

Yumuşak Zeminler Üzerinde Dolgu İnşasında Temel Zemini Göçmesine Dayalı Tasarım Yaklaşımı

Zülal AKBAY ARAMA¹
S. Feyza ÇİNİCİOĞLU²

ÖZ

Yumuşak zeminlerin tipik özelliği düşük kayma mukavemetleri ve yüksek sıkışma yetenekleridir. Bu sebeple yumuşak zeminlere büyük yükler aktarmak zordur ve kolaylıkla göçme oluşabilir, bu durum özellikle dolgu inşaatlarında sorun yaratır. Bu çalışmada, söz konusu zorluğu bertaraf etme anlayışından ve özellikle de deniz dibi zeminler üzerine inşa edilen dolgularda ilk yükleme kademelerinde kontrollü bir göçmeye izin verilebilmesi yaklaşımından hareket ederek özgün bir dolgu tasarım yöntemi geliştirilmiştir. Yöntemin uygulanmasında limit denge hesaplarıyla yüksekliği belirli bir dolgunun yükleri altında çeşitli derinliklerdeki güvenlik seviyesi taranmakta ve göçme davranışı gösteren bölge tanımlanabilmektedir. Yöntem, farklı durumlar için uygulanmış ve sonuçlar sonlu elemanlar ve limit denge yöntemlerine dayanan iki ayrı ticari yazılımın sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Limit denge, limit analiz, yumuşak zeminler, güvenlik sayısı, dolgu.

ABSTRACT

An Approach of Embankment Design Based on Foundation Failure

In order to tackle the difficulties encountered in embankment design and construction, a new design method for embankments on soft clays is proposed in this paper. The method approaches to the problem with the philosophy of allowing controllable failures at small depths. Foundation soils are scanned through by applying a limit equilibrium approach specifically developed for the embankment problem and considering different slip planes at various depths. The purpose is to find the depth and the location of the failure region which gives a safety factor value of unity and also values of the safety factors which were mobilized at different depths under an embankment of considered height. Numerical applications of the

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 13 Şubat 2018 günü ulaşmıştır. 9 Ekim 2018 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 30 Kasım 2019 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://dx.doi.org/10.18400/tekderg.393971>

1 İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - zakbay@istanbul.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0001-8185-7329>

2 Özyeğin Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - feyzacinicioglu@gmail.com - <https://orcid.org/0000-0002-5380-0832>

method are compared with the results of two different commercial software which are developed with finite element and limit state methods.

Keywords: Limit equilibrium, limit analysis, soft soils, safety factor, embankment.

1. GİRİŞ

Yumuşak zeminler üzerinde yapılacak dolguların tasarımı, inşa sürecinde karşılaşılabilecek yoğun ve karmaşık “dolgu-temel zemini etkileşimi” problemlerinin öngörülmesindeki güçlükler veya sorunların tipik bir tasarım problemine göre oldukça farklı olması sebebiyle, özel tasarım yöntem ve süreçlerinin geliştirilmesini gerekli kılar [1]. Dolgu-temel zemini etkileşimi problemlerinde üst yapı dolgudur ve dolgunun da zeminlerden oluşması sebebiyle söz konusu iki ortam arasındaki etkileşim aynı tür malzemenin oluşan fakat farklı rijitlikteki ortamlar arasında oluşmaktadır. Böylece bu problemde üst yapı ve temel zemini arasında yük naklini bütünleştiren daha rijit bir yapısal eleman, örneğin radye bir temelin bulunmaması sebebiyle iki ortamı birlikte etkileyen bölgesel kayma düzlemleri kolaylıkla gelişebilmektedir [2, 3, 4].

Dolgu-temel zemini ilişkisinde dolgu ve temel zemininin göreceli mukavemet özelliklerinin bütünsel davranış ve özellikle de göçme davranışı üzerindeki etkisi büyüktür. Örneğin, dolgu zeminine nazaran temel zemininin daha rijit olduğu durumlarda kayma yüzeyi genellikle dolgu içerisinde kalmaktadır. Yumuşak zeminlerin üzerine oturan dolgu örneğinde ise temel zemininin mukavemetinin oldukça düşük ve deformasyon yeteneğinin fazla olması sebebiyle göçmeler temel zemini içinde oluşmaktadır. Dolgu inşasında kısa dönemde göçmeye karşı gözetilmesi gereken iki kriter söz konusudur. Bunlar stabilite ve taşıma gücü kriterleri olup dolgu ve temel zemininin birbirlerine göre göreceli rijitliklerine bağlı olarak ya dolgu stabilitesi genel stabilite mekanizması üzerinde egemendir veya yumuşak temel zemin stabilitesi genel stabilizeyi kontrol eder. Yumuşak zeminler üzerinde yapılacak dolgularda hemen daima birincil rol yumuşak zemine aittir veya diğer bir ifadeyle göçmeyi kontrol eden mekanizma yumuşak zemindeki hareketlenme veya büyük deplasmanlarla göçmeye gitme eğilimidir. Ayrıca da mühendislik prensiplerine uygun olarak tasarlanan dolgularda dolgu içi stabilitenin gerek boyutlandırma gerekse de geosentetik ve benzeri uygulamalarla sağlanması mümkündür ve neredeyse standart uygulama durumundadır. Bu sebeplerle yumuşak zeminlerin temel zemini tabakalanmasında yer aldığı durumlar özenle araştırılmalı ve tasarımda dolgu yüklemesinden etkilenen bütün zemin ortamı göz önünde bulundurulmalıdır [4, 5].

Dolgu yapılarında göçme davranışının incelenmesi amacı ile günümüze kadar yapılmış olan teorik ve sayısal modellemelerde saha çalışmalarında ve prototip kesitler üzerinde yapılan laboratuvar araştırmalarının tamamında yüzeysel temellerin göçme davranışlarından yola çıkılarak tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar yüzeysel temeller ile dolguların göçme davranışlarının kısmen birbirine benzemekte olduğunu destekler niteliktedir [6, 7, 8, 9, 10]. Bu çalışmalarda rijit radye temeller için üstyapıdan temel zeminlerine aktarılan yüklerin temelin altındaki her noktada aynı seviyede hissedildiği değerlendirilmiştir yapılmaktadır. Söz konusu çözümlerde, üst yapının ve radyenin zati ağırlığı sebebi ile temel zeminlerinin boğçalandığı ve temel altında temelin kendi genişliğini tarayacak kama şeklinde bir aktif gerilme bölgesinin meydana geldiği kabul edilebilmektedir. Ancak dolguların diğer

