DÜMF Mühendislik Dergisi

web: http://dergipark.gov.tr/dumf

Şev stabilitesi problemlerinin sayısal analizler ile karşılaştırılmalı çözümü

Gizem MISIR*
Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Karaman
gmisir@kmu.edu.tr, Tel: (338) 226 20 00 (5021)

Geliş: 14.08.2017, , Kabul Tarihi: 03.10.2017

Öz

Bu çalışma kapsamında, iki farklı bilgisayar yazılımı kullanılarak, şev stabilitesi problemleri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Seçilen problem, içinde kazı, üniform yüklü alan ve ankraj desteklerinin yer aldığı inşaat aşamalarını içermektedir. Karşılaştırmalar, literatürde kabul görmüş şev stabilitesi tahkikinde kullanılan analitik yöntemleri baz alan GEO5 yazılımı ve sonlu elemanlar yöntemine dayanan 2 boyutlu PLAXIS yazılımından elde edilen sonuçlar üzerinden gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, kaymaya karşı güvenlik sayısı ve kayma yüzeyinin yeri dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Geo5 yazılımından elde edilen güvenlik sayıları, İsveç Dilim, Bishop, Janbu, Morgenstern ve Price, Spencer vb. yaklaşımlar için ayrı ayrı hesaplanırken, Plaxis 2D yazılımından elde edilen sonuçlar mukavemet azaltma yönteminden elde edilmiştir. Ayrıca; Plaxis analizlerinde uygulanan mukavemet azaltma işleminin her aşamasında, mevcut sonlu eleman ağının güncelleştirilmesi durumu da bu çalışma kapsamında araştırılmıştır.

İnşaat aşaması ve yapısal eleman desteğinin olmadığı modelde, ağ güncellemesi yapılmasının şevin güvenlik sayısı üzerinde %2 gibi küçük bir fark ortaya çıkardığı dolayısıyla, ağ güncellemesi seçeneğinin kullanılmasının şevin güvenlik sayısı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Ancak; inşaat aşamalarının dikkate alındığı ve yapısal elemanların tanımlandığı problemlerde, ağ güncellemesi yapılmadığında elde edilen güvenlik sayıları, limit denge yöntemlerinin çok daha altında kalmıştır. Güvenlik sayısı kadar şevin kayma yüzeyleri de ağ güncellemesi seçeneğinden etkilenmektedir. Ağ güncellemesi yapılmadığında ortaya çıkan en elverişsiz kayma yüzeyleri, Geo5 yazılımından elde edilen sonuçlardan oldukça farklıdır. Bununla birlikte, inşaat aşamalarının dikkate alındığı problemlerin ağ güncellemesi yapılarak çözülmesi durumunda elde edilen güvenlik sayıları ve kayma yüzeylerinin, Geo5 yazılımından elde edilen sonuçlarla oldukça uyumlu olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: *Geo5, Plaxis 2D, Şev Stabilitesi, Güvenlik Sayısı, Kayma Düzlemi, Sayısal Analiz*

* Yazışmaların yapılacağı yazar

DOI:

Giriş

Şev genel anlamda, yatayla belirli bir açı yapan zemin kitlesi olarak tarif edilebilir. 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 stabiliteleri, 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 kütlesinin dengesinin araştırılmasıdır.

Tablo 1'de farklı esaslarda tanımlanmış başlıca şev stabilite analizlerinin özeti sunulmaktadır (Budhu, 2000).

