

Sığ Rijit Tabaka Üzerinde Yer Alan Kohezyonsuz Zeminlerdeki Yüzeysel Temellerin Taşıma Gücü Hakkında Sayısal Modelleme Esaslı Parametrik Bir Çalışma

Güneş BABAGİRAY¹
Sami Oğuzhan AKBAŞ²

ÖZ

Sığ derinlikte rijit tabaka içeren kohezyonsuz zeminlerdeki yüzeysel temellerin taşıma gücü, temel genişliği ve şekli, rijit tabaka derinliği ve zemin içsel sürtünme açısı değişkenlerinin etkisinde, sonlu elemanlar yöntemi ile parametrik olarak irdelenmiştir. Kullanılan sonlu elemanlar yönteminin ne derecede gerçekçi sonuçlar ortaya koyduğunun belirlenebilmesi için Texas A&M Üniversitesi'nde, genişlikleri 1 m ve 3 m arasında değişen sığ temeller üzerinde gerçekleştirilen yükleme deneylerinin sonuçlarından faydalanılmıştır. Dört farklı içsel sürtünme açısı (32°, 35°, 40°, 45°) ve temel genişliği (B=1m, 1.5m, 2.5m, 3m) ile kare/dairesel ve şerit temeller için rijit tabakanın taşıma gücü üzerindeki etkisinin ortadan kalkacağı kritik derinliği etkileyen faktörler araştırılmıştır. Modellemeler, beklenildiği üzere artan derinlikle rijit tabakanın etkisinin azalmakta olduğunu göstermekle birlikte, söz konusu etkinin daha önce açık şekilde etkileri ortaya konulmamış olan içsel sürtünme açısı, temel genişliği ve şekli ile ilişkileri ortaya konularak, tasarım abakları oluşturulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Yüzeysel (sığ) temeller, taşıma gücü, rijit tabaka etkisi, sonlu elemanlar yöntemi.

ABSTRACT

A Numerical Modelling Based Parametric Study on the Bearing Capacity of Shallow Foundations on Cohesionless Soils Underlain by a Shallow Rigid Layer

A finite element-based parametric study was conducted to examine the effect of shallow rigid layer on the bearing capacity of shallow foundations in cohesionless soils considering footing width, shape, rigid layer depth, and the effective stress friction angle of the soil. The results of full-scale load tests on footings with widths that range between 1 m and 3 m conducted in the National Instrumentation Site at Texas A&M University were used to calibrate the finite

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 23.10.2015 günü ulaşmıştır. 18.04.2017 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Mart 2018 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• DOI: 10.18400/tekderg.345394

1 Gazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara - gunesaydin@gazi.edu.tr

2 Gazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara - soakbas@gazi.edu.tr

element models. The factors that influence the critical depth at which the rigid layer has no more influence on the bearing capacity of square/circular and strip footings were investigated for a series of drained friction angles (32°, 35°, 40°, 45°) and footing widths (B=1m, 1.5m, 2.5m, 3m). As expected, results indicate a diminishing rigid layer effect with increasing depth, but more importantly, the influences of drained friction angle, footing width and shape that have not been previously examined in detail, were revealed and presented in the form of design charts.

Keywords: Shallow foundations, bearing capacity, rigid layer effect, finite element method.

1. GİRİŞ

Yüzeysel temellerin etki derinliği içerisinde bulunan zemine kıyasla rijit bir tabakanın taşıma gücü faktörü N_{γ} ve buna bağlı olarak taşıma gücü üzerindeki etkisi çeşitli araştırmacılar tarafından ortaya konulmuştur [1, 2, 3, 4]. Bu konudaki ilk çalışmalarda [örn. 1] söz konusu etki derinliği (H) temel genişliğine (B) eşit olarak değerlendirilerek, rijit tabakanın temel genişliğinden büyük bir derinlikte olduğu durumlarda taşıma gücü faktörü N_{γ} 'da herhangi bir düzeltmeye ihtiyaç duyulmamıştır. Daha yakın tarihli bir çalışmada [3] ise genişlikleri 50 mm ile 500 mm arasında değişen model ve prototip ölçekli temellerin farklı derinliklerde rijit tabaka üzerinde yer alan kohezyonsuz zeminlerdeki yükleme sonuçları derlenmiş, rijit tabaka etkisinin yaklaşık $H/B = 1.5$ değerinde ortadan kalktığı ortaya konulmuştur. Şaşırtıcı biçimde, aynı çalışmada, derlenen sonuçlar dışında, $H/B = 0.5-4.0$ aralığında, rölatif sıklığı %24, %57 ve %87 olacak şekilde hazırlanmış kum zemin üzerinde genişlikleri 0.102 m ile 0.457 m arasında değişen rijit model kare ve dairesel temeller üzerinde yapılan yükleme deneylerinde ise kritik H/B oranının 3'e kadar yükseldiği gözlenmiştir. Mevcut çalışmanın yazarları tarafından 100 mm genişlikte, uzunluğu ise 100 mm ile 400 mm arasında değişen kare ve dikdörtgen model temeller üzerinde gerçekleştirilen yükleme deneylerinde de, Cerato ve Lutenegeger [3] tarafından elde edilen sonuçları destekleyecek şekilde kritik H/B değerinin 2.0-2.5 mertebelerine ulaşabildiği gözlenmiştir [4]. Söz konusu daha yüksek H/B oranının sebebi için bir hipotez, literatürden toplanan deney verilerinin temiz, kötü derecelenmiş kumlar, son iki çalışmanın [3, 4] ise iyi derecelenmiş kum üzerinde gerçekleştirilen deneylere ait olmasıdır. İyi derecelenmiş kumda daha yüksek içsel sürtünme açısına ulaşarak, yenilme yüzeyinin derine doğru itilmesi olasılığı mevcuttur. Rölatif sıklık (D_r) ya da efektif içsel sürtünme açısının (ϕ') rijit tabaka etkisi ile ilişkisi, rijit tabaka mevcudiyetindeki taşıma gücü faktörü (N_{γ}^*) ile doğal N_{γ} arasındaki oranın (δ), 101.6 mm çapındaki temellerde, değişen rölatif sıklıkta daha önce hiçbir çalışmada tanımlanmadığı şekilde farklı değerler alması ile de ortaya konulmuştur [3]. Taşıma gücü faktörü N_{γ} 'nın birçok araştırmacı tarafından [örn. 5, 6] belirlendiği üzere, boyut etkisi olarak da nitelendirilen bir biçimde temel genişliğinin bir fonksiyonu olması bu ilişkileri daha da karmaşık hale getirmektedir.

