra azalmıştır.

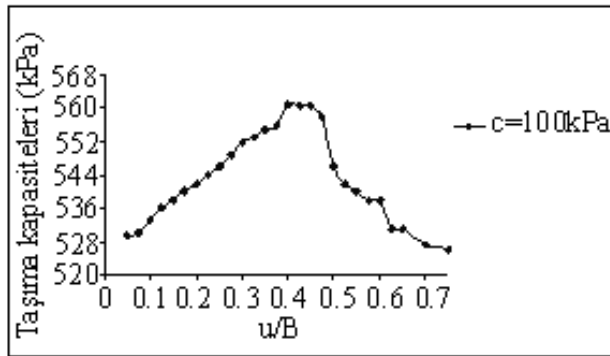


Şekil 4. Göçme anında zemin hareketi; (A) Donatısız, (B) Donatılı, N=6

Güvenliğin maksimuma ulaştığı uzaklık etkin ilk donatı derinliği (u_e) olarak kabul edilmiştir. $u_e = 4$ m diğer bir deyişle etkin ilk donatı derinlik oranı $u_e/B = 0.4B$ olarak bulunmuştur. İlk donatı derinlik oranı $u/B = 0.7$ değerinden sonra. model donatısız zemin gibi davranmıştır. Ayrıca zemin kohezyonu arttıkça güvenlik sayılarının da aynı oranda arttığı görülmüştür.



(A)



(B)

Şekil 5. Taşıma kapasiteleri-ilk donatı derinlik oranı grafiği; (A) $c=50$ kPa için, (B) $c=100$ kPa için

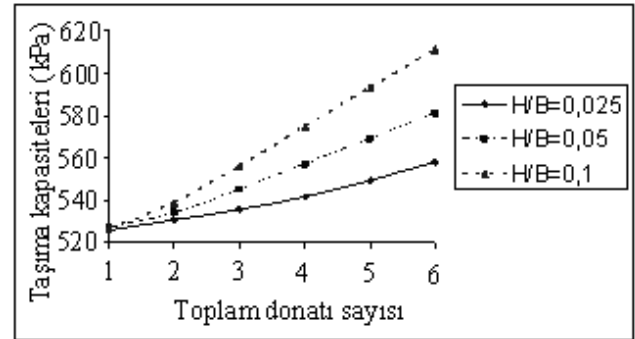
Donatılar arası düşey mesafenin etkisi

Geosentetik donatılar arasındaki düşey mesafe (H) değiştirilerek SE analizleri yapılmıştır. Donatılar arası mesafenin temel genişliğine oranı $H/B = 0.025, 0.05$ ve 0.1 değerlerinde alınmıştır. Analizlerde donatı sayısı (N) 1 ila 6 arasında değiştirilerek sistemlerin taşıma kapasiteleri belirlenmiştir. Temel genişliği $B = 10$ m, ilk donatının temel plakası alt yüzeyine olan mesafesinin temel genişliğine oranı ($u/B = 0.05$) sabit alınmıştır. Hesaplamalar iki farklı zemin kohezyonu $c = 50$ kN/m² ve 100 kN/m² için yapılmıştır. Tablo 3 farklı donatı aralıklarına sahip modellerin taşıma kapasitelerini göstermektedir.

Tablo 3. Donatı aralıkları farklı sistemlerin taşıma kapasiteleri; q_s (kPa)

H/B	0.025		0.05		0.1	
	c=100 (kPa)	c=50 (kPa)	c=100 (kPa)	c=50 (kPa)	c=100 (kPa)	c=50 (kPa)
N						
1	527	263	527	263	527	263
2	531	267	534	269	539	270
3	535	269	545	273	556	278
4	542	271	557	279	575	288
5	549	275	569	284	593	297
6	558	279	581	291	611	306

Tablo 3 incelendiğinde, Donatı sayısı ile birlikte donatılar arası mesafe (H) arttıkça taşıma kapasitesi değerlerinin de büyüdüğü görülmektedir. Zemin kohezyonu arttıkça taşıma kapasitesi de aynı oranda artmıştır. Şekil 6'dan kohezyonu $c = 100$ kPa olan zeminde donatılar arası mesafenin değişmesinin taşıma kapasitesine etkileri görülmektedir. Donatılar arası mesafe arttıkça taşıma kapasitesindeki değişimi gösteren grafik eğrisinin eğimi de dikleşmiştir.