üstyapı sistemlerine göre çok daha fazla yer kaplaması, etkiledikleri alanın derinlik ve genişlik olarak çok büyük bölgelere yayılması, aynı zamanda bünyelerinde oluşan kayma etkilerinin giderilerek stabilitenin sağlanması amacıyla şevler ile desteklenerek inşa edilmeleri dolgular için oluşturulacak göçme mekanizmalarının farklı bir şekilde ele alınmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır [11]. Bu sebeplerle dolguların tasarımı basit bir temel taşıma gücü çözümlenmesinden çok daha karmaşık bir problemi oluşturmaktadır [12]. Problemin çözümlenmesinde doğrusal olmayan yükleme koşulları, bölgeden bölgeye değişen gerilme durumları, temel taşıma gücü problemi, şev stabilitesi, deformasyon dereceleri hep birlikte göz önüne alınarak bütünsel sistemin davranışı zemin-dolgu etkileşimi durumu göz önüne alınarak değerlendirilmelidir. Bilindiği gibi zemin problemlerinde yükleme seviyesi ve etkilenen bölgenin hacmine ilave olarak temel zemininin permeabilite özelliklerine bağlı olarak yükleme koşulları gerilme-deformasyon davranışı ve özellikle de göçme kontrolü bakımından son derece önemlidir. Düşük permeabilite özelliklerine sahip kil zeminler üzerinde yapılan hızlı yüklemeler yüksek seviyede ilave boşluk suyu basıncı üretimi ve bunun sonucunda da azalan efektif gerilmelerle zemin ortamını kolaylıkla göçme durumuna getirebilecektir. Bu sebeple büyük yükler aktaran dolguların inşasında tercih edilen yükleme şekli kademeli yükleme yöntemi olup, bu yöntem göçmeye sebep olmayacak seviyelerde yükleme ve bunu takip eden konsolidasyon dönemlerinden oluşmaktadır. Böylece birbirini takip eden drenajsız yükleme ve drenajlı konsolidasyon süreçleri ile yükleme sırasında azalan efektif gerilmeler konsolidasyon döneminde artmakta ve bu dönemde artan zemin mukavemetinden yararlanılarak göçmeye sebep olmadan istenilen seviyede dolgu inşa edilebilmektedir [13]. Bu tanımlama bilimsel olarak doğru bir idealizasyondan yola çıkmakta ve hesapsal olarak da her aşamada göçmeye sebep olmadan istenilen yükseklikte dolgu inşa edilmesini mümkün kılan yükleme ve konsolidasyon programları oluşturulabilmektedir [2, 12, 13]. Aslında uygulamada tam drenajsız ve tam drenajlı koşulların sağlanabilmesi oldukça zordur, yükleme sırasında koşullar noktasal farklılıklara ve zemin ortamının heterojenliğine bağlı olarak kısmen drenajlı olarak gerçekleşebilir. Buna rağmen yapılan kabuller gerçek davranışı öngörmek bakımından yeterli sonuçlar vermektedir. Diğer taraftan hesapsal olarak elde edilen yükleme programının arazide uygulama koşullarında birebir uygulanabilmesinde pratik kaygılarla örtüşmeyen zorluklar söz konusu olabilir. Örneğin çok yumuşak zeminler üzerinde yapılan dolguların ilk kademelerinde çok küçük yüklemeler altında bile yüzeysel ve bölgesel göçmeler oluşabilir, bu göçmenin oluşmaması için serilmesi gereken dolgu kalınlığı ise pratikte uygulanamayacak kadar ince elde edilebilir. Uygulamada ise tasarımda verilen yükleme değerlerini önemsemeyen bir yaklaşımla dolgu inşası gerçekleştirilir ve bunun sonucunda sıklıkla genel göçme problemleri ile karşılaşılabilir [4].

Bu makalede sunulan tasarım yöntemi ilk yükleme kademelerinde kontrollü göçmeye izin verecek bir yaklaşımla geliştirilmiştir. Burada geliştirilen “kontrollü göçme” ifadesi ile tanımlanan yaklaşım inşayı engellemeyecek boyutta göçmenin oluşmasına izin veren kontrollü bir uygulamadır. Bu yaklaşım özellikle deniz dibi veya nehir yataklarındaki çok yumuşak zemin ortamlarında inşa edilen dolguların ilk kademelerinde herhangi bir hesaba dayandırılmadan olağan bir şekilde uygulanmaktadır. Bu makalede söz konusu rutin yaklaşım tasarım sürecinin içerisine katılarak hesapsal bir tabana dayandırılmaktadır. Böylece yumuşak killer üzerine inşa edilecek dolguların tasarımında kullanılmak üzere sahadaki uygulamaların yaklaşımını yansıtabilen ve alt sınır plastisite teoremi ile limit denge yöntemlerinin birlikte kullanılmasına dayanan bütünlük bir tasarım

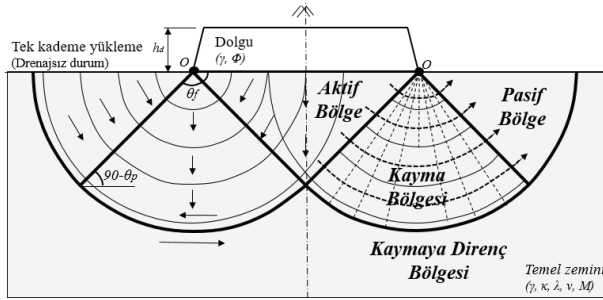
teknîği oluşturulmuştur. Önerilen yöntem için yüzeysel temellerin taşıma gücü mekanizmaları gözetilmekle birlikte [14, 15, 16, 17] arada rijit bir temelin bulunmadığı dolgu-temel zemini ilişkisinin bölgesel etkileri de önerilen yeni çözümlemeyle hesaba katılmıştır. Bu mekanizma modellerinin kurulmasında yazarların önceki çalışmalarında [11, 18] yapılmış olan sonlu elemanlar analizlerinden faydalanılarak tek bir formasyondan oluşan temel zeminleri üzerine inşa edilen belirli yükseklikteki dolgular için göçme derinliğinin tespiti ile ilgili bulgular da davranışın öngörülmesi bakımından değerlendirilmiştir. Kabul edilebilir sıklıktaki göçme derinliklerine sebep olan yüklemelerde yükleme programının devam koşulu bu seviyenin altındaki derinliklerdeki güvenlik seviyelerinin yeterliliğine bağlanmıştır. Yöntem tek kademeli dolgu inşasının yapılacağı durumlar için olduğu gibi çok kademeli inşa tasarımları bakımından da geçerlidir. Kademeli inşaat durumunda, kabul edilebilir seviyedeki göçmeyi takiben devam eden yükleme seviyeleri için bir sonraki aşamada ani yükleme durumunda göçmeye sebep olmayacak yük kademeleri hesaplanarak yöntem adımları oluşturulmuştur. Önerilen yöntem dolgu ile yüklenen temel zemini ortamında farklı davranış bölgelerindeki güvenlik seviyelerinin belirlenmesini sağlayabilmekte, limit denge programlarından farklı olarak gerilme hesaplarını kapsamakta ve böylece kademeli yükleme yöntemi ile birlikte kullanılabilir bir limit denge yöntemi olarak da mevcut limit denge yöntemlerinden daha kapsamlı bir nitelik kazanmaktadır.

2. MALZEME VE YÖNTEM

Yumuşak zeminler üzerinde inşa edilen dolguların göçme durumlarının analizi doğası gereği olarak göçme bakımından kritik olan drenajsız yükleme koşullarında yapılır. Dolgular için drenajsız yükleme durumu ya tek aşamada inşa edilen dolgular bakımından analiz edilir veya kademeli yükleme söz konusu ise inşa sırasındaki ani yükleme aşamaları için drenajsız şartlar geçerli kabul edilir. Yumuşak kil zeminler üzerinde yer alan dolguların ani yüklenmesi durumunda inşa edilebilecekleri maksimum yüksekliklerinde tasarlanması veya belirli bir yükseklikteki dolgu için temel zeminlerinin güvenlik seviyesinin belirlenebilmesi için geliştirilen yeni tasarım yönteminde, dolgunun temel genişliğine bağlı olarak temel zemini profili belli bir hassasiyet oranında eleman ağına bölünmektedir. Zemin yüzeyinden itibaren taranan her bir derinlik için drenajsız koşulları temsil eden daire parçası şeklindeki kayma yüzeylerinin çizilmesi ile bölgesel göçme mekanizmaları elde edilmektedir. Her bir bölgesel göçme mekanizmanın kendi içerisindeki statik dengesinin ve sitemin bütünsel moment eşitliğinin çözümlenmesi ile limit denge durumunu temsil eden yüzey bulunabilmektedir. Güvenlik düzeyini sınır konumuna getiren bu yüzey, ilgili dolgu yüklemesi sonucunda bütünsel sistemin gerilmelerinden etkilenen temel zemini alanını sınırlamaktadır yani yumuşak zemin içindeki göçme yüzeyini oluşturmaktadır. Önerilen yöntemde değişik bölgelerin statik dengesini ve değişen gerilme durumlarını elde edebilmek için eleman ağırları oluşturulmaktadır, ancak yöntem bir sonlu elemanlar yöntemi değildir. Tanımlanan gerilme dağılım alanı içerisinde yer alan bölgelerdeki güvenlik seviyelerinin elde edilebilmesi bakımından mevcut sonlu elemanlar çözümlemelerinden ayrılmaktadır. Aşağıda, geliştirilen yeni tasarım yönteminin uygulanma esasları yüksekliği belli olan ve kendi içerisinde stabil durumda olan bir dolgunun yumuşak zemin üzerine inşası için kurgulanarak sırası ile sunulmaktadır.