Tablo 1. Değişik Şev Stabilite Analiz Yöntemleri (Budhu, 2000)

Method	Kayma Tipi	Denge Şartı	Çözüm Aracı
Fellenius (1927)	Dairesel	Moment	Geleneksel
Bishop (1955)	Dairesel	Moment	Geleneksel
Mod. Bishop (1955)	Dairesel	Moment	Geleneksel
Morgenstern-P.(1965)	Herhangi	Tümü	Bilgisayar
Spencer (1967)	Herhangi	Tümü	Bilgisayar
Bell (1968)	Herhangi	Tümü	Bilgisayar
Janbu (1973)	Herhangi	Düşey	Geleneksel
Sarma (1976)	Herhangi	Tümü	Bilgisayar

Klasik şev stabilite analizlerinde, zemin kütlesi içerisindeki gerilmelerin analizinin yaklaşık olması, değişik yükleme koşulları ve geometrilerde hesabı güçleştirmektedir. Bilgisayar kullanımı, tüm alanlarda olduğu gibi geoteknik mühendisliğinde de yaygın olarak kullanılmakta ve özellikle analitik çözümün karmaşık ve zaman alıcı olduğu şev stabilitesi analizlerinde artan bir şekilde kullanılmaktadır.

Materyal ve Yöntem

Son yıllarda inşaat sektöründe hızla gelişen bilgisayar teknolojileri ve yazılımları, mühendislik araştırma ve geliştirme faaliyetlerine de önemli bir ivme kazandırmıştır. Geoteknik Mühendisliği, bir yapının inşa edileceği arazinin zemin yapısının yapıya uygunluğunu, zemin-yapı etkileşimini ve temel tasarımını inceleyen bilim dalıdır. Bu konuda oluşabilecek hatanın telafisi çoğu zaman yüksek maliyette olmaktadır. Temeller, istinad duvarları, iksa yapılarının tasarımı, emniyetli taşıma gücünün belirlenmesi ve oluşabilecek oturmaların hesabı, geosentetik malzemelerin kullanımı, temel kazıları, derin kazılar ve şev stabiliteleri konularının incelenmesi ve tasarlanması, zemin iyileştirme yöntemleri, zemin yapı etkileşimi ve alt yapı ve tünellerin tasarlanması geoteknik mühendisliğinin uygulama alanlarına girmektedir. Bu gibi mühendislik problemlerinin çözümünde elle hesabın yanı sıra yazılımlardan yararlanılarak, sanal ortamda zaman ve test maliyeti azalırken, mevcut sistemlerde ortaya çıkması muhtemel problemlerin sebepleri araştırılıp, uygun ve alternatifli çözümler geliştirilir.

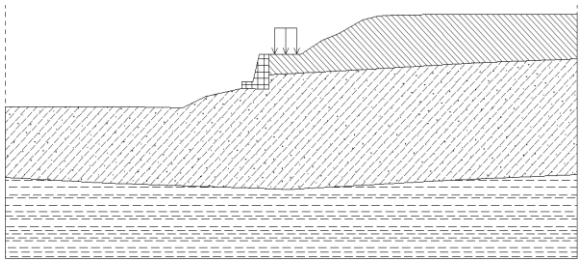
Geoteknik mühendisliğinde analiz ve modellemede kullanılan lisanslı ve kişisel olmak üzere toplamda yaklaşık 1730 civarında program mevcuttur (http://www.ggsd.com). Bu programlar analiz yeteneklerine göre birçok şekilde kategorize edilebilir. Kapsamlı yazılımlar olduğu gibi sadece belli problemlere çözüm üreten yazılımlar da bulunmaktadır. Geoteknik problemlerin hemen hemen hepsine uygun çözümler sunan yazılımlar sürekli geliştirilmekte ve tasarımlarda inşaat mühendislerine daha hassas ve hızlı çözümler yapma imkânı sunmaktadır.

Bu çalışmada, şev stabilitesi problemlerinin Geo5 ve Plaxis 2D ile karşılaştırmalı çözümleri yapılmış ve sistemler güvenlik sayıları ve kayma düzlemlerine göre değerlendirilmiştir.