Yukarıda yer verilen araştırma sonuçları incelendiğinde, rijit tabaka etkisi ile rölatif sıklık arasındaki ilişkiye sadece bir araştırmada ve model veya prototip ölçekteki temelleri içeren son derece sınırlı deneysel veri ile işaret edildiği, bunun dışında δ değerinin temel şekli ve genişliğine bağlı olup olmadığının anlaşılabilmesi için literatürde Cerato ve Lutenegeger [3] tarafından da ifade edildiği üzere yeterli veri bulunmadığı ortaya çıkmaktadır. Bu noktalardan hareket ederek, özellikle gerçek temel boyutlarındaki davranışı temsil edebilmek amacı ile, mevcut çalışmada sığ derinlikteki rijit tabaka üzerinde bulunan yüzeysel temellerin

taşıma gücü, temel genişliği ve şekli, rijit tabaka derinliği ve zemin içsel sürtünme açısı değişkenlerinin etkisinde, PLAXIS 2-D paket programı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile sayısal modelleme gerçekleştirilerek irdelenmiştir. Sonuçların genelleştirilmesinde en kritik nokta kullanılan sonlu eleman yönteminin ne derecede gerçekçi sonuçlar ortaya koyduğunun belirlenebilmesi olduğundan, kalibrasyon için Texas A&M Üniversitesi'nde, genişlikleri 1 m ve 3 m arasında değişen sığ temeller üzerinde gerçekleştirilen yükleme deneylerinden [7] faydalanılmıştır.

2. YÜZEYSEL TEMEL YÜKLEME DENEYLERİ

Texas A&M Üniversitesi Geoteknik Test Alanı'nda yapılan eksenel yükleme deneyleri, yaklaşık 0.75 m derinlikteki, 1 m, 1.5 m, 2.5 m ve iki adet 3 m genişlikte ve 1.2 m kalınlıkta kare betonarme temeller üzerinde gerçekleştirilmiştir [7]. Literatürde az sayıda rastlanabilen büyük ölçekli yükleme uygulamalarından biri olmaları dışında, bu testlerin mevcut çalışmada kıyaslama ölçütü olarak seçilmesinin nedenleri, yükleme gerçekleştirilen zeminin çok sayıda saha ve laboratuvar deneyi yardımı ile son derece detaylı biçimde karakterize edilmiş olması ve yük-deformasyon ölçümlerinin kalitesinin yüksekliğidir. Test alanında 6 adet standart penetrasyon testi (SPT), 5 adet konik penetrasyon testi (CPT), 4 adet presiyometre testi (PMT) ve 3 adet sondaj kuyusu kesme testi (BHST) gerçekleştirilmiştir. Temellerin ve saha testlerinin yerleşim planları ve bazı zemin testlerinin özet profilleri Şekil 1'de görülmektedir. Zemin modülü PMT ve rezonant kolon deneyleriyle, içsel sürtünme açıları ise BHST, CPT ve SPT testleriyle belirlenen test alanındaki siltli kum zemin için, ortalama dane çapı $D_{50}=0.2$ mm, ortalama SPT darbe sayısı 18 darbe/0.3m, CPT uç mukavemeti 6 MPa, PMT limit basıncı 800 kPa, PMT modülü 8.5 MPa, BHST içsel sürtünme açısı 32° , birim hacim ağırlık 15.5 kN/m^3 olarak belirlenmiştir [7]. Test alanında yeraltı su seviyesi yaklaşık 5 m derinliktedir. Yükleme testleri boyunca temellerin yaptığı deplasmanlar, LVDT (Doğrusal Değişken Fark Dönüştürücü) ile ölçülmüştür. Ortalama 30 dakikalık süre boyunca sabit artan yükleme yapılarak, her temel için yük-oturma eğrileri elde edilmiştir. 150 mm oturma değerine kadar gerekli olan yükler, 1 m, 1.5 m, 2.5 m, 3 m boyutlarındaki temeller için sırasıyla 1740 kN, 3400 kN, 7100 kN ve 9625 kN olarak belirlenmiştir [7].

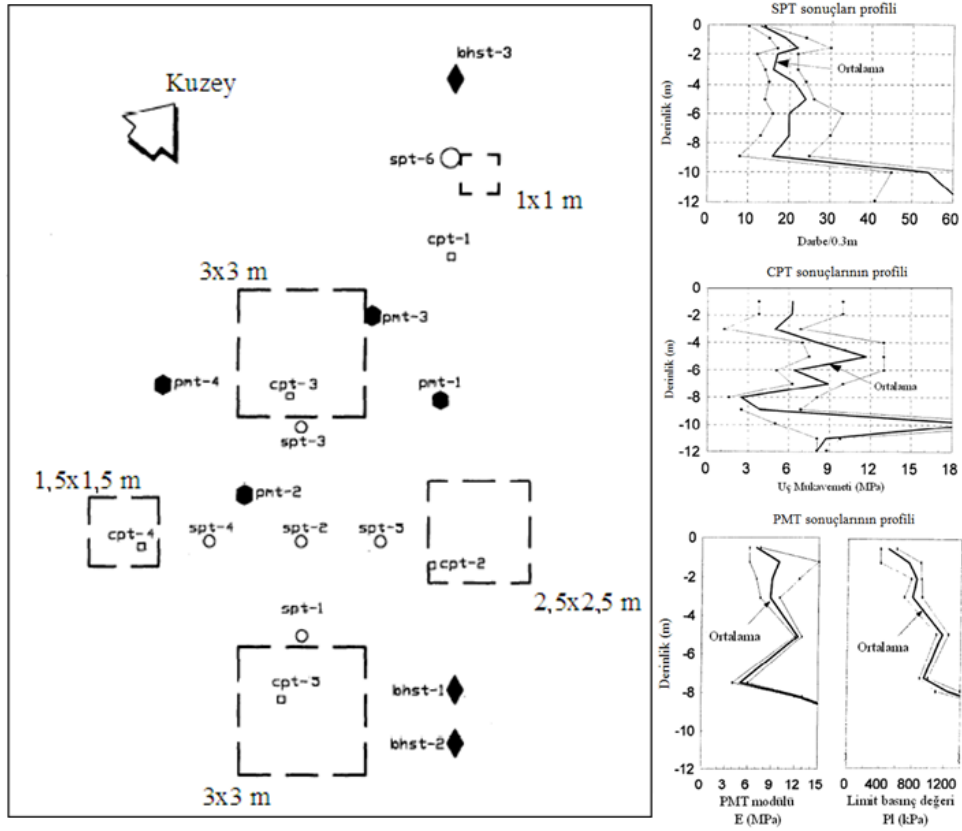
3. SONLU ELEMAN MODELİ KALİBRASYONU VE PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ

Sonlu eleman analizlerinde güvenilir sonuçlara ulaşılabilmesi için, zeminin davranışını yeterince iyi temsil edebilecek gerilme-birim deformasyon ilişkileri kullanmanın son derece önemli olduğu açıktır. Çoğu zemin, bir hiperbol ile yaklaşık olarak tasvir edilebilen, düşük birim deformasyonlarda dahi doğrusal olmayan gerilme-birim deformasyon eğrilerine sahiptir.

