Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, Cilt 23, Sayı 2, 2018 ARAŞTIRMA

DOI: 10.17482/uumfd.361043

KOMŞU ZEMİN YAPILARININ PARAMETRİK ANALİZİ "DOLGU-ŞEV ETKİLEŞİMİ"

Zülal AKBAY ARAMA [*]
Muhammed Selahaddin AKIN [**]
Safiye Feyza ÇİNİCİOĞLU [***]

Alınma:04.12.2017; düzeltme:16.02.2018; kabul:28.05.2018

Öz: Uygulama sahalarındaki sınırlar sebebi ile yapıların şevler üzerine ve/veya içine inşa edilmesi durumunda yapıların davranışı şevlerin varlığından etkilenmekte olup bu durum etkileşimli davranış analizlerini gerektirmektedir. Yapı-şev sisteminin bütünsel stabilitesini etkileyen faktörler şevin yüksekliği ve eğimi, yapının şeve uzaklığı, temel zemini türü ve yapının geometrik durumudur. Bunların yanı sıra, dolguların yumuşak zeminler üzerine inşa edilmesi taşıma kapasitesi göçmesi ve şev stabilitesi gibi geoteknik problemleri de barındıran bir zemin-yapı etkileşimi problemi oluşturmaktadır. Bu çalışmanın amacı bütünsel davranış üzerinde farklılık oluşturan tüm faktörlerin davranış üzerindeki etki derecesinin belirlenmesidir. Bu amaçla, dolgu-şev ve temel zemininden oluşan etkileşimli sistemin davranışı birçok parametrik değerlendirme yapılarak iki boyutlu uzayda sonlu elemanlar analizleri yapılarak irdelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Şev Stabilitesi, Dolgu, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Güvenlik Sayısı, Sayısal Analizler.

Parametric Analysis of Adjacent Soil Structures: Embankment-Slope Interaction

Abstract: It may be necessary to build structures on or adjacent to slopes due to the limited land areas. In such a case, behavior of the structures together with the adjacent slope is significantly affected by the presence of slopes. The variables influencing overall stability of the structure-slope system are the height and inclination of the slope, the distance of the structure to the crest of the slope, size of the structure and encountered types of foundation soils. Besides these, construction of embankments on soft soil is an important soil-structure interaction problem including many geotechnical challenges such as bearing capacity failure and global slope stability. The aim of this paper is to examine the degree of effectiveness of each of the influencing variables on the overall behavior. For this purpose, the behavioral aspects of the complete interactive system made up of embankment, slope and foundation soils, was analyzed by performing series of parametrical evaluations with finite element software in two dimensional media.

Keywords: Slope Stability, Embankment, Finite Element Method, Factor of Safety, Numerical Analyses.

[*] İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Avcılar Yerleşkesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34320, İstanbul.
[**] Kartal Belediyesi, İmar ve Şehircilik Müdürlüğü, Kartal, İstanbul
[***] Özyeğin Üniversitesi, Çekmeköy Yerleşkesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34794, İstanbul.
İletişim Yazarı: Zülal Akbay Arama (zakbay@istanbul.edu.tr)

1. GİRİŞ

Yapısal projelendirme ve uygulama sürecinde sistemi oluşturan elemanların malzeme özellikleri, kullanım amaçları, mevcut koşullar, çevresel etkenler gibi probleme neden oluşturabilecek durumların belirlenmesi tasarımın ilk aşamasını oluşturmaktadır. Bu bağlamda geoteknik mühendislerinin sahada karşılaştıkları en temel sorun, temel zeminlerinin taşıma gücünün yapısal yerleşim koşullarına bağlı olarak yapılan yüklemeler altında uygunluğunun denetlenerek tasarımın gerçekleştirilmesidir. Yüzeysel temellerin izin verilebilir taşıma basınçlarının hesaplanmasında iki önemli husus mevcuttur. Bunlar; nihai kayma gerilmesine karşı yeterli güvenlik seviyesinde olması ve izin verilebilir taşıma gücü değerinde meydana gelecek deformasyonların öngörülen seviyedekileri aşmamasıdır. Zemin yüzeyi üzerinde veya içerisinde bulunan temellerin taşıma kapasitesinin belirlenmesi için laboratuvar deneylerine veya yerinde yapılan deneylere bağlı olarak önerilen çok sayıda doğruluğu kabul edilmiş yöntem mevcuttur (Terzaghi, 1943; Meyerhof, 1963; Hansen, 1970; Vesic, 1975). Ancak söz konusu yöntemler; inşa sahalarının kısıtlılığı, temel zeminlerinin elverişsizliği veya tabakalanma durumu, mimari veya ekonomik nedenler ile eğimli yüzey üzerine veya içine inşa edilen veya gömülü bir şekilde tasarlanan temellerin projelendirilmesi konularında yetersizdirler. Şevlerin üzerinde veya içerisinde inşa edilen yapısal temellerin tasarımı konusu günümüz geoteknik mühendisliği araştırma konuları içerisinde halen gündemdeki yerini korumaktadır. Zemin nitelikli komşu yapılardan oluşan bu şekildeki etkileşimli sistemlerin analizinde yüklerin temel zemini ortamına güvenli bir şekilde aktarılabilmesinin yanı sıra temel yüklemeleri sebebi ile şevin de iç stabilitesini sağlaması koşulu gözetilmelidir. Şev üzerine inşa edilen temellerin taşıma kapasitesinin hesaplanması için önerilen ilk metotlar (Meyerhof, 1957; Hansen, 1970; Vesic, 1975) genellikle Terzaghi (1943) tarafından önerilen yüzeysel temellerin taşıma gücü eşitliğinden faydalanılarak oluşturulmuş ve belli bir gömülme derinliği ve sınırlı temel yerleşim uzaklıkları için öngörülmüşlerdir. Konu hakkındaki eksikliklerin giderilmesi amacı ile limit denge analizleri (Narita ve Yamaguchi, 1990; Castelli ve Motta, 2008), kayma çizgisi metodu (Sokolovski, 1960; Chen, 1975), akma tasarım teorisi, (Buhan ve Garnier, 1994; 1998), limit analiz yöntemleri (Lysmer, 1970; Davis ve Booker, 1973; Chen, 1975; Kusakabe ve diğ., 1981, Michalowski, 1989; Farzaneh ve diğ., 2008; Shiau ve diğ., 2011; Modifi ve diğ., 2014), sonlu elemanlar yöntemi (Sloan ve Kleeman, 1995; Krabbenhoft ve diğ., 2005; Georgiadis ve diğ., 2008; Shiau ve diğ., 2011), gerilme karakteristikleri yöntemi (Graham ve diğ., 1987), fiziksel modelleme teknikleri (Gemperline, 1988; Shileds ve diğ., 1990), saha uygulamaları (Shields ve diğ., 1977) gibi farklı metotlar denenerek sayısız araştırma yapılmıştır. Söz konusu yöntemlerden limit denge, basitliği ve uygulanabilirliği sebebi ile sıklıkla çözümlemelerde tercih edilmekle birlikte karmaşık geometrik koşullar, yükleme asimetrisi, zemin özelliklerinin farklılaşması ve sınır koşullarının tanımlanmasında belirsizlikler içermektedir. Kayma çizgisi yöntemi matematiksel çözümleme açısından karmaşık fakat güvenilir bir yapıdadır ancak tıpkı limit denge yöntemi gibi bütünleşik sistemlerin çözümlenmesinde tanımlanan yükleme ve geometri koşullarının belirlenebilmesi zordur. Limit analizlerin alt ve üst sınır çözümlemeleri zemin plastisitesinin klasik yaklaşımlarını oluşturmaktadır. Geoteknik stabilite problemlerinde göçme yükünün hesaplanmasında kullanılan üst sınır, dış yükler tarafından oluşturulan deplasmanlar ile içsel gerilmelerin mobilizasyonu sonucu oluşan birim deformasyonların yaptığı işin eşitliği varsayımı ile temeli göçmeye götüren değer olarak tanımlanabilmektedir. Alt sınır çözümlemelerinde ise gerçek bir göçme mekanizması tanımlanarak malzemenin göçme kriteri aşılmadan uygulanan dış yüklerin gerilmeleri dengeye getirdiği güvenli bir değer hesaplanabilmektedir. Temel zemini ortamının alt sınır yükü ile yüklenmesi durumunda göçme gerçekleşmeyeceği gibi sistemin gerçek göçme değerini, alt ve üst sınır teorilerinin aynı sonucu verdiği hesap oluşturmaktadır. Saha uygulamaları ve laboratuvar deneyleri problemin tam ölçekli çözümü için mutlak gerekliliktir, ancak ölçek etkisinin değerlendirmeler üzerindeki yanıltıcı etkisi ve maliyetleri sebebi ile tek

başlarına yeterli değildir. Parametreleri deneysel çalışmalarla elde etmek koşuluyla güncel araştırmalarda ve uygulamalarda modelleme yetenekleri sebebiyle sayısal analiz programları ile yapılan tasarımlar tercih edilmektedir.

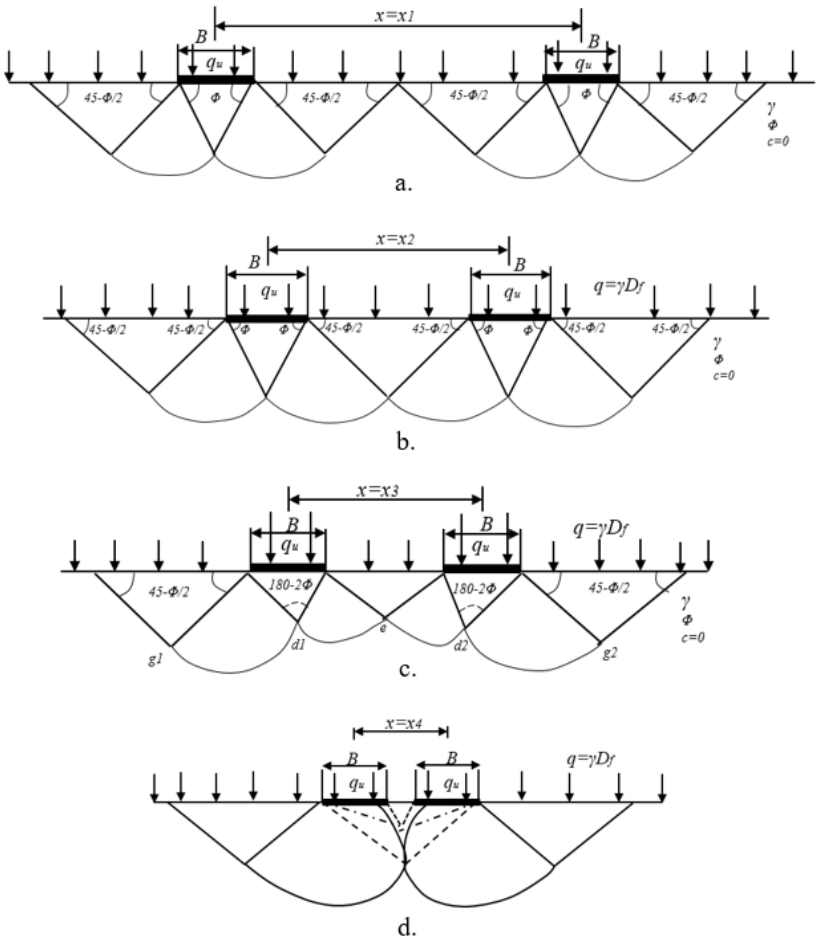
Bu makale kapsamında, köprü kenar ayaklarına bağlanan dolgular, elektrik dağıtım kulesi temelleri, çok katlı yapı temelleri gibi çeşitli yapısal sistemlerin inşasında sıklıkla rastlanılan bir zemin-yapı etkileşimi problemi olan şev-dolgu etkileşimi konusu ele alınarak sonlu elemanlar yöntemi ile sayısal analiz uygulamaları yapılmıştır. Üst yapı sistemi olarak, yapısal malzemesi zeminlerden oluşan, uygulama sahası bakımından geniş alan kaplaması ile diğer üst yapılardan farklılaşan, "dolgular" çalışmaya konu edinilmiş olup mevcut şevlerin çevresine ani olarak inşa edilecek komşu dolgular için güvenlik değerleri elde edilerek bütünsel göçme mekanizmaları değerlendirilmiştir. Çalışmada şev-dolgu bütünleşik sisteminin etkileşimli davranışı üzerinde farklılık oluşturabilecek tüm parametreler irdelenmiş ve çeşitlendirilerek analizler tekrarlanmıştır. Bu bağlamda kullanılan temel zemini profillerinde tamamen homojen kohezyonlu zeminler ele alınmış, drenajsız kayma mukavemetinin (c_u) farklı değerlerinin stabilite ve göçme davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Şev için yükseklik (H) ve açı (β°) değişken olarak kurgulanarak üç farklı yükleme koşulunda (q) dolgunun şev tepesinden uzaklığının (L) temel genişliğine (B) bağlı farklı kombinasyonları için sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yapan bir sayısal çözümleme programı ile güvenlik hesaplamaları yapılmıştır. Bunun yanı sıra mevcut şevlerin çevresine inşa edilebilecek olan dolgular için uygulanabilecek maksimum yük değerleri plastik yükleme koşullarında hesaplanmış, dolgu inşasının mevcut şevlerin güvenlik seviyesini etkileme derecesi, analizler sonucunda elde edilen nihai taşıma gücü değerleri ile karşılaştırılarak belirlenmiştir.

