

Şev stabilitesinin iki ve üç boyutlu modeller ile incelenmesi

Taha TAŞKIRAN^{*1}, Veysel Süleyman YAVUZ², Mehmet Salih KESKİN³

¹Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 21280, Diyarbakır

²Batman Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 72100, Batman

³Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 21280, Diyarbakır

Makale Gönderme Tarihi: 29.07.2012

Makale Kabul Tarihi: 09.03.2015

Öz

Bu çalışmada, sonlu elemanlar yönteminin, şev stabilitesi problemlerinin analizinde uygulanabilirliği iki ve üç boyutlu modeller kullanılarak araştırılmıştır. Çalışmada, şevlerin stabilitesinin sonlu elemanlar yöntemi ile analizinde kullanılan mukavemet azaltma tekniğinden bahsedilmiş ve kumlu bir şev örneği ele alınarak göçmeye karşı güvenlik sayısı, mukavemet azaltma tekniği kullanılarak elde edilmiştir. Çalışmada iki ve üç boyutlu modellemenin sonlu elemanlar analizi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ayrıca, limit denge yöntemi kullanılarak şev stabilite analizleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen güvenlik sayıları sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çalışma sonunda, üç boyutlu şev modeliyle elde edilen güvenlik sayısı değerlerinin iki boyutlu durumda elde edilen değerden daha büyük olduğu ve mukavemet azaltma tekniği ile elde edilen güvenlik sayısı değerlerinin, limit denge yöntemleri ile elde edilen güvenlik sayısı değerleriyle uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Şev stabilitesi, Sonlu elemanlar yöntemi, Limit denge yöntemi, Güvenlik sayısı

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Taha TAŞKIRAN. taha@dicle.edu.tr; Tel: (412) 241 10 00 (3506)

Giriş

Şev genel anlamda “yatay ya da mevcut arazi yüzeyi ile belirli bir açı yapan kitle” olarak tarif edilebilir (Cernica, 1995). Şev stabilitesi analizleri geoteknik mühendisliğinin önemli araştırma konularından biridir. Bunun nedeni, şev stabilite bozukluklarının depremler, sel baskınları gibi doğal afetlere benzer olarak ciddi can ve mal kayıplarına yol açabilmesidir. Doğal ve yapay tüm şevlerin gerek kendi ağırlıkları, gerekse uygulanan yüklerin etkisi altında göçmeye karşı stabilite, elastik teoriye dayanan limit denge yöntemleriyle analiz edilmektedir (İsveç Dilim, Bishop, Janbu, Morgenstern ve Price, Spencer vb). Bu yöntemler arasında uygulamada bazı farklılıklar olmasına rağmen, ortak özellik, bilinen veya kabul edilen bir kritik kayma yüzeyinde, kayma kütesinin dengesinin araştırılmasıdır.

Şevlerin analizi halen klasik limit denge yöntemleri ile gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemlerde, dairesel veya kama tipi potansiyel bir kayma yüzeyi kabulü yapıp, kaydıran ve direnen momentler ya da kuvvetler arasındaki ilişki kullanılarak şevin güvenlik sayısı belirlenmektedir. Şevlerin limit denge yöntemleri ile analizine yönelik literatürde bir çok çalışma mevcuttur (Duncan ve Wright, 2005). Sıklıkla kullanılmasına rağmen, limit denge yaklaşımının önemli eksiklikleri bulunmaktadır. Yöntemde, kayma yüzeyinin şekli ve yeri, kayan kütlelerin davranışı ile ilgili kabuller yapılmaktadır. Ayrıca bu yöntemlerde gerilme-şekil değiştirme ilişkisi gözönüne alınmamakta ve deplasmanlar hesaplanamamaktadır.

Bilgisayar kullanımının, tüm alanlarda olduğu gibi, geoteknik mühendisliğinde de yaygınlaşması ile şev stabilite analizlerinde sonlu elemanlar yöntemi artan bir şekilde kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yaklaşımının diğer geleneksel limit denge yöntemlerine göre avantajı, şevin göçme yüzeyinin yeri ve şekli, dilimlerin şiddeti ve yönleri ile ilgili bir kabule ihtiyaç duyulmamasıdır. Sonlu elemanlar yöntemi, karmaşık şev geometrileri, farklı zemin, sınır ve yükleme koşullarında iki veya üç boyutlu olarak tüm göçme mekanizması

tiplerinde uygulanabilmektedir. Şev modellenirken birçok zemin malzeme modeli kullanılarak gerçeğe yakın malzeme bünye davranışı elde edilebilmekte, zeminde oluşan gerilmeler ve deplasmanlar doğru bir şekilde hesaplanabilmektedir. Ayrıca, uzun ve kısa süreli stabilite analizlerinde, yeraltı su seviyesi bulunması, şevin geotekstil veya zemin çivisi gibi malzemelerle güçlendirilmesi durumlarında da yöntem rahatlıkla kullanılabilir.