Bu çalışmada gerçekleştirilen sonlu eleman analizlerinde de zemin davranışı, modülün gerilmeye bağlı olduğu hiperbolik bir model olan "Hardening Soil Model" (Pekleşen Zemin Modeli) ile tanımlanmıştır [8]. Model hakkında detaylı bilgi çeşitli kaynaklarda verilmektedir (örn. [9]).

Texas A&M Geoteknik Test Alanı'nda bulunan siltli kumun, mümkün olduğu kadar gerçekçi şekilde modellenebilmesi için, sonlu eleman analizlerinde kullanılan malzeme

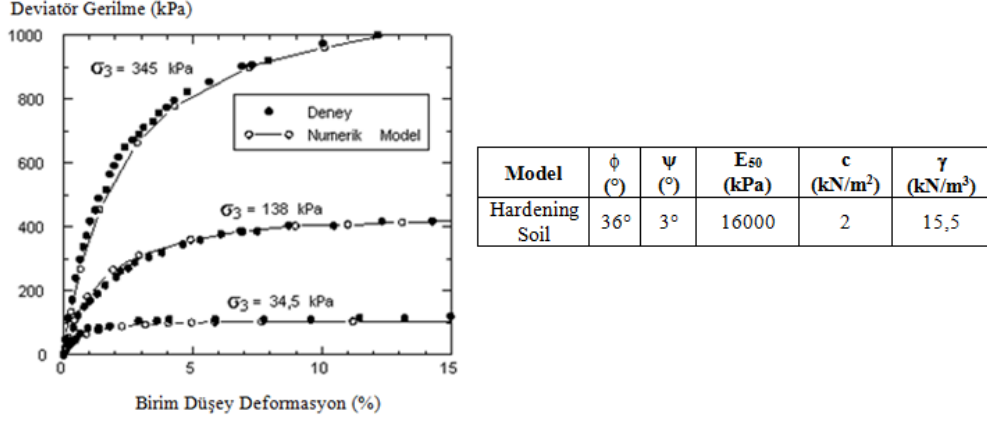
parametrelerinin seçimi büyük önem taşımaktadır. Bu çerçevede sonuçları kullanılan testlerden en önemlileri, üç değişik efektif çevre basıncı (34.5 kPa, 138 kPa, 345 kPa) altında gerçekleştirilen konsolidasyonlu–drenajlı (CD) üç eksenli basınç testleridir. Bu testler, presiometre ve rezonant kolon deneyleri sonuçlarından yararlanılarak tespit edilen zemin modülü ile sondaj deliği kesme testi, konik penetasyon ve standart penetasyon testleri sonuçlarından elde edilen içsel sürtünme açıları da temel alınarak, sonlu eleman yöntemi ile modellenmiştir. Gerçekleştirilen parametrik analizler sonucunda, pekleşen zemin modeli ile zemin içsel sürtünme açısı 36° , dilatasyon açısı 3° , zemin modülü 16000 kPa, kohezyon 2 kN/m², birim hacim ağırlık ise 15.5 kN/m³ seçildiğinde, deneyler ile son derece uyumlu eğrilerin elde edildiği ortaya çıkmıştır (Şekil 2). Deneysel olarak elde edilen gerilme–birim deformasyon eğrilerinin, sonlu eleman analizlerinden elde edilenler ile yüksek uyumlu olmasını sağlayan söz konusu zemin parametrelerinin sonlu eleman modellemelerinde kullanılması uygun bulunmuştur.



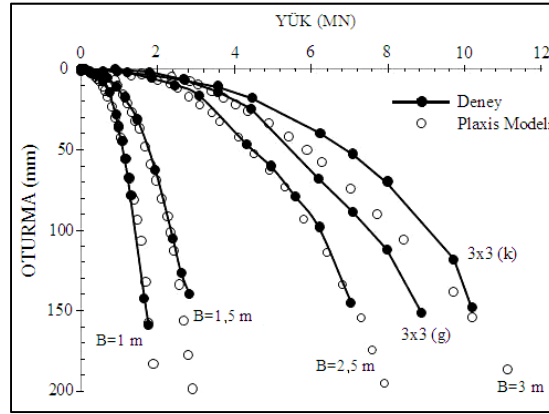
Şekil 1. Temellerin ve saha deneylerinin konumları ve zemin test profilleri [7]

Analizlere yönelik zemin parametrelerinin yukarıda anlatıldığı şekilde belirlenmesinin ve kullanılan zemin modelinin uygunluğunun teyit edilmesinin ardından, Texas A&M Üniversitesi'nde gerçekleştirilen B=1 m, 1.5 m, 2.5 m, 3 m boyutlarındaki kare temellerin

yüklemeye deneylerindeki davranışları da sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiştir. Sonlu eleman programının iki boyutlu modelleme sınırlaması sebebi ile aksel simetriden yararlanılarak kare temeller, eşdeğer dairesel temele dönüştürülmüş ve sistemin yalnızca 1/4'ü modellenmiştir. Testler ve sonlu eleman modelinden elde edilen sonuçlar Şekil 3'te karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



Şekil 2. Üç eksenli basınç testinin sonuçlarının sonlu elemanlar modellemesi ile karşılaştırması ve modellemede kullanılan parametreler



Şekil 3. Sonlu elemanlar analizi ve yüklemeye deneyleri sonucunda elde edilen yük-oturma grafikleri

Beş yüklemeye deneyi için de yeterince uyumlu olarak ortaya çıkan bu sonuçlar, kullanılan sonlu eleman yönteminin ve hiperbolik zemin modelinin, kohezyonsuz zeminler üzerinde yer alan aksel basınç altındaki sığ temellerin davranışını mevcut çalışma için yeterince başarılı bir şekilde temsil edebildiğini göstermektedir.