2.2. Genel Göçme Mekanizmasının Elde Edilmesi

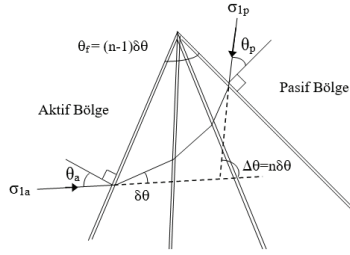
Başlangıç olarak belli bir yükseklikte (h_d), simetrik olarak inşa edileceği düşünülen dolgu kademesi için göçme mekanizmasının Şekil 1’de görüldüğü gibi topuktan başlayarak ilerlediği ve kayma derinliği arttıkça da göçme mekanizmasına katılan dairesel kayma düzleminin topuk merkezli olarak büyüyeceği öngörülmüştür. Dairesel kayma düzlemlerinin kapsadığı bölge genişledikçe göçme mekanizması derinleşmektedir ve sonuçta Şekil 1’de görülen ve dolgu simetri eksenine göre her iki tarafta gelişebilen genel göçme mekanizmasına ulaşılmaktadır. Ulaşılan genel göçme mekanizmasında, aktif bölge tabanı dolgu temel tabanını tamamen tarayacak şekilde üçgensel bir bölge oluşturmaktadır. Kayma bölgesi daire parçası şeklinde olup merkezi şev ucuna yerleştirilmiştir ve alt sınır limit analiz yönteminin gerilme yelpazeleri uygulamaları dâhilinde aktif-kayma-pasif bölge sınırları belirlenmektedir.



Şekil 1 - Geliştirilen dolgu tasarım yöntemi uygulamalarına esas olan göçme mekanizması [4]

Aynı zamanda, kayma düzleminin altında kalan zemin elemanlarında pasif direnç etkisi ile hareketi durdurmaya çalışan bir kayma yüzeyi direnci ortaya çıkmaktadır. Kayma düzlemi ile sınırlanan bu alan altında kalan bölge “kaymaya direnç bölgesi” olarak tanımlanabilmektedir. Limit analizlerin alt sınır yöntemi çözümlerinde gerilme bölgelerinin sınırlarını oluşturan süreksizlik düzlemlerinin konumları; yükleme koşullarına, zemin özelliklerine ve seçilen süreksizlik düzlemi sayısına bağlı olarak çizilebilmektedir [19]. Bu bağlamda, Şekil 1’de verilen genel göçme mekanizmasının elde edilmesinde kullanılacak geometrik sınırları tanımlayan koşullar ve eşitlikler aşağıda tanımlanmıştır.

Şekil 1’de verilen aktif ve pasif bölge arasında süreksiz kayma düzlemleri mevcuttur. Süreksizlik düzlemlerinin oluşturduğu gerilme yelpazesi içinde süreksizlik düzlemleri arasında kalan bölgelerdeki gerilme eksen dönüşleri büyük asal gerilmenin doğrultusundaki açılal dönme miktarı $\delta\theta$ olmak suretiyle bulunmaktadır ve bu duruma ait gerilme yelpazesi ve gerilme eksen dönüşleri Şekil 2’de gösterilmektedir.



Şekil 2 - Gerilme yelpazesindeki süreksiz kayma düzlemlerinin arasında kalan bölgelerdeki büyük asal gerilmenin doğrultusundaki açısız dönme [19]

Söz konusu dönme miktarları sebebi ile aktif bölgeden pasif bölgeye kadar oluşan toplam açısız dönme miktarı “ $\Delta\theta=n.\delta\theta$ ” ile hesaplanmakta olup n değeri kayma düzlemi sayısıdır. Kayma düzlemleri boyunca oluşan gerilme eksenini dönüşleri ile bu gerilmeler 90° döndürülerek pasif bölgeye doğru aktarılmaktadır. Gerilme yelpazesi boyunca gerilme değerlerinde meydana gelen değişim $\Delta s=n.\delta s$ ile hesaplanabilmektedir. Süreksizlik düzlemlerinin normaleri ile yaptıkları açılar

$$\theta_a=45^\circ+0.5 \delta\theta \quad (1)$$

$$\theta_p=45^\circ-0.5 \delta\theta \quad (2)$$

olmak üzere aralarındaki fark,

$$\delta\theta=\theta_a-\theta_p \quad (3)$$

olmaktadır. n adet süreksiz kayma düzlemini geçen gerilmedeki değişim ise

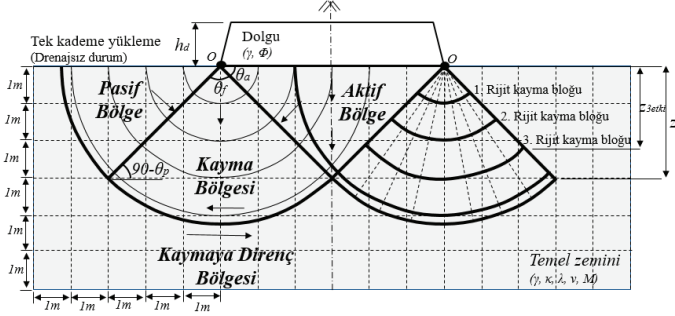
$$\Delta s=n (2. c_u. \sin \delta\theta) \quad (4)$$

ile hesaplanmaktadır [19].

2.3. Göçme Ağının Oluşturulması ile Limit Analiz-Denge Hesaplamaları

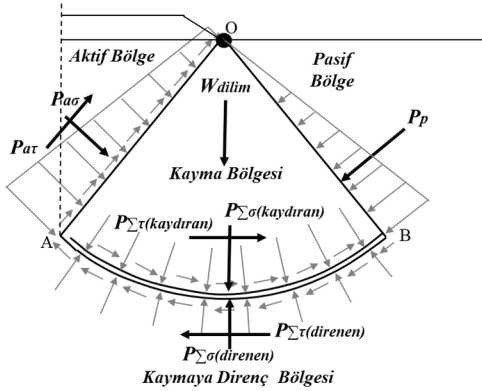
Temel zemini ortamı istenilen hassasiyet çerçevesinde düşey ve yatay çizgilerle oluşturulacak bir karelaj ile taranabilmektedir. Oluşturulan karelaj sayesinde (Şekil 3’de tanımlanan gösterimde karelaj 1x1 metre boyutlarında oluşturulmuştur) farklı derinlikler için drenajsız şartlarda göçme düzleminin daire parçaları ile tanımlanmasından hareket edilerek göçme mekanizması elde edilmiştir ve göçme mekanizmasını oluşturan gerilme yelpazelerine bağlı olarak gerilme eksenini dönüşlerini de esas alan plastik denge durumları aranmıştır. Plastik denge güvenlik sayısının 1’e eşit olduğu duruma karşı gelmektedir. Şekil 3’de görüldüğü gibi, topuk noktasından itibaren derine ve yataya doğru genişleyen yarım

daire şeklindeki göçme blokları kullanılarak yapılan çözümlemeye en küçük rijit kayma bloğundan başlanılmaktadır.