2. METODOLOJİ

2.1. Komşu Yapılar

Şehirlerdeki inşa alanlarının azalması veya mimari tasarımlardan kaynaklanan sınırlamalar yapısal sistemlerin birbirine yakın veya bitişik konumlandırılmasına neden olmaktadır. Terzaghi (1943), Meyerhof (1951), Hansen (1970) ve Vesic (1973) tarafından öne sürülen klasik temel taşıma gücü formülleri ile ayrık temellerin taşıma güçleri kolaylıkla hesaplanabilmektedir. Ancak yakın olarak inşa edilen yapısal sistemlerin temellerinde gözlemlenen yükleme deformasyon davranışı ve elde edilen taşıma gücü değerleri ayrık temeller ile karşılaştırıldığında nihai yükleme durumlarında mobilize olan göçme mekanizmalarındaki kayma bölgelerinin birbiri içerisine girişimi nedeni ile çokça farklılaşmaktadır. Bu sebeple, temeller veya temel grupları arasındaki girişim konusu hem teoride hem de uygulamalarda önemini korumaktadır. Birbirine yakın olan temellerin yük dağılımlarındaki girişim konusu, ilk olarak Stuart (1962) tarafından irdelenmiştir. Limit denge metodunun kullanılması ile birbirine yakın konumlandırılan iki sürekli temel için girişimin nihai yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi araştırılarak söz konusu girişim etkisinin her bir temelin taşıma gücünü azalttığı öngörülmüştür. Nihai taşıma yükünde temel zemini ortamında aktive olan göçme mekanizması şeklinin Terzaghi (1943)'nin önerdiği mekanizmayla aynı olduğunu kabul ederek, iki pürüzlü temelin girişimi sebebi ile oluşan kesişim bölgesinde küçük bir non plastik kama ile kısmen plastik bir kayma zonu oluşturduğunu savunmuştur (Şekil 1). Bahsi geçen mekanizmanın oluşumu aşamalar halinde Şekil 1'de verilmiştir. Şekilde tanımlanan x mesafesi, temellerin birbirinden uzaklıklarını temsil etmekte olup Şekil (a), (b), (c)'de $x_1>x_2>x_3>x_4$ büyüklük tanımlamasına göre değişen yaklaşım mesafeleri sırası ile ele alınmaktadır. Şekil 1 (a)'da birbirinden $x>x_1$ uzaklığında iki yüzeysel temel tanımlanmıştır. Ara mesafelerinin yeteri kadar fazla olması nedeni ile nihai göçme yükünde oluşan göçme mekanizmaları üst üste çakışmamaktadır ve temellerin taşıma gücü değerleri ayrık temeller için Terzaghi (1943)'ün tanımladığı genel taşıma gücü eşitlikleri ile elde edilebilir durumdadır. Şekil 1 (b)'de birbirine komşu iki temel verilmiş olup temeller arası uzaklık $x=x_2<x_1$ olacak şekilde ayarlanmıştır. Söz konusu koşulda iki temele

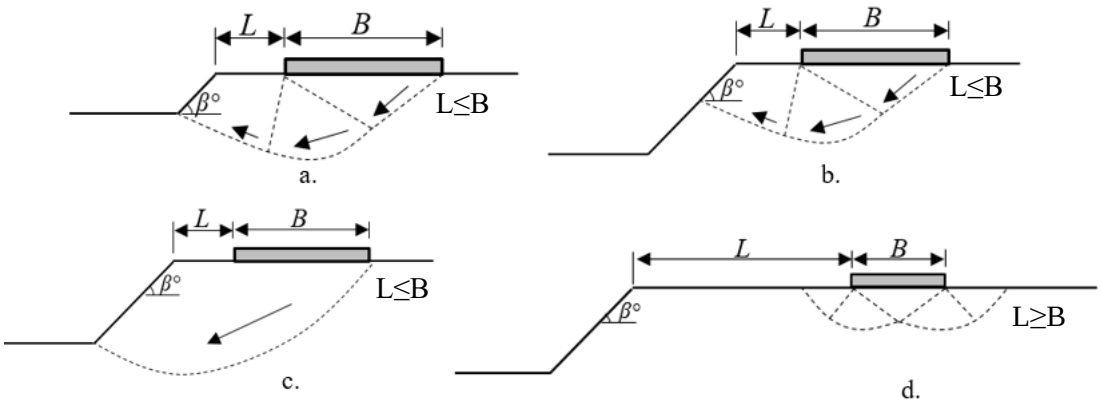
ait Rankine pasif zonları üst üste gelmektedir ve hesaplanacak olan nihai göçme yükünün değeri yine genel göçme eşitlikleri ile elde edilebilmektedir. Şekil 1 (c)’de temellerin merkezden merkeze uzaklıkları $x=x_3<x_2$ şeklindedir ve temellerin altında oluşan üçgensel aktif bölgenin d_1 ve d_2 noktalarındaki açısı 180-2ϕ’dir.



Şekil 1:
Birbirine yakın konumlandırılan yüzeysel temeller için önerilen göçme mekanizması (Stuart, 1962)

d_1g_1 ve d_1e yayları logaritmik spiraldir ve her iki logaritmik spiral yay d_1 noktasına teğettir. Sistem simetrikliği nedeni ile d_2g_2 ve d_2e yayları da logaritmik spiraldir ve her iki logaritmik spiral yay da d_2 noktasına teğettir. Söz konusu durumda hesaplanacak olan nihai taşıma gücü değeri genel taşıma gücü eşitliklerindeki taşıma gücü faktörlerinin belirli etki oranları ile çarpılması sonucu elde edilebilmektedir. Etki oranı değerleri zeminin içsel sürtünme açısının, temel genişliğinin ve temellerin yaklaşım mesafesinin fonksiyonu olarak belirlenebilmektedir. Şekil 2 (d)’de temeller arası mesafe $x=x_4<x_3$ olarak öngörülmüştür ve ilgili mesafe blok göçmeye neden olmaktadır. Komşu temeller yaklaşım mesafesinin azlığı sebebi ile geniş bir temele sahip tek bir yapı gibi davranmaktadır. Yük uygulandıkça temellerin ara yüzeyinde kalan zemin aşağı doğru hareket eden ters bir yay oluşturmaktadır. İki temelin teğet olması durumunda ise yay ortadan kaybolarak 2B temel genişliğine sahip tek bir temel davranışı sergilenmektedir. Stuart (1962)’dan sonra birçok araştırmacı (West ve Stuart, 1965; Reddy ve Mogaliah, 1976; Graham, 1984; Kumar ve Ghosh, 2007; Kumar ve Kouzer, 2008) teorik çalışmalarında bu konuyu araştırmışlardır. Temellerin girişimi konusunda deneysel olarak

çalışmalarda (Saran ve Agarwal,1974; Selvadurai ve Rabbaa, 1983; Das ve Lerbi-Cherif, 1983; Kumar ve Saran, 2003) nihai taşıma gücü araştırmalarının yanı sıra oturmalar konusu da irdelenmiştir. Bahsi geçen tüm çalışmalarda temeller arasındaki mesafenin belli bir kritik genişliğe kadar azalması durumunda nihai taşıma gücünü azaltacağı savunulmaktadır. Yüzeysel temellerden oluşan simetrik geometri ve yükleme koşullarını göz önüne alan komşu yapıları konu edinen bu çalışmalar; uygulamada geoteknik mühendislerinin karşısına çıkan tüm komşu yapı problemlerini kapsayamamaktadır. Üst yapı elemanı olarak, büyük zemin kütlelerinden inşa edilen, dolgular ele alındığında davranış mekanizması yüzeysel temellere göre farklılaşmakla birlikte dolgunun şev yanına inşa edilmesi durumunda nihai yükleme koşullarında aktive olan göçme mekanizması girişimi pek çok etkene bağlı olarak değişebilmektedir. Dolgunun oluşturduğu üst yapı ve temel zemini ara yüzeyinde yük aktarımını dengeleyen daha rijit bir yapısal eleman bulunmaması nedeni ile iki ortamı topyekün etkileyen bölgesel kayma düzlemleri kolaylıkla gelişebilmektedir. Şevler ise doğal yollarla oluşmuş veya yapay inşa metotları ile elde edilebilen zemin yapıları niteliğinde olup şev çevresine inşa edilecek komşu yapıların projelendirilmesinde hem şevin stabilitesi hem de yapısal sistemin taşıma gücü koşulları birlikte irdelenmelidir. Dolgu-temel zemini-şev etkileşim çözümlemelerinde doğrusal ve simetrik olmayan yükleme koşulları, bölgesel olarak farklılaşan gerilme değerleri, temel zemini taşıma gücü problemi, şev stabilitesi, deformasyon oranları bir bütün olarak göz önüne alınmalı ve değerlendirilmelidir. Literatürde dolguların şev çevresine inşa edilme durumu için kaynaklar sınırlıdır ancak yüzeysel temellerin şev yanına inşa edildiği etkileşimli sistemler için literatürde bazı genel potansiyel göçme mekanizmaları tanımlanmış ve bu mekanizmalar Şekil 2'de gösterilmiştir (Mofidi ve diğ., 2014).