4. RİJİT TABAKA ETKİSİ VE MODELLEME SONUÇLARI

4.1. Kare ve Dairesel Temeller

Çeşitli koşullar ve geometrilerde, temel altında yer alan rijit tabaka varlığının etkisini yitirdiği kritik derinliği belirlemek üzere sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerden elde edilen sonuçlar ile efektif içsel sürtünme açısının (ϕ'), temel boyutlarının (B) ve rijit tabaka derinliğinin (H), sığ rijit tabaka üzerinde yer alan yüzeysel temellerin taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi incelenmiştir.

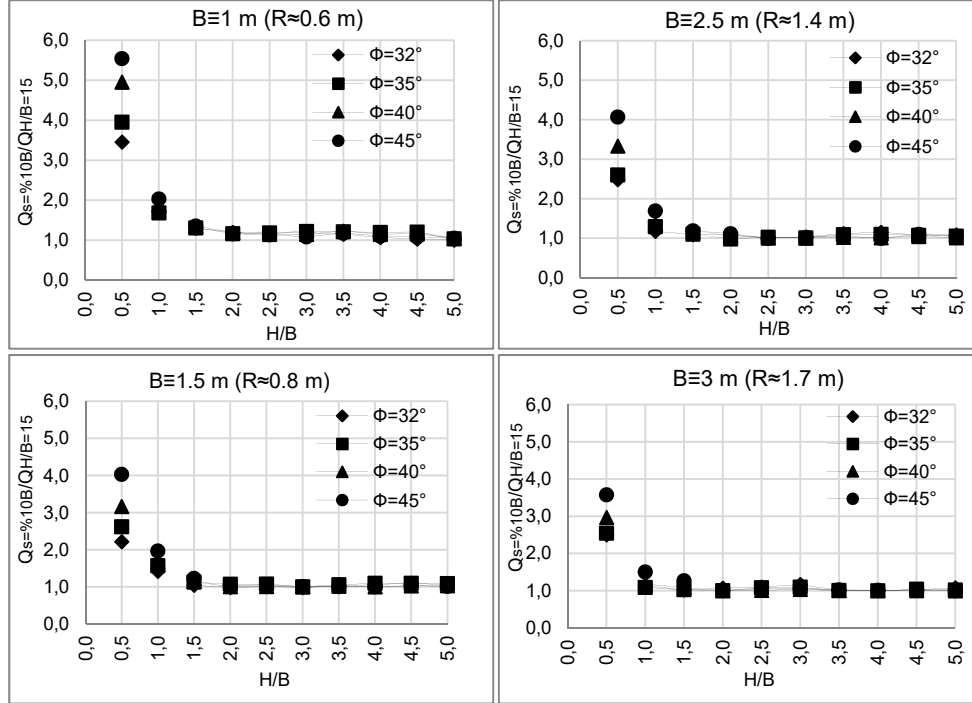
Modellenen kare temel genişlikleri (B) ve rijit tabakanın temele uzaklıkları (H) Tablo 1'de özetlenmiştir. İçsel sürtünme açılarının etkilerini değerlendirebilmek için, tüm temeller sırasıyla 32°, 35°, 40° ve 45° içsel sürtünme açısına sahip kum tabakalar üzerinde yer almaktadır. H/B=15, rijit tabakanın temeli etkilemeyecek kadar derinde olduğu uzaklığı temsil etmektedir.

Kohezyonsuz zeminlerde zemin modülü (E) değerinin artan rölatif sıklık, buna bağlı olarak da yükselen içsel sürtünme açısı ile daha büyük değerler alması beklenir. Gerçekleştirilen çalışmada sunulan sonuçlar çerçevesinde ise, inceleme konusu rölatif sıklık aralığında modülde ortaya çıkması beklenen değişimin sonuçlar üzerindeki etkisinin oldukça sınırlı olduğu, farklı modüller kullanılarak yapılan analizlerle belirlenmiştir. Bu sebeple ve özellikle diğer parametrelerin incelenen sonuçlara etkisini daha rahat çözümleyebilmek amacı ile tüm analizlerde pekleşen zemin modeli modülleri sabit kabul edilerek içsel sürtünme açısı ile değişimleri ihmal edilmiştir.

Tablo 1. Modellemelerde kullanılan B ve H boyutları

B=1 m (R≈0.6 m)		B=1.5 m (R≈0.8 m)		B=2.5 m (R≈1.4 m)		B=3 m (R≈1.7 m)	
H/B	H(m)	H/B	H(m)	H/B	H(m)	H/B	H(m)
0.50	0.50	0.50	0.75	0.50	1.25	0.50	1.50
1.00	1.00	1.00	1.50	1.00	2.50	1.00	3.00
1.50	1.50	1.50	2.25	1.50	3.75	1.50	4.50
2.00	2.00	2.00	3.00	2.00	5.00	2.00	6.00
2.50	2.50	2.50	3.75	2.50	6.25	2.50	7.50
3.00	3.00	3.00	4.50	3.00	7.50	3.00	9.00
3.50	3.50	3.50	5.25	3.50	8.75	3.50	10.50
4.00	4.00	4.00	6.00	4.00	10.00	4.00	12.00
4.50	4.50	4.50	6.75	4.50	11.25	4.50	13.50
5.00	5.00	5.00	7.50	5.00	12.50	5.00	15.00
15.00	15.00	15.00	22.50	15.00	37.50	15.00	45.00

Tüm modellemelerde sınır etkilerinin ihmal edilebilir düzeylere çekilebilmesi amacıyla, modellenen zemin en az 15 m genişlikte seçilmiştir. Farklı H/B oranlarında temel genişliğinin %10'u değerindeki oturmalara ($s=\%10B$) denk gelen ve nihai taşıma gücünü temsil eden yük değeri, $Q_{s=\%10B}$ ile gösterilmiştir. H/B=15 oranındaki, diğer bir deyişle sığ rijit tabaka etkisinin bulunmadığı durumda $s=\%10B$ ' ye karşılık gelen yük değeri ise, $Q_{H/B=15}$ ile ifade edilmiştir. Nihai taşıma gücünün tanımlanmasında oturmaların temel genişliğinin %10'u olarak seçilmesinin herhangi bir teorik altyapısı bulunmamakla birlikte, kolay hatırlanabilir ve göçme durumundaki ortalama zemin birim deformasyonuna yakın bir değer olması ile farklı boyutlardaki temelleri benzer şekilde değerlendirebilmesi açısından bunun yararlı bir yaklaşım olduğu söylenebilir [3,4]. Analiz sonuçlarına göre, kare (eşdeğer dairesel) temelerde $Q_{s=\%10B}/Q_{H/B=15}$ (δ) oranlarının rijit tabaka mesafesinin temel genişliğine oranı (H/B) ile değişimi, içsel sürtünme açıları da dikkate alınmak üzere, Şekil 4'te gösterilmiştir.