Şekil 6. Farklı H/B oranlarında taşıma kapasiteleri ($c = 100$ kPa)

Donatı genişliğinin etkisi

Beş farklı donatı genişliği için analizler tekrarlanarak donatı genişliğinin etkisi incelenmiştir. Donatının sadece temel genişliği kadar olduğu durumdan ($L=B$) donatının temel genişliğinin beş katı olduğu duruma kadar ($L=5B$) analizler yapılmıştır. İlk donatının temel plakası alt yüzeyine olan mesafesinin temel genişliğine oranı $u/B = 0.05$ ve donatılar arası mesafenin temel genişliğine oranı $H/B = 0.1$ olarak alınmıştır. Kohezyon değerleri $c=100$ kN/m² ve

50 kN/m², temel genişliği B = 10 m ve N = 1 ile 6 arasında alınmıştır. Tablo 4’de kohezyonu c = 100 kN/m² ve Tablo 5 ‘de c=50 kN/m² olan killi zeminlerde donatı genişliğinin taşıma kapasitesine etkileri görülmektedir.

Tablo 4. Farklı donatı genişliklerinde taşıma kapasiteleri. q_s, kPa (c=100 kN/m² için)

N	L=B	L=2B	L=3B	L=4B	L=5B
1	527	566	580	581	581
2	539	593	606	606	606
3	556	621	628	628	629
4	575	646	646	646	646
5	593	663	663	663	663
6	611	680	680	680	680

Tablo 5. Farklı donatı genişliklerinde taşıma kapasiteleri. q_s, kPa (c=50 kN/m² için)

N	L=1	L=2	L=3	L=4	L=5
1	263	283	290	290	290
2	270	297	303	303	303
3	278	311	314	314	314
4	288	322	322	322	322
5	297	331	331	331	331
6	306	341	340	340	340

Tablolar incelendiğinde; donatı genişliği arttıkça taşıma kapasitesi de artmıştır. Donatı genişliği temel genişliğinin 2 katı olduğunda (L = 2B) taşıma kapasitesinde maksimum artış sağlanmıştır. L = 3B için sadece N = 1, 2 ve 3 adet donatılı durumlar için artış olmuş; N = 4, 5 ve 6 adet donatılı haller için taşıma kapasiteleri L = 2B modeli ile aynı çıkmıştır. L = 3B değerinden sonra taşıma kapasitesinde bir artış olmamıştır.

Zemin kohezyonunun etkisi

Zemin özellikleri aynı olan modellerde yalnız zemin kohezyon değeri c = 100, 75, 50, 37.5, 25, 12.5 kN/m² alınarak donatısız şartlarda SE analizleri yapılmıştır. Phi-c azaltma yöntemiyle bulunan güvenlik sayıları (GS) ile taşıma kapasiteleri hesaplanmıştır. Donatısız (N = 0) ve donatılı durumlar (N ≥ 1) için bulunan taşıma ka-

pasiteleri Tablo 6’da verilmiştir. Donatılı analizlerde u/B = 0.05 ve H/B = 0.1 değerleri sabit alınmıştır.

Tablo 6. Nihai taşıma kapasiteleri. q_s (kPa)

	c=100	c=75	c=50	c=37.5	c=25	c=12.5
N	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
0	519	391	260	195	130.2	65.075
1	527	397	263	197.7	131.7	66.074
2	539	407	270	203	135.5	67.951
3	556	421	278	210	140	70.155
4	575	435	288	217	144.5	72.436
5	593	449	297	224.3	149.5	74.879
6	611	464	306	231.7	154.5	77.369

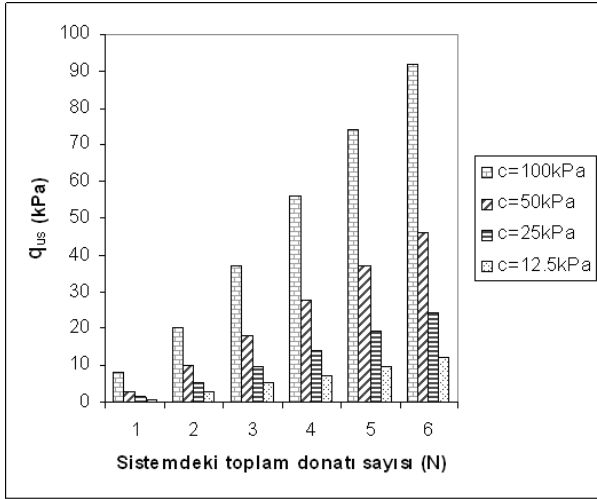
Tablo 6’nın ilk satırı incelendiğinde; donatısız durum (N=0) için tüm kohezyon değerlerinde de Nc*=5.2 olduğu görülmüştür. Yine Tablo 6 incelendiğinde tek donatı kullanılan durumda taşıma kapasitesinde ortalama %1.5 değerinde artış sağladığı, 6 donatı kullanıldığında ise yaklaşık %17-19 arasında artış meydana geldiği görülmektedir. Tablo 7’de ise modellerde kullanılan donatı sayısı ile bu donatıların sağladığı taşıma kapasitesi artışları gösterilmektedir. Sistem donatı eklendikçe donatılı taşıma kapasitesi artış değerleri de büyümüştür. Bu değerler kohezyon oranı ile aynı oranda artmıştır.