Geo 5 Yazılımı ile Şev Stabilitesi Probleminin Modellenmesi

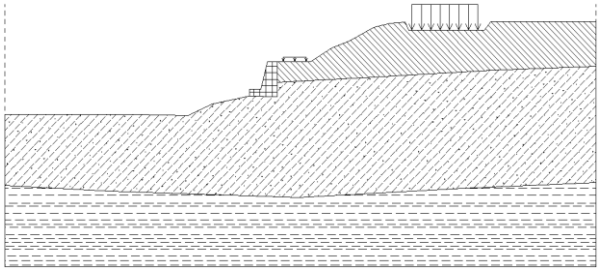
Bu çalışma kapsamında kullanılan yazılımlardan bir tanesi Geo 5 programıdır. Bu program, içerisinde farklı temel inşaatı problemini barından 26 modül içermektedir. Analizi yapılacak probleme göre uygun modül çalıştırılır. Modülde tanımlanan analitik çözüm yöntemleri, Sarma, Spencer, Janbu, Morgenstern-Price ve Shachunyanc gibi literatürde sıklıkla kullanılan yaklaşımlardır.

Bu çalışmada analiz edilen sistem, 3 farklı inşaat aşamasından oluşmaktadır. Birinci aşama, eğimli bir arazide yer alan rijit bir duvar arkasında 3.5 m genişlikte 12 kPa değerindeki üniform yayılı yükün olduğu mevcut arazi durumunu ifade etmektedir. Modelin birinci aşamasına ait görüntü Şekil 1'de verilmiştir.



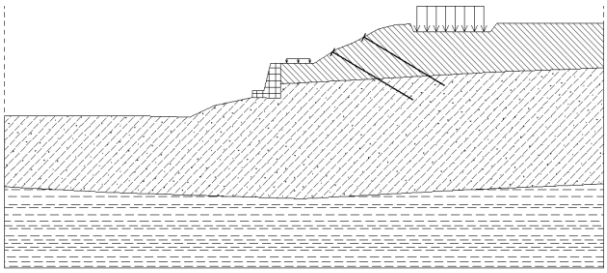
Şekil 1. Birinci Aşama için Geo5 Modeli

Problemin ikinci aşaması ise, mevcut duruma ilave olarak, duvar arkasında 13 m genişlikte 1.2 m derinlikteki kazı alanı üzerinde inşa edilen yapıdan dolayı 160 kPa değerinde yayılı yük olması durumuna ait senaryodur (Şekil 2).



Şekil 2. İkinci Aşama için Geo5 Modeli

Üçüncü inşaat aşamasında ise, uygulanan 160 kPa değerindeki üniform yayılı yükün neden olacağı olumsuz etkiyi önleyebilmek için arazinin, 14m uzunluk ve 30^o eğimli iki sıra ankraj ile desteklenmesi durumu modellenmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. Üçüncü Aşama için Geo5 Modeli

Problem 90m x 30m boyutlarında, düzlem deformasyon koşullarının dikkate alındığı bir model ile tanımlanmıştır. Sayısal analizi gerçekleştirilen problemin zemin profili üç tabakadan oluşmakta olup ilgili tabakalara ait zemin parametreleri Tablo 2'de verilmiştir. Burada; γ_n, γ_d, ϕ_{ef} ve c_{ef} parametreleri sırasıyla, doğal ve doygun durumdaki birim hacim ağırlıkları ile içsel sürtünme açısı ve kohezyon kavramlarını ifade etmektedir. Dayanma duvarı ise, birim hacim ağırlığı 25 kN/m^3 olan rijit eleman olarak modellenmiştir.

Tablo 2. Geo5 Yazılımı için Zemin Parametreleri

	Üst Tabaka	**Orta Tabaka**	**Alt Tabaka**
γ_n (kN/m^3)	20.0	18.0	19.0
γ_d (kN/m^3)	22.0	18.0	22.0
ϕ_{ef} (^{o})	21.0	26.5	40.0
c_{ef} (kPa)	12.0	16.0	50.0

Problemin aşamalarında tanımlanan sürşarj yüklerine ait yükleme çeşidi, yüklü alanın başlangıç noktası ve uzunluğu ile yükün büyüklüğüne ait bilgiler Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Probleme ait Sürşarj Yükleri