Şekil 2:
Şev çevresinde yer alan yüzeysel temeller için göçme mekanizmaları (Modifi ve diğ., 2014)

Şekil 2 (a) ve (b)'deki göçme mekanizmaları, şevin farklı yüksekliklerde ve kendi içerisinde dengede olduğu durumda temel zemininin nihai taşıma kapasitesine eriştiği anda gözlemlenebilmektedir. Şekil 2 (c)'de tanımlanmış olan göçme mekanizması genel şev göçmesi olarak nitelendirilmekte ve zeminin ağırlığı sebebi ile yerçekimi yükü altında gerçekleşmektedir. Şekil 2 (d)'de ise temelin şevden yeteri kadar uzaklıkta inşa edilmesi durumunda temelin taşıma gücünün düz zemin tabakası üzerine inşa edilen temel ile aynı olacak şekilde oluştuğu ve şevin açısından etkilenmediği söylenebilmektedir. Şekil 2'de verilmiş olan tüm göçme davranışlarında etkili olan başat faktör, temel ile şevin etkileşim mesafesidir. Bu yaklaşım mesafesinin azalması durumunda, birbirine komşu temeller için yapılan çalışmalarda önerildiği üzere bütünleşik sistemin temel taşıma gücü belli bir etkileşim mesafesine kadar azalmakta olup benzer bir yaklaşım ile göçme mekanizmasında kayma bölgesindeki hareketi engelleyen pasif bölgenin mevcudiyetinin sınırlanması sonucunda nihai taşıma gücü değeri şeve

komşu dolgular için de azalmaktadır. Bu çalışma kapsamında, farklı drenajsız kayma mukavemeti değerine sahip homojen killi zeminler üzerine inşa edilen dolguların şevlere komşu olması durumunda göçme davranışının ve oluşan göçme mekanizmaların değişimi, yapılan sonlu elemanlar analizleri ile irdelenmiş olup; analizlerin literatürdeki diğer çalışmalardan özgün kılınan yanını, bütünsel sistem davranışının değerlendirilmesinde güvenlik sayısının hesaplanarak irdelenmesi ve kritik dolgu yüklerinin elde edilmesi oluşturmaktadır.

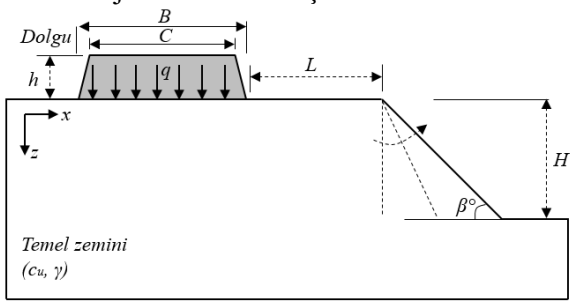
2.2. Zemin Yapılarında Güvenlik

Zemin yapılarının tasarımında ekonomi, sürdürülebilir kullanım ve göçmeye kaşı güvenlik beklenilen performans kriterleridir. Güvenlik ve ekonomi optimizasyonunun sağlandığı nitelikli tasarımların oluşturulabilmesi için uygun bir güvenlik faktörünün kullanılması gerekmektedir. Yapısal tasarım mühendisliğinin klasik yaklaşımına göre elemanların kapasitesi C (dayanım veya direnen kuvvet) ile gereksinimleri D (gerilme veya rahatsız edici kuvvet) arasındaki ilişki F=C/D yapının güvenlik faktörü olarak tanımlanarak göçmenin F değerinin 1'in altında olduğu durumlarda gerçekleşeceği söylenebilmektedir. Bu bağlamda yapısal tasarımın kabul edilebilirlik koşulu projelendirmede uygun bir toplam güvenlik faktörünün kullanılması ile sağlanabilmektedir (Baikie, 1985). Geleneksel geoteknik uygulamalarında kullanılan güvenlik sayıları çoğunlukla deneyimlere bağlı olarak elde edilen uygun değerlerden seçilmişlerdir. Bununla birlikte uygulama sahalarında karşılaşılan özel bir vaka için, hesaplanmasında yer alan belirsizlik veya koşullardaki farklılık derecesine bakılmaksızın, kullanılan güvenlik sayısının aynı olması kabul edilebilirdir. Bu durum; gelenek yolu ile aktarılan güvenlik faktörü değerinin çok çeşitli belirsizlikler içeren koşullara aynı seviyede uygulandığının göstergesidir ve özel durumların göz önüne alınmasını zorlaştırmaktadır (Duncan, 2000). Örneğin üst yapı sistemi olarak dolgular söz konusu olduğunda, yükleme zemin ağırlığından kaynaklanmaktadır ve zemin ağırlığındaki her artış mutlaka göçmeye neden olmamaktadır. Bunun yanı sıra tamamen sürtünmeli zeminler sadece zeminin kendi ağırlığının etkisi ile oluşan yerçekimi yükü altında göçme davranışı sergilemeyebilmektedirler (Jiang ve diğ., 2014). Bu sebeple zemin yapıları için güvenlik kavramı mevcut maksimum kayma gerilmesinin denge için gerekli kayma gerilmesine oranı şeklinde tanımlanabilmekte ve vakalara bağlı olarak değişkenlik hesaplanarak göçmenin olasılığı göz önüne alınabilmesini sağlayabilmektedir. Bu oran gerçek dayanımın denge için ihtiyaç duyulan minimum dayanıma oranı olarak da ifade edilebilmektedir. Günümüz uygulamalarında güvenlik kavramına özgü yaklaşımlar deterministik ve probabilistik olmak üzere iki başlık altında toplanabilir. Deterministik yöntemler ile hesaplanan güvenlik sayılarının kesin olduğu düşünülür. Mukavemet azalım tekniği, sonlu elemanlar yöntemi ve limit denge analizleri deterministik güvenlik hesabı yapılabilen metotlara örnek olarak verilebilmektedir. Probabilistik yöntemler ise olasılıksal yaklaşımlardır ve zemin özelliklerinden veya hesaplamalardan kaynaklanabilecek belirsizlikler güvenlik sayılarının hesabında olasılık teorileri kullanılarak dikkate alınmaktadır. Olasılıksal yöntemlere örnek olarak Monte Carlo tekniği ve Taylor serileri verilebilmektedir. Şevlerin stabilitesi konusu göz önüne alındığında geometrik ve geoteknik koşulların değişkenliği sebebi ile olasılık teorilerini göz önüne alan çözümlemeler yapılması hesaplamaları oldukça karmaşık hale getirmektedir. Bu sebeplerle şev problemlerinin çözümlenmesinde genellikle limit denge eşitliklerine (Bishop, 1955; Janbu, 1957; Morgenstern ve Price, 1965; Spencer, 1967; Sarma, 1973; Fredlund ve diğ., 1973) dayalı hesaplamalar yapılmaktadır. Ancak limit denge eşitlikleri statik denge koşullarını göz önüne alarak yaptığı analizler ile sadece göçme davranışını değerlendirebilmekte iken deformasyonların değişimini göz önüne alamamaktadır. Bu sebeple gerek sayısal programlama ile uygulama kolaylığı sunan gerekse çözümlemelerinde deformasyona bağlı tasarım yapılmasına olanak sağlayan sonlu elemanlar analizleri projelendirmelerde sıklıkla tercih edilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi ile temel zeminlerinin başlangıç gerilme durumları tanımlanabilmekte ve gerçekçi bir gerilme-deformasyon ilişkisi oluşturulabilmektedir. Ancak limit denge metodunun eksik kalan yönlerini tamamlayan sonlu elemanlar yönteminde her

zaman belirgin bir kayma yüzeyi elde etmek mümkün olamayabilir. Sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan sayısal analiz programlarında dayanım azaltma teknikleri kullanılarak zeminin kayma mukavemeti parametreleri olan c ve ϕ'nin ardışık bir şekilde azaltılması sonucunda şevi göçmeye ulaştıracak değer tanımlanabilmekte ve göçmenin oluştuğu andaki güvenlik, söz konusu şev için güvenlik sayısı değeri olmakta, elde edilen yüzey göçme yüzeyi kabul edilebilmektedir. Bu çalışma kapsamında komşu şev-dolgu sisteminin göçme durumu irdelenmiş olup yapılan sonlu elemanlar analizlerinde dayanım azaltma yöntemi ile elde edilen güvenlik sayıları bütünsel sistem davranışının incelenmesinde kullanılmıştır.

2.3. Modelleme ve Sayısal Analizler

Makale kapsamında, şevlere komşu dolgu yapılarının göçme davranışı üzerindeki faktörlerin incelenmesi amacı ile sayısal analizler şekillendirilmiş olup hesaplamalarda kullanılan etkileşimli kesit ve temsili parametrik gösterimler Şekil 3'de verilmiştir. h yüksekliğinde inşa edilen dolgu sebebi ile B temel taban alanına aktarılan yük q'dur. Yapay olarak oluşturulduğu varsayılan şevin eğim açısı β ve yüksekliği H'tır. L mesafesi dolgu topuğundan şev tepesine kadar olan şev-dolgu yaklaşım mesafesini temsil etmektedir. Yarı sonsuz temel zemini ortamı homojen killerden oluşmaktadır.



Şekil 3:
Sayısal analizlerde kullanılan geometri ve temsili parametreler

Sayısal analizlerde sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan Plaxis 2017 programı kullanılmıştır. Bütünsel sistemin asimetrisi nedeni ile dolgu bütün olarak modellenmiş ve sistem sınırlamalarının yükleme koşullarını etkilememesi için koordinatlar yatay ve düşey doğrultuda sırasıyla yeterince geniş ve derin tutulmuştur. Oluşturulan model geometrisinde sağ ve sol sınır koşullarında sadece düşey şekil değiştirmeye izin verilirken sistem tabanında hem yatay hem de düşey yer değiştirmelere sınır getirilmiştir. *Analizlerde kullanılan ağ yoğunluğu çok sıkı olarak tanımlanmış ve 15 düğümlü üçgen elemanlar ile modellemeler yapılmıştır.* Temel zemini ve dolgu geoteknik özelliklerinin tanımlanmasında doğrusal elastik-mükemmel plastik davranışı prensip kabul eden Mohr Coulomb malzeme modeli kullanılmıştır (Brinkgreve ve diğ., 2017). Dolgunun, birim hacim ağırlığı γ_d=20 kN/m^3 olan siltli kum karışımından ihtiva olduğu düşünülerek temel genişliği sabit B=24 metre kullanılmıştır. Dolgu yüksekliğine göre hesaplanan eşdeğer q dolgu yükleri sırası ile 20, 60, 120 kPa değerlerinde tanımlanmıştır. Temel zemininin birim hacim ağırlığı γ_z=16 kN/m^3, drenajsız kayma mukavemeti değeri c_u 12,5 kPa (E=10000 kPa, υ=0,35), 25 kPa (E=20000 kPa, υ=0,35), 50 kPa (E=30000 kPa, υ=0,35) olarak değerlendirilmiştir. Şev yüksekliği H, temel genişliğinin fonksiyonu olarak B/8=3 metre, B/4=6 metre ve B/2=12 metre; β şev açısı 0°, 30°, 45°, L şev-dolgu yaklaşım mesafesi ise yine dolgu temel genişliği fonksiyonu olarak 0, B/8=3 metre, B/4=6 metre, B/2=12 metre, B=24 metre, 2B=48 metre ve 4B=96 metre olarak değerlendirmeye alınmıştır. Parametrik analizler kapsamında oluşturulan vakalarda şevin uygulama sahasında mevcut bir yapı olduğu düşünülerek plastik drenajlı; dolgunun ise sonradan inşa edildiği varsayılarak drenajsız olarak yüklendiği kurgulanmıştır. Plastik drenajlı yükleme koşulları, zaman etkisini değerlendirmeye

almayan plastik yükleme koşulları ile benzer nitelikte olup aralarındaki tek fark drenajsız davranışın geçici olarak göz ardı edilmesidir. Tamamen plastik yükleme koşullarının uygulanması sistemde uzun sürede meydana gelen deformasyon değerlerini belirlenmesini sağlamaktadır. Plastik drenajlı çözümlemelerde, yükleme tarihçesinin takip edilmemesine ve konsolidasyon sürecinin göz önüne alınmamasına rağmen nihai durum değerlendirmeleri yapıldığında söz konusu deformasyonlar kabul edilebilir değerler öngörmektedir. Bu bağlamda şevlerin duraylılığı problemlerinde uzun süreli stabilite kritik yükleme koşullarını oluşturduğundan plastik drenajlı çözümlemeler kurgulanan vakalar için uygundur. Yumuşak kil temel zeminleri üzerine inşa edilen dolguların tasarım sürecinin modellenmesinde ise projelendirme kriterleri yükleme programından çokça etkilenmektedir. Dolgunun yüklenme kademeleri yumuşak zeminin taşıma kapasitesinden etkilenmekte olup yükün uygulandığı anda kritik yükleme koşulları oluşmaktadır ve drenajsız yükleme koşulları modelleme açısından uygundur.