Bu çalışmada, şevlerin stabilitesinin sonlu elemanlar yöntemi ile analizinde kullanılan mukavemet azaltma tekniğinden bahsedilmiş ve kumlu bir şev örneği ele alınarak göçmeye karşı güvenlik sayısı, mukavemet azaltma tekniği kullanılarak elde edilmiştir. Ayrıca, limit denge yöntemi kullanılarak şev stabilite analizleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen güvenlik sayıları sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Nümerik Modelleme

Sonlu elemanlar yöntemi ile şev stabilitesi analizlerinde genel olarak iki yaklaşım bulunmaktadır. İlk yaklaşım olan gravite arttırma yönteminde, yerçekimi ivmesi, şev göçünceye ve denge çözümü ortadan kalkıncaya kadar arttırılır (Chen ve Mizuno, 1990). İkinci yaklaşım olan mukavemet azaltma yönteminde ise, kayma mukavemeti parametreleri, c ve ϕ şev göçünceye ve denge çözümü ortadan kalkıncaya kadar azaltılır (Zienkiewicz ve Taylor, 1989). Bu yöntemde, gerçek kayma mukavemeti parametrelerinin bir dizi güvenlik sayısına bölünmesi ile elde edilen farklı kayma mukavemet parametreleri kullanılarak elasto-plastik analizler gerçekleştirilmektedir. Mohr-Coulomb malzeme modeli için, güvenlik sayısı (F_s) ile azaltılan kayma mukavemeti Denklem (1) kullanılarak belirlenebilmektedir:

$$\frac{\tau}{F_s} = \frac{c}{F_s} + \frac{\tan \phi}{F_s} \quad (1)$$

Bu bağıntı,

Şev stabilitesinin iki ve üç boyutlu modeller ile incelenmesi

$$\frac{\tau}{F_s} = c^* + \tan \phi^* \quad (2)$$

şeklinde de yazılabilir. Bu durumda,

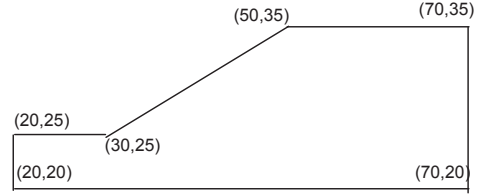
$$c^* = \frac{c}{F_s} \quad \text{ve} \quad \phi^* = \arctan \left[\frac{\tan \phi}{F_s} \right] \quad (3)$$

şeklinde. Burada c , ve ϕ kayma mukavemet parametreleri ve c^* , ϕ^* azaltılmış kayma mukavemet parametrelerini ifade etmektedir.

Çalışmada, geogrid donatılı bir şevin stabilitesi, mukavemet azaltma yöntemi ile analiz edilmiştir. Mukavemet azaltma hesaplamaları, sonlu elemanlar yöntemi ile çözüm yapan PLAXIS (User Manual, Edited by Brinkgreve, 2002) bilgisayar programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. PLAXIS, geoteknik mühendisliği projelerinde karmaşık problemleri sonlu elemanlar yöntemi yardımı ile çözmeye yarayan, deformasyon analizleri, stabilite analizleri, dinamik analizler, zamana bağlı davranış analizleri yapan bilgisayar programıdır. Analizlerde, problemler iki boyutlu olarak eksene simetrik veya düzlem deformasyon ya da üç boyutlu geometri koşullarında analiz edilmektedir. Programda, malzemenin gerilme-deformasyon davranışı lineer olmayan çözüm teknikleri ile modellenmektedir. PLAXIS programı ile şev stabilite analizi yapılırken “phi-c reduction” olarak adlandırılan yöntem kullanılmakta (mukavemet azaltma metodu) ve kayma mukavemet parametreleri c ve $\tan(\phi)$ göçmeye erişilinceye kadar azaltılmaktadır.