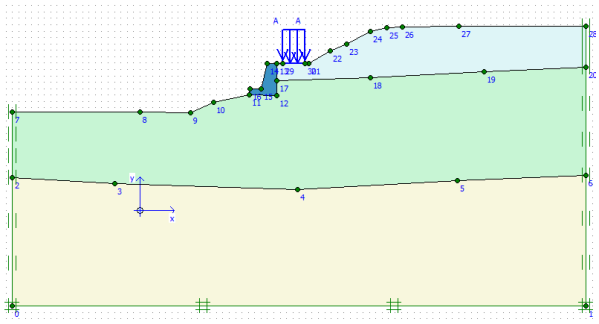
	Duvar Arkası Sürşarj No:1	**Şev Tepesi Sürşarj No:2**
Çeşit	Şerit	Şerit
Eylem Türü	Kalıcı	Kalıcı
Konum z (m)	Arazi Üzerinde	Arazi Üzerinde
Başl. x koor. (m)	22.4	42.0
Uzunluk (m)	3.5	10.0
Eğim (^{o})	0.0	0.0
Büyüklük (kPa)	12.0	160.0

Son olarak, modelde oluşturulan ankrajlar için 200 kN değerinde ön germe tanımlanmıştır. Ankraj aralıkları ise 1m olarak alınmıştır. Analizler her üç aşama için de ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, kayma düzleminin yeri ve kaymaya karşı güvenlik sayısının değeri analitik çözüm yöntemleri kullanılarak elde edilmiştir.

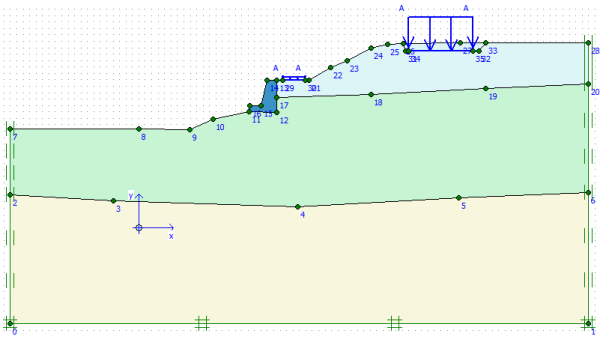
Plaxis 2D Yazılımı ile Şev Stabilitesi Probleminin Modellenmesi

Bu çalışma kapsamında kullanılan bir diğer program, sonlu elemanlar yöntemine dayanan iki boyutlu Plaxis yazılımıdır. Bu program, geoteknik problemlerinin deformasyon analizlerinin gerçekleştirilmesi için geliştirilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemindeki temel yaklaşım, karmaşık bir problemi basite indirgeyerek, çözüm bulmaktır. Esas problemin, daha basit bir probleme indirgenmiş olması nedeni ile kesin sonuç yerine yaklaşık bir sonuç elde edilmekte, ancak bu sonucun çözüm için daha fazla çaba harcayarak iyileştirilmesi, hatta kesin sonuca ulaşılması mümkün olmaktadır. Program gerilme şekil değiştirme analizleri yanında, zamana bağlı konsolidasyon analizleri, dinamik analizler ve mukavemet azaltma yöntemi kullanarak stabilite analizleri yapmaktadır.

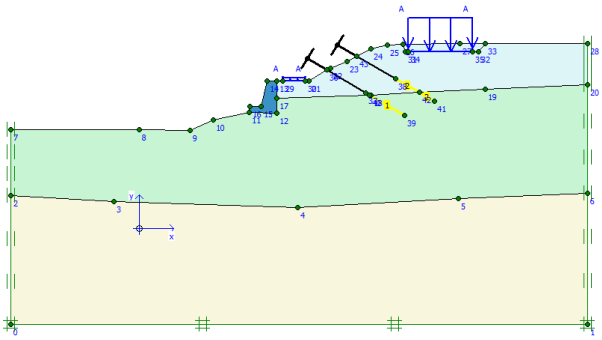
Geo5 programında tanımlanan inşaat aşamalarının her üçü de Plaxis 2D yazılımı kullanılarak ayrı ayrı modellenmiştir (Şekil 4, 5 6). Zemin profilleri, duvar geometrisi, yükleme özellikleri ve sınır şartları, Geo5 yazılımındaki parametreler ile birebir uyumludur.



