

Dolgu ile İyileştirilen Zeminlerde Dolgu ve Temel Parametrelerinin Taşıma Gücüne Etkilerinin Araştırılması

Bahadır OK^{1*}, Talha SARICI², Murteda ÜNVERDİ³, Hüseyin ÇOLAKOĞLU⁴

Öz

Tabakalı zeminlerin nihai taşıma kapasitesinin belirlenmesine yönelik birçok teorik yaklaşım ortaya konulsa da zeminlerin karmaşık yapılarını basitleştirmek için yapılan kabuller özellikle tabakalı zeminlerin taşıma kapasitelerinin doğru olarak belirlenmesini zorlaştırmaktadır. Bu sebeple, zeminlerin davranışının belirlenmesinde sonlu eleman yöntemi kullanılması son yıllarda popülerleşmektedir. Bu çalışma kapsamında, sonlu elemanlar yöntemini kullanan Plaxis programı kullanılarak tabakalı zeminlere oturan dairesel bir temelin gerilme-şekil değiştirme davranışları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Tabakalı zeminler, arazide yapılmış bir gurup plaka yükleme deneyi dikkate alınarak, alt kısımda kohezyonlu zayıf bir zemin ve üst kısımda ise dolgu olarak düşünülen kohezyonsuz farklı zeminlerden oluşturulmuştur. Plaxis ile yapılan sayısal analizler ile arazide yapılan deney sonuçları karşılaştırılarak modelin güvenilirliği kanıtlanmıştır. Model doğrulandıktan sonra, temel çapı, dolgu yüksekliği ve dolgunun mukavemeti gibi parametrelerin yük deformasyon davranışına etkisini belirlemek için parametrik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çalışma sonuçlarındaki ölçek etkisi ortaya konmuştur. Analiz sonuçları tabakalı zeminlerin nihai taşıma kapasitelerini karşılaştırmak için boyutsuz taşıma kapasitesi oranları şeklinde sunulmuştur. Taşıma kapasitesi oranları incelendiğinde, temel çapı, dolgu kalınlığı ve dolgunun mukavemeti arttıkça taşıma kapasitesi oranının da arttığı belirlenmiştir. Örneğin, içsel sürtünme açısının artmasıyla kalın bir dolgunun taşıma kapasitesi oranında 3,37 kat artış elde edilmiştir. Bununla birlikte temel çapının küçülmesi ile birlikte dolgu kalınlığı ve dolgunun mukavemeti arttıkça ölçek etkisinin arttığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Tabakalı zeminler, Dolgu ile zemin ıslahı, Sonlu elemanlar analizi, Plaka yükleme deneyi

Investigation of the Effects of Filling and Foundation Parameters on Bearing Capacity in Soil Improved by Filling

Abstract

Although many theoretical approaches have been put forward to determine the ultimate bearing capacity of layered soils, the assumptions made to simplify the complex structures of soils make it difficult to determine the bearing capacity of layered soils accurately. As a consequence, the use of the finite element method in determining the behavior of soils has become popular in recent years. In this study, the stress-strain behaviors of a circular foundation settling on layered soils were investigated in detail by using the Plaxis program, which uses the finite element method. Layered soils were formed from weak cohesive soil at the bottom and cohesionless soil (filling) at the top, taking into account a group of plate loading tests conducted in the field. The reliability of the model was proven by comparing the numerical analyzes made with the Plaxis and the results of the field experiments. After the model was validated, parametric studies were carried out to determine the effect of some parameters such as foundation diameter, the height of filling, and strength, on load-deformation behavior. In addition, the scale effect in the results of the study was revealed. The results of the analyses are presented as nondimensional bearing capacity ratios to compare the ultimate bearing capacities of layered soils. When the bearing capacity ratios were examined, an increase was noticed in the bearing capacity ratio as the foundation diameter, the height of filling, and the strength increased. For example, with the increase of the internal friction angle, an increase of 3.37 times at bearing capacity ratio was obtained for a thick filling. However, an increase was observed in the scale effect as the height of filling soil and the strength increased with the reduction of the foundation diameter.

Keywords: Layered soils, Filling, Soil improvement, Finite element analysis, Plate loading test.

^{1,3,4}Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, İnşaat Müh. Böl., Adana, Türkiye, bahadirok@atu.edu.tr
unverdi.murteda@gmail.com huseyincolakoglu.hc@gmail.com

²İnönü Üniversitesi, İnşaat Müh. Böl., Malatya, Türkiye, talha.sarici@inonu.edu.tr

¹<https://orcid.org/0000-0001-8333-5671>

²<https://orcid.org/0000-0001-8488-5851>

³<https://orcid.org/0000-0002-0893-7450>

⁴<https://orcid.org/0000-0001-6804-0963>

1. Giriş

Yapıdan gelen yükleri zemine aktaran yapı elemanları temel olarak isimlendirilmektedir. Temelden gelen yüklere maruz kalan ve temel zemini olarak adlandırılan ortam ile temeller arasında kaçınılmaz bir etkileşim olmaktadır. Yüzeysel ve derin temeller olmak üzere genel olarak iki ana kısma ayrılan temel sistemlerinden uygun temel sistemini belirleyebilmek için temelin inşa edileceği temel zemininin özelliklerinin iyi bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Yüzeysel temel sistemleri, tekil, şerit ve radye temel sistemlerini kapsamaktadır. Ayrıca, bu temel sistemleri, yapıdan gelen yükleri daha çok yüzeye en yakın temel zeminine iletmektedirler. Yüzeysel temellerden biri olan tekil temellerin diğer yüzeysel temellere göre maliyetleri düşüktür ve inşa aşamaları nispeten daha kolaydır. Bu ve buna benzer sebeplerden dolayı kullanımını oldukça yaygındır. Ancak, taşıma gücü ve oturma koşullarını sağlayabilmek için genellikle orta ve iyi derecedeki zemin ortamlarına inşa edilen küçük ve orta boyuttaki yapılarda kullanılabilirler. Tekil temel sistemlerinde, her taşıyıcı elemanın altında tipik olarak bir tekil temel bulunmaktadır. Bununla birlikte, bir tekil temel üzerinde birden fazla taşıyıcı eleman (kolon, taşıyıcı duvar vb.) bulunması isteniyorsa tekil temelin bir boyutu arttırılabilir. Bu durumda oluşturulan temel sistemleri sürekli temel olarak isimlendirdiler. Bir diğer yüzeysel temel çeşidi olan radye temeller ise genellikle yapının tüm temas yüzeyini kuşatırlar. Diğer yüzeysel temellere göre inşa maliyeti yüksek ve yapım aşamaları daha zorlu olmasına karşın, taşıma gücü ve oturma koşullarını diğer temellere kıyasla daha iyi sağlarlar. Genellikle, bir yüzeysel temelin, bulunduğu yapının temas alanının yaklaşık olarak üçte birinden daha fazla alanı kaplaması planlanıyorsa, yüzeysel temel olarak radye temel tipini seçmek daha avantajlı olabilmektedir (Coduto ve ark., 2001; Murthy, 2002; Uzuner, 2016).

Temel ile temel zemini arasındaki etkileşimin iyi bir şekilde belirlenmesi oldukça önem arz etmektedir. Bu etkileşimde, temel zemininin taşıma gücü ve oturma davranışı çeşitli yöntemler ile belirlenebilmektedir (Murthy, 2002). Bu amaçla geleneksel olarak çeşitli teorik yaklaşımlar ve deneysel çalışmalar kullanılsa dahi, günümüzde sonlu elemanlar yöntemi gibi sayısal metotlar gittikçe yaygın hale gelmektedir. Zeminin göçme olmaksızın teorik olarak taşıyabileceği maksimum basınç nihai taşıma kapasitesi olarak tanımlanmaktadır. Taşıma kapasitesini bulmak amacıyla güvenilir bir yöntem belirlemek için çeşitli çözümler, kapsamlı bir şekilde uygulanmalıdır. Nihai taşıma kapasitesini teorik olarak hesaplayabilmek için Terzaghi (Terzaghi ve ark., 1943), Hansen (Hansen, 1970) ve Meyerhof (Meyerhof, 1963) gibi geleneksel hesaplama yöntemleri önerilmektedir. Bu ve buna benzer geleneksel taşıma gücü teorileri, homojen zemin ortamlarının nihai taşıma kapasitesi hesaplamaları için uygundur. Ancak zemin özelliklerinin derinlikle değiştiği ya da farklı zemin tiplerinin bulunduğu tabakalı zemin durumlarında nihai taşıma kapasitesinin bu tarz geleneksel taşıma gücü teorileri ile hesaplanması uygun olmayacaktır (Coduto ve ark., 2001; Murthy, 2002). Bu

durumun nedeni olarak potansiyel yenilme yüzeylerinin zemin yüzeyinin önemli bir uzaklığına kadar uzanarak farklı özellikteki zeminler tarafından karşılanmaya çalışılmasıdır.