Çalışmada ele alınan problem (Griffiths ve Lane, 1999) için şev geometrisi Şekil 1’de görülmektedir. Analizlerde, zemin davranışını modellemek için, Mohr-Coulomb malzeme modeli kullanılmıştır. Mohr-Coulomb malzeme modelinde, geoteknik mühendisliğinde sıklıkla kullanılan ve zemin numunesi üzerinde gerçekleştirilen basit laboratuvar deneyleriyle elde edilebilen toplam 5 adet parametreye ihtiyaç duyulmaktadır. Analizlerde kullanılan zemin parametreleri Tablo 1’de verilmiştir. Analizlerde kohezyon değeri 0 (sıfır) olarak seçilmesine rağmen PLAXIS programında

kohezyonun sıfırdan farklı (minimum $c=5$ kPa) bir değer seçilmesi zorunluluğu göz önüne alınmıştır.



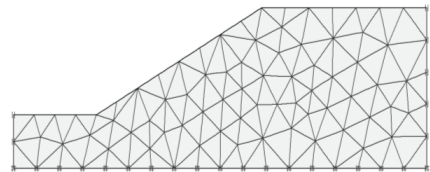
Şekil 1. Model şev geometrisi

Tablo 1. Kullanılan zemin parametreleri

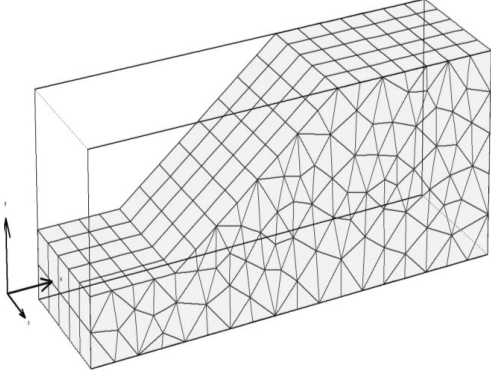
Parametre	Değer
Elastisite Modülü, E (kN/m ²)	100000
Poisson Oranı, ν	0.3
İçsel Sürtünme Açısı, ϕ (°)	19.6
Kohezyon, c (kN/m ²)	5.0
Dilatasyon Açısı, ψ (°)	0

Analizlerde, problemin yatay olmayan zemin yüzeylerine sahip olmasından dolayı (şevli yüzey), başlangıç gerilmeleri oluşturulurken ağırlık yüklemesi yöntemi kullanılmıştır. Analizlerde, çözüm iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada zemin ağırlığından dolayı meydana gelen başlangıç gerilmeleri oluşturulmuş, ikinci aşamada ise stabilite analizleri gerçekleştirilmiştir.

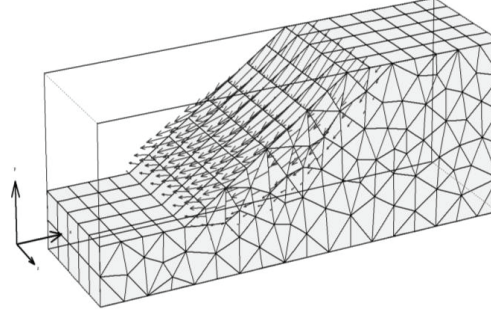
Nümerik çalışmada kullanılan şev geometrisi, sonlu elemanlar ağı ve sınır koşulları 2 ve 3 boyutlu analizler için sırasıyla Şekil 2 ve 3’de görülmektedir.



Şekil 2. 2 boyutlu model için geometri, ağ ve sınır koşulları



Şekil 3. 3 boyutlu model için geometri, ve sonlu elemanlar ağı



(b) Üç boyutlu model

Şekil 4. Düğüm deplasman vektörleri

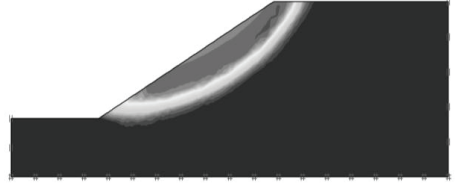
Bulgular ve Tartışma

Sonlu Elemanlar Yöntemi

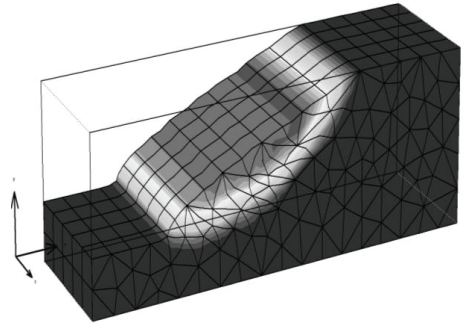
Tablo 2’de, iki ve üç boyutlu sonlu elemanlar çözümleriyle elde edilen güvenlik sayısı (F_s) değerleri görülmektedir. Tablo 2 incelendiğinde, iki ve üç boyutlu çözümlerle elde edilen değerlerin birbirine yakın olmakla birlikte, üç boyutlu çözümün bir miktar (%4) daha büyük güvenlik sayısı değeri verdiği görülmektedir. Şekil 4 ve 5’de ise, iki ve üç boyutlu modellemeler için elde edilen düğüm deplasman vektörleri ve kayma yüzeyi konturları görülmektedir.