Tablo 7. Donatıların sağladığı taşıma kapasitesi artışları. q_{us} (kPa)

	c=100	c=75	c=50	c=37.5	c=25	c=12.5
N	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
1	8	6	3	2.7	1.5	0.999
2	20	16	10	8	5.3	2.876
3	37	30	18	15	9.8	5.080
4	56	44	28	22	14.3	7.361
5	74	58	37	29.3	19.3	9.804
6	92	73	46	36.7	24.3	12.294

Şekil 7 taşıma gücünde donatı kullanılması ile meydana gelen mutlak artışların kohezyon ve donatı sayısına göre değişimini vermektedir. Bu şekilden, donatının sağladığı ilave taşıma gücü değerinin kohezyon değerinden bağımsız olmadığı, artan kohezyon değeri ile aynı donatı miktarında daha büyük artışlar elde edildiği görül-

mektedir. Ayrıca donatı sayısı arttıkça bu etkinin daha da büyüdüğü görülmektedir. Donatı sayısı değiştikçe taşıma kapasitesi artışları (q_{us}) nihai taşıma kapasitesini (q_s) yaklaşık $0.08c$ değerinden $0.9c$ değerine kadar değiştirmiştir. Bu gözlemden yola çıkarak donatının da izafi bir kohezyon artışı yarattığı yorumunun yapılabileceği düşünülmüştür.



Şekil 7. Farklı kohezyon durumları için donatı etkisi

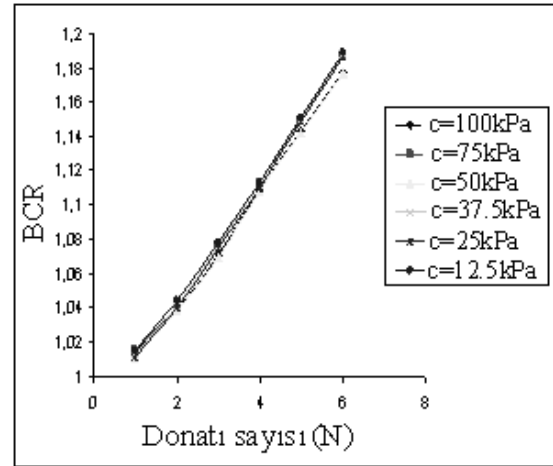
Daha sonra farklı kohezyon şartlarında taşıma kapasitesi oranları (BCR) incelenmiştir (Şekil 8). Donatı sayısı arttıkça BCR değerleri de artmıştır. Tek donatı kullanıldığında BCR 1.02 iken donatı sayısı 6'ya çıkarıldığında yaklaşık 1.18 olmuştur. Zemin kohezyon değerleri değişse de donatı sayısı ile BCR değişimi ve artış miktarlarında fark oluşmadığı Şekil 8'de görülmektedir.

Sonuçlar

Bu çalışmada Sonlu Elemanlar yöntemi ile donatılı ve donatısız kil zemine oturan yüzeysel şerit temellerin taşıma kapasiteleri parametrik olarak incelenmiş ve aşağıda özetlenen sonuçlar elde edilmiştir:

- Kohezyonlu zeminlerde Sonlu Elemanlar yöntemi ile bulunan taşıma gücü değerlerinin klasik limit denge analizleri ile bulunan değerlerle uyumlu olduğu gözlenmiştir.
- Donatı sayısı arttıkça taşıma kapasitesi de artmış, tek donatı kullanıldığında taşıma ka-

pasitesi %1.5, altı adet donatı kullanıldığında $H/B = 0.025$. 0.5 ve 0.1 için taşıma kapasitesi sırasıyla %7.5, %12 ve %17 artmıştır.