Şekil 3 - Göçme ağının oluşturulması [4]

Her bir rijit göçme bloğu üzerine etkiyen gerilmelerin statik dengesi, düşey ve yatay doğrultudaki kuvvetlerin ve şev ucuna göre alınan momentlerin dengesinin sağlanmasına bağlı olarak oluşturulmuştur. Yöntemde; göçme ağının hassasiyetine bağlı olarak tüm derinlikler için hesaplamalar tekrar edilmekte ve pasif kuvvetlerin aktif kuvvetlere eşit veya büyük olduğu durumlarda güvende kalındığı düşünülerek ($GS \geq 1$), bu durumu sağlayan derinlik söz konusu yüklemeye için oluşabilecek sınır göçme derinliğini temsil etmekte ve ilgili gerilme yelpazesi göçme yüzeyini oluşturmaktadır. Bu bağlamda, limit dengesi kurulacak temsili bir rijit kayma bloğu ve bu bloğa etkiyen kuvvetler Şekil 4’de verilmiştir. Şekil 4’de tanımlanan kuvvet denge sisteminin yeterliliği yatay-düşey kuvvet ve moment dengesine göre değerlendirilmektedir. Denge eşitliklerinin ilk sağlandığı yüzey ($GS=1$) söz konusu yüklemeye için göçme yüzeyi sınırı olarak kabul edilebilmektedir.



Şekil 4 - Rijit kayma bloğu üzerinde etkili olan gerilmeler ve kuvvet değerleri [4]

Şekil 4’de gösterilen kuvvetlerden P_{σ} , dolgu yüklemesi ve zeminin zati ağırlığı sebebi ile oluşan aktif normal kuvvet ve P_{τ} , dolgu yüklemesi ve zeminin zati ağırlığı sebebi ile oluşan

aktif kayma kuvveti şeklinde tanımlanmıştır. Dolgu yüklemesi sebebi ile temel zemini ortamında derinlik boyunca sönmülenerak aktarılan düşey gerilmeler en basit şekliyle 2/1 yöntemi veya alternatif bir yöntem kullanılarak elde edilebilmektedir. Her bir derinlik için hesaplanan düşey ve yatay gerilmeler Mohr daireleri yardımı ile rijit kayma bloğuna dik olan normal kuvvet ve rijit kayma bloğuna paralel etkiyen kayma kuvvetlerine dönüştürülerek hesaplanmaktadır.

Dolgu merkez ekseninden gerek yatay gerekse düşey düzlemlerde uzaklaşılması ile elde edilen ve rijit kayma bloğunun 1. süreksizlik düzlemini temsil eden OA düzlemi üzerinde yüklemeler sebebi ile normal gerilmeler ve kayma gerilmeleri oluşacağı açıktır.

Yüksekliği belli olan bir dolgu için aktif bölgeden başlanılarak gerilmelerin aktarılması ile elde edilen $P_{\Sigma\sigma(kaydırın)}$, kayma bölgesinde kayma yüzeyi sınırında oluşan göçmeyi tetikleyen normal kuvvet ve aynı şekilde $P_{\Sigma\tau(kaydırın)}$, göçmeyi tetikleyen kayma kuvvetidir ve aşağıdaki eşitlikler ile hesaplanır. Eşitliklerde a değeri aktif gerilmeleri, n yelpazede yer alan toplam süreksizlik düzlemi sayısını, L gerilmenin etkili olduğu düzlemin uzunluğunu ifade etmektedir.

$$P_{\Sigma\sigma(kaydırın)} = \sum_{i=2}^n \left[\sigma_{za(i)} \cdot L_{a(i-1)} \right] \quad (5)$$

$$P_{\Sigma\tau(kaydırın)} = \sum_{i=2}^n \left[\tau_{xa(i)} \cdot L_{a(i-1)} \right] \quad (6)$$

W_{dilim} parametresi ile tanımlanan rijit kayma bölgesi diliminde kalan zemin kütlelerinin ağırlığının hesabı klasik bir geometri işlemi olup

$$W_{dilim} = (\theta_f \cdot \pi \cdot z^2 \cdot \gamma_z) / 2\pi \quad (7)$$

eşitliği ile hesaplanır. Süreksizlik diliminin limit dengesine dayalı olarak oluşturulan bu yöntemde dolgu-temel zemini dayanımının yeterliliği, yukarıda tanımlanmış olan aktif kuvvetlerin ve kayma kuvvetlerinin toplamının, toplam pasif kuvvetler tarafından karşılanabilmesine bağlıdır. Diğer bir deyişle herhangi bir derinlikteki toplam pasif kuvvet değeri o zemin tarafından taşınabilecek olan limit dolgu yükünün miktarını belirler ve sadece zemin kayma dayanım parametrelerine bağlı olarak hesaplanır. Göçmeye karşı zeminin zati ağırlığı sebebi ile oluşan pasif direnç kuvvetleri bileşkesi P_p olup düşey pasif direnç kuvvetleri zemin yüzeyinde sıfır değerinde olup derinlik artımı ile orantılı bir şekilde artış gösterir. Rijit kayma diliminin OB yüzeyine dik olarak etkidiği varsayılan P_p kuvvetinin büyüklüğü, seçilen dilimin etki derinliğine bağlı bir şekilde pasif kayma yüzeyine dik normal gerilme dağılımını dikkate alarak kayma yüzeyi boyunca çarpılması ile elde edilmektedir.

Rijit kayma diliminde, kayma düzlemi $P_{\Sigma\sigma(kaydırın)}$ ve $P_{\Sigma\tau(kaydırın)}$ kuvvetlerinin etkisi altında göçmeye zorlanırken, bu kuvvetlere bir tepki olarak kayma düzlemi sınırında pasif gerilmeler tarafından da bir direnç sistemi mobilize olmakta ve direnen normal $P_{\Sigma\sigma(direnen)}$, kayma $P_{\Sigma\tau(direnen)}$ kuvvetlerini oluşturur. $P_{\Sigma\sigma(direnen)}$ ve $P_{\Sigma\tau(direnen)}$ kuvvetleri yine rijit kayma bloğu yelpazesi yardımı ile hesaplanabilmekte olup her iki durum için de geometrik boyutlandırılmaları aynıdır. Bu bağlamda rijit kayma bloğu için yatay doğrultudaki kuvvet

dengesi, düşey doğrultudaki kuvvet dengesi ve O noktasına göre moment dengeleri aşağıda verilen (8), (9), (10) eşitlikleriyle elde edilir.

$$P_{a\sigma(yatay)} + P_{at(yatay)} + P_{\Sigma\tau(kaydıran)} = P_{p(yatay)} + P_{\Sigma\tau(direnen)} \quad (8)$$

$$W_{dilim} + P_{a\sigma(düşey)} + P_{at(düşey)} + P_{\Sigma\sigma(kaydıran)} = P_{p(düşey)} + P_{\Sigma\sigma(direnen)} \quad (9)$$

$$(2P_p / 3) + P_{\Sigma\tau(direnen)} = (P_{a\sigma} / 2) + P_{\Sigma\tau(kaydıran)} \quad (10)$$

Kurulan bu limit denge eşitliklerine göre mekanizma ağı dâhilinde tanımlanan tüm derinlikler denetlenerek her üç denge eşitliği için de geçmeye ulaşılmayan ($GS= 1.0$) derinlik değeri söz konusu yüklenme koşulu için geçme anındaki gerilme dağılım bölgesini oluşturacaktır. Böylece yöntem, yüklenme koşullarından etkilenen tüm temel zemini ortamını gerilmeler açısından tamamen tarayabilmektedir. Bunun yanı sıra denge eşitliklerinde kullanılan kuvvetlerin oranları şeklinde tanımlanan güvenlik sayıları ile temel zemini ortamının tamamının bölgesel güvenlik değerleri elde edilebilmektedir. Oldukça kolay bir geometriden ve bölgesel güvenlik değerlerinden yola çıkılarak elde edilen bu limit denge hesabı ile lokal göçmelerden genel geçme davranışı değerlendirmelerine varılabilmektedir. Aşağıdaki eşitliklerle verilen güvenlik değerlerinden minimum değerde olanı hesap yapılan rijit kayma bloğundaki güvenlik düzeyini göstermektedir.