Şekil 4. Birinci Aşama için Plaxis 2D Modeli



Şekil 5. İkinci Aşama için Plaxis 2D Modeli



Şekil 6. Üçüncü Aşama için Plaxis 2D Modeli

Plaxis 2D yazılımında zemin özellikleri Mohr-Coulomb (MC) malzeme modeli kullanılarak tanımlanmıştır. Profilde tanımlanan her üç tabaka için kullanılan zemin parametreleri Tablo 4'te, lineer elastik malzeme modeli ile tanımlanan dayanma yapısına ait parametreler ise Tablo 5'te verilmiştir. Burada; E, E_{duvar}, ψ, ν değerleri sırasıyla zemin ve duvar malzemesine ait elastisite modülü, dilatasyon açısı ve poisson oranını göstermektedir.

Tablo 4. Plaxis 2D Yazılımı için Zemine Parametreleri

	Üst Tabaka	**Orta Tabaka**	**Alt Tabaka**
Malzeme Modeli	MC	MC	MC
γ_n (kN/m^3)	20.0	18.0	19.0
γ_d (kN/m^3)	22.0	18.0	22.0
ϕ_{ef} (°)	21.0	26.5	40.0
c_{ef} (kPa)	12.0	16.0	50.0
E (kPa)	22,000	29,000	60,000
Ψ (°)	0.0	0.0	10.0

Tablo 5. Plaxis 2D Yazılımı için Dayanma Yapısına ait Malzeme Parametreleri

	Dayanma Yapısı
Malzeme Modeli	Lineer Elastik
Malzeme Tipi	Geçirimsiz
γ_{duvar} (kN/m^3)	25.0
E_{duvar} (kPa)	2*10^7
ν (°)	0.25

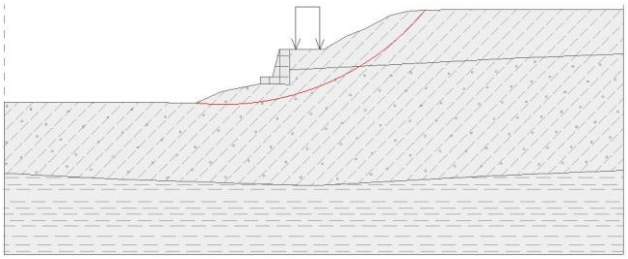
Aşamalarda girilen üniform yayılı yükler ve ankraj elemanları Geo5 programında olduğu gibi benzer parametreler ile tanımlanmıştır. İki boyutlu model, ince ağ sıkılığında 417 eleman 3467 düğüm noktası altında çözülmüştür. Analizlerde inşaat aşamaları, dayanma yapısının, sürşarj yüklerinin ve/veya ankrajların aktif hale getirildiği plastik analiz aşamasını takiben tanımlanan, mukavemet azaltma (ϕ-c reduction) yöntemine dayanan stabilite analizleri ile tamamlanmıştır. Bu yöntemin uygulanması, kayma mukavemeti parametreleri olan c ve φ değerlerinin şev göçünceye ve denge çözümü ortadan kalkıncaya kadar azaltılmasına dayanmaktadır (Keskin ve Laman, 2007).

Plaxis 2D analizlerinde, tanımlanan bu inşaat adımları için, kullanıcı tarafından güncellenmiş ağ (Updated Mesh-UM) seçeneği aktif duruma getirilebilir. Bu seçenek, özellikle büyük deformasyonların oluştuğu analizlerde ve özellikle zamana bağlı olarak tanımlanan konsolidasyon analizlerinde kullanılan bir seçenektir. Bu çalışma kapsamında Plaxis 2D ve Geo5 arasında bir karşılaştırma yapılması ve UM seçeneğinin aktif ya da pasif olması durumlarında kaymaya karşı güvenlik sayıları ve kayma düzlemlerinin değişimi incelenmiştir. Bu nedenle, sayısal analizler arasındaki karşılaştırmalar, Geo5, Plaxis 2D UM aktif ve Plaxis 2D UM pasif modelleri arasında, her üç aşama için incelenmiştir.