En yaygın homojen olmayan zemin türü olarak, farklı özelliklerde ve yaklaşık olarak sabit kalınlıkta olan farklı zemin tabakalarının oluşturduğu zemin ortamları kabul edilebilir. Bu durumdaki problemleri çözebilmek için dikkate alınabilecek en basit iki durum vardır. Bu iki durumda, iki farklı karakteristik özellikteki iki farklı katmanlı bir zemin profili olabilir. Bu durumların ilkinde üstteki katman alttaki katmandan nihai taşıma kapasitesi olarak daha zayıfken, ikincisinde daha güçlüdür. Tabakalı bir zemin ortamında inşa edilen yüzeysel bir temelin nihai taşıma kapasitesi hesaplanırken dikkat edilmesi gereken bazı hususlar vardır. Bunlar; yüzeysel temelin derinliği ve çeşidi, zemin tabakalarının kalınlığı ve mukavemeti gibi parametrelerdir. Tabakalı zemin ortamlarının nihai taşıma kapasitesi hesaplanırken çeşitli yöntemler kullanılabilir. Bunlar; arazi deneyleri yöntemleri, laboratuvarında model yükleme deneyleri yöntemleri, mevcut farklı zeminlerin mukavemet parametrelerinin ağırlıklı ortalama değerleri ile hesaplama yöntemi, limit denge yöntemleri, limit analiz yaklaşımları, sonlu elemanlar yöntemi, vb. (Florkiewicz, 1989; Michalowski ve Shi, 1995; Frydman ve Burd, 1997; Dewaikar ve Mohapatra, 2003; Silvestri, 2003; Shiau ve ark., 2003). Tabakalı zeminler üzerine inşa edilen temellerde temel ile zemin arasındaki etkileşim literatürde farklı şekillerde araştırılmıştır. Kohezyonlu zemin üzerinde kohezyonsuz zemin ya da kohezyonsuz zemin üzerinde kohezyonlu zemin bulunduğu tabakalı zemin ortamları ile ilgili Meyerhof (1974), Kenny ve Andrawes (1997), Mustafa ve Elsharief (2020) çalışmalar gerçekleştirmiştir. Hanna (1981, 1982) iki farklı kum tabakası üzerine inşa edilmiş temellerin, taşıma gücünün belirlenmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirmiştir.

Son yıllarda, geoteknik mühendisliği problemlerinin çözümünde, sonlu elemanlar yöntemi giderek artan bir şekilde tercih edilmektedir. Zeminin karmaşık davranışı, bazı durumlarda, sadece hazır denklemlerle ve/veya arazi/laboratuvar deneylerinden elde edilen veriler ile belirlenemeyebilmektedir. Bundan dolayı, sonlu elemanlar yöntemi kullanarak uygun bir şekilde oluşturulan sayısal modeller ile zeminlerin gerilme-şekil değiştirme davranışı, doğru bir şekilde hesaplanabilmektedir. Zemin ortamının daha küçük sonlu elemanlara ayrıştırıldığı sonlu elemanlar yöntemi, son yıllarda geoteknik modellemeler için önemli bir araç olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, bu yöntemde, modellerdeki malzemelerin doğrusalsızlığı, karışık sınır koşulları ve karmaşık geometriler de dikkate alınmaktadır (Nujid ve Taha, 2014). Geoteknik alanında yapılan bilimsel araştırmalarda, deneysel ve sayısal çalışmalar birbirlerini tamamlayabilmektedir. Sonlu eleman yöntemi ile yapılan sayısal çalışmaların deneysel çalışmalara göre çeşitli avantajları vardır. Örneğin, sayısal analizlerde çeşitli parametreler kolaylıkla değiştirilebilir ve problem genelindeki gerilme ve deformasyon detayları rahatlıkla incelenebilir. Bu incelemeyi bir deneysel çalışmada yapmak son derece zordur. Özellikle, tabakalı zemin ortamlarında zeminin davranışını sonlu elemanlar yöntemi

ile araştırmak işleri kolaylaştıracaktır (Ramadan ve Hussien, 2015). Ancak, sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan modellemelerde dikkat edilecek en önemli husus, oluşturulan modelin, zemin ortamının özelliklerini ve bulunduğu koşulları çok iyi temsil etmesidir.

Literatürde yapılan çalışmalarda tabakalı zeminler incelenirken genellikle üç temel konu üzerinde durulmuştur. Bunlar; tabakalı zeminlerin taşıma gücünün belirlenmesi, zayıf zeminlerin güçlendirilmesi ve ölçek etkisidir (Ochiai ve ark., 1996; Fukushima ve ark., 2005; Ornek ve ark., 2012; Mosallanezhad ve Moayedi, 2017). Mosallanezhad ve Moayedi (2017) yaptıkları çalışmada model deneysel çalışmalar ve sonlu elemanlar analizleri ile tabakalı zemin ortamının taşıma gücünü belirlemeye yönelik çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca yaptıkları araştırma kapsamında limit denge metodunu da kullanmışlardır. Sonlu elemanlar analizini gerçekleştirirken Plaxis paket programını kullanmışlardır. alışmalarında, zeminin tabaka kalınlığı ve özelliği, uygulanan gerilme ve tasarım analizi türü gibi parametrelerin zeminin taşıma kapasitesini etkileyebileceğini belirtmişlerdir. Geleneksel yöntemler ile zeminin nihai taşıma kapasitesinin belirlenmesi üzerine birçok araştırma yapılmış olsa da elde edilen sonuçların bazen güvenilir olamayabileceğini belirtmişlerdir. Bunun nedeni olarak, geleneksel teorilerin taşıyıcı zemin katmanını sonsuz ve homojen bir katman olarak basitleştirmesi olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, Plaxis paket programı ile yaptıkları analizlerin tutarlı ve güvenilir olduklarını bildirmişlerdir. Ornek ve ark. (2012) granüler dolgu tabakası ile güçlendirilmiş kil zemin üzerinde bulunan dairesel temelin taşıma gücünü arazi ortamında deneysel çalışmalar ve Plaxis paket programı yardımıyla sayısal analizler yaparak belirlemişlerdir. Ayrıca çalışmalarının temel hedefinin ölçek etkisini araştırmak olduğunu belirtmişlerdir. alışmalarında, deneysel çalışmalar ile sayısal analizleri mukayese ederek oluşturdukları sonlu elemanlar modelinin geçerli olduğunu kanıtlamışlardır. Yaptıkları çalışmanın sonucunda, granüler dolgu tabakasının dairesel temellerin taşıma kapasitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Gerçekleştirdikleri arazi deneyleri ve sayısal çalışmalar ışığında, granüler dolgu bulunan kil zemin formasyonunun taşıma kapasitesi oranının, temel çapının artmasıyla arttığını ifade etmişlerdir. İlave olarak, kil zemin üzerine oturan dairesel temelin önemli bir ölçek etkisinin olmadığını bildirmişlerdir. Dash ve ark. (2003), yumuşak kil zemin üzerinde yer alan granüler dolgunun davranışını incelemek için laboratuvarda model deneyler gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca granüler dolgunun güçlendirilmesi etkisini de araştırmışlardır. Granüler dolgu tabakasının kalınlığının artması ile yük taşıma kapasitesinde artış olduğunu belirtmişlerdir. Singh ve Roy (2021) yaptıkları çalışmada dikey ve eğimli bir yüklemeye maruz kalan tabakalı bir zemin üzerinde duran dairesel bir temelin davranışını incelemişlerdir. Bunun için, çalışmalarında, Plaxis paket programını kullanmışlardır. Yaptıkları parametrik çalışmalarda, üstte bulunan tabakanın kalınlığının ve her iki tabakanın içsel sürtünme açısının etkisini incelemişlerdir. Plaxis paket programından elde ettikleri sonuçların literatürden elde edilen verilerle uyumlu olduğunu

belirtmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, üstteki tabaka kalınlığı ve içsel sürtünme açısı değeri arttıkça taşıma kapasitesinin arttığını bildirmişlerdir. Demir ve ark. (2009), zayıf bir kil zemininde inşa edilmiş granül dolgu üzerinde bulunan dairesel temellerin taşıma kapasitesinin ve oturma davranışını belirlemek için laboratuvarında model testler yapmışlardır. Bununla birlikte dolgunun güçlendirilmesi durumunu da araştırmışlardır. Ayrıca, Plaxis paket programı kullanarak sayısal analizler gerçekleştirmişlerdir. Deneysel sonuçların sayısal analizler ile uyumlu olduğunu, granüler dolgunun taşıma kapasitesini artırdığını ve dolgu kalınlığı arttıkça taşıma kapasitesinin arttığını söylemişlerdir. Ibrahim (2016) çalışmasında, arazide plaka yükleme deneyleri ve Plaxis paket programı kullanarak sayısal analizler gerçekleştirmişlerdir. Yaptığı çalışmada, nihai taşıma kapasitesinin, granüler zeminin içsel sürtünme açısı, granüler zeminin tabaka kalınlığı ve temelin derinliği ile doğru orantılı ancak temel çapı ile ters orantılı olduğunu bildirmiştir. Ayrıca, arazide yaptığı plaka yükleme deneyleri ile sayısal analizlerin birbiri ile uyum içerisinde olduğunu göstermiştir.

Literatür incelendiğinde, farklı özelliklerdeki tabakalı zeminlerin ve granüler dolgu ile ıslah edilmiş zemin ortamlarının gerilme-şekil değiştirme davranışlarının incelenmesinde, Plaxis paket programının etkin bir şekilde kullanıldığı ve bu program yardımıyla yapılan analizlerden güvenilir sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Bu çalışmanın temel amacı, Plaxis paket programı kullanılarak, kohezyonlu bir zemin üzerinde bulunan kohezyonsuz bir zeminin (dolgunun) oluşturduğu tabakalı bir zemin ortamına yerleştirilmiş dairesel bir temelin, gerilme-şekil değiştirme davranışının belirlenmesidir. Bu çalışma kapsamında literatürde bulunan, arazide yapılmış plaka yükleme deney sonuçları, Plaxis paket programı yardımıyla modellenmiştir. Arazi çalışmalarında, alt kısımda kohezyonlu ve üst kısımda ise kohezyonsuz zeminden oluşan tabakalı bir zemin ortamı üzerinde plaka yükleme deneyleri yapılmıştır. Oluşturulan sonlu elemanlar modeli arazide yapılmış plaka yükleme deney sonuçları ile karşılaştırılmış, bunun neticesinde modelin güvenilir sonuçlar verdiği görülmüştür. Daha sonra, Plaxis yardımıyla oluşturulan bu model kullanılarak parametrik çalışmalar yapılmıştır. Parametrik çalışmalarda, temel çapı ile dolgunun mukavemet özelliklerinin ve yüksekliğinin gerilme-şekil değiştirme davranışına etkisi araştırılmıştır. Ayrıca bu parametrelerin ölçek etkisi üzerindeki etkileri de incelenmiştir.

2. Sonlu Elemanlar Analizi (FEM)

Sayısal analiz yöntemleri içerisinde yer alan sonlu elemanlar yöntemi geoteknik mühendisliğinde en iyi sistematığe ve en iyi etkinliğe sahip olarak kullanılan bir yöntemdir. Sonlu elemanlar yöntemi, sürekli sistemlerin matematiksel olarak tanımlanması ile oluşan bir çözüm yöntemidir. Belirlenen bölgenin, eleman adı verilen alt bölgelere ayrılması ve bu alt bölgelerin yani

elemanların düğüm noktaları (node) ile ilişkilendirilerek çözüm bölgesini sonlu elemanlar ağına dönüştürmesi (mesh), sonlu elemanlar yöntemini diğer sayısal yöntemlerden ayıran en önemli özelliğidir. Bu özelliği sayesinde karmaşık geometriye ve farklı malzemelere sahip bölgeler modellenebilmektedir. Sonlu elemanlar yönteminde tek bir eleman için oluşturulan denklem bütün sistem için kullanılabilir (Zienkiewicz, 1977). Sonlu elemanlar yöntemi, yükleme sırasında ve nihai durumda deformasyon şekillerini ve gerilme dağılımını belirlemek açısından özellikle yararlı olabilir. Bu sebeplerle sonlu elemanlar yöntemi sığ temelleri ve çevreleyen zemin davranışını belirlemek açısından oldukça uygundur (Ornek ve ark., 2012).

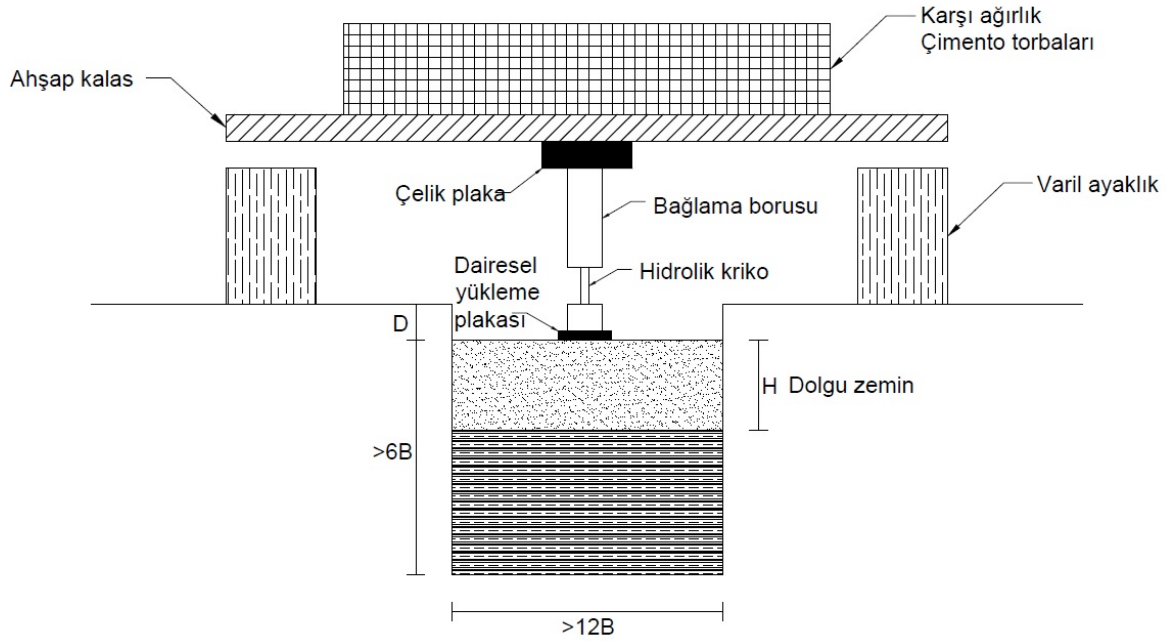
Geoteknik mühendisliğinde gerçeğe yakın sonuçlar elde edilebildiği için tercih edilen sonlu elemanlar yöntemini esas alan birçok paket program geliştirilmiştir. Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi ile geoteknik mühendisliğindeki stabilite ve deformasyon problemlerinin analiz edilebilmesi için tasarlanmış olan Plaxis 2D V8.6 programıyla analizler yapılmıştır (Brinkgreve ve ark., 2004).

Temelin ve zeminin yarısının analiz edildiği problemi temsil etmek için eksenel simetrik model seçilmiştir. Çalışmadaki bütün zeminlerin davranışlarını modellemek için Mohr-Coulomb teorisi kullanılmıştır. Özellikle göçme anındaki gerilme durumları belirli kayma mukavemeti parametreleri yardımı ile Mohr-Coulomb göçme kriteri kullanılarak iyi bir şekilde belirlenebileceği bildirilmektedir (Ornek ve ark., 2012). Granüler zemin için drenajlı bir koşul seçilirken, doymuş yumuşak zemini temsil etmek için drenajsız bir yükleme seçilmiştir. Rijit elastik temel kabulü yapılmıştır. Modelin sınır koşullarında, alt sınır yer değiştirmelere iki yönde de izin vermemektedir. Sağ ve sol kenarlar yatay yer değiştirmelere izin vermemektedir. Zemin ortamı, 15 düğümlü üçgen elemanlar kullanılarak modellenmiştir.