3. ŞEV-DOLGU ETKİLEŞİM ANALİZLERİ VE DEĞERLENDİRMELER

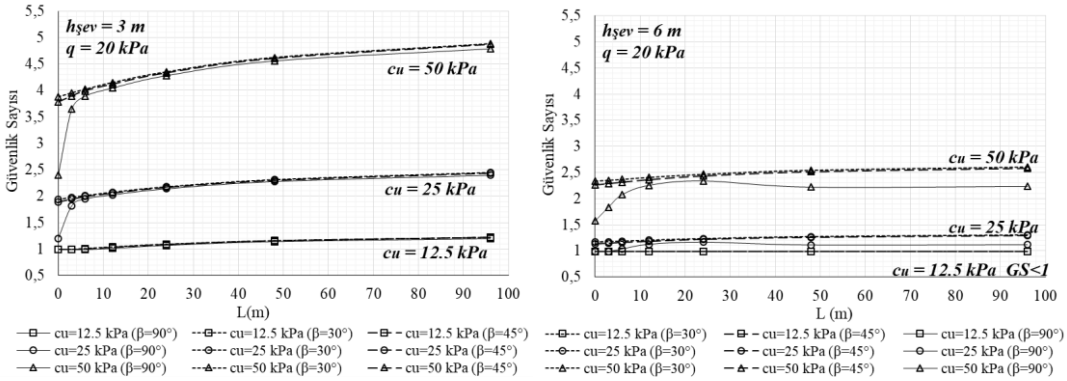
Komşu şev-dolgu yapılarının etkileşimli davranışlarının değerlendirilmesi amacı ile farklı parametreler kullanılarak kurgulanan vakalar sonucunda elde edilen güvenlik sayısı ve göçme yükü değerleri dolgu topuğu-şev tepesi arasındaki mesafe değişimine bağlı olarak analiz edilerek yorumlanmıştır. Ayrıca hesaplamaların değişik aşamalarında elde edilen göçme mekanizmaları farklı parametrelere göre sınıflandırılarak karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir.

3.1. Dolgu-Şev Etkileşiminde Güvenlik

3.1.1. Temel Zemini Drenajsız Kayma Mukavemetinin Etkisi

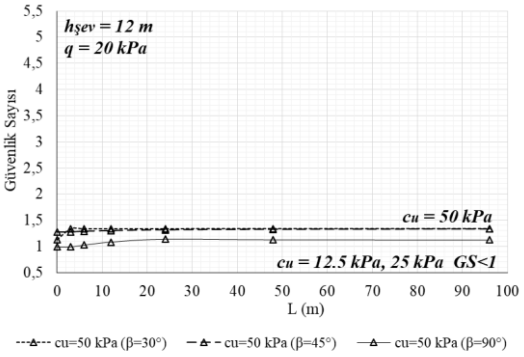
Temel zemini drenajsız kayma mukavemetinin dolgu-şev komşu zemin yapılarının güvenlik durumu üzerine etkilerinin belirlenmesi amacı ile yapılan sonlu elemanlar analizlerinde güvenlik sayısının sabit bir dolgu yüklemesi etkisi altındaki (20 kPa) homojen temel zemini ortamında dolgu-şev etkileşim mesafesine bağlı olarak değişimi incelenmiştir. Drenajsız kayma mukavemeti sırası ile 12,5; 25; 50 kPa değerlerinde varsayılarak aynı şev yüksekliğinde farklı şev açılarında bulunan bütünleşik sistemlerin analizi sonucunda Şekil 4’te verilen grafikler elde edilmiştir. L şev-dolgu yaklaşım mesafesi dolgu temel genişliği (B=24 metre) fonksiyonu olarak 0, B/8=3 metre, B/4=6 metre, B/2=12 metre, B=24 metre, 2B=48 metre ve 4B=96 metre olarak değerlendirmeye alınmıştır. Şekil 4a, b, c’de sırası ile şev yüksekliğinin 3 metre, 6 metre ve 12 metre değerlerinde sabit varsayılması sonucunda elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Temel zemini drenajsız kayma mukavemeti değerinin 12,5 kPa değerinde 3 metreden daha fazla olan şev yükseklikliklerinde dolgu yüklemesi yapılmadan önce şevin kendi duraylılığını sağlayamadığı görülmüştür. Bu durumda çok yumuşak zeminlere inşa edilen etkileşimli sistemlerde tasarım koşulu şev stabilitesinin sağlanması olup göçme davranışı şevin açısından çok derinliği ile ilişkilidir denilebilmektedir. Şev yüksekliğinin 3 metre olması durumunda şev stabilitesi sağlanabilmiş (GS~1) ve şev açısının davranış üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Temel zemininin drenajsız kayma mukavemeti 25 kPa olan homojen orta katı killi zeminden oluşması durumunda bütünsel sistemin güvenlik değişimi irdelendiğinde, şev yüksekliğinin 12 metre olması durumunda şev duraylılığı sağlanamadığı görülmektedir. 6 metre yüksekliğinde 90° eğimindeki şev için L=6 m değerinden sonra dolgu yüklemesi etkisi altında olan etkileşimli sistemin stabilitesi sağlanabilmiş olup güvenlik sayısı değerinin 1’e yakın hesaplanması nedeni ile 20 kPa değerinin üzerindeki herhangi bir yüklemede bütünsel stabilitenin sağlanamayacağı öngörülebilmektedir. Şev yüksekliğinin 3 metre olması durumunda ise göçmeye karşı güvenlik sağlanabilmiştir. Bu durumda davranış açısından dikkat çeken husus temelin şev tepesine yerleştirilmesi durumunda stabilitenin düşük bir güvenlik seviyesinde dahi sağlanabilmiş

olmasıdır. Ancak L değerinin artması ile güvenlik sayısı ciddi oranda artmakta olup uzaklığın arttırılması ile sığ derinlikli şevlerde bu artışın azalarak devam ettiği gözlemlenebilmektedir. Stabilitenin sağlanabilmiş olduğu 6 metre şev derinliğinde ise güvenlik sayısı değeri L=24 m değerinden sonra etkilenmemekte ve sabit değerde seyretmektedir.



a.

b.



c.

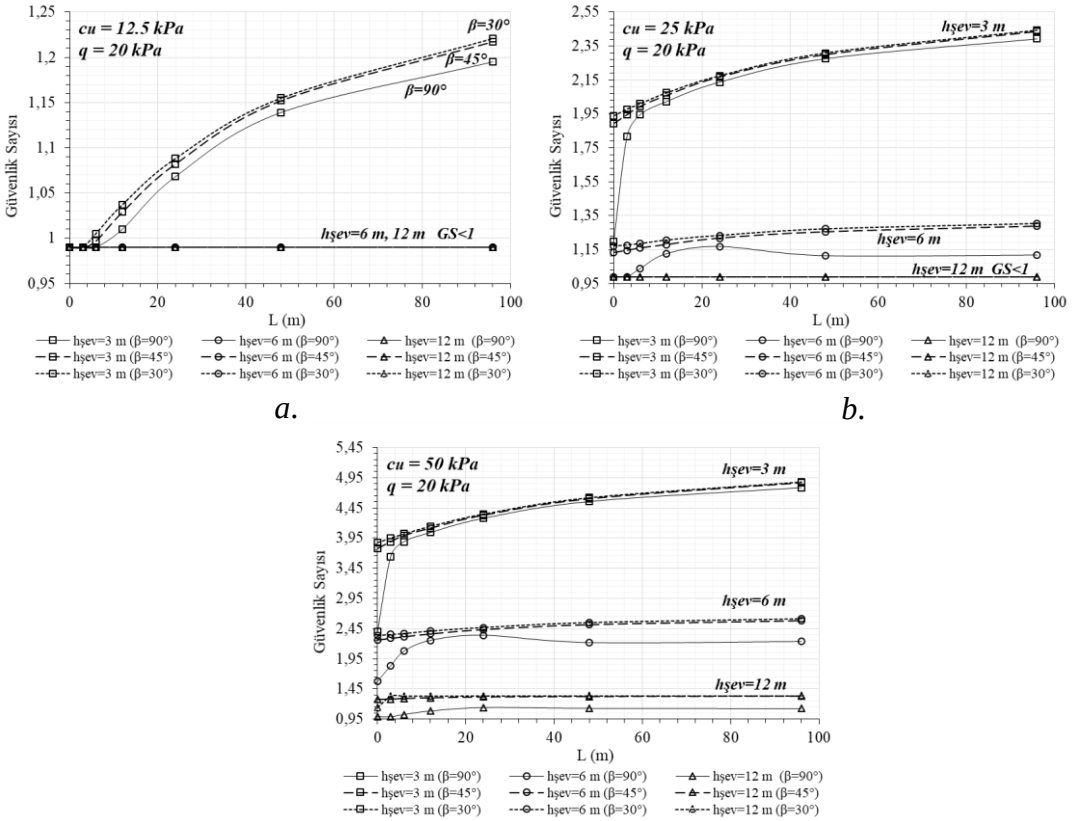
Şekil 4:

Dolgu-şev-temel zemini etkileşiminde temel zemini geoteknik özelliklerinin güvenlik sayısına etkileri ***a.*** *$h_{şev}$=3 metre* ***b.*** *$h_{şev}$=6 metre* ***c.*** *$h_{şev}$=12 metre*

Temel zemininin drenajsız kayma mukavemeti 50 kPa değerinde olan orta katı killerden oluşması durumunda güvenlik değişimi incelendiğinde, davranışın drenajsız kayma mukavemeti değerinin 25 kPa olması durumundakine benzer nitelikli olduğu görülmektedir. İki davranış arasındaki fark; güvenlik değerlerin yüksekliğinden ileri gelmektedir. Şev derinliğinin artması ile elde edilebilen güvenlik sayısı değerleri dolgu-şev etkileşim mesafesinin, dolgu temel taban genişliğinden daha fazla olması durumunda değişim göstermemektedir denilebilir. Ayrıca şev-dolgu etkileşim mesafesinin B/4'ten (kurgulanan vaka için 6 metre) fazla olması durumunda, tüm farklı temel zemini profillerinde gözlemlenebildiği üzere, güvenlik sayısının fazla oranda etkilenmediği ve mesafenin B'den büyük bir değer alması durumunda güvenlik sayısı değerinin değişmediği söylenebilmektedir. Şekil 4a, b, c'de düşey eksende verilen güvenlik sayısı değerleri eşit sayısal değerli grafik alanlarında tanımlanmış olup amaçlanan temel zemini drenajsız kayma mukavemetinin etkisinin net bir şekilde gözlemlenebilmesidir. Bu bağlamda, drenajsız kayma mukavemetinde meydana gelen değişimin sistemsel stabiliteyi çokça etkilediği, drenajsız kayma mukavemetinde meydana gelen artımın güvenlik düzeyini arttırdığı ancak göçme davranışını tetikleyen tüm değişkenlerin birlikte gözetilerek tasarımların yapılması gerektiği söylenebilmektedir.