Şekil 8. Farklı zemin kohezyon şartlarında BCR değerleri

- Kullanılan ilk donatının temel tabanına uzaklığı (u) arttıkça taşıma kapasitesi artmış, optimum bir değere ulaşıktan sonra azalmıştır. Maksimum taşıma kapasitesi artışı $u/B = 0.4$ değeri için elde edilmiştir.
- Sadece tek sıra donatı kullanılması durumunda bile etkin donatı derinliğinde taşıma kapasitesinin yaklaşık %8 oranında arttığı görülmüştür.
- Donatı genişliği temel genişliğinin 3 katından büyük olduğunda ($L > 3B$) taşıma kapasitesinde ilave bir artış gözlenmemiştir.
- Artan kohezyon değeri ile aynı donatı miktarında daha büyük taşıma gücü artışları elde edildiği görülmüştür. Donatı sayısı arttıkça donatıdan dolayı meydana gelen taşıma kapasitesi artışları (q_{us}) $0.08c$ değerinden $0.9c$ değerine kadar artmıştır.
- Taşıma kapasitesi oranları (BCR) donatı sayısı ile birlikte artmıştır. BCR değeri ve etkin donatı derinliğinin zemin kohezyonundan bağımsız olduğu görülmüştür.
- Bu çalışmada nümerik bir inceleme yapılmış olup, yalnızca donatı etkisinin görülebilmesi ve başka parametrelerin sonuçları etkilememesi açısından, geri dolgu malzemesi tabii zemin ile aynı özelliklere sahip bir kil olarak seçilmiştir. Bu nedenle; elde edilen sonuçlar,

uygulamada donatılı dolgularda uygun granülometride zemin yerine şantiyede kazıdan çıkan herhangi bir toprağın kullanılabilmesi anlamını taşımamaktadır.

- İleriki çalışmalarda hem tabii koşullara hem de farklı parametrelere sahip zeminler için analizler ve incelemelerin devam ettirilmesi önerilir.

Teşekkür

Bu makalenin yazarlarından Elif ÇİÇEK TÜBİTAK tarafından yurt içi doktora bursu ile desteklenmiştir. Yazar bu destek için TÜBİTAK'a teşekkürlerini sunmaktadır.

Semboller

γ_k	:Kuru birim hacim ağırlık (kN/m^3)
E	:Young modülü (kN/m^2)
ν	:Poisson oranı
ϕ	:Kayma mukavemet açısı ($^\circ$)
ψ	:Dilatasyon açısı ($^\circ$)
c	:Zemin kohezyonu (kPa)
J	:Donatı rijitliği (kN/m)
B	:Temel genişliği (m)
u/B	:İlk donatı derinlik oranı
u_e	:Etkin ilk donatı derinliği (m)
H/B	:Donatılar arası düşey mesafe oranı
L	:Donatı genişliği (m)
N	:Donatı sayısı
GS	:Güvenlik sayısı
q	:Temel üzerine uygulanan sürşarj yükü (kPa)
q_s	:Nihai taşıma kapasitesi (kPa)
q_u	:Donatısız durum için hesaplanan nihai taşıma kapasitesi (kPa)
q_{us}	:Donatılı analizlerde donatıların etkisini temsil eden taşıma kapasitesi artışı
BCR	:Taşıma kapasitesi oranı
N_c	:Taşıma kapasitesi katsayısı

Kaynaklar

- Adams, M.T. ve Collin, J.G., (1997). Large model spread footing load tests on geosynthetic reinforced soil foundations, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, **123**, 1, 66–72.
- Atom, M.F. ve Barakat, S., (2000). Investigation of three methods for evaluating swelling pressure of soils, *Environmental and Engineering Geoscience*, **6**, 293-299.