Tablo 2. Güvenlik sayısı sonuçları

Model	F_s
PLAXIS 2D	1.090
PLAXIS 3D	1.133

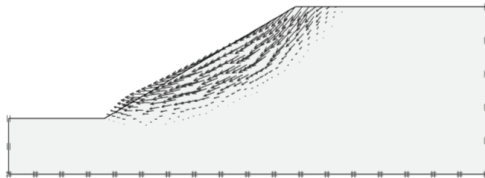


(a) İki boyutlu model



(b) Üç boyutlu model

Şekil 5. Kayma yüzeyi konturları



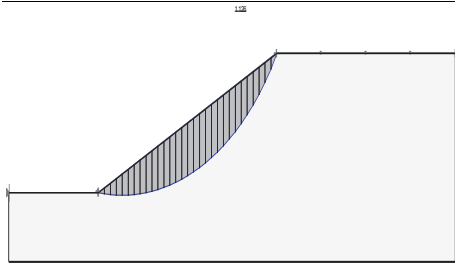
(a) İki boyutlu model

Limit Denge Yöntemi

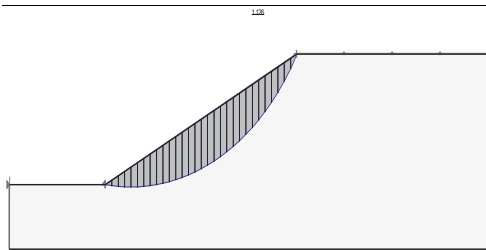
Sonlu elemanlar yöntemine ek olarak, GeoStudio 2012 (Geo-Slope Int. Ltd., 2012) bilgisayar yazılımı kullanılarak farklı limit denge yöntemleriyle analizler gerçekleştirilip güvenlik sayıları elde edilmiştir. Tablo 3’de, farklı limit denge yöntemleri ile elde edilen güvenlik sayısı (F_s) değerleri görülmektedir. Tablo 3 incelendiğinde, elde edilen değerlerin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Şekil 6-7 ve 8’de sırasıyla Morgenstern-Price, Spencer ve Bishop metodlarıyla elde edilen kayma yüzeyleri görülmektedir.

Tablo 3. Güvenlik sayısı sonuçları

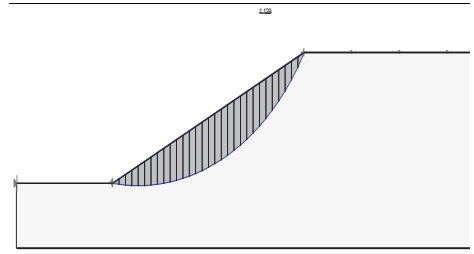
Yöntem	F_s
Morgenstern-Price	1.126
Spencer	1.126
Bishop	1.129



Şekil 6. Morgenstern-Price Metodu



Şekil 7. Spencer Metodu



Şekil 8. Bishop Metodu

Sonuçlar

Sonlu elemanlar yaklaşımı, diğer geleneksel limit denge yöntemlerine göre avantajlarında dolayı geoteknik mühendisliğinde şev stabilite problemlerinin analizinde artan bir şekilde kullanılmaktadır. Plaxis programının kullanı kolaylığı şev stabilite problemlerinde sonlu elemanlar yönteminin sağladığı yararları görmeye imkan sağlamaktadır. Sonuçta deplasman ve gerilme konturlarının da elde edilebiliyor olması bu problemin daha rahat anlaşılabilmesine katkı sağlamaktadır (Keskin · Laman, 2007). Çalışmada, şevlerin stabilitesi, i ve üç boyutlu koşullar altında nümerik olarak analiz edilmiştir. İki ve üç boyutlu çözümler elde edilen değerlerin birbirine yakın olmakla birlikte, üç boyutlu çözümün bir miktar (%4) daha büyük güvenlik sayısı değeri verdi görülmüştür.