3.1.2. Şev Açısının ve Şev Yüksekliğinin Etkisi

Şev yüksekliğinin ve şev açısının güvenlik durumu üzerindeki etkisinin belirlenebilmesi amacı ile yapılan sonlu elemanlar analizlerinin sonuçları grafikselleştirilerek Şekil 5'de verilmiştir. Genel davranışın gereği olarak tüm temel zemini profillerinde şev açısının artması ile orantılı şev eğimi artmakta ve sistemsel stabiliteyi azaltmakta veya bozmaktadır. Şekil 5a'da temel zemini drenajsız kayma mukavemeti değerinin 12,5 kPa olması durumunda 6 metre ve 12 metre şev yüksekliklerinde şev açısına bağlı olmaksızın göçme gerçekleşmiş olup göçme davranışı temel taşıma gücü yetersizliğinden ziyade şev stabilitesinin sağlanamamasından ileri gelmektedir. 3 metre şev yüksekliğinde yapılan analizlerde ise stabilite sağlanabilmiştir. 3 metre şev yüksekliğinde dolgu-şev yaklaşım mesafesinin B/4= 6 metre değerine kadar şev güvenliği sınır değerde belirenmiş, şev-dolgu etkileşim mesafesinin artması ile elde edilen güvenlik düzeyi devamlı artmıştır. Temel zemini drenajsız kayma mukavemeti değerinin 25 kPa değerine çıkması durumunda 12 metre şev yüksekliğinde yine stabilite sağlanamazken 6 metre şev yüksekliği için 30 ve 45° olan şev açılarında yaklaşık olarak aynı değerde güvenlik düzeyleri elde edilmiştir. Dik şevlerin oluşturulması durumunda ise dolgu-şev yaklaşım mesafesinin B/4'ten küçük olması durumlarında duraylılık sağlanamamıştır. Aynı zamanda temel genişliğine eşit veya büyük bir mesafede şevin konumlandırılması durumunda güvenlik sayısı değeri bahse konu mesafeden etkilenmemektedir. 3 metre şev yüksekliğinde 30 ve 45° şev eğimlerinde benzer davranış görülmekte olup şevin dik açılması durumunda B/4 etkileşim mesafesine kadar güvenlik seviyesi hızla artmakta ancak bu mesafeden fazla uzaklıklarda güvenlik sayısı artım oranı azalmaktadır.



a. *b.*

c.

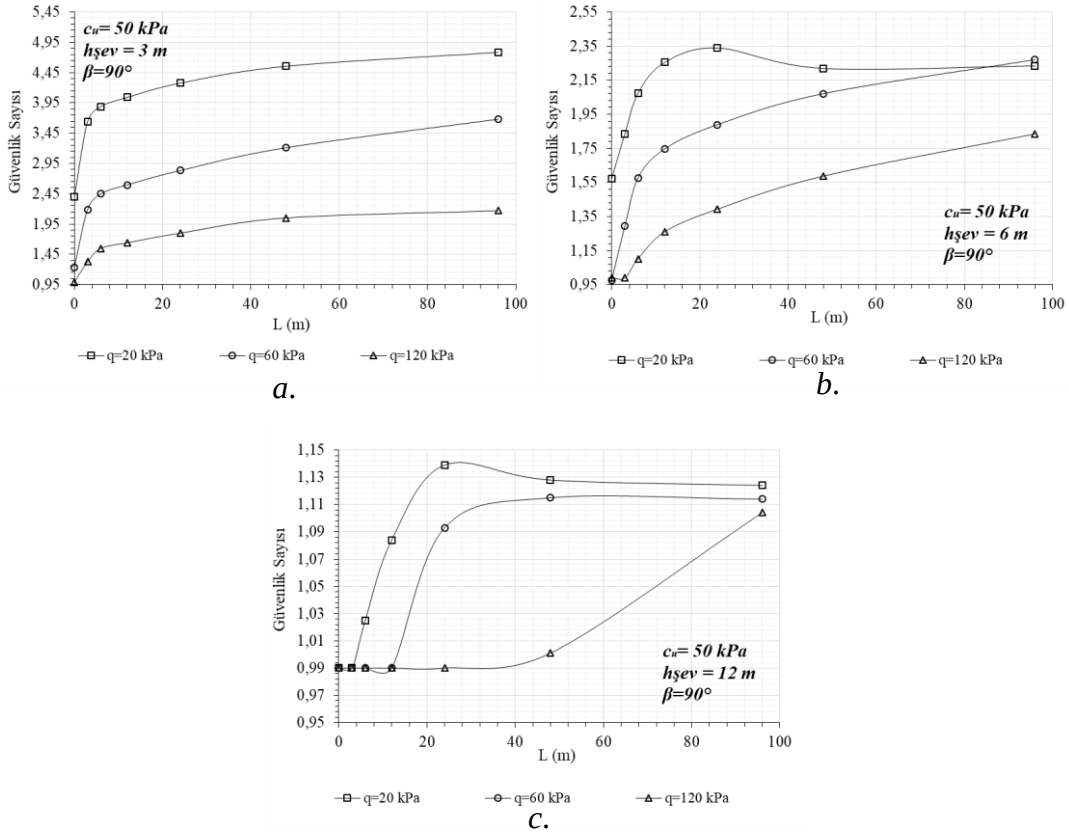
Şekil 5:

Dolgu-şev- temel zemini etkileşiminde şev açısının ve yüksekliğinin güvenlik sayısına etkileri ***a.*** c_u*=12,5 kPa* ***b.*** c_u*=25 kPa* ***c.*** c_u*=50 kPa*

Drenajsız kayma mukavemetinin 50 kPa olduğu durumda üç şev yüksekliği için de stabilite sağlanabilmiş olup güvenlik seviyesi çoktan aza doğru 3, 6, 12 metre şeklinde değişim göstermiştir. Her üç şev yüksekliğinde de benzer bir eğilim görülmektedir. Dolgu-şev etkileşim mesafesinin B/4'ten büyük olması durumunda güvenlik seviyesi artımı azalmakta veya sabit kalmaktadır. Şev yüksekliğinin etkisi yumuşak zeminlerde stabilite açısından şev göçmelerini tetiklemekle birlikte daha sert zeminlerde dolgu yüklemesi sebebi ile göçme mekanizması tetiklenmektedir. Dik açılan şevlerde güvenlik seviyesi her durumda daha küçüktür ve tasarımlarda özenle denetlenmesi gerekmektedir.

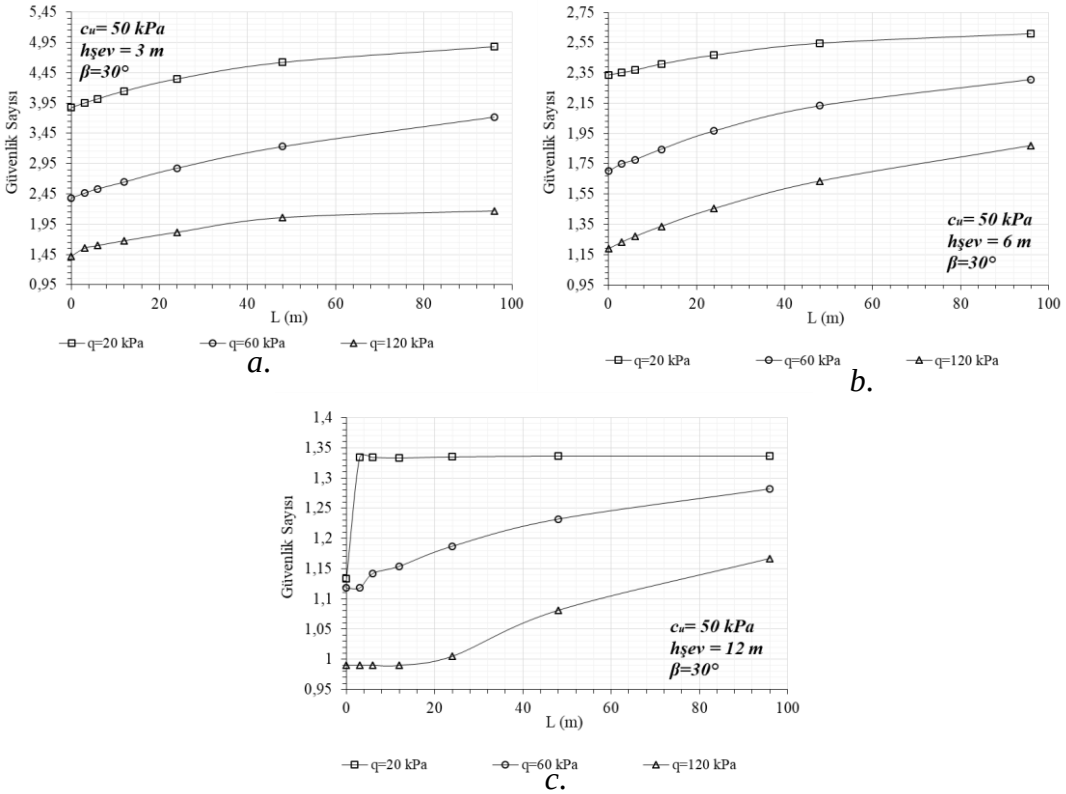
3.1.3. Uygulanan Yük Büyüklüğünün Etkisi

Yapılan sonlu elemanlar analizleri sonucunda drenajsız kayma mukavemeti değerinin 50 kPa olması durumunda şev-dolgu etkileşimli komşu zemin yapısı sisteminin stabilitesinin kurgulanan tüm vakalarda sağlanabildiği gözlemlenmiştir (12 metre yüksekliğe sahip dik şeve teğet dolgu inşası hariç). Makalenin bu bölümünde, 20 kPa değerindeki eşdeğer dolgu yükünün 60 ve 120 kPa değerlerine çıkarılması ile bütünleşik sistemin göstereceği göçme davranışının incelenmesi için de analizler yenilenmiştir. Şekil 6'da dik olan şevlere bitişik inşa edilen dolguların farklı şev yüksekliklerinde sergiledikleri davranış gösterilmiştir. Nispeten yüzeysel yüksekliğe sahip olan 3 metrelik şevde maksimum güvenlik düzeyine 20 kPa yüklemede ulaşılmış, 60 ve 120 kPa değerindeki eşdeğer yüklerin drenajsız koşullarda etki ettirilmesi ile güvenlik seviyesi düşmüş hatta şeve teğet dolgu durumunda göçme gerçekleşmiştir.