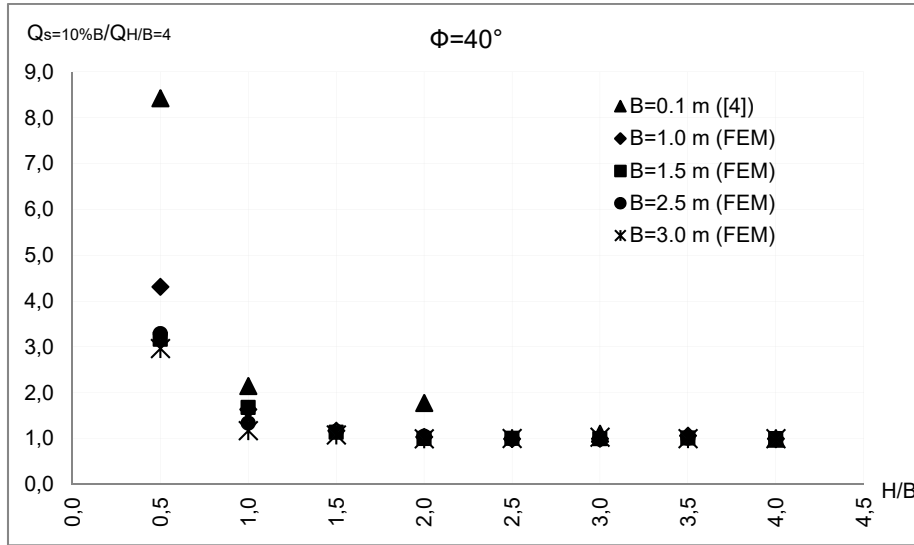


Şekil 4. Kare temelerde farklı temel genişlikleri ve içsel sürtünme açıları için sonlu eleman analizlerine göre $H/B - Q_{s=\%10B} / Q_{H/B=15}$ ilişkisi

Şekil 4 incelendiğinde, analiz edilen temel genişlikleri için, kritik H/B değerinin büyük ekseriyetle ve hemen hemen tüm koşullarda güvenli bir biçimde 1.5 mertebesinde kabul edilebileceği görülebilmektedir. Bu değer, Cerato ve Lutenegger [3] ile Babagiray vd. [4] tarafından gerçekleştirilen model ölçekli güncel çalışmalarda belirlenen kritik tabaka derinliğinden daha düşük olmakla birlikte, Cerato [10] tarafından derlenen daha eski tarihli veri seti ile uyumlu olduğu göze çarpmaktadır. Şekil 4'te yüksek içsel sürtünme açısı (40°-45°) ve düşük temel genişliğine sahip modellerin söz konusu genellemenin bir miktar dışında

kaldığı ve kritik H/B değerinin bu şartlarda 2.0 seviyesine kadar yükseldiği anlaşılmaktadır. Şekil 4'ten açıkça görüldüğü kadarı ile, kritik H/B değeri içsel sürtünme açısı ile yükselmekte, artan temel genişliği ile azalmaktadır. Cerato [10], gerçekleştirdiği model deneyler sonucunda, 304.8 mm genişlikteki temelin 101.6 mm genişliğine oranla çok daha düşük δ değerine sahip olduğunu belirterek, kritik H/B'nin temel genişliğine bağlı olabileceği savını ortaya koymuştur. Şekil 5'te mevcut çalışmanın 40° içsel sürtünme açısı için sonuçları, Babagiray vd. [4] tarafından 0.1 m genişlikte kare temeller için ($\phi = 41.6^\circ$) elde edilen deneysel veri noktaları da eklenerek sunulmaktadır. Her ne kadar etkisi son derece küçük olsa da, deneysel veriler H/B = 4 ile sınırlı olduğundan, δ hesaplanırken $Q_{H/B=15}$ yerine $Q_{H/B=4}$ ile oranlandığı gözden kaçırılmamalıdır. Şekil 5'ten de kolayca görülebileceği üzere, temel genişliği özellikle düşük rijit tabaka derinliklerinde δ üzerinde önemli etkiye sahiptir. Bu sonuç, daha önce son derece küçük bir aralıktaki temel genişliklerini kapsayan sınırlı deneysel veriye dayalı olarak Cerato [10] tarafından öne sürülen bu iddiayı uygulamada kullanılan boyuttaki temeller için de destekler niteliktedir.

Yukarıda açıklanan davranış özellikleri ışığında, Cerato ve Lutenegger [3] ile Babagiray vd. [4] çalışmalarında, genişliği 0.1 m ile 0.5 m arasında değişen model temeller ve yüksek içsel sürtünme açısına sahip ve buna bağlı olarak yenilme yüzeyinin daha derinde oluştuğu iyi derecelenmiş kum kullanıldığı göz önünde bulundurulduğunda, söz konusu araştırmalarda elde edilen 2.0–3.0 aralığındaki yüksek H/B oran sınırları da açıklanabilmektedir.