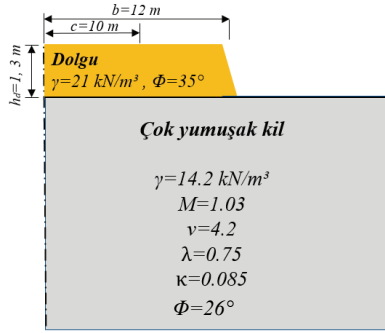
$$GS_{YD} = \frac{P_{p(yatay)} + P_{\Sigma\tau(direnen)}}{P_{a\sigma(yatay)} + P_{at(yatay)} + P_{\Sigma\tau(kaydıran)}} \quad (11)$$

$$GS_{DD} = \frac{P_{p(düşey)} + P_{\Sigma\sigma(direnen)}}{W_{dilim} + P_{a\sigma(düşey)} + P_{at(düşey)} + P_{\Sigma\sigma(kaydıran)}} \quad (12)$$

$$GS_{MD} = \frac{P_p \frac{2}{3} + P_{\Sigma\tau(direnen)}}{P_{a\sigma} \cdot \frac{1}{2} + P_{\Sigma\tau(kaydıran)}} \quad (13)$$

3. YÖNTEMİN SAYISAL UYGULAMALARI VE DOĞRULANMASI

Önerilen teorik yöntemin kullanılabilirliğini değerlendirmek amacıyla sayısal uygulamalar yapılmış ve elde edilen sonuçlar geçerliliği kabul edilmiş yöntemlerin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu amaçla seçilen uygulama profili Şekil 5'de verilmiştir. Şekilde, çok yumuşak kil zemin için tanımlanan M parametresi kritik durum çizgisinin sabit hacim düzlemi üzerindeki izdüşümünü, ν özgül hacmi, λ sıkışma indeksini, κ tekrar sıkışma eğrisinin eğimini temsil etmektedir.



Şekil 5 - Seçilen uygulama profilinin geoteknik ve geometrik özellikleri [4]

Analizlerde inşa edilen dolgunun birim hacim ağırlığı 21 kN/m^3 , kayma mukavemeti açısı ise 35° olarak kullanılmıştır. Dolgunun B temel taban genişliği 24 metre, C platform genişliği ise 20 metre olarak seçilmiştir. Dolgu yüksekliği h_d $1,3$ metre alınarak sırası ile analizler tekrarlanmıştır. Temel genişliğinin göçme mekanizması yerleşimini, göçme mekanizması yerleşiminin rijit kayma bloğunun konumunu ve rijit kayma bloğunun konumunun da drenajsız kayma mukavemetinin hesaplanacağı derinliği değiştirmesi sebebi ile yöntem kapsamında yapılacak ilk iş, göçme ağının çizilmesi ile kayma bloklarının geometrik boyutlarının belirlenmesidir. Göçme mekanizmasının çizilmesinde plastisite teorisinin alt sınır yaklaşımları gerilme yelpazeleri çözümlemelerinden faydalanılmış olup, $n=9$ adet süreksizlik düzlemine sahip olan ve elemanları ilave gerilmelerin etkisi ile 90° dönüş yapacağı yelpazenin tepe açısı $\Delta\theta=90^\circ$ alınarak;

$$\theta_f = (n-1) \cdot \delta\theta = \left[\frac{n-1}{n} \right] \cdot \Delta\theta = (9-1) \cdot \delta\theta = \left[\frac{9-1}{9} \right] \cdot 90^\circ = 80^\circ \quad (14)$$

Yelpaze içerisindeki iki süreksizlik düzlemi arasındaki $\delta\theta$ açısal dönme miktarı ise

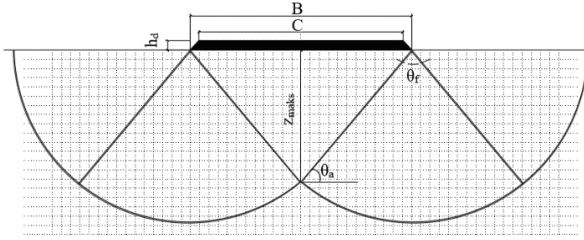
$$\delta\theta = \frac{\theta_f}{(n-1)} = \frac{80^\circ}{(9-1)} = 10^\circ \quad (15)$$

olarak hesaplanabilmektedir. Kayma bölgesini aktif ve pasif bölgelerinden ayıran süreksizlik düzlemlerinin normaleri ile yaptıkları açılar θ_a ve θ_p olmak üzere $\delta\theta = \theta_a - \theta_p$ olmaktadır. Drenajsız koşullarda yapılan bu analiz için,

$$\theta_a = \left(45^\circ + \frac{1}{2} \cdot \delta\theta \right) = \left(45^\circ + \frac{1}{2} \cdot 10^\circ \right) = 50^\circ \quad (16)$$

$$\theta_p = \left(45^\circ - \frac{1}{2} \cdot \delta\theta \right) = \left(45^\circ - \frac{1}{2} \cdot 10^\circ \right) = 40^\circ \quad (17)$$

Hesaplanarak çizilen göçme mekanizması ve sonlu eleman ağı Şekil 6'da verilmiştir.

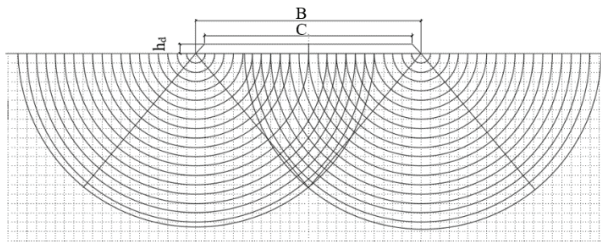


Şekil 6 - Geliştirilen yeni yöntemle çizilen göçme mekanizması ve sonlu eleman ağı [4]

Değişik derinliklerdeki göçme düzlemlerinin çizilmesi amacı ile yöntem dâhilinde bir metre hassasiyetinde karelej kullanılmıştır. Karelej uygulaması sıklığının artırılması çözümlene hassasiyetini artırarak gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edilmesini sağlayabilmektedir. Çizilen genel göçme mekanizmasında, aktif bölge tabanı dolgu temel tabanını tamamen tarayacak şekilde üçgensel bir bölge oluşturmaktadır. Kayma bölgesi daire parçası şeklinde olup merkezi şev ucuna yerleştirilmiştir ve plastisite teorisinin alt sınır yöntemi gerilme yelpazeleri uygulamaları dâhilinde aktif-kayma-pasif bölge sınırları belirlenmiştir.

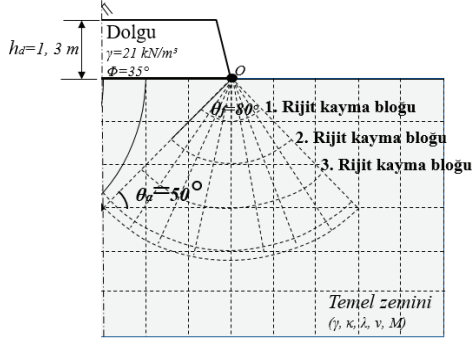
Göçme ağının çizilmesine şev ucundan başlanmış ve şevin topuğu her bir kayma dairesinin merkezi olarak belirlenmiş ve metrik karelej yardımı ile yarı dairesel kayma düzlemleri genel göçme mekanizmasının içerisine entegre edilmiştir. Birim metre hassasiyetle çizilen eleman ağına bağlı oluşturulan göçme ağı Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 8'de ise simetrik dolgunun yarı kesiti üzerinde rijit kayma blokları ve bloklara ait başlangıç ve son kayma düzlemlerinin konumunun belirlenmesini sağlayan açısız değerler verilmiştir.

Uygulama sahalarında temel zemini profilinin tamamen yumuşak zeminlerden oluşması durumuna genellikle bataklıklarda veya deniz tabanlarında rastlanılmakta olup bu tür formasyonların drenajsız yüklenmeleri durumunda kullanılan dayanım parametresi drenajsız kayma mukavemeti olmaktadır. Yumuşak kil zeminler için drenajsız kayma mukavemeti değeri laboratuvar ve arazide birçok farklı yöntem ve deney ile belirlenebilmektedir. Ancak yerinde ölçülen drenajsız kayma mukavemeti değerleri laboratuvar uygulamalarında elde edilen değerlere göre daha güvenilirdir.