Şekil 6:
Dolgu - dik şev - temel zemini etkileşiminde uygulanan yük seviyesinin güvenlik sayısına etkileri ***a.*** $h_{şev}$*=3 m* ***b.*** $h_{şev}$*=6 m* ***c.*** $h_{şev}$*=12 m*

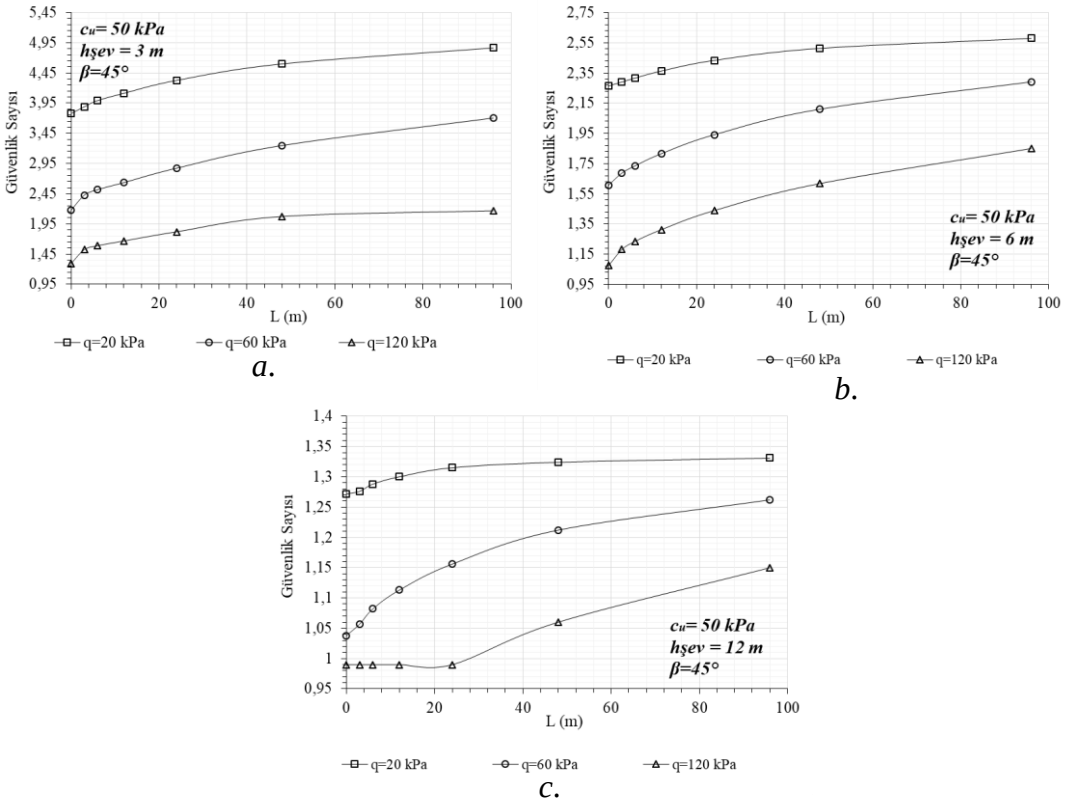
3 metrelik şev için çizilen grafikte her bir yükleme durumunda benzer davranış eğrileri elde edilmiştir. Eğrilerin şekil değiştirdiği noktalar dikkate alındığında yüzeysel şev derinliklerinde temel genişliğinin iki katı mesafeye konumlandırılan bir dolgunun güvenliğinin şev stabilitesinden etkilenmediği söylenebilmektedir. Dolgunun şeve yakınlık mesafesinin 0 ve 0,25B değerlerinde güvenlik değişimi doğrusal artımlıdır. Şev yüksekliğinin 6 metreye çıkarılması durumunda, her bir yükleme için güvenlik sayısındaki maksimum değişim şev-dolgu ara mesafesinin 0-B kadarlık uzaklıklarında meydana gelmektedir. B kadarlık mesafenin aşılması durumunda güvenlik sayısındaki artım oranında azalma ve belli bir mesafeden sonra sabitlik söz konusudur. Şev yüksekliğinin 12 metreye arttırılması ile 20 ve 60 kPa değerindeki yükleme durumları için B mesafesine kadar benzer güvenlik davranışı sergilenmektedir. Ancak 120 kPa değerindeki yükün sisteme uygulanması şevde göçmeye neden olmaktadır. Yükün şevden 2B uzaklıkta uygulanması durumunda şev dengesini sağlayabilmekte olup bütünsel sistem bir güvenlik sergileyebilmektedir. Ancak söz konusu durumda oluşacak davranış mekanizmasının konumunun belirlenebilmesi için dayanım azaltma metodu ile yapılan güvenlik analizleri sonucu elde edilen gerilme dağılım mekanizmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil 7’de 30° şev açısına sahip sistemin uygulanan yük değerlerine karşı sergiledikleri davranış gösterilmektedir. 3 metre şev yüksekliğinde dolgu-şev etkileşim mesafesinin 2B’den büyük olduğu durumlarda güvenlik seviyesinin uygulanan yükn büyüklüğünden etkilenmediği ve dolgu ile şevin stabilitesinin sğlandığı ve ayrIk sistemler olarak çalıştıkları öngörülebilmektedir. Şev yüksekliğinin 6 metreye çıkması durumunda 3 metrelik şev ile benzer davranış gelişimi görülmekte olup fark güvenlik seviyesinin azalmasından ileri gelmektedir.



Şekil 7:

Dolgu - şev (β=30°) - temel zemini etkileşiminde uygulanan yük seviyesinin güvenlik sayısına etkileri ***a.*** $h_{şev}$*=3 m* ***b.*** $h_{şev}$*=6 m* ***c.*** $h_{şev}$*=12 m*

Şev yüksekliğinin 12 metreye çıkması durumunda ise 20 kPa değerindeki dolgu yükü etkisi altında B/6 mesafesine kadar güvenlik seviyesi ciddi oranda artmış ancak bu mesafeden büyük uzaklıklarda güvenlik seviyesi sabit kalmıştır. Yük miktarının 60 kPa değerine artması ile güvenlik azalmış ve etkileşim mesafesinin artması ile artam bir gidişat izlemiştir. Yük miktarının 120 kPa değerine çıkarılması ile de etkileşim mesafesinin B mesafesinden uzak olması durumunda sistemsel stabilite sağlanarak mesafenin daha da arttırılması ile güvenlik düzeyi arttırılabilmiştir. Şekil 8'de şev açısının 45° olması durumunda uygulanan yük seviyesinin bütünleşik sistem dengesine etkileri gözetilmiştir. Şekil 8a, b, c incelendiğinde 30° şev eğimine sahip etkileşimli sistemle aynı davranışı sergilediği ancak kazandıkları güvenlik düzeyi bakımından bir miktar azalma olduğu söylenebilmektedir.



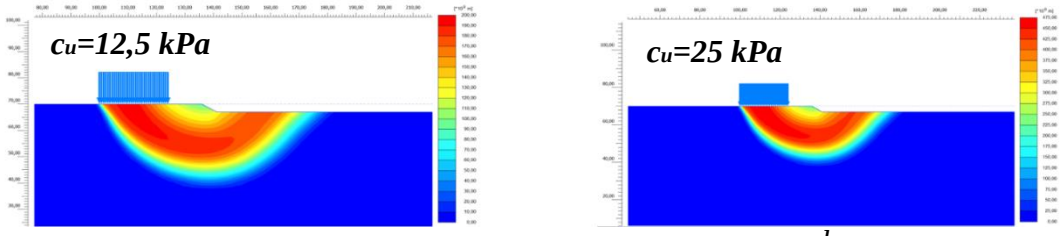
Şekil 8:
Dolgu - şev (β=45°) - temel zemini etkileşiminde uygulanan yük seviyesinin güvenlik sayısına etkileri ***a.*** $h_{şev}$*=3* ***b.*** $h_{şev}$*=6 m* ***c.*** $h_{şev}$*=12 m*

3.2. Dolgu-Şev Etkileşiminde Göçme

3.2.1. Temel Zemini Drenajsız Kayma Mukavemetinin Etkisi

Temel zemini drenajsız kayma mukavemeti değerinin göçme mekanizması üzerindeki etkilerinin gözlemlenebilmesi amacı ile Plaxis 2017 programında güvenlik analizleri yapılmış olup elde edilen göçme mekanizmaları irdelenmiştir. Bu bağlamda yapılan değerlendirmelerde makaledeki yer kısıtı nedeni ile sadece 30° şev eğimine sahip 3 metre yüksekliğindeki şevlerin 20 kPa dolgu yükü ile yüklenmeleri durumunda farklı temel zemini ortamlarında sergiledikleri davranış incelenmiştir. Şekil 9'da dolgu-şev etkileşim

mesafesi 12 metre olan komşu zemin yapıları için elde edilen göçme mekanizmaları verilmiştir.



a. *b.* *c.*

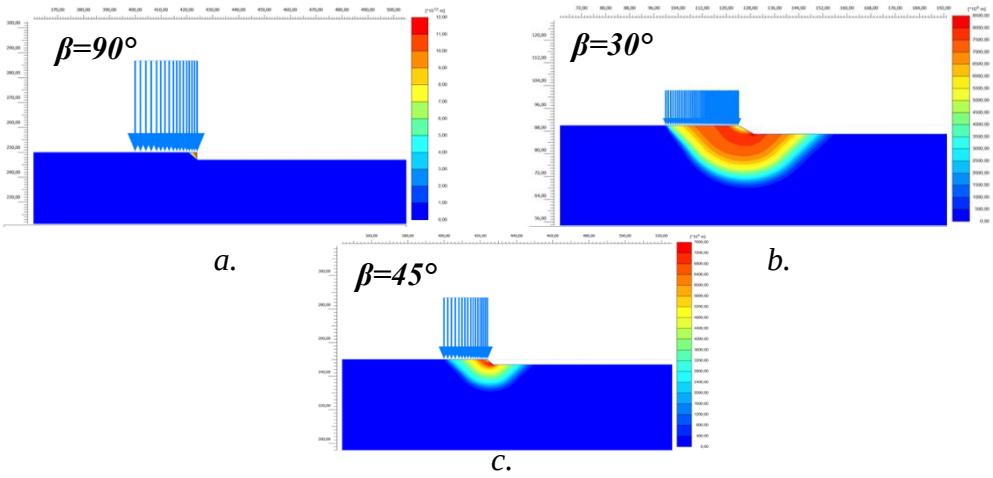
Şekil 9: *Temel zemini oratmının drenajsız kayma mukavemetinin göçme mekanizması üzerindeki etkileri* ***a.*** *c_u= 12,5 kPa* ***b.*** *c_u= 25 kPa* ***c.*** *c_u= 50 kPa*

Drenajsız koşullarda ani olarak gerçekleştirilen dolgu yüklemeleri sonucunda temel zemini ortamında drenajsız kayma mukavemeti değerinin 2 ve 4 katına çıkması durumları için elde edilen göçme mekanizması şekilleri incelendiğinde mekanizma gelişimi açısından drenajsız kayma mukavemeti değerinin etkili olmadığı söylenebilmektedir. Oluşan mekanizmanın gerilme dağılım alan sınırları aynı olup gerilmelerin yoğunlaşma bölgeleri açısından yumuşak olan formasyonlarda daha sık bir ağ görüldüğü belirtilebilmektedir. Temel zemini ortamındaki değişimin etkileri kendisini güvenlik sayısı değişimi olarak sonuçlara yansıtmaktadır.