- Bergado, D.T., Youwai, S., Hai, C.N. and Voottipruex. P., (2001). Interaction of nonwoven needle-punched geotextiles under axisymmetric loading conditions, *Geotextiles and Geomembranes*, **19**, 299-328.
- Binquet, J. ve Lee, KL., (1975a). Bearing capacity tests on reinforced earth slabs, *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, **101**, 12, 1241-1255.
- Binquet, J. ve Lee, KL. (1975b). Bearing capacity analysis of reinforced earth slabs, *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE* **101**, 12, 1257-1276.
- Boushehrian, A. H. ve Hataf. N., (2008). Bearing capacity of ring footings on reinforced clay, *Proceedings of the 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics*, Shanghai, China, 328-331.
- Bowles. J.E., (1988). *Foundation Analysis and Design*, Fourth Edition, McGraw-Hill Book Company.
- Chou, N., N., S., (1992). Performance of geosynthetic reinforced soil walls, *Doctor of Philosophy Thesis*, University of Colorado at Denver, Department of Civil Engineering, USA.
- Das, B. M. ve Omar, M. T. (1994). The effects of foundation width on model tests for the bearing capacity of sand with geogrid reinforcement, *Geotechnical and Geological Engineering*, **12**, 2, 133–141.
- Das, B. (2007). *Principles of Foundation Engineering*, Six Edition, Thomson Canada Limited.
- Deb. K., Sivakugan, N., Chandra. S. ve Basudhar, P.K., (2007). numerical analysis of multi layer geosynthetic-reinforced granular bed over soft fill, *Geotechnical and Geological engineering*. **25**, 6, 639-646.
- El Sawwaf, M.A., (2007). Behavior of strip footing on geogrid-reinforced sand over a soft clay slope, *Geotextiles and Geomembranes*, **25**, 1, 50-60.
- Hansen, J. B. (1970). A revised and extended formula for bearing capacity, *Danish Geotechnical Institute, Copenhagen, Bulletin* **28**, 5–11.
- Huang, C.C. ve Tatsuoka, K., (1990). Bearing capacity of reinforced horizontal sandy ground, *Geotextile and Geomembranes*, **9**, 51-82.
- Khing, K. H., Das, B. M., Puri, V. K., Cook, E. E. ve Yen, S. C. (1993). The bearing capacity of a strip foundation on geogrid-reinforced sand, *Geotextiles and Geomembranes*, **12**, 4, 351–361.
- Kumbasar, V. ve Kip, F., (1999). *Zemin Mekaniği Problemleri*, Çağlayan Kitapevi, İstanbul.
- Kurian, N., Beena, K.S. ve Kumar, R.K., (1997). Settlement of reinforced sand in foundations,

- Journal of Geotechnical Engineering*, **123**, 9, 818-827.
- Maharaj, D.K., (2002). Nonlinear finite element analysis of strip footing on reinforced clay, *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, **8**, C.
- Mandal, J.N. ve Sah, H.S., (1992). Bearing capacity tests on geogrid- reinforced clay, *Geotextiles and Geomembranes*, **11**, 3, 327-333.
- Meyerhof, G. G. (1963). Some recent research on the bearing capacity of foundations, *Canadian Geotechnical Journal*, **1**, 16–26.
- Omar, M. T., Das, B. M., Puri, V. K., ve Yen, S. C. (1993). Ultimate bearing capacity of shallow foundations on sand with geogrid reinforcement, *Canadian Geotechnical Journal*, **30**, 3, 545–549.
- Örnek, M., (2009). Yumuşak zeminlerin geogrid donatı ile güçlendirilmesi, *Doktora Tezi*, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Prandtl, L. (1921). Über die Eindringungsfestigkeit (Härte) plastischer Baustoffe und die Festigkeit von Schneiden. *Zeitschrift für Angewandte Mathematic und Mechanic, Basel, Switzerland*, **1**, 1, 15-20.
- Ramaswamy, S.D. ve Purushothaman, P., (1992). Model footings of geogrid reinforced clay, *Proceedings of the Indian Geotechnical Conference on Geotechnique*, **1**, 183-186.
- Shin, E.C., Das, B.M., Puri, V.K., Yen, S.C. ve Cook, E.E., (1993). Bearing capacity of strip foundation on geogrid-reinforced clay, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, **16**, 4, 534-541.
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley and Sons. Newyork.
- Yetimoglu, T., Wu, J. ve Saglamer, A., (1994). Bearing capacity of rectangular footings on geogrid reinforced sand, *Journal of Geotechnical Engineering*, **120**, 12, 2083-2099.
- Yetimoglu, T., (1994). Geogrid-donatılı kum zemine oturan temellerin taşıma kapasitesi, *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yıldız, A., (2002). Donatılı zeminler üzerine oturan yüzeysel temellerin analizi, *Doktora Tezi*, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Vesic, A.S., (1973). Analysis of ultimate loads of shallow foundations, *ASCE, Journal of the soil mechanics and foundation division*, **99**, 1, 45-73.
- Zhu, M. ve Michalowski, R.L., (2005). Bearing capacity of rectangular footings on two-layer clay, *16th Int. Conf. Soil Mesh. Geot. Eng. (16th ICSMGE)*, Osaka, Japan, **2**, 997-1000.