Bulgular Tartışma

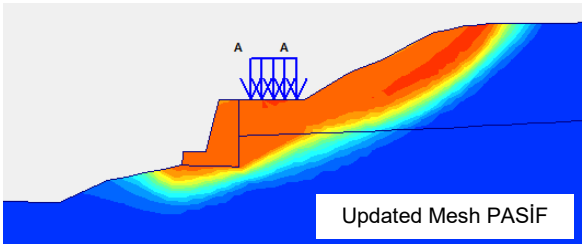
Birinci Aşamanın Karşılaştırılması

Birinci aşama analizlerde, eğimli arazide yer alan bir dayanama yapısı ve arkasındaki yüklü alan göz önüne alınarak hem Geo5 hem de Plaxis 2D yazılımları kullanılarak şev stabilitesi analizleri gerçekleştirilmiştir. Geo5 program çıktısı istenilen analitik hesap yöntemine göre kaymaya karşı güvenlik sayısı ve kayma yüzeyini oluşturan yay parçasına ait merkez koordinatı ile yarıçap bilgilerini vermektedir. Geo5 yazılımından elde edilen kayma yüzeyi Şekil 7'de verilmiştir.

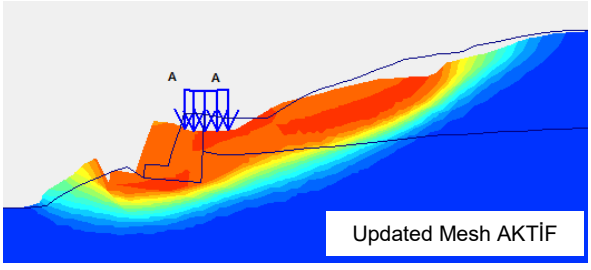


Şekil 7. Geo5 Yazılımından Elde Edilen Kayma Düzlemi

Sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yapan Plaxis 2D programında ise elde edilen çıktılar, kaymaya karşı güvenlik sayısı (M_{sf}) ile kayma düzleminin tahmini yerini gösteren Şekil 8 ve 9'da verilen boyalı deplasman görünümleridir. Plaxis programı, Geo5 yazılımının aksine, kayma yüzeyinin yerini daha spesifik tanımlayacak merkez ve yarıçap bilgilerini vermemektedir.



Şekil 8. Plaxis 2D UM Pasif Analizinden Elde Edilen Kayma Düzlemi



Şekil 9. Plaxis 2D UM Aktif Analizinden Elde Edilen Kayma Düzlemi

Şekil 8 ve 9'daki görünümler sırasıyla, Plaxis yazılımında Updated Mesh (UM) seçeneğinin pasif ve aktif olduğu durumları ifade etmektedir. İlgili seçenek aktif konumda tutulduğunda, mukavemet azaltması uygulandıkça şev üzerinde meydana gelen hareket ile birlikte probleme ait ağ dizilimi yeniden düzenlenmektedir. Bu sayede göçme anına ulaşıldığında şevin tahmini görüntüsü de elde edilebilmektedir (Şekil 9).

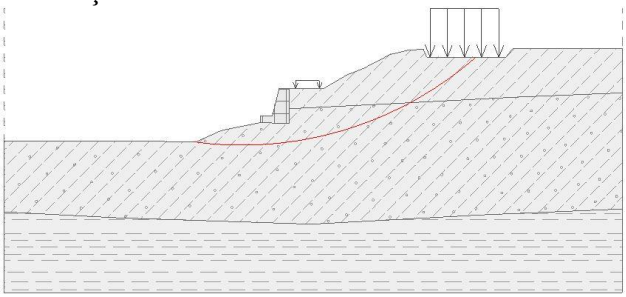
Tablo 6. Birinci Aşama için Güvenlik Sayılarının Karşılaştırılması