Şekil 7 - 1 metre hassasiyetle çizilen eleman ağına bağlı olarak elde edilen göçme ağı [4]

Drenajsız kayma mukavemeti parametresine dair literatürdeki değerlendirmeler incelendiğinde iki önemli durum ortaya çıkmaktadır. Bunlardan ilki yumuşak zeminlerin mukavemetinin derinlikle arttığı [20] ikincisi ise dolgu altı temel zemininde yumuşak zemin üzerinde belirli bir kalınlıkta kabuk olduğu [21] şeklindedir.



Şekil 8 - Göçme ağının oluşturulması ile rijit kayma bloklarının belirlenmesi [4]

Uygulama sahalarında yumuşak zeminlerin temel zemin formasyonunun bir parçasını oluşturduğu durumlar bu iki şekilde kendini gösterebilmektedir. Bu sebeplerle örnek kapsamında değerlendirilen homojen yumuşak kil zeminlerinin, üzerlerindeki jeolojik yük ile artacak bir drenajsız kayma mukavemeti değişim fonksiyonuna sahip olduğu düşünülmüştür.

Drenajsız kayma mukavemeti değişim fonksiyonu ise kritik durum zemin mekaniği ilkelerinden faydalanılarak ulaşılan efektif gerilme durumunun bir fonksiyonu olarak elde edilmiştir (Tablo 1). Derinlikle doğrusal olarak artım gösteren drenajsız kayma mukavemetinin değişim fonksiyonu Şekil 9'da gösterilmiştir.

Normal konsolide kil bir zemin için drenajsız gerilme izi takip edilerek ulaşılan drenajsız kayma mukavemeti değeri yüzeye en yakın nokta için hesaplanmıştır. Daha alt seviyeler için de bu değerden başlanılarak derinlikle artan drenajsız kayma mukavemeti fonksiyonu uygulanmıştır.

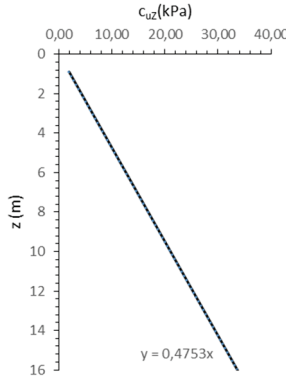
Elde edilen drenajsız kayma mukavemeti değerlerine göre, metrik karelaj kapsamındaki her bir derinlik için Eşitlik 4'ten faydalanılarak temel zemin ortamına iletilen ve derinlik boyunca dağılan gerilme değerleri hesaplanmakta ve Eşitlik 5, 6, 7 yardımı ile de rijit kayma bloğu üzerine etkileyen kuvvetler belirlenebilmektedir.

Eşitlik 9, 10, 11'de verilen limit denge eşitlikleri her bir rijit kayma bloğu için ayrı ayrı yazılarak hesaplamalara, istenilen hassasiyet oranına bağlı olarak çizilmiş karelajda dolgu topuğuna en yakın olan göçme bloğundan başlanılmaktadır. Bu bağlamda 1 metrelik dolgunun yüklenmesi durumunda temel zemin ortamında 1 metre derinlik için hesaplanan kuvvetler ve değerleri Şekil 10'da verilmiştir. Hesaplanan kuvvet değerlerine bağlı Eşitlik 12, 13, 14'ün yazılması sonucunda güvenlik sayısı, yatay kuvvetlerin dengesine göre 0.61, düşey kuvvetlerin dengesine göre 0.67 ve moment dengesine göre 0.69 olarak elde edilmiştir.

Bu değerlere göre 1. rijit kayma bloğunda minimum güvenliği veren denge yatay kuvvetlerin dengesi olup rijit kayma bloğunun güvenlik sayısı 0.61 olarak belirlenebilmektedir.

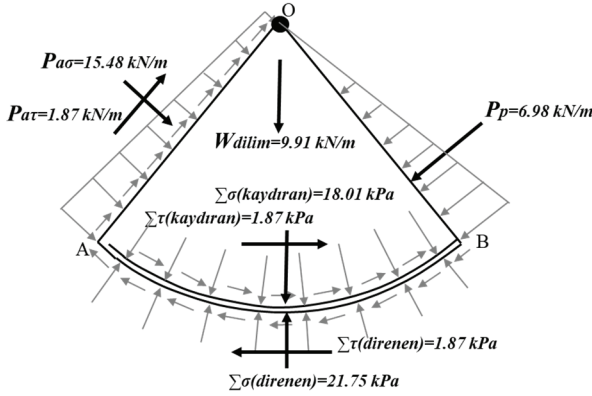
Tablo 1 - Drenajsız kayma mukavemetinin derinlikle değişimi [4]

z(m)	Z(m)	σ_v (kPa)	σ'_v (kPa)	p'(kPa)	q'(kPa)	p_0 '(kPa)	v_c	v_0	N	Γ	p_f (kPa)	q_f (kPa)	c_{uz} (kPa)
1	0,89	3,91	2,19	2,77	1,71	3,77	4,29	4,17	5,17	5,17	3,64	3,74	1,87
2	1,78	7,81	4,39	5,53	3,43	7,53	4,35	4,17	5,69	5,69	7,27	7,49	3,74
3	2,66	11,68	6,56	8,26	5,12	11,25	4,38	4,17	5,99	5,99	10,87	11,19	5,60
4	3,55	15,58	8,75	11,03	6,83	15,02	4,40	4,17	6,21	6,21	14,50	14,94	7,47
5	4,44	19,49	10,95	13,80	8,54	18,78	4,42	4,17	6,37	6,37	18,14	18,68	9,34
6	5,33	23,40	13,14	16,56	10,26	22,55	4,44	4,17	6,51	6,51	21,77	22,43	11,21
7	6,22	27,31	15,34	19,33	11,97	26,31	4,45	4,17	6,63	6,63	25,41	26,17	13,09
8	7,11	31,21	17,53	22,09	13,68	30,08	4,46	4,17	6,73	6,73	29,05	29,92	14,96
9	7,99	35,08	19,70	24,83	15,38	33,80	4,47	4,17	6,81	6,81	32,64	33,62	16,81
10	8,88	38,98	21,89	27,59	17,09	37,57	4,48	4,17	6,89	6,89	36,28	37,36	18,68
11	9,77	42,89	24,09	30,36	18,80	41,33	4,49	4,17	6,97	6,97	39,91	41,11	20,55
12	10,66	46,80	26,28	33,12	20,51	45,10	4,50	4,17	7,03	7,03	43,55	44,85	22,43
13	11,55	50,70	28,48	35,89	22,23	48,86	4,50	4,17	7,09	7,09	47,18	48,60	24,30
14	12,43	54,57	30,65	38,62	23,92	52,59	4,51	4,17	7,15	7,15	50,78	52,30	26,15
15	13,32	58,47	32,84	41,39	25,63	56,35	4,52	4,17	7,20	7,20	54,41	56,05	28,02
16	14,21	62,38	35,04	44,15	27,35	60,12	4,52	4,17	7,25	7,25	58,05	59,79	29,90
17	15,10	66,29	37,23	46,92	29,06	63,88	4,53	4,17	7,29	7,29	61,69	63,54	31,77
18	15,99	70,20	39,42	49,68	30,77	67,65	4,53	4,17	7,33	7,33	65,32	67,28	33,64
19	16,88	74,10	41,62	52,45	32,48	71,41	4,54	4,17	7,38	7,38	68,96	71,03	35,51
20	17,76	77,97	43,79	55,18	34,18	75,14	4,54	4,17	7,41	7,41	72,55	74,73	37,36



Şekil 9 - Drenajsız kayma mukavemetinin derinlikle değişimi [4]

Yöntemin uygulanması sırasında, yöntem bölümünde özetlenmiş olan hesap aşamalarında görüldüğü gibi, taranan temel zemini derinliğinin sonlu eleman ağındaki ikinci derinlikle değiştirilmesi durumu için hesaplar tekrarlanır. Bu hesaplama ritmine göre farklı derinlikler için elde edilen güvenlik sayıları Çizelge 2'de verilmiştir.