3. Materyal ve Metot

Çalışma kapsamında mevcut kohezyonlu bir zemin üzerine kohezyonsuz bir dolgu tabakası yerleştirildiğinde oluşan tabakalı zeminin gerilme-şekil değiştirme davranışı ve nihai taşıma gücü üzerine farklı parametrelerin etkisinin detaylı incelenebilmesi için sonlu elemanlar yöntemi kullanan Plaxis programında modellemeler ve analizler gerçekleştirilmiştir. Belirtilen şekilde tabakalı zemin için farklı parametrelerin etkisi araştırılabilmesi literatürdeki Ibrahim (2016)'in çalışması baz alınarak ağ (mesh) analizi ve doğrulama gerçekleştirilmiştir. Ibrahim (2016) çalışmasında arazide mevcut bir zayıf zemin üzerine dolgu tabakası yerleştirmiş ve 0.2 m çaplı bir plaka ile yükleme deneyi gerçekleştirmiştir. Deneylerde farklı içsel sürtünme açısına sahip iki farklı dolgu tabakası kullanmıştır. Ayrıca deneyleri dört farklı dolgu kalınlığı (H) için tekrarlamıştır. Buna rağmen deneylerde plaka çapını (B) sabit tutmuştur. Ibrahim (2016)'in arazi deney düzeneği Şekil 1'de gösterilmiştir. Şekil 1'deki D deney düzeneğinin gömülme derinliğini göstermekle birlikte arazide

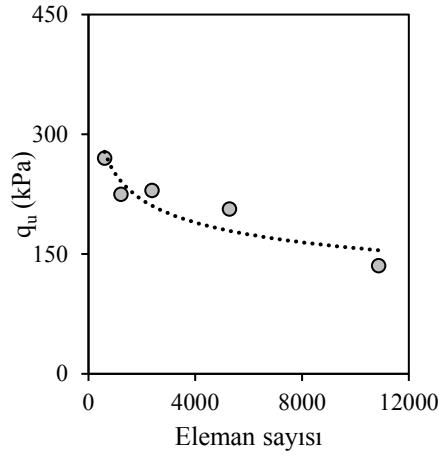
deney yapılan kısmın genişliği $12B$ 'den fazla olduğu için deney düzeneğine bir etkisi olmayacağı düşünülmektedir.



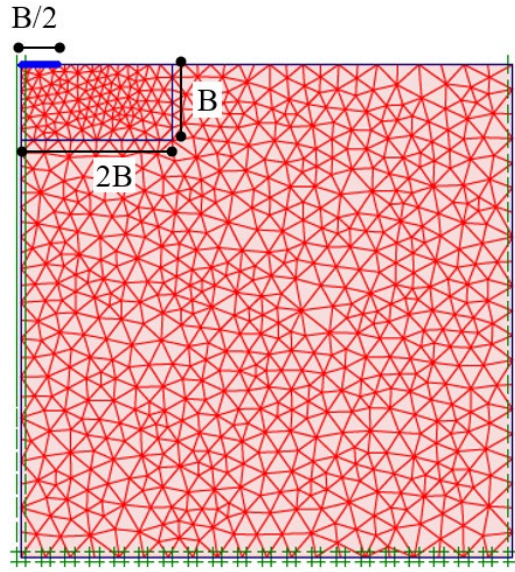
Şekil 1. Arazi deney düzeneği (Ibrahim, 2016).

3.1. Ağ (Mesh) Analizi

Plaxis programı modelleme alanını birbirine uyumlu yapısal elemanlara bölerek otomatik olarak ağ oluşturabilmektedir. Programda çok kabadan (coarse) oldukça inceye (very fine) kadar ağ oluşturmak mümkünken bölgesel ağ sıkılaştırmaları da yapılabilmektedir (Ornek ve ark., 2012). Bu çalışma kapsamında yapılacak nümerik analizler için Ibrahim (2016)'in çalışmasındaki yumuşak kil zemin üzerine yapılan yüklemeler temel alınarak oluşturulan farklı ağlara sahip modeller üzerinde analiz yapılarak bir ağ analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde 603 eleman sayısına sahip ağdan, $B/2$ çapındaki temelin altında $2B$ genişlik ve B derinlikteki (zemin içinde oluşacak gerilmelerin yüksek olacağı bölge) kısımda ağ sıkılaştırması yapılarak oluşturulan oldukça sıkı 10869 elemana sahip ağa kadar farklı ağlar oluşturulmuştur. Yumuşak kil zemin için Mohr Column zemin modeli kullanılmıştır. Zeminin kohezyonu 21 kPa doğal birim hacim ağırlığı 20 kN/m^3 , elastisite modülü 4000 kPa ve poisson oranı 0.5 'tir (Ibrahim, 2016). Ağ analizinden elde edilen sonuç Şekil 2'de sunulmuştur. Bu sonuçlara göre Şekil 3'te gösterildiği gibi ağ sıkılaştırması yapılarak oluşturulan durumdaki sonuçların yeterince hassas olduğu kanaatine varılmış ve sonraki çalışmalar bu ağ düzeni ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. Ağ (mesh) etkisi araştırması.

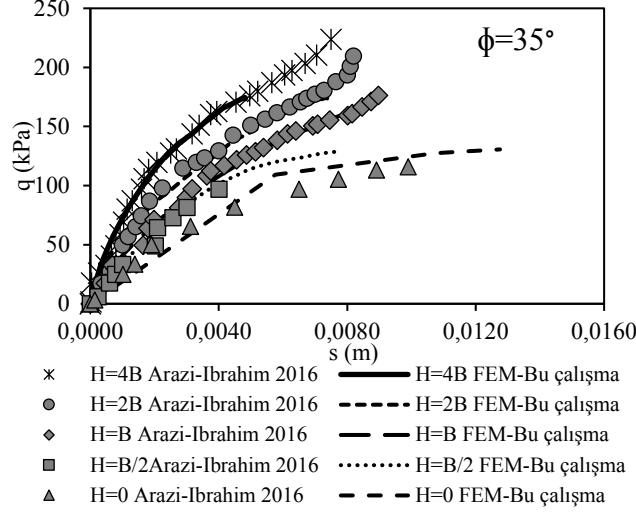


Şekil 3. Tipik sıklaştırılmış ağ (mesh) görünümü.

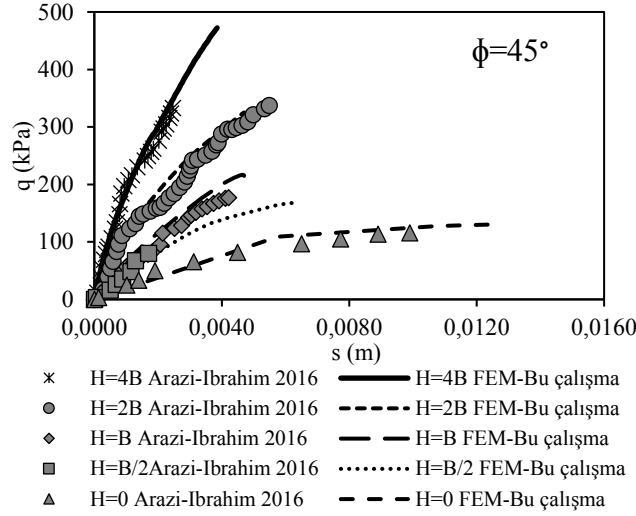
3.2. Nümerik Modelin Doğrulanması

Modellemede elde edilecek sonuçların güvenilirliğinin belirlenmesi için Ibrahim (2016)'in çalışmasında gerçekleştirdiği arazi deneyleri modellenmiş ve arazi deney sonuçları ile analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Ibrahim (2016) çalışmasında yumuşak kil zemin üzerine doğrudan (dolgusuz) ve B yüklem plakası çapı olmak üzere B/2, B, 2B ve 4B kalınlıklarda dolgulu arazi yüklem deneyleri gerçekleştirmiştir. Bu deneylerde içsel sürtünme açısı 35° ve 45° olmak üzere iki farklı dayanıma sahip dolgu kullanmıştır. Doğrulama çalışması için yapılan analizlerde yumuşak kil zemin için ağ analizinde ifade edilen zemin modeli ve parametreler kullanılmıştır. Dolgular için Mohr Colum zemin modeli kullanılmıştır. İçsel sürtünme açısı 35° olan dolgu dilatasyon açısı 5°, birim hacim ağırlık 19 kN/m³, elastisite modülü 20000 ve poisson oranı 0.30'dur. İçsel sürtünme açısı 45° olan dolgu dilatasyon açısı 15°, birim hacim ağırlık 22 kN/m³, elastisite modülü 50000 ve poisson oranı 0.29'dur (Ibrahim, 2016). Analiz ve arazi deneylerinin karşılaştırması basınca (q) karşılık

oturma (s) cinsinden içsel sürtünme açısı 35° olan dolgu için Şekil 4'te içsel sürtünme açısı 45° olan dolgu için Şekil 5'te verilmiştir. Arazi deneyleri ve analiz sonuçları karşılaştırıldığında analiz sonuçlarının arazi deney sonuçları ile oldukça uyumlu olduğu görülmüştür.