1.Aşama	Güvenlik Sayısı
Geo 5 (Bishop)	1.80
Geo 5 (Fellenius)	1.74
Geo 5 (Spencer)	1.81
Geo 5 (Janbu)	1.81
Geo 5 (Morgenstern-Price)	1.81
Plaxis 2D UM Pasif (FEM)	1.74
Plaxis 2D UM Aktif (FEM)	1.78

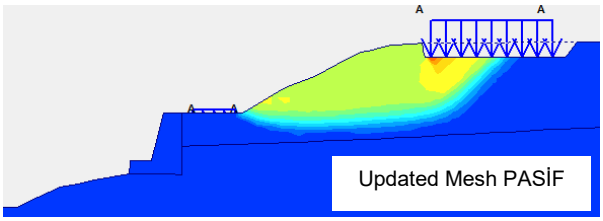
Kayma düzleminin yeri ve boyundan daha önemli olan fiziksel büyüklük, kaymaya karşı güvenlik sayısıdır. Geo5 ve Plaxis 2D yazılımlarından elde edilen kaymaya karşı güvenlik sayıları Tablo 6'da verilmiştir. Tabloya göre, en düşük güvenlik sayısı değeri Fellenius (İsveç Dilim Yöntemi) ve Plaxis 2D analizinde UM nin pasif olduğu durumda 1.74 olarak elde edilmiştir. Sonlu elemanlar mantığında ağın sıkılığı arttıkça, sonuçların gerçek değere yakınlaştığı bilinir. Bu durumda, Plaxis 2D UM aktif sonucu 1.78 olarak, UM pasif sonucu 1.74'den daha doğru kabul edilebilir. Bu durumda, Geo5 program çıktılarından Fellenius hariç diğerleri birbirleri ile uyumlu olup, sonuçlar 1.80-1.81 olarak elde edilmiştir. Bu grup ile Plaxis 2D UM aktif program çıktısından elde edilen güvenlik sayıları birbirleri ile uyumlu çıkmış, aralarındaki fark %1-2 mertebelerinde kalmıştır.

İkinci Aşamanın Karşılaştırılması

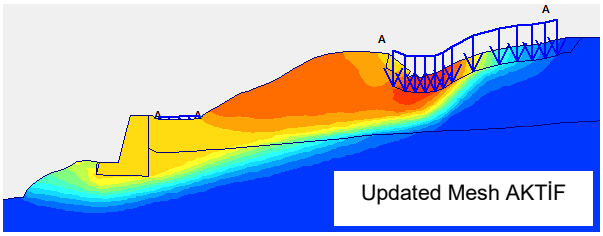
Zemin profilinde, eğimli zemin yüzeyinin tepesinde gerçekleşen bir kazı ve bu kazı alanında tanımlanan yüklü alanın şevin stabilitesine olan etkisinin incelendiği ikinci aşama analizlerden elde edilen kayma yüzeyleri Geo5, Plaxis UM pasif ve Plaxis UM aktif durumları için sırasıyla Şekil 10, 11 ve 12'de verilmiştir.



Şekil 10. Geo5 Yazılımından Elde Edilen Kayma Düzlemi



Şekil 11. Plaxis 2D UM Pasif Analizinden Elde Edilen Kayma Düzlemi



Şekil 12. Plaxis 2D UM Aktif Analizinden Elde Edilen Kayma Düzlemi

Kayma yüzeylerinin içine aldığı bölge incelendiğinde, UM seçeneğinin aktif halde olduğu Plaxis 2D analizi ile Geo5 programından elde edilen kayma yüzeylerine ait sınırlar (kayma yüzeyinin başladığı ve sona erdiği noktalar) birbirleri ile oldukça uyumludur. Ancak; UM seçeneğinin etkinleştirilmediği Şekil 11'de verilen analiz sonucu incelendiğinde, kaymanın dayanma yapısına