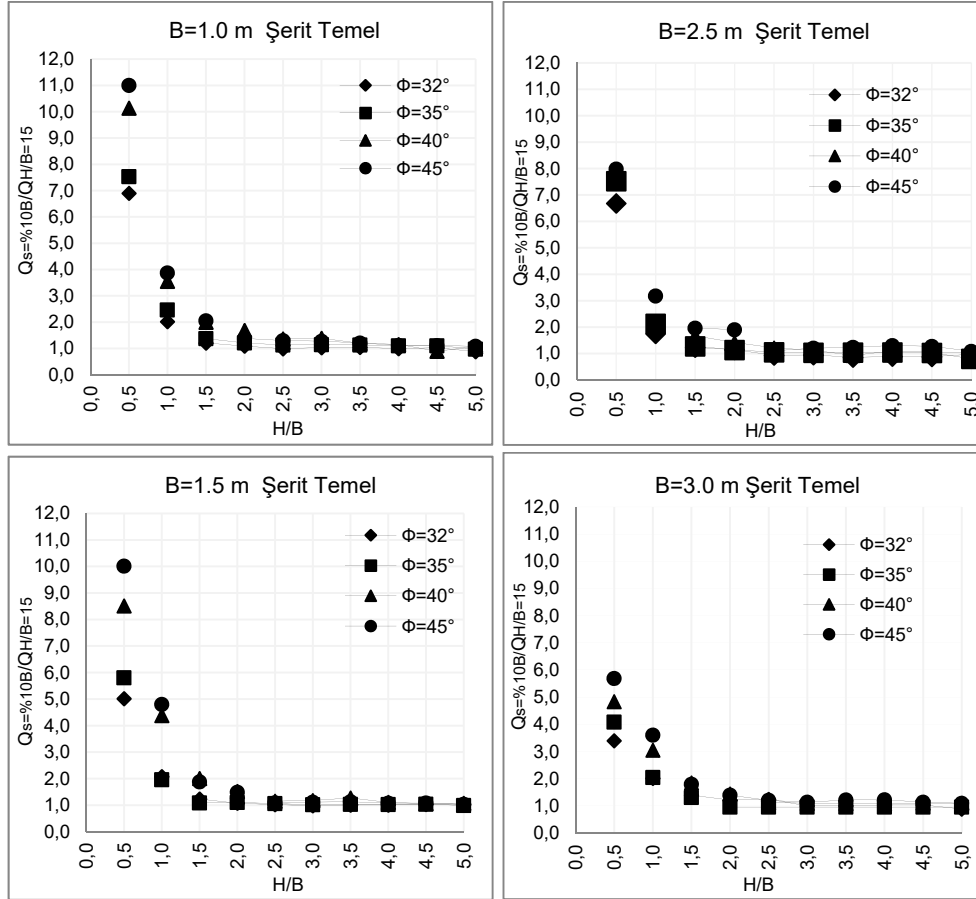
Şekil 5. $\phi = 40^\circ$ için farklı genişliklerdeki kare temellerde $H/B - Q_{s=10\%B} / Q_{H/B=4}$ ilişkisi

4.2. Şerit Temeller

Cerato [10], üç farklı sıklıkta kum kullanarak, 101.6 mm genişliğe sahip kare ve dairesel temeller üzerinde gerçekleştirdiği deneyler sonucunda, kritik H/B oranının temel şekliyle bağımsız olduğunu belirlemiştir. Söz konusu çalışmada dikdörtgen temellere yer verilmemesinden yola çıkan Babagiray vd. [4] ise B/L oranı 1 ile 4 arasında değişen temelleri

aynı çerçevede incelemiş ve rijit tabaka mevcudiyetinde, kare ile dikdörtgen temellerin değerlendirilmesinde Terzaghi [11] tarafından önerilen şekil faktörlerinin kullanımını önermişlerdir. Bu analizlerin sadece model temeller üzerinde gerçekleştirilmiş olmasından hareket ile, sıg rijit tabaka varlığında şekil etkisi hususunun da açıklığa kavuşturulması amacıyla, yukarıda özetlenen eksenel simetrik analizlere ek olarak şerit temelleri de değerlendirebilmek için düzlem birim deformasyon şartları altında sonlu eleman modelleri de incelenmiştir. Bu modellemelerde de kullanılan içsel sürtünme açıları önceki analizler ile uyumlu olarak sırasıyla, 32°, 35°, 40° ve 45°'dir. Böylelikle, şerit temeller altında bulunan rijit tabakanın etkisini kaybettiği derinlik de içsel sürtünme açısı (ϕ) ve temel genişliği (B) değişkenleri dikkate alınarak araştırılmıştır.

Şerit temeller için, $Q_{s=\%10B}/Q_{H/B=15}$ (δ) oranlarının rijit tabaka mesafesinin temel genişliğine oranı (H/B) ile değişimi, içsel sürtünme açıları da dikkate alınmak üzere, Şekil 6'da gösterilmiştir.



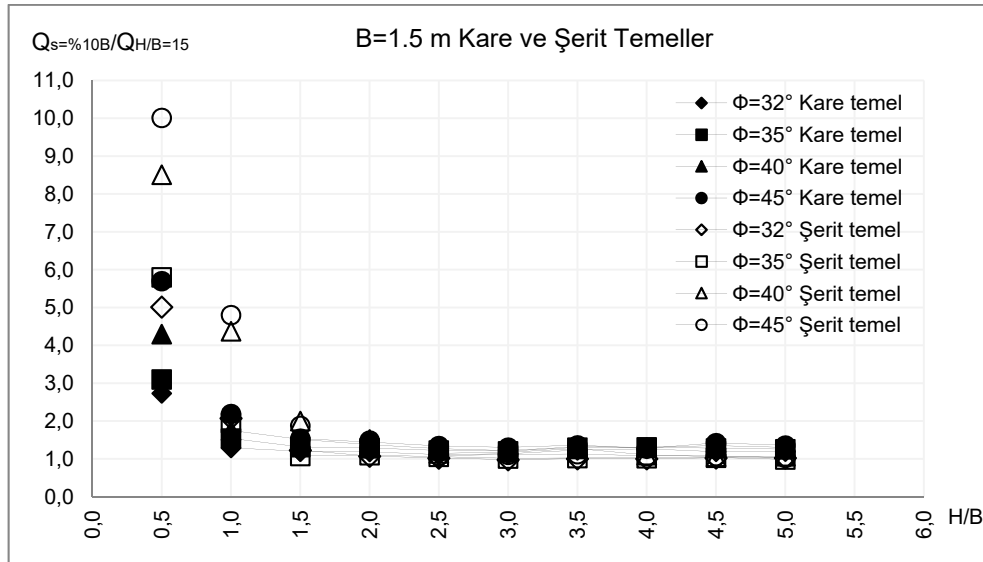
Şekil 6. Şerit temellerde farklı temel genişlikleri ve içsel sürtünme açıları için sonlu eleman analizlerine göre $H/B - Q_{s=\%10B}/Q_{H/B=15}$ ilişkisi

Şekil 6 incelendiğinde, şerit temelerde rijit tabaka üzerinde davranışın kare temeller ile büyük oranda paralellik göstermekle birlikte, sayısal açıdan farklar taşıdığı anlaşılmaktadır. Öncelikle δ , aynı genişlikte temeller göz önünde bulundurulduğunda, şerit temelerde daha yüksek değerler almaktadır. Bu durum Şekil 7'de 1.5 m genişlikte temeller için örneklenmiştir. Şerit temelerde de kritik H/B değeri artan genişlik ve azalan rölatif sıklık veya içsel sürtünme açısı ile düşmektedir. Fakat, kare temellerden farklı olarak, kritik H/B değeri 2.0 mertebesinde ve yüksek içsel sürtünme açısı (40° - 45°) ve düşük temel genişliğine sahip modellerde 2.5-3.0 aralığında yer almaktadır.