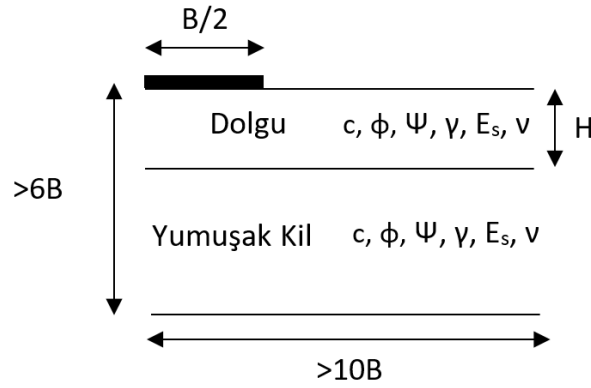
Şekil 4. Arazi deneyleri ve analizlerin karşılaştırılması ($\phi = 35^\circ$).



Şekil 5. Arazi deneyleri ve analizlerin karşılaştırılması ($\phi = 45^\circ$).

3.3. Parametrik Çalışma

Çalışma kapsamında yumuşak kil zemin üzerine dolgu yerleştirildiği tabakalı zemin durumunda temel çapı, dolgu yüksekliği ve dolgunun mukavemeti gibi parametrelerin yük deformasyon davranışına ve taşıma gücüne etkilerinin belirlenebilmesi için Plaxis programında modeller yapılmıştır. Analizlerin şematik çizimi Şekil 6'da sunulmuştur. Ayrıca çalışma için gerçekleştirilen 65 analiz Tablo 1'de özetlenmiştir.



Şekil 6. Analizlerin Şematik Çizimi.

Tablo 1. Analizler.

Seriler	Dolgu Durumu	Dolgu İçsel Sürtünme Açısı	Dolgu Kalınlığı (H)	Temel Çapı (B)
Seri I	Yok	-	-	B=1.6m, 3.2m, 6.4m, 10m, 20m
Seri II	Var	35°, 43°, 45°	H/B=0.5, 1.0, 2.0, 4.0	B=1.6m, 3.2m, 6.4m, 10m, 20m

Analizlerde kullanılan yumuşak kil zemin (İbrahim, 2016) ve dolgu zeminlerin parametreleri (İbrahim, 2016; Ornek ve ark., 2012) literatürdeki arazi deneyleri yapılan çalışmalardan alınmıştır. Zemin parametreleri ve zemin modelleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Analiz parametreleri.

	Eleman Tipi	Model	c (kPa)	ϕ (°)	Ψ (°)	γ (kN/m ³)	E_s (kPa)	ν
Üst tabaka	Dolgu 1	Mohr Column	1	35	5	19	20000	0.30
	Dolgu 2	Mohr Column	1	43	13	21	42500	0.20
	Dolgu 3	Mohr Column	1	45	15	22	50000	0.29
Alt tabaka	Yumuşak kil zemin	Mohr Column	21	-	-	20	4000	0.50
Temel	Çelik	Elastik	-	-	-	-	2E+08	0.30

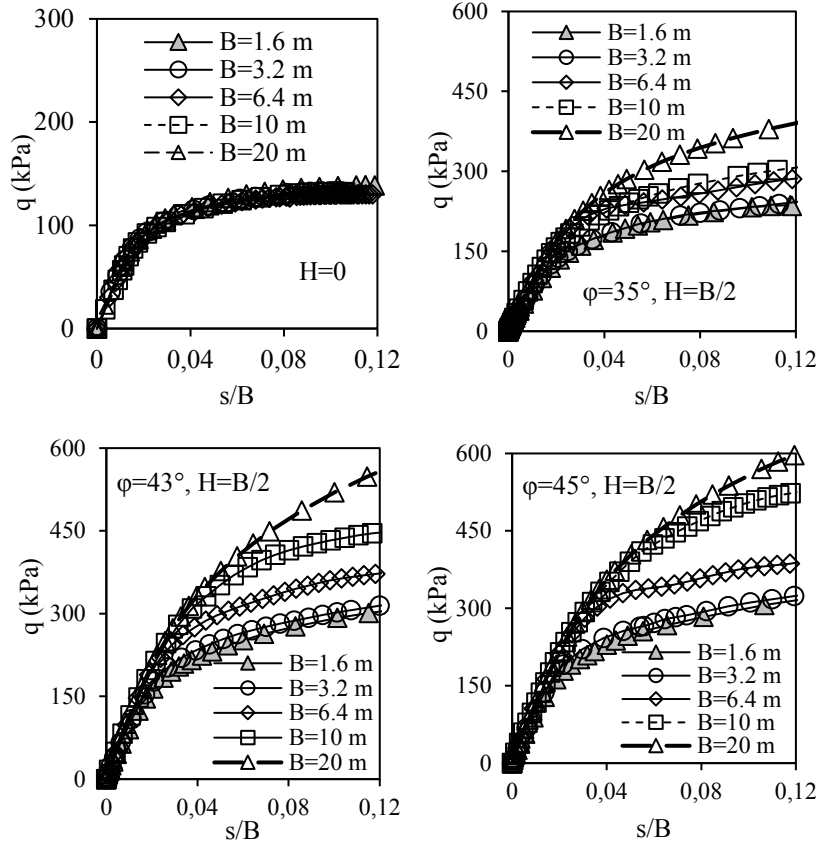
Analizler sonucunda, araştırılan parametrelerin taşıma gücüne etkileri Taşıma Kapasitesi Oranı (BCR) (Binquet ve Lee, 1975) ile ifade edilmiştir. BCR dolgu tabakası ile güçlendirilmiş durumda elde edilen taşıma gücü değerinin yumuşak kil zeminden elde edilen taşıma gücü değerine oranı şeklinde hesap edilmiştir. Analiz sonuçlarında 0.1B yöntemine göre temel çapının %10’u kadar ($s/B=\%10$) deplasman yapmasına karşılık gelen basınç değeri o analiz için nihai taşıma gücü (q_u) olarak kabul edilmiştir (Briaud ve Jeanjean, 1994).

4. Bulgular ve Tartışma

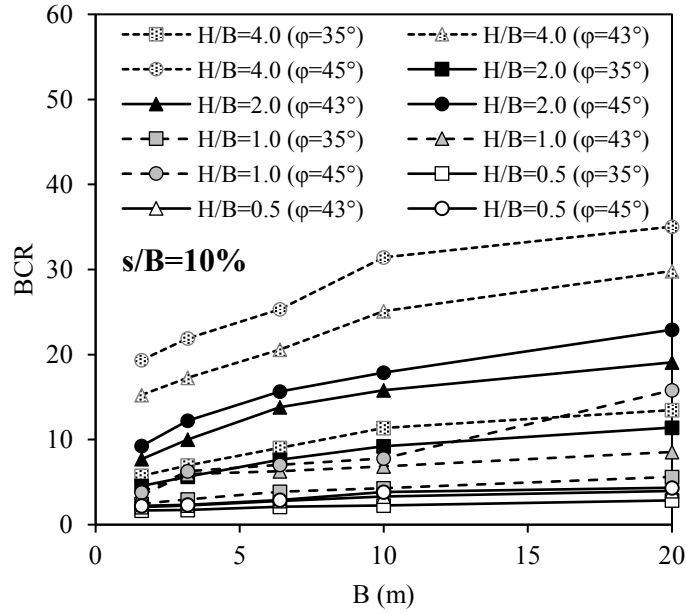
4.1. Temel Çapı

Dolgunsuz durumda temel çapının etkisi ve üç farklı dolgu malzemesi için B/2 kalınlığında dolgulu durumda temel çapının etkisi Şekil 7’de gösterilmiştir. Şekil 7’de görülebileceği gibi dolgunsuz durumda plaka çapının taşıma gücü üzerinde belirgin bir etkisi yoktur. Benzer sonucu başka araştırmacıların da bulması ile birlikte bu durum Terzaghi’nin (Terzaghi ve ark., 1943) taşıma gücü teorisine de uygundur (Ornek ve ark., 2012; Ibrahim, 2016). Ayrıca yine Şekil 7’de sunulduğu gibi, B/2 kalınlığında dolgulu durumlarda, temel çapı arttıkça taşıma gücü değerleri artmıştır.