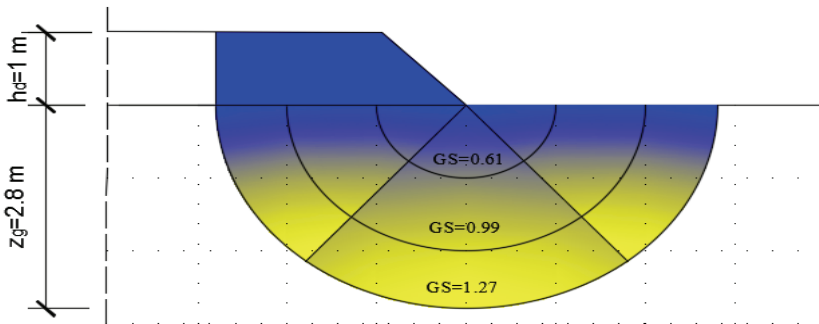


Şekil 10 - Birinci rijit kayma bloğuna etkien kuvvetler [4]

Çizelge 2 - Bir metre dolgu yüksekliği için farklı derinliklerde elde edilen güvenlik sayısı değerleri [4]

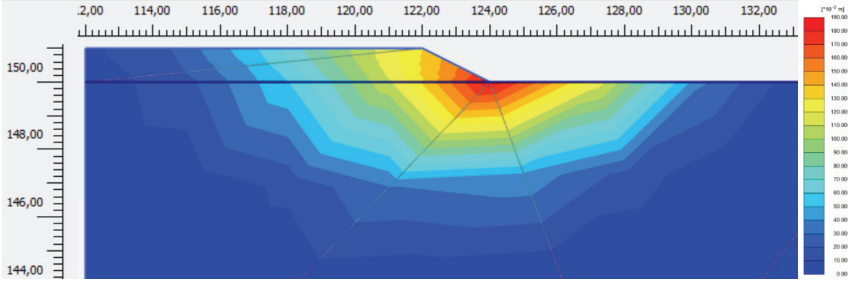
Derinlik (m)	Güvenlik sayısı		
	Yatay denge	Düsey denge	Moment dengesi
1	0.61	0.67	0.69
2	0.89	1.05	1.12
2.8	1.39	1.27	1.57

Örnekte, bir metre yüksekliğindeki dolgu yüklemesinin homojen yumuşak kil zeminler üzerine yapılması durumunda oluşacak olan göçmenin derinliği 2.8 metre olarak belirlenmiştir. Hesaplanan bu değerlere göre mekanizma ağı üzerinde güvenlik seviyeleri gösterilerek (Şekil 11) sistemin göçme davranışı yorumlanabilmektedir.



Şekil 11 - 1 metrelik dolgu yüklemesinde geliştirilen yöntem ile elde edilen güvenlik ağı [4]

Geliştirilen yeni yöntemin kullanılabilirliğinin denetlenmesi amacı ile öngörülen problem, sonlu elemanlar mantığı ile çalışan Plaxis 2D.2011 programı ile de analiz edilmiştir. Analizlerde dolgu malzemesi ve yumuşak zemin ortamı Mohr Coulomb malzeme modeli ile tanımlanmıştır. Yapılan analizlerin sonucunda, yumuşak zemin temel ortamı için bir metre yükseklikte inşa edilen dolgunun zemin yapısını geçerteceği görülmüştür. Göçmenin etkilediği temel zemini ortamı Şekil 12’de görülen deformasyon dağılımı değerlendirilerek 2.8 metre civarında elde edilmiştir.



Şekil 12 - 1 metrelik dolgu yüklemesinde Plaxis programından elde edilen göçme mekanizması [4]

Farklı bir yük değeri ile yöntemin işleyişini kontrol etmek amacıyla, dolgu yüksekliğinin 3 metreye çıkarılması durumunda geliştirilen yeni yöntemle yapılan çözümler sonucunda elde edilen güvenlik sayısı değerleri Çizelge 3’de sunulmaktadır.

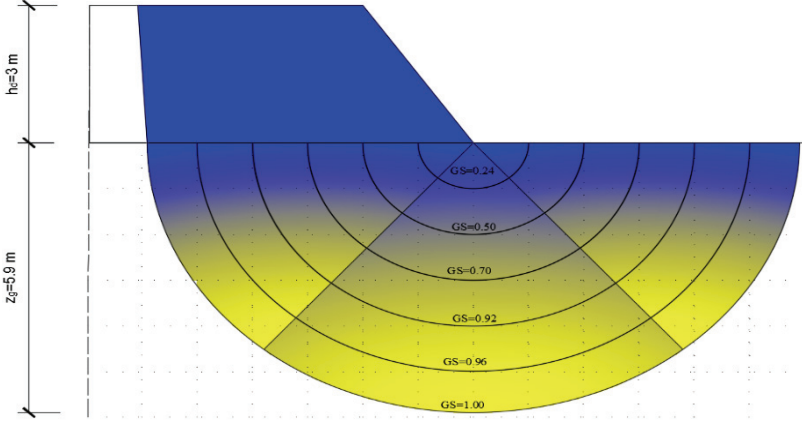
Çizelge 3 - Dolgu yüksekliğinin 3 metre olması durumunda temel zemini profilinde birim derinlik için elde edilen güvenlik sayısı değerleri [4]

hd=3 m	
z (m)	GS
1,0	0,24
2,0	0,50
3,0	0,70
4,0	0,92
5,0	0,96
5,9	1,00

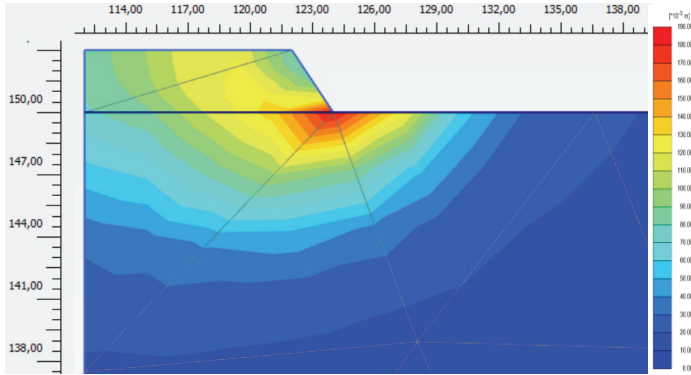
Üç metrelik dolgu için sunulan yöntemle elde edilen göçme açısı Şekil 13’de görsel olarak sunulmaktadır.

Genel kabul görmüş bir sonlu elemanlar yazılımı olan Plaxis analizleri ile elde edilen göçme açısı ise Şekil 14’de görülmektedir. Sunulan yöntemle güvenlik sayısı değeri 5.9 metre derinlikte tam olarak 1 iken Plaxis hesaplamaları sonucunda elde edilen göçme derinliği deformasyon dağılım alanları incelendiğinde 5.5 metre civarında değerlendirilebilir. Elde

edilen sonuçların benzerliği, sunulan yöntemle hesaplanan sonuçların güvenilirliği bakımından olumlu bir bulgudur.



Şekil 13 - 3 metre dolgu yüklemesinde geliştirilen yöntem ile elde edilen güvenlik ağı [4]



Şekil 14 - 3 metrelik dolgu yüklemesinde Plaxis programından elde edilen göçme mekanizması [4]

Çizelge 4 - Geliştirilen yöntem, Plaxis, Slope/W programları elde edilen nihai göçme derinliği değerleri [4]

h_d (m)	Geliştirilen Yöntem	Göçme Derinliği (m)	
		Plaxis 2D.2011	Slope/W (Morgestern Price)
1	2.8	2.8	3
3	5.9	5.5	5.9

Çalışma kapsamında yapılan analizlerin kontrolü amacı ile limit denge yöntemi ile çalışan Slope W programı da kullanılmış olup 1 ve 3 metre dolgu yükseklikleri için yapılan analizlerin sonuçları karşılaştırmalı bir şekilde Çizelge 4'te sunulmuştur.