Çalışmada ayrıca GeoStudio 2012 bilgisayar programı kullanılarak limit denge yöntemleri i güvenlik sayısı değerleri bulunmuştur. Elde edilen değerlerin Plaxis bilgisayar yazılımı ile elde edilen değerler ile oldukça uyumlu olduğu görülmüştür.

Semboller

- F_s : Güvenlik sayısı
- c : Kohezyon (kN/m^2)
- ϕ : İçsel sürtünme açısı ($^\circ$)
- τ : Kayma mukavemeti (kN/m^2)
- c^* : Azaltılmış kohezyon (kN/m^2)
- ϕ^* : Azaltılmış içsel sürtünme açısı ($^\circ$)
- E : Elastisite modülü
- ν : Poisson oranı
- ψ : Dilatasyon açısı ($^\circ$)

Kaynaklar

- Cernica, J.N., Geotechnical Engineering: Soil Mechanics, John Wiley and Sons Inc., Canada, 1995.
- Chen, W.F. ve Mizuno, E., Nonlinear Analysis in Soil Mechanics: Theory and Implementation, Elsevier, Amsterdam, 1990.
- Duncan J.M. ve Wright, S.G., Soil Strength and Slope Stability, John Wiley and Sons, Hoboken, N.J., 2005.
- GeoStudio, Geo-Slope Int. Ltd., 2012.
- Griffiths, D. V., ve Lane, P. A., "Slope Stability Analysis by Finite Elements", Geotechnique, 49, (3), 387-403, 1999.
- Keskin, M.S. ve Laman, M., "Sonlu Eleman Yönteminin Şev Stabilitesi Problemleri Analizinde Kullanılması", Çukurova Üniver Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 1, Sayı 1, 101-114, 2007.
- PLAXIS, User Manual. 2D version8, (Editör: Brinkgrvee, R.J.B.), Delft University Technology&PLAXIS b.v., The Netherlands, 2002.
- Zienkiewicz, O.C. ve Taylor, R.L., The Finite Element Method, Vol. 1, 4th Edition, McGraw-Hill, New York, 1989.

Analysis of slope stability with two and three dimensional models

Extended abstract

In this study, the applicability of the finite element method in the analysis of slope stability problems was investigated using two and three dimensional models. Limit-equilibrium methods are the most commonly used approaches for analyzing the stability of slopes. The fundamental assumption at their core is that failure occurs through sliding of a block or mass along a slip surface. The popularity of limit-equilibrium methods is primarily due to their relative simplicity, ready ability to evaluate the sensitivity of stability to various input parameters, and the experience geotechnical engineers have acquired over the years in interpreting calculated factor of safety values. Limit-equilibrium methods require minimal input data. The factor of safety values they output help engineers to guard against uncertainties such as ignorance about the reliability of input parameters and loadings, and the possibility that identified failure mechanisms may differ from actual behaviour. As well, recommended factor of safety values for slopes and excavations generally ensure that deformations are within acceptable range. Rapid advances in computer technology and sustained development have pushed the finite element method (FEM) and other numerical analysis approaches to the forefront of geotechnical practice. Since it was first applied to geotechnical engineering in 1966, the FEM has grown tremendously in popularity, primarily due to its ability to analyze a very broad range of problems, while yielding realistic results. It can accommodate practically all kinds of geometry, and can model key aspects of material behaviour such as stress paths (construction sequence), and coupled stress-pore pressure variations. In the mid 1970s, techniques for applying the FEM to slope stability analysis started appearing in geotechnical literature. They were mostly based on an approach that flows naturally from the definition of slope factor of safety, and is now commonly referred to as the Shear Strength Reduction (SSR) technique. By definition, the factor of safety of a slope is the "ratio of actual soil shear strength to the minimum shear strength required to prevent failure," or the factor by which soil shear strength must be reduced to bring a slope to the verge of failure (Duncan, 1996). Strength reduction

technique which is used in the analysis of stability with finite element method is discussed. An example of sand slope was considered to the factor of safety against the failure using strength reduction technique. The strength reduction analysis was carried out with the using of the computer programme which is solved with the finite element method. In the study, the effects of two and three dimensional models on the finite element analysis were investigated. Also, slope stability analyses were performed using limit equilibrium method and obtained results were compared with finite element results. At the end of the study, it is shown that the values of factor of safety obtained from 3D model is higher than those from 2D model and a satisfactory agreement was observed between the results obtained from limit equilibrium method.

Keywords: Slope stability, Finite element method, Limit equilibrium method, Factor of safety