3.2.2. Şev Açısının ve Şev Yüksekliğinin Etkisi

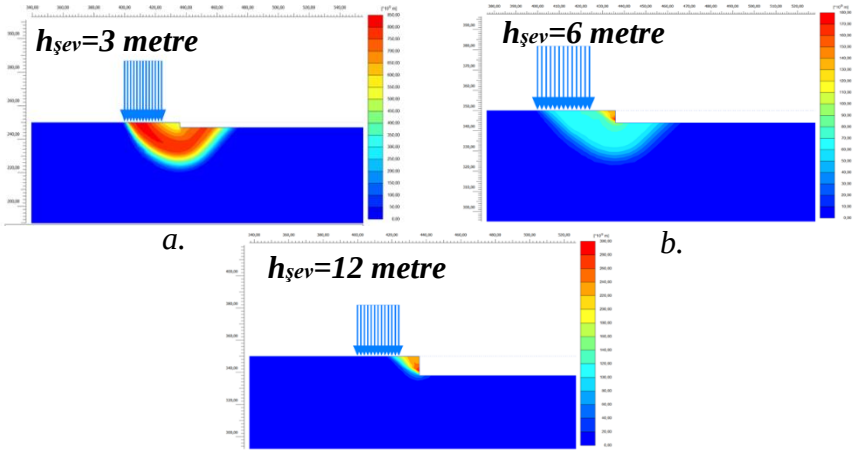
Şev açısının göçme mekanizması üzerindeki etkilerinin gözlemlenebilmesi amacı ile yapılan güvenlik analizleri sonucunda drenajsız kayma mukavemeti değerinin 50 kPa, şev yüksekliğinin 3 metre, dolgu yükünün 20 kPa olduğu durumda şeve teğet konumlandırılan dolgu için elde edilen göçme mekanizmaları Şekil 10’da verilmiştir. Şekiller incelendiğinde 90° şev açısına sahip olan sistem için göçme davranışını şevin duraylılık durumunun tetiklediği görülebilmektedir. Şev açısının artması ile şev stabilitesi sağlanabilmiş olup dolgu yükleri temel zemini ortamına dağılabilmiştir ve göçme davranışını şev-dolgu etkileşimi birlikte tetiklemiştir. Şev açısının 45° değerine çıkarılması sonucunda ise bir önceki durumla aynı davranış sergilenmekte olup gerilme dağılım alanı daralmış ve yoğunluk bakımından azalma meydana gelmiştir. Ancak sadece şev açısının davranışı yönetmek bakımından etkili olduğu yaklaşımı hatalı olacaktır. Göçme mekanizması şev yüksekliği ve etkileşim mesafesine bağlı olarak çokça değişim göstermektedir. Bu bağlamda şev yüksekliğinin etkisinin gözlemlenmesi amacı ile yapılan analizlerle elde edilen göçme mekanizmaları Şekil 11’de verilmiştir. Söz konusu mekanizmalar, temel zemini drenajsız kayma mukavemeti değerinin 50 kPa olması durumunda 20 kPa değerindeki dolgu yükünün dik şevlere 12 metre mesafede konumlandırılması sonucunda elde edilmiştirler.

Şekil 11’de verilen göçme mekanizmaları değerlendirildiğinde; 3 metre şev yüksekliğinde göçmenin dolgu yüklemesinden kaynaklandığı ancak şev yüksekliğinin arttırılması sonucunda şev stabilitesinin sağlanamayıp göçmelerin artan yükseklikle birlikte dolgudan bağımsız gerçekleştiği görülebilmektedir. Söz konusu durum yüzeysel temeller için önerilen davranışla uyuşmaktadır.



a. *b.* *c.*

Şekil 10:
Şev açısının göçme mekanizması üzerindeki etkileri
a. *β=90° kPa* ***b.*** *β=30°* ***c.*** *β=45°*

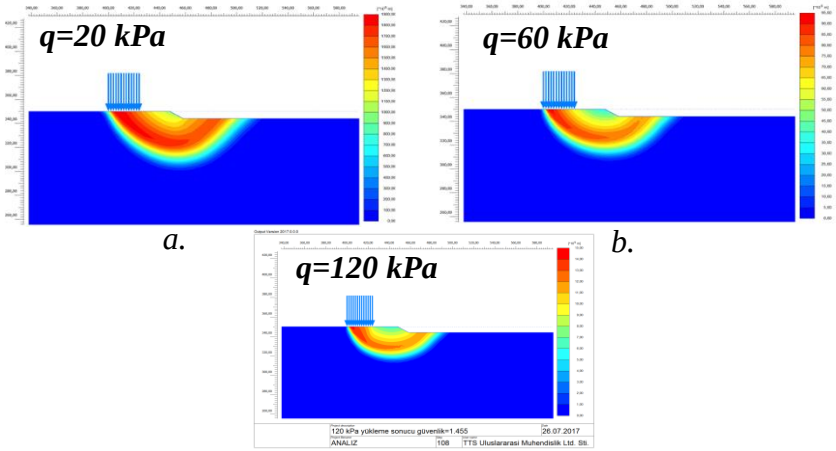


a. *b.* *c.*

Şekil 11:
Şev yüksekliğinin göçme mekanizması üzerindeki etkileri
a. *$h_{şev}$=3 metre* ***b.*** *$h_{şev}$=6 metre* ***c.*** *$h_{şev}$=12 metre*

3.2.3. Uygulanan Yük Büyüklüğünün Etkisi

Dolgu-şev komşu zemin yapılarının etkileşimli davranışının belirlenmesi için yapılan güvenlik analizlerinde uygulanan yük büyüklüğünün değerlendirilmesi amacı ile temel zemini drenajsız kayma mukavemeti 50 kPa değeri için 3 metre şev yüksekliğinde ve 30° şev açısında 20 kPa dolgu yüklemesi etkisi altında oluşan göçme mekanizmaları Şekil 12'de verilmiştir. Dolgu yüklemesinin artması ile aktive olan göçme mekanizması dolgu altında yoğunlaşmakta olup şev stabilitesinden bağımsızlaşmaktadır.



a. *b.* *c.*

Şekil 12:
Uygulanan yük büyüklüğünün göçme mekanizması üzerindeki etkileri
a. *q=20 kPa* ***b.*** *q=60 kPa* ***c.*** *q=120 kPa*

3.2.4. Şev-dolgu Etkileşim Mesafesinin Etkisi

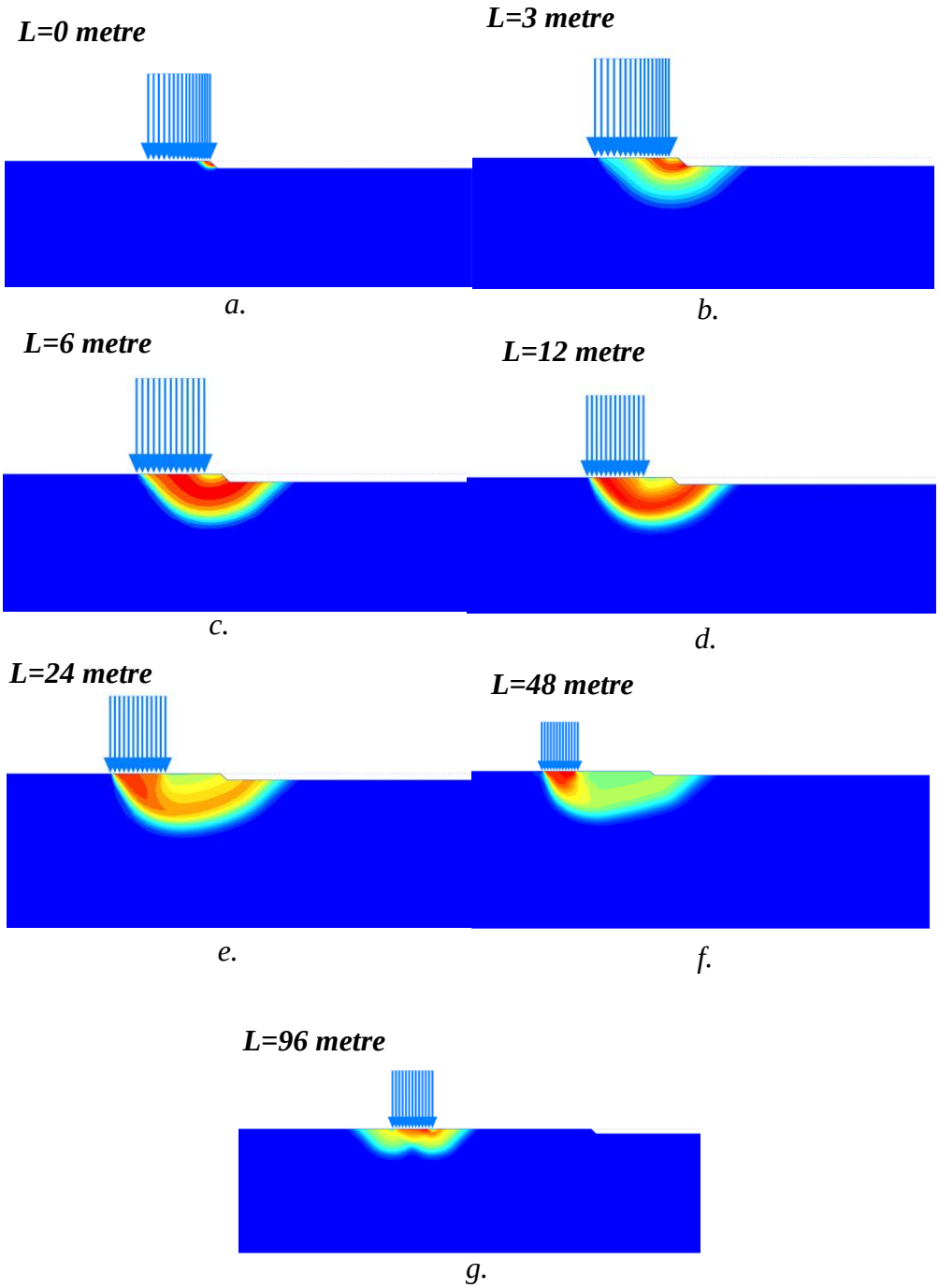
Komşu dolgu-şev etkileşimli zemin yapılarının stabilitesi incelenen tüm etkenlere bağlı olmakla birlikte gerilme-deformasyon davranışını asıl etkileyen parametre yapıların birbirlerine olan uzaklıklarıdır. Etkileşim mesafesinin göçme davranışına etkilerinin araştırılması amacı ile temel zemini drenajsız kayma mukavemeti 50 kPa olan 120 kPa dolgu yükü etkisi altında olan temel zemini ortamına inşa edilecek 30° eğime ve 3 metre yüksekliğe sahip şev için elde edilen göçme mekanizmaları Şekil 13’de verilmiştir. Elde edilen şekillerden görülmektedir ki, komşu yapıların stabilitesi ve aktive olan göçme mekanizmaları etkileşim mesafesine ciddi oranda bağlıdır. Şev tepesinden uzaklaştırılarak inşa edilen dolgular için aktive olan göçme davranışı dolgunun uzaklığının artması ile yükleme kaynaklı hale dönüşmekte olup yaklaşık olarak temel genişliğine eşdeğer bir mesafeden sonra belirtilen şev yüksekliği için davranış şevden bağımsızlaşmaktadır. Nispeten yakın mesafelerde ise şev kaynaklı göçmeler sıklıkla vuku bulabilmektedir. Etkileşim mesafesinin 4B’den fazla olması durumunda ise dolgu-şev etkileşimi bozulmakta olup zemin yapıları ayrık yapılar gibi davranmaktadırlar. Bu bağlamda dolgu-şev etkileşim mesafesinin 0-4B aralığındaki değişimleri için bütünleşik sistemin etkileşimli analizleri yapılmalı, şev nedeni ile dolgu altındaki temel zemini ortamında aktive olamayan pasif bölge dirençlerinin eksiltilmesine dayalı farklı bir çözümleme metodu ile analizler yapılmalıdır.