Bütün dolgu kalınlıkları için temel çapı ve BCR değişimi Şekil 8’de verilmiştir. Burada dolgu içsel sürtünme açısı ve kalınlığı sabit tutulduğu bütün durumlar için temel çapındaki artışın BCR’yi arttırdığı görülmektedir. Ayrıca temel çapı artışı ile elde edilen BCR artışının dolgu kalınlığı ve içsel sürtünme açısı ile biraz daha belirgin olduğu belirlenmiştir. Örneğin, dolgu kalınlığı 0.5B ve içsel sürtünme açısı 35° için temel çapı 1.6 m’den 20 m’ye yükseltildiğinde BCR değeri 1.71 katına çıkarken dolgu kalınlığı 4.0B ve içsel sürtünme açısı 45° için temel çapı 1.6 m’den 20 m’ye yükseltildiğinde BCR değeri 1.81 katına çıkmıştır.



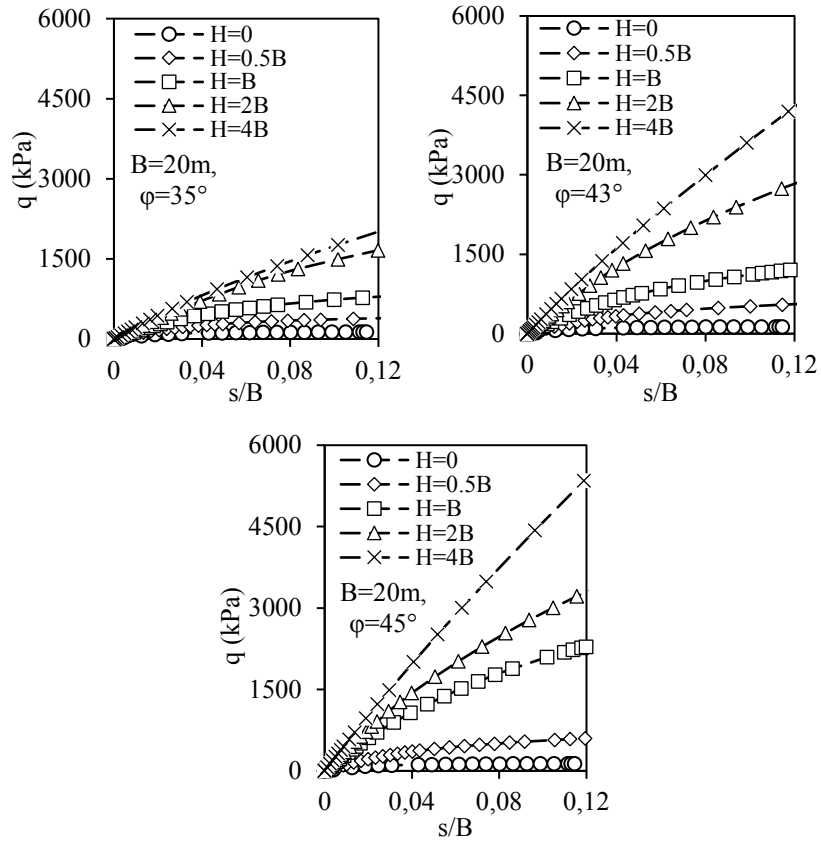
Şekil 7. Temel çapının etkisi.



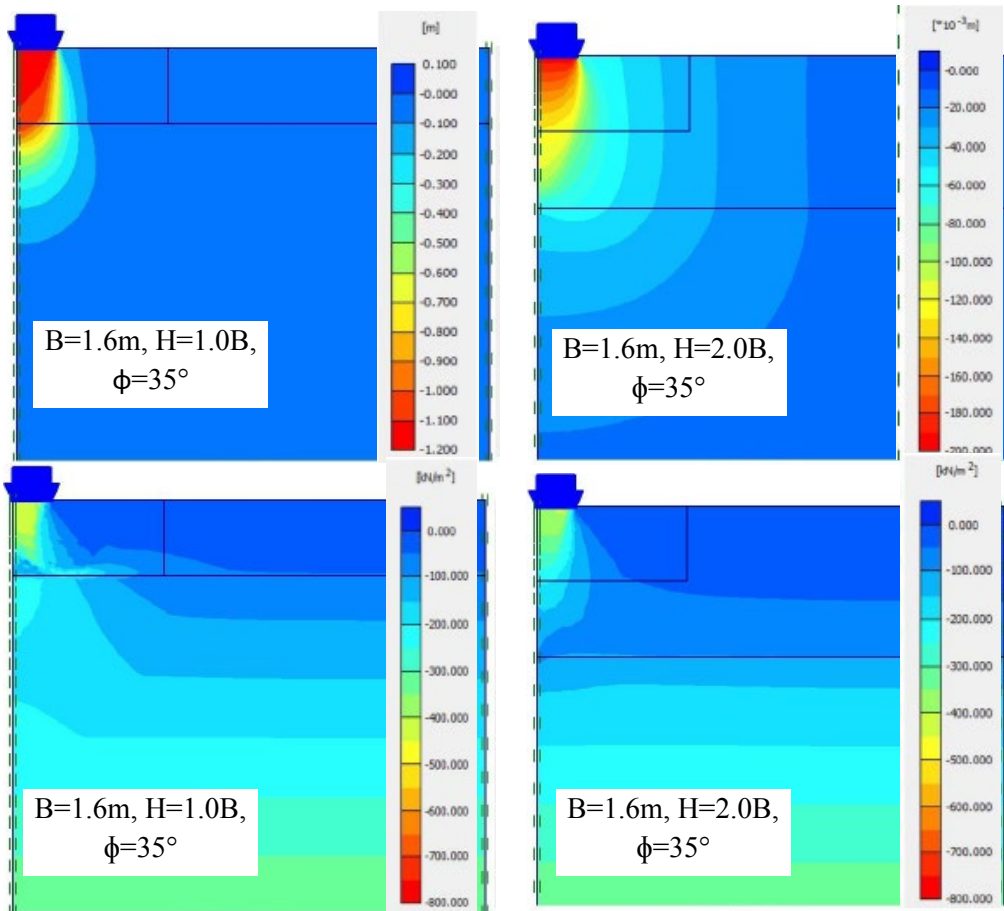
Şekil 8. Temel çapı ile BCR değişimi.

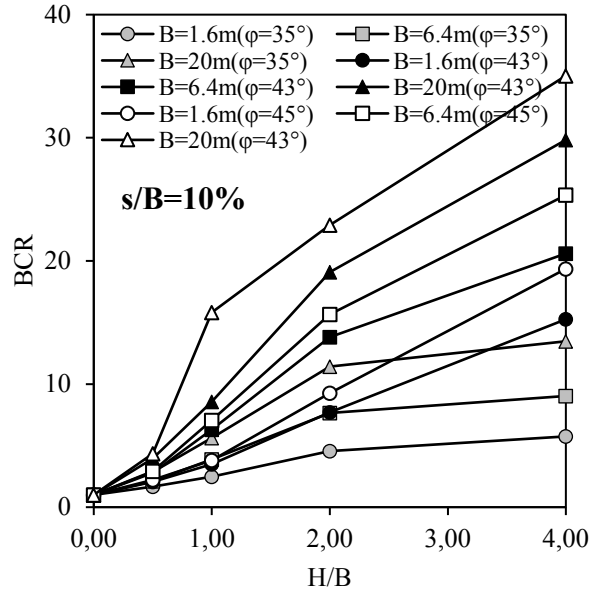
4.2. Dolgu Kalınlığı

Dolgu kalınlığı artışında elde edilen gerilme deformasyon davranışları Şekil 9’da sunulmuştur. Dolgu kalınlığındaki artış taşıma gücünü artırmıştır. Buradaki dolgu tabakası olan sağlam zeminin artması temel etki derinliğine girecek zayıf zemin kalınlığını azaltacağı için bu sonuç doğal olarak karşılanmaktadır. Bu durum Şekil 10’daki 1.6 m temel çapı için düşey deplasman ve gerilme değişiminde de görülebilir. Ayrıca tabakalı zeminlerde güçlü üst tabaka kalınlığının artması ile taşıma gücünün artması durumu Meyerhof (1974) ve Hanna (1982) yaklaşımları ile uyumludur. Şekil 11’de 1.6 m, 6.4 m ve 20 m temel çapları için farklı dolgu içsel sürtünme açılarına sahip dolgularda dolgu kalınlığı ile BCR değişimi gösterilmektedir. Dolgu içsel sürtünme açısı 35° iken dolgu kalınlığı 2.0B’den sonra üç temel çapı için de BCR’deki artış miktarı oldukça sınırlı kalırken, içsel sürtünme açısı 43° ve 45°’de dolgu kalınlığı 2.0B’den sonra bile üç temel çapı için de önemli artışlar elde edilmiştir.