Çizelge 4'deki karşılaştırmanın sonuçları geliştirilen yöntemin geçerli ve uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Göçmenin genel mekanizması ve dolgu yüksekliğine bağlı kayma yüzeyi derinliği bakımından çok benzer sonuçlar elde edilmiştir. Diğer taraftan gerilme hesaplarını da kapsamı yönü ile önerilen yöntem limit denge ve sonlu elemanlar analizleri arasında bir yerde konumlandığı ifade edilebilir. Diğer bir deyişle gerilme durumlarını takip etmesi sebebi ile mevcut limit denge yöntemlerinde olduğu gibi göçme düzeyine ulaşıldığı seviyede kesintiye uğramamaktadır. Sonlu elemanlardan farklı olarak da bölgesel ve noktasal güvenlik seviyeleri tespit edilebilir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, limit analiz ve limit denge yöntemlerinin mantığı kullanılarak dolgu yüklemeleri etkisi altındaki temel zeminlerinin drenajsız koşullardaki göçme davranışının yorumlanması için yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Önerilen yöntemin mevcut limit denge tasarım yöntemlerine göre özgün yanını temel zemini ortamının gerilme durumunun ve gerilmeler etkisi altındaki elemansal davranışının her noktada taranarak güvenlik seviyelerini belirleyen bir ağız tanımlanabilmesi oluşturmaktadır. Bölgesel güvenlik durumlarının değerlendirilmesi sonucunda göçme davranışına ne kadarlık bir temel zemini bölgesinin katıldığı belirlenebilmektedir. Önerilen yöntem ile belli bir yükseklikte inşa edilen dolgu için temel zemininde yükmeden etkilenen bölge sınırları belirlenebildiği gibi tersi bir bakış açısı da kullanılabilen olup belirli bir temel zemini profili üzerine drenajsız koşullarda inşa edilebilecek olan maksimum dolgu yüksekliği de elde edilebilmektedir. Yöntem, kademeli yükleme sisteminin uygulandığı dolgu projelendirmelerinde de gerilmeleri hesaba katabilmesi sebebi ile uygulanabilir niteliktedir. Ayrıca yöntem, dörtgen bir temele sahip yapı yüklemesi etkisi altındaki her tür temel zemini için uygulanabilir nitelikte olup bu makale kapsamında sadece dolgu yüklemeleri etkisi altındaki yumuşak homojen kil temel zemini profilleri için kullanılmıştır. Limit analiz ve denge yöntemlerinin bir bileşimi şeklinde uygulanan yöntemin doğrulanması amacı ile farklı dolgu yüklemelerinin temel zemini ortamında oluşturduğu gerilme dağılım bölgeleri ve göçme derinlikleri bildiri dâhilinde seçilen bazı temel zemini profilleri üzerinde irdelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, bir sonlu elemanlar yazılımı olan Plaxis ve limit denge yazılımı olan Slope/W programlarında yapılan analizlerle karşılaştırılmış olup geliştirilen yöntem ile sayısal program sonuçlarının birbirine yakın olduğunu görülmüştür.

Semboller

- b Dolgu temel taban genişliği
- c_u Drenajsız kayma mukavemeti
- GS Güvenlik sayısı
- h_d Dolgu yüksekliği

- κ Tekrar sıkışma eğrisinin eğimi
M Kritik durum çizgisinin sabit hacim düzlemi üzerindeki izdüşümü
n Süreksizlik düzlemi sayısı
 P_a Aktif zemin kuvveti
 P_p Pasif zemin direnci
 γ Zeminin birim hacim ağırlığı
 ϕ Zeminin kayma mukavemeti açısı
 σ_1 Büyük asal gerilme
 σ_3 Küçük asal gerilme
 $\delta\theta$ Kayma düzlemleri arasındaki açı
 θ_f Süreksizlik yelpazesinin tepe açısı
 $\Delta\theta$ Büyük asal gerilmeler arasındaki toplam dönme açısı
 v Özgül hacim
 λ Normal konsolidasyon çizgisinin eğimi
z Derinlik

Teşekkür

Bu çalışma, İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (Proje no: 20589, 26324) ve TÜBİTAK BİDEB 2211A Yurtiçi Doktora Burs Programı ile desteklenmiştir. Destek için teşekkürlerimizi sunarız.

Kaynaklar

- [1] Çinicioğlu, S.F., Toğrol, E., Embankment Design on Soft Clays, American Society of Civil Engineers Journal of Geotechnical Engineering, Vol 117, 1991.
- [2] Öztoprak, S., Yüklenmiş Zeminlerde Gerilme-Deformasyon Davranışının Teorik Tanımlanması ve Modellenmesi, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2002.
- [3] Yılmaz, G., Yumuşak Temelli Toprak Dolguların Tasarımı, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1994.
- [4] Akbay Arama, Z., Yumuşak Zeminler Üzerinde Yer Alan Genişletilmiş Yol Dolgularının Teorik ve Nümerik Analizi, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2016.

- [5] Öser, C. and Cinicioğlu. S.F., Embankment Design Method Combining Limit-State Approach with Stress-Path Application International Journal of Geomechanics, ASCE, Vol.17, 2017.
- [6] Chirapuntu, S., Duncan, J. M., The Role of Fill in the Stability of Embankments on Soft Clay Foundations, Geotechnical Engineering Report No TE 75-3, University of California, Berkeley, 1975.
- [7] Chen, W.F., Limit Analysis and Soil Plasticity, Elsevier Scientific Publishing Company, New York, 1975.
- [8] Chapuis, R.P., New stability method for embankments on clay foundations, Canadian geotechnical journal, 19, 44-48, 1982.
- [9] Ladd, C.C., 1991, Stability evaluation during staged construction, Journal of geotechnical engineering, 117, 540-615
- [10] Michalowski, R.L., 2002, Limit analysis of weak layers under embankments, Soils and foundations, 33, 155-168.
- [11] Akbay Arama, Z., Çinicioğlu, S. F., Tabakalanmış Killi Zeminler Üzerinde Yer Alan Dolgularda Kritik Yükseklik, 6. Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana, 2015.
- [12] Yaramış, M., Yatay yükler altındaki destek sistemlerinde yumuşak zemin-dolgu ve kazık etkileşimi, İstanbul Üniversitesi, Fen bilimleri enstitüsü, İstanbul 2017.
- [13] Çinicioğlu, S.F., Toğrol, E., Yüklenmiş Yumuşak Zeminlerin Davranışı Üzerine, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 5. Ulusal Kongresi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, 36-46, 1994.
- [14] Terzaghi, K., Theoretical soil mechanics, John Wiley and Sons, New York, 1943.
- [15] Meyerhof, G.G., The ultimate bearing capacity of foundation, Geotechnique, 2, 301-332, 1951.
- [16] Meyerhof, G.G., Some recent research on the bearing capacity of foundations, Canadian geotechnical journal, 1, 16-26, 1963.
- [17] Balla, A., Bearing Capacity of Foundations Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 88, 5, 13-36, 1962.
- [18] Akbay Arama, Z., Çinicioğlu, S.F., Dolgu Zemin Etkileşiminde Malzeme Modeli Etkisi, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Vol 31, 35-50, 2016.
- [19] Atkinson, J.H., Foundations and Slopes: An Introduction to Applications of Critical State Soil Mechanics, Mc Graw-Hill Book Company, 1981.
- [20] Davis, E.H., Booker, J.R., The effect of increasing strength with depth on the bearing capacity of clays, Geotechnique, 23, 551-563, 1973.
- [21] Mandel, J., Salençon, J., Force portante d'un sol sur une assise rigide (étude théorique), Geotechnique, 22, 79-93, 1972.