Görüldüğü üzere, temel genişliği ve içsel sürtünme açısının etkisi benzer şekilde gerçekleşmekle birlikte, temel uzunluğunun genişliğine oranının artması ile rijit tabaka daha derin seviyelerde de yenilme yükü üzerinde etkili olabilmektedir. Sunulan tüm bu veriler ışığında, sığ rijit tabaka varlığında, Cerato ve Lutenegeger [3] veya Meyerhof [2] tarafından sınırlı genişlik aralığında yapılmış olan araştırmalar sonucu belirlenmiş olanın aksine, H/B oranı ve daha az önemli olsa da rölatif sıklık veya içsel sürtünme açısından bağımsız bir şekil faktöründen bahsetmek mümkün görünmemektedir.

Mevcut çalışmada gerçekleştirilen modelleme şartları dikkate alındığında, kohezyonsuz zemin üzerinde, yüzeysel temel kabulü ile ve ayrıca taban eğim faktörleri, yük eğim faktörleri ve zemin eğim faktörleri taşıma gücü eşitliğinde dikkate alınmayacağından, herhangi bir H/B değeri için aynı genişlikteki kare ve şerit temellerin taşıma gücü oranları aşağıdaki biçimde ifade edilebilir:

$$\frac{q_{ult-kare}}{q_{ult-şerit}} = \frac{N_{\gamma-kare}^*}{N_{\gamma-şerit}^*} S_{\gamma} \quad (1)$$

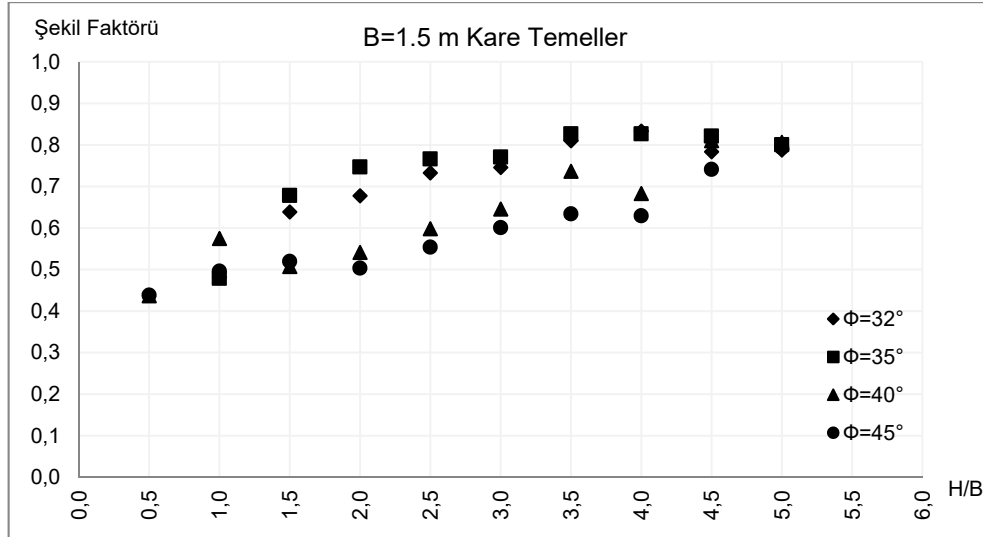


Şekil 7. 1.5 m genişlikte kare ve şerit temelerde farklı içsel sürtünme açıları için sonlu eleman analizlerine göre H/B-Qs=%10B/QH/B=15 ilişkisinin karşılaştırılması

Eşitlik 1’de $q_{ult-kare}$ ve $q_{ult-şerit}$ sırası ile aynı genişlikteki kare ve şerit temeller için nihai taşıma gücü basınçlarını, $N_{\gamma}^*_{kare}$ ve $N_{\gamma}^*_{şerit}$ ise sırası ile kare ve şerit temeller için belirli bir H/B değerinde rijit tabaka mevcudiyetindeki taşıma gücü faktörü değerlerini ifade etmektedir. Şerit temel için şekil faktörü genel yaklaşım ile uyumlu biçimde 1 kabul edilmiştir.

Şekil 7’de de görüldüğü üzere, rijit tabaka varlığında taşıma gücü değerleri şerit ve kare temeller için farklılık göstermektedir. Eşitlik 1 göz önünde bulundurularak, herhangi bir H/B değerindeki rijit tabaka mevcudiyetindeki taşıma gücü faktörünün sadece içsel sürtünme açısı ve rijit tabaka derinliğine bağlı olduğu kabulü yapılarak $N_{\gamma}^*_{kare}$ ve $N_{\gamma}^*_{şerit}$ değerleri eşit kabul edildiğinde, söz konusu fark sadece kare temel şekil faktörü s_{γ} ile açıklanabilir. Bu kabul ile hesaplanan kare temel şekil faktörleri Şekil 8’de sunulmaktadır.

Şekil 8’de görüldüğü üzere, herhangi bir H/B oranı için şerit ve kare temellerde sadece içsel sürtünme açısına bağlı bir N_{γ}^* değeri kabulü yapıldığında, kare temel şekil faktörü (s_{γ}), rijit tabaka derinliği ve içsel sürtünme açısına bağlı bir değişken halini almaktadır. Söz konusu şekil faktörü, rijit tabakanın etkisini yitirdiği yüksek H/B değerlerinde ise Terzaghi [11] tarafından kare temeller için önerilen 0.8 değerine yakınsamaktadır.