Şekil 9. Dolgu kalınlığı etkisi.

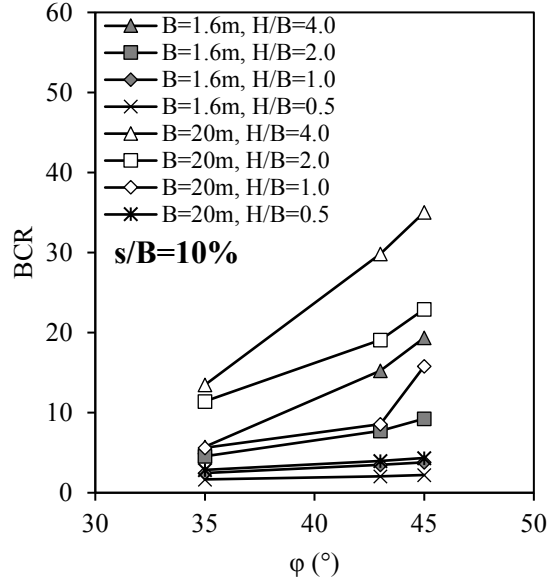
Şekil 10. Düşey deplasman ve gerilme kıyaslaması ($q=600$ kPa).



Şekil 11. Dolgu kalınlığı ile BCR değişimi.

4.3. Dolgu İçsel Sürtünme Açısı

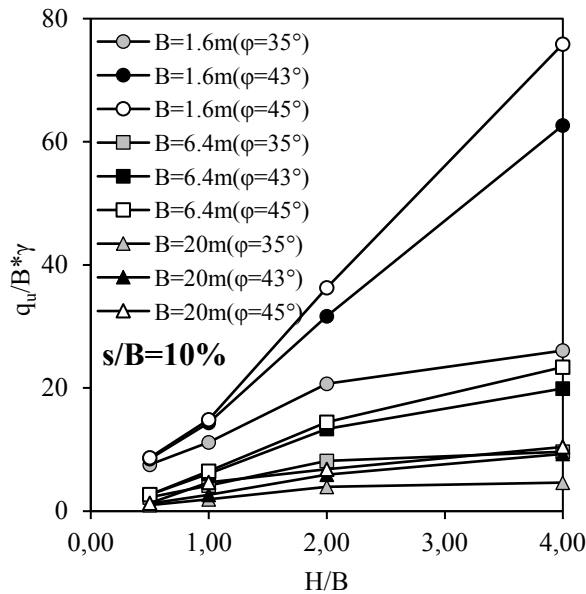
Dolgunun içsel sürtünme açısındaki artışın BCR ile değişimi Şekil 12’de sunulmuştur. Dolgunun içsel sürtünme açısı arttıkça BCR değeri artmıştır. Bu artış dolgunun mukavemetinin artması ile gerilmeyi daha geniş alana yayarak zayıf zemine gelen gerilmelerin azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca bu zayıf zemine gelen gerilmenin azalması durumu dolgu kalınlığı ile de doğru orantılıdır (Love ve ark., 1987). Örneğin 1.6 m temel çapında 0.5B kalınlığına sahip dolgu için içsel sürtünme açısı 35°’den 45°’ye arttırıldığında BCR değeri 1.33 katına çıkarken benzer şartlarda 4.0B dolgu kalınlığı için BCR değeri 3.37 katına çıkmıştır.



Şekil 12. İçsel sürtünme açısının etkisi.

4.4. Ölçek Etkisi

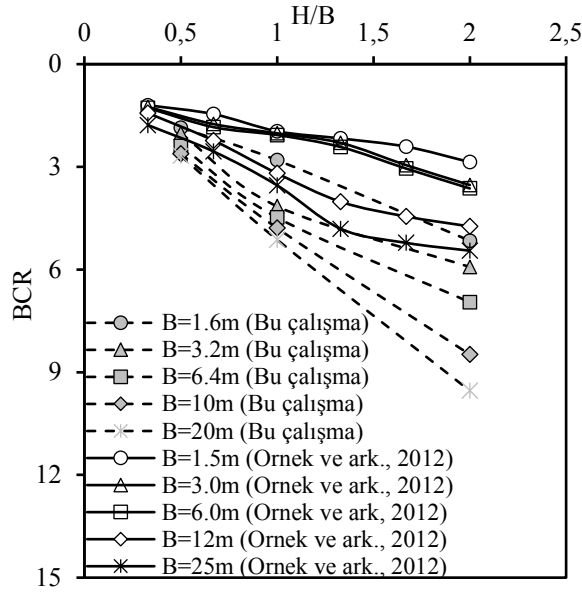
Analiz sonuçlarından ölçek etkisinin araştırılabilmesi için Terzaghi'nin (Terzaghi ve ark., 1943) taşıma gücü teorisi düşünülerek nihai taşıma kapasitesi temel çapı ve zemin birim hacim ağırlığına bölünerek boyutsuzlaştırılmıştır (İbrahim, 2016). Bu durumda temel çapı 1.6 m, 6.4 m ve 20 m için 35°, 43° ve 45° içsel sürtünme açısına sahip dolgularda dolgu kalınlığı ve boyutsuz parametre değişimi Şekil 13'te verilmiştir. Buna göre temel çapı, arttıkça ölçek etkisinin arttığı görülmüştür. Ayrıca ölçek etkisi dolgunun içsel sürtünme açısı ve dolgu tabakasının kalınlığından da etkilenmiş bu parametrelerin artması ölçek etkisini arttırmıştır.



Şekil 13. Ölçek etkisi.

4.5. Literatürle Karşılaştırma

Literatürde daha önce benzer şartlarda bu çalışmada elde edilen BCR'lere yakın BCR değerleri elde edilmiştir. Ornek ve ark., (2012) çalışmalarında nihai göçme yükünü plaka teğet kesiştirme yöntemine göre belirleyerek tek tip dolgu ile (içsel sürtünme açısı 43° olan tek çeşit dolgu araştırılmış) farklı temel çapları ve dolgu kalınlıkları için BCR hesaplamışlardır. Çalışmalarında teğet kesiştirme yöntemi ile elde ettikleri nihai taşıma gücü temel çapının yaklaşık %3'üne denk gelmektedir. Bu çalışmadaki aynı dolgu parametrelerine sahip analiz sonuçlarından temel çapının %3'ü deplasmana karşılık taşıma gücü değerlerinden BCR'ler elde edilmiş ve bu BCR'ler benzer şartlardaki Ornek ve ark., (2012) çalışmasında elde ettiği BCR'ler ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma Şekil 14'te sunulmaktadır. Şekil 14'te de görülebileceği gibi genel anlamda sonuçlar birbirine yakın olmakla beraber özellikle dolgu kalınlığı arttıkça ortaya çıkan eğriler arasındaki farkın iki çalışmadaki dolgu tabakası altındaki zayıf zemin parametrelerinin birbirinden farklı olmasından kaynakladığı düşünülmektedir. Bu sebeple çalışmanın literatür ile uyumlu olduğu kanısına varılmıştır.



Şekil 14. Literatür kıyaslaması.

5. Sonuçlar

Çalışmada sonlu tabakalı zeminlere oturan dairesel temellerde, farklı parametrelerin gerilme-şekil değiştirme davranışları üzerine etkisi sonlu elemanlar yöntemini kullanan Plaxis programında yapılan analizlerle araştırılmıştır. Tabakalı zemin altta zayıf kil zemin üzerinde ise güçlendirme amacı ile kullanılan dolgu zeminden oluşturulmuştur. Zemin modellemesi sonrasında ağ (mesh) analizi yapılmış ve literatürden alınan arazi deneyleri sonuçlarına göre tabakalı zemin modellenerek

doğrulama yapılmıştır. Ardından dolgu kalınlığı, dolgu mukavemeti ve temel çapı değişkenleri ile parametrik bir çalışma yürütülmüştür. Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda açıklanmaktadır.