4. SONUÇLAR

Şeve komşu dolgu yapılarının temel zemini göçme davranışına etkilerinin yorumlanması amacı ile yapılan çok değişkenli sonlu elemanlar programı analizleri sonucunda elde edilen güvenlik sayıları ve göçme mekanizmalarına bağlı bir şekilde yapılan değerlendirmeler aşağıda sırası ile sunulmuştur. Söz konusu analizlerde şev yüksekliği, açısı; dolgu yüksekliği, temel zemini mukavemet parametreleri, dolgu-şev yaklaşım mesafesi değişken olarak kullanılmıştır.

- Komşu zemin yapıları olan şev-dolgu sistemlerinde en düşük güvenlik sayısı değerine dolgunun şev tepesine konumlandırılması durumunda yaklaşılmaktadır. Dolgunun farklı konumlara yerleştirilmesi ile güvenlik sayısında, sadece kurgulanan vaka için, beş kata varan farklılık meydana gelmektedir.

- Şeve komşu dolgu yapılarının stabilitesi üzerinde etkili en temel parametre zeminin mukavemeti olarak görünmekle birlikte, drenajsız yükleme sonucunda aktive olan göçme mekanizmasının sınırları ve gerilme dağılım alanları mukavemet parametresinden çok etkileşim mesafesine bağlı olarak değişim göstermektedir.



Şekil 13:
Komşu dolgu-şev zemin yapılarının etkileşim mesafesinin göçme mekanizması üzerindeki etkileri ***a.*** *L=0 m.* ***b.*** *L=3 m.* ***c.*** *L=6 m.* ***d.*** *L=12 m.* ***e.*** *L=24 m.* ***f.*** *L=48 m.* ***g.*** *L=96 m.*

- İki baskın göçme şeklinin (şevin toptan göçmesi ve taşıma gücü göçmesi) kombinasyonu şeve komşu dolgu yapılarının çözümlenmesini zorlaştırmaktadır.

- Dolgunun şev tepesinden uzaklaşması ile göçme davranışı şev göçmesinden toptan göçmeye, toptan göçmeden de taşıma gücü göçmesine değişen bir yol izlemektedir.
- Şev açısının artması duraylılığı bozmakta dolayısı ile şev yakınına konumlandırılan dolguların taşıma gücü azalmakta ve şev ile birlikte göçme davranışı göstermektedir.
- Belli bir temel zemini profilinde şev yüksekliğinin temel taban genişliğine oranı şeklinde belirlenebilen mesafelere göre farklı göçme şekilleri tanımlanabilmektedir. Düşük H/B değerlerinde şev yüksekliği sınırı nedeni ile göçme de şev içerisinde gerçekleşmektedir.
- Şev yanında yer alan dolguların taşıma kapasitesi şev açısının artmasına ve veya temel tabanı ile şev tepesi arası mesafenin azalmasına bağlı olarak azalmaktadır.

KAYNAKLAR

1. Baikie, L. D. (1985) Total and partial factors of safety in geotechnical engineering, Department of Civil Engineering, Technical University of Nova Scotia, Halifax, N.S., Canada B3J 2X4. doi: 10.1139/t85-067

2. Bishop, A. W. (1955) The use of slip circle in the stability analysis. doi: 10.1680/geot.1955.5.1.7

3. Brinkgreve, R.B.J., Kumarswamy, S., Swolfs, W.M. (2017) Plaxis tutorial manual.

4. Buhan, P. and Garnier, D. (1994) Analysis of the bearing capacity reduction of a foundation near a slope by means of the yield design theory, *Revue Française de Géotechnique*, 68, 21–32 (in French).

5. Buhan P. D. and Garnier D. (1998) The dimensional bearing capacity analysis of a foundation near a slope, *Revuse Française de Géotechnichnique*, 38, 153-163. doi: 10.3208/sandf.38.3_153

6. Castelli F. and Motta E. (2010) Bearing capacity of strip footings near slopes, *Geotechnical and Geological Engineering*, 28, 187-198. doi: 10.1007/s10706-009-9277-9

7. Chang, H., Nyhart, J. ve Goeltner, C. (1998) Computer models as support for complex negotiaitions, *International Conference of the Society for General System Research*, Hungarian Academy of Science, Budapest, 40-48. doi:11.3267/2553/8911.324.260

8. Chen W. F. (1975) Limit analysis and soil plasticity, *Elsevier*, Amsterdam.

9. Das, B. M., and Larbi-Cherif, S. (1983) Bearing capacity of two closely spaced shallow foundations on sand., *Soils and Foundations*, 23(1), 1–7. doi: 10.3208/sandf1972.23.1

10. Davis, E.H. and Booker, J.R. (1973) Some adaptations of classical plasticity theory for soil stability problems, *Proceedings of the Symposium on the Role of Plasticity in Soil Mechanics*, A.C. Palmer, ed., Cambridge University, Cambridge, UK, 24–41.

11. Duncan, J. M. (2000) Factors of safety and reliability in geotechnical engineering, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2000, 126(4): 307-316. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:4(307)

12. Farzaneh, O., Askari, F. and Ganjian, N. (2008) Three dimensional stability analysis of convex slopes in plan view, *ASCE, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(8), 1192-1200. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:8(1192)

13. Fredlund-Krahn-Pufahl. (1981) The relationship between limit equilibrium slope stability methods.

14. Gemperline, M. C. (1988) Centrifuge modeling of shallow foundations., *In Proc. ASCE Spring Convention*, 45-70.

15. Georgiadis, K. (2008) The influence of load inclination on the undrained bearing capacity of strip footings on slopes, *Computers and Geotechnics*, 37(3), 311-322. doi: 10.1016/j.compgeo.2009.11.004

16. Graham, J., Raymond, G. P., and Suppiah, A. (1984) Bearing capacity of three closely-spaced footings on sand., *Geotechnique*, 34(2), 173-182. doi: 10.1680/geot.1984.34.2.173

17. Graham, J. Andrews, M. and Sheilds, D.H. (1987) Stress characteristics for shallow footings in cohesionless slopes, *Canadian Geotechnical Journal*, Vpl 25, No. 2, pp. 238-249. doi: 10.1139/t88-028

18. Hansen, J. B. (1970) A revised and extended formula for bearing capacity

19. Janbu, N. (1957) Earth pressure and bearing capacity calculations by generalized procedure of slices, *Proc. of 4th Int. Conf. Soil. Mech. Eng.*, 2, 207-212. London: Butterworths. doi: 10.12691/ajna-1-1-2.

20. Jiang, S. H., Li, D. Q., Cao, Z. J., Zhou C. B. and Phoon, K. K. (2014) Efficient system reliability analysis of slope stability in spatially variable soils using monte carlo simulation, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141, 2, 04014096. doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001227

21. Krabbenhoft, K., Lyamin, A.V., Hjiaj, M. and Sloan, S.W. (2005) A new discontinuous upper bound limit analysis formulation, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 63(7), 1069–1088. doi: 10.1002/nme.1314

22. Kumar, J. and Ghosh, P. (2007) Ultimate bearing capacity of two interfering rough strip footings, Int J Geomech. *ASCE*,7(1):53–62. doi: 10.1061/(ASCE)1532-3641(2007)7:1(53)

23. Kumar, J., and Kouzer, K. M. (2008) Bearing capacity of two interfering footings, *Int. J. Numer. Analyt. Meth. Geomech.*, 32(3), 251–264. doi: 10.1002/nag.625

24. Kumar, A. and Saran, S. (2003). Closely spaced footings on geogrid reinforced sand, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 129(7), 660–664. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:7(660)

25. Kusakabe, O., Kimura, T. & Yamaguchi, H. (1981) Bearing capacity of slopes under strip loads on the top surfaces, *Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, v. 21, n. 4, p. 29-40. doi: 10.3208/sandf1972.21.4_29

26. Lysmer, J. (1970) Limit analysis of plane problems in soil mechanics, *J. Soil Mechanics Foundation Division, ASCE*, 96 (SM4), 1311-1334.

27. Meyerhof, G. G. (1957). The ultimate bearing capacity of foundations on slopes. *In Proc., IV Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, London, England, 1, 384-387.

28. Meyerhof, G. G. (1963) Some recent research on the bearing capacity of foundations, *Canadian Geotech. J.*, 1(1), 16–26. doi: 10.1139/t63-003

29. Michalowski, R.L. (1989) Three-dimensional analysis of locally loaded slopes, *Géotechnique,* 39(1), 27–38. doi: 10.1680/geot.1989.39.1.27

30. Mofidi, J., Farzaneh, O. and Askari, F. (2014) Bearing capacity of strip footings near slopes using lower bound limit analysis, *Civil Engineering Infrastrructures Journal*, 47(1):89-109. doi: 10.7508/CEIJ.2014.01.007

31. Morngenstern, N. R. and V. E. Price. (1965) The analysis of the stability of general slip surfaces, *Géotechnique* 15: 1: 79. doi: 10.1680/geot.1965.15.1.79

32. Narita, K. and Yamaguchi, H. (1990) Bearing capacity analysis of foundations on slopes by use of log-spiral sliding surfaces, *Soils and Foundations*, 30(3), 144–152. doi: 10.3208/sandf1972.30.3_144

33. Reddy, S. A and Mogalish, G. (1976) Interference between surface strip foundations on soils exhibiting anisotropy and non-homogeneity in cohesion., *Jr. of Inst. of Engg. of India*, 7-13.

34. Saran, S. and Agarwal, V. C. (1974) Interference of surface footings in sand, *Indian Geotech.* J., 4(2), 129–139.

35. Sarma, S. K. (1973) Stability analysis of embankments and slopes*, Géotechnique*, No. 3, 423-433. doi: 10.1680/geot.1973.23.3.423

36. Selvadurai, A. P. S., and Rabbaa, S. A. A. (1983) Some experimental studies concerning the contact stresses beneath interfering rigid foundations resting on a granular stratum, *Can. Geotech.* J., 20(3), 406–415. doi: 10.1139/t83-050

37. Shiau, J.S., Merifield, R.S., Lyamin, A.V. and Sloan, S.W. (2011) Undrained stability of footings on slopes, *ASCE, International Journal of Geomechanics*, 11(5), 381-390. doi: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000092

38. Shields, D. H., Scott, J. D., Bauer, G. E., Deschemes, J. H., and Barsvary, A. K. (1977) Bearing capacity of foundations near slopes, *Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 1, pp. 715-720.

39. Shields, D., Chandler, N., and Garnier, J. (1990) Bearing capacity of foundations in slopes, *J. Geotech. Eng., ASCE*, 116, 3, 528-537. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1990)116:3(528)

40. Sloan, S.W. and Kleeman, P.W. (1995) Upper bound limit analysis using discontinuous velocity fields, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 127(1-4), 293–314. doi: 10.1016/0045-7825(95)00868-1

41. Sokolovski, V.V. (1960) Statics of granular media, *Butterworth Scientific Publications*, London.

42. Spencer, E. (1967) A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces, *Géotechnique* 17:1:11-26 doi: 10.1680/geot.1967.17.1.11

43. Stuart, J. G. (1962) Interference between foundations with special reference to surface footings in sand, *Geotechnique*, 12(1), 15–23.doi: 10.1680/geot.1962.12.1.15

44. Terzaghi, K. (1943) *Theoretical soil mechanics*, Wiley, New York.

45. Vesic, A. S. (1975) Bearing capacity of shallow foundations, *Foundation Engineering Hand-Book*, Winterkorn, H.F., and Fang, H.Y., Eds., Van Nostrant Reinhold Co., pp. 121-147.

46. West, J. M., and Stuart, J. G. (1965) Oblique loading resulting from interference between surface footings on sand, *Proc., 6th Int. Conf. On Soil Mechanics*, 2, Montreal, 214–217.