Şekil 8. 1.5 m genişlikte kare temellerde farklı içsel sürtünme açıları ve H/B değerlerinde şekil faktörü

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada sığ rijit tabaka mevcudiyetinin kohezyonsuz zeminler üzerindeki sığ temel taşıma gücü üzerindeki etkisi, kritik derinlik, temel şekli, temel genişliği ve zemin içsel sürtünme açısı değişkenleri çerçevesinde sonlu eleman yöntemi ile parametrik olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmektedir:

- Kohezyonsuz zeminlerde temel taşıma gücü üzerinde rijit tabaka etkisinin ortadan kalktığı derinlik olarak tanımlanan kritik derinliğe ait literatürde sunulan çelişkili

sonuçlara, zemin efektif içsel sürtünme açısı ve temel genişliğinin karşılıklı etkileşimi çerçevesinde bir açıklama getirilmiştir. Kritik H/B, artan rölatif sıklık ve azalan temel genişliği ile artma eğilimi göstermektedir. Söz konusu değerler yüksek rölatif sıklık ve küçük temel genişliklerinde kare temellerde 2.0'a kadar yükselebildiği anlaşılmıştır.

- Daha sık rastlanılan temel tasarım parametreleri ($\phi' < 40^\circ$, $B > 1$ m) söz konusu olduğunda ise rijit tabaka mevcudiyetinin kare temel taşıma gücü üzerindeki etkisi H/B, 1.5 değerini aştığında güvenle ihmal edilebilir.
- Daha önce çeşitli araştırmacılar tarafından öne sürülenin aksine, etkili rijit tabaka derinliğinin temel şekli ile de ilişkili olduğu ortaya konulmuştur. Kritik H/B değeri, azalan B/L ile artış eğilimi göstermektedir. Şerit temellerde kritik H/B değeri genellikle 2.0 mertebesinde, yüksek içsel sürtünme açısı (40° - 45°) ile düşük temel genişliğine sahip modellerde ise 2.5-3.0 aralığında yer almaktadır. Bu husus en kolay şekilde, şerit temelin kare temele göre daha derine inen gerilme soğanları kapsamında açıklanabilir.
- Sabit bir rijit tabaka derinliği için eşit genişlikte şerit ve kare temellerde sadece içsel sürtünme açısına bağlı bir N_γ^* değeri kabulü yapıldığında, şekil faktörü (s_γ), rijit tabaka derinliği ve içsel sürtünme açısına bağlı bir değişken halini almakta ve kare temeller için artan H/B ile 0.8'e yakınsamaktadır. Bu sebeple, rijit tabaka içeren tasarım uygulamalarında taşıma gücü ve şekil faktörlerini ayrı ayrı ele almak uygun ve kullanışlı olmayacaktır.
- Mevcut çalışmada 32° ile 45° arasındaki içsel sürtünme açıları ve 1 m ile 3 m arasında değişen temel genişlikleri için derinliğine bağlı olarak rijit tabaka mevcudiyetinde taşıma gücünde meydana gelen artışlar kare ve şerit temeller için grafiksel olarak sunulmuştur. Uygulamada kohezyonsuz zeminler üzerinde yer alan sığ temel tasarım parametre aralığını büyük oranda içeren söz konusu grafikler gerekli enterpolasyonların yapılması sureti ile kohezyonsuz zeminlerdeki tüm kare ve dikdörtgen temeller için tasarım abakları olarak kullanılabilir.

Semboller

B	Temel genişliği
BHST	Sondaj kuyusu kesme testi
c	Zemin kohezyonu
CD	Konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç testi
CPT	Konik penetrasyon testi
D ₅₀	Numunenin ağırlıkça geçen %50'sine karşılık gelen tane çapı
D _r	Rölatif sıklık
E ₅₀	Gerilmeye bağlı zemin modülü
FEM	Finite element method (sonlu elemanlar yöntemi)
H	Temel ile rijit tabaka arasındaki tabaka kalınlığı

kN	KiloNewton
kPa	KiloPascal
L	Temelin uzunluğu
LVDT	Doğrusal değişken fark dönüştürücü
m	Metre
mm	Milimetre
MPa	MegaPascal
PMT	Presiyometre testi
q_{ult}	Nihai taşıma gücü basıncı
R	Eşdeğer dairesel temel yarıçapı
s	Oturma miktarı
s_γ	Şekil faktörü
SPT	Standart penetrasyon testi
N_γ	Taşıma gücü faktörü
N_γ^*	Değiştirilmiş taşıma gücü faktörü
γ	Zeminin birim hacim ağırlığı
ϕ	İçsel sürtünme açısı
ϕ'	Zeminin efektif içsel sürtünme açısı
ψ	Dilatasyon Açısı
δ	Yük değerlerinin oranları

Kaynaklar

- [1] Mandel, J., Salencon, J., Force portante d'un sol sur une assise rigide (Etude Theorique), Geotechnique, Vol 22, No 1, 79-93, 1972.
- [2] Meyerhof, G. G., Some Recent Research on the Bearing Capacity of Foundations, Canadian Geotechnical Journal, Ottawa, Canada, Vol 1, No 1, 16-26, 1963.
- [3] Cerato, A. B., Lutenegeger, A. J., Bearing Capacity of Square and Circular Footings on a Finite Layer of Granular Soil Underlain by a Rigid Base, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol 132, No 11, 1496–1501, 2006.
- [4] Babagiray, G., Akbas, S. O., Anıl, O., Sığ Rijit Tabaka Mevcudiyetinin Kohezyonsuz Zeminler Üzerindeki Yüzeysel Temellerin Taşıma Kapasitesine Etkisi, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, Vol 28, No 1, 187-198, 2013.

- [5] Shiraishi, S., Variation in Bearing Capacity Factors of Dense Sand Assessed by Model Loading Tests, *Soils and Foundations*, Vol 30, No 1, 17-26, 1990.
- [6] Akbas, S. O., Kulhawy, F. H., Axial Compression of Footings in Cohesionless Soils. II: Bearing Capacity, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, Vol 135, No 11, 2009.
- [7] Briaud, J. L., Gibbens, R., Behaviour of Five Large Spread Footings in Sand, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 787–796, 1999.
- [8] Schanz, T., Vermeer, P.A., Bonnier, P.G., The Hardening Soil Model: Formulation and Verification, *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*, Balkema, Rotterdam, 1999.
- [9] Brinkgreve, R.B.J., PLAXIS Finite Element Code for Soil and Rock Analysis-version 8, Balkema, Rotterdam, 2002.
- [10] Cerato, A. B., Scale Effects of Shallow Foundation Bearing Capacity on Granular Material, *Doktora Tezi*, University of Massachusetts, 2005.
- [11] Terzaghi, K., *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley and Sons, New York, 1943.