- Çalışma kapsamında literatürde mevcut bir çalışmadaki arazi deneyleri sonlu elemanlar yöntemi kullanan bir programda modellenmiş ve yapılan analizlerin sonuçları arazi deney sonuçları ile uyumlu olarak elde edilmiştir. Bu kapsamda modelleme farklı dolgu kalınlığı ve içsel sürtünme açıları da benzer sonuçlar elde edilebileceği görülmüştür.
- Dolgu kalınlığı, dolgu içsel sürtünme açısı ve temel çapının herhangi birinin artırılması BCR değerini arttırmıştır.
- Dolgu içsel sürtünme açısı 35° iken dolgu kalınlığı 2.0B'den sonra bütün temel çapları için BCR'deki artış miktarı oldukça sınırlı kalırken, içsel sürtünme açısı 43° ve 45° 'de dolgu kalınlığı 2.0B'den sonra bile önemli artışlar elde edilmiştir. Bu bakımdan dolgu içsel sürtünme açısı düşük olduğu durumlarda 2.0B'den kalın dolgu yapmanın gerekli olmayacağı düşünülmüştür. Bunun yerine dolgunun içsel sürtünme açısını arttırmanın daha faydalı olabileceği öne sürülmektedir. Ayrıca uygulamada temel boyutlarının (B) genellikle oldukça büyük olması sebebi ile 2.0B'den büyük dolgular yapmak maliyet açısından uygun olamayacaktır.
- Dolgulu durumlarda temel çapı değişiminin bir ölçek etkisi oluşturduğu görülmüştür. İki temel çapı arasındaki fark arttıkça daha fazla ölçek etkisi görülmüştür. Ayrıca ölçek etkisi dolgunun içsel sürtünme açısı ve kalınlığı ile de doğru orantılı olarak artmıştır. Bu yüzden, eğer tasarımcı büyük veya tam ölçekli arazi deneyleri yapamıyorsa, daha güvenilir bir tasarım için önce sonlu elemanlar yöntemi ile modelleme yapması daha faydalı olabilir.

Teşekkür

Yazarlar analiz programının kullanımı konusunda desteğinden dolayı Çukurova Üniversitesinden Prof. Dr. Abdulazim YILDIZ'a teşekkürlerini bildirirler.

Yazarların Katkısı

Birinci yazar %35, ikinci yazar %30, üçüncü yazar %25 ve dördüncü yazar %10 gibi bir oranda katkı sunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Binquet, J., & Lee, K. L. (1975). Bearing capacity tests on reinforced earth slabs. *Journal of the geotechnical Engineering Division*, 101(12), 1241-1255.
- Briaud, J. L., & Jeanjean, P. (1994). Load settlement curve method for spread footings of sand. In *Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments* (pp. 1774-1804). ASCE.
- Brinkgreve, R. B. J., Broere, W. and Waterman, D. (2004). Plaxis finite element code for soil and rock analysis, 2D –Version 8.6.
- Coduto, D. P., Kitch, W. A., & Yeung, M. C. R. (2001). *Foundation design: principles and practices* (Vol. 2). USA: Prentice Hall.
- Dash, S. K., Sireesh, S., & Sitharam, T. G. (2003). Model studies on circular footing supported on geocell reinforced sand underlain by soft clay. *Geotextiles and Geomembranes*, 21(4), 197-219.
- Demir, A., Ornek, M., Laman, M., Yildiz, A., & Misir, G. (2009). Model studies of circular foundations on soft soils. In *Proceedings of the 2nd International Workshop on Geotechnics of Soft Soils* (pp. 219-226). Taylor and Francis.
- Dewaikar, D. M., & Mohapatra, B. G. (2003). Computation of bearing capacity factor N_γ -Prandtl's mechanism. *Soils and foundations*, 43(3), 1-10.
- Florkiewicz, A. (1989). Upper bound to bearing capacity of layered soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 26(4), 730-736.
- Frydman, S., & Burd, H. J. (1997). Numerical studies of bearing-capacity factor N_γ . *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 123(1), 20-29.
- Fukushima, H., Nishimoto, S., & Tomisawa, K. (2005). Scale effect of spread foundation loading tests using various size plates. *Independent Administrative Institution Civil Engineering Research Institute for Cold Region*, 1-8.
- Hanna, A. M. (1981). Foundations on strong sand overlying weak sand. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 107(7), 915-927.
- Hanna, A. M. (1982). Bearing capacity of foundations on a weak sand layer overlying a strong deposit. *Canadian Geotechnical Journal*, 19(3), 392-396.
- Hansen, J.B. (1970). A revised and extended formula for bearing capacity. *Danish Geotechnical Institute Bulletin*, 28, 5-11.
- Ismail Ibrahim, K. M. H. (2016). Bearing capacity of circular footing resting on granular soil overlying soft clay. *HBRC journal*, 12(1), 71-77.
- Kenny, M. J., & Andrawes, K. Z. (1997). The bearing capacity of footings on a sand layer overlying soft clay. *Geotechnique*, 47(2), 339-345.
- Love, J. P., Burd, H. J., Milligan, G. W. E., & Houlsby, G. T. (1987). Analytical and model studies of reinforcement of a layer of granular fill on a soft clay subgrade. *Canadian Geotechnical Journal*, 24(4), 611-622.
- Meyerhof, G. G. (1963). Some recent research on the bearing capacity of foundations. *Canadian geotechnical journal*, 1(1), 16-26.
- Meyerhof, G. G. (1974). Ultimate bearing capacity of footings on sand layer overlying clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 11(2), 223-229.
- Michalowski, R. L., & Shi, L. (1995). Bearing capacity of footings over two-layer foundation soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(5), 421-428.

- Michalowski, R. L., & Shi, L. (1995). Bearing capacity of footings over two-layer foundation soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(5), 421-428.
- Mosallanezhad, M., & Moayedi, H. (2017). Comparison analysis of bearing capacity approaches for the strip footing on layered soils. *Arab J Sci Eng*, 42(9), 3711-3722.
- Murthy, V. N. S. (2002). *Geotechnical engineering: principles and practices of soil mechanics and foundation engineering*. New York: CRC press
- Mustafa, B., & Elsharief, A. M. (2020). Experimental Study of the Bearing Capacity of Stiff Clay Overlying Sand with and without Geotextile Inclusion. *FES Journal of Engineering Sciences*, 9(3), 119-126.
- Nujid, M. M., & Taha, M. R. (2014). A review of bearing capacity of shallow foundation on clay layered soils using numerical method. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 19.
- Ochiai, H., Watari, Y. and Tsukamoto, Y. (1996). Soil reinforcement practice for fills over soft ground in Japan. *Geosynthetics International*, 3 (1), 31-48.
- Ornek, M., Laman, M., Demir, A., & Yildiz, A. (2012). Numerical analysis of circular footings on natural clay stabilized with a granular fill. *Acta geotechnica slovenica*, 9(1), 61-75.
- Ramadan, M. I., & Hussien, M. H. (2015). Bearing capacity of sand overlying clay-strip footing. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 4(11), 1852-1859.
- Shiau, J. S., Lyamin, A. V., & Sloan, S. W. (2003). Bearing capacity of a sand layer on clay by finite element limit analysis. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(5), 900-915.
- Silvestri, V. (2003). A limit equilibrium solution for bearing capacity of strip foundations on sand. *Canadian geotechnical journal*, 40(2), 351-361.
- Singh, S. P., & Roy, A. K. (2021). Numerical Study of the Behaviour of a Circular Footing on a Layered Granular Soil Under Vertical and Inclined Loading. *Civil And Environmental Engineering Reports*, 31(1), 29-43.
- Terzaghi, K.; Peck, R.; Mesri, G. (1943): *Soil Mechanics in Engineering Practice*. Wiley, Hoboken, New Jersey, United States
- Uzuner, B., A. (2016). *Temel Mühendisliğine Giriş*. Derya Kitabevi, 6. Basım, Trabzon, 409s.
- Zienkiewicz, O.C., (1977). *The Finite-Element Method* 3rd ed., New York, McGraw- Hill Book Co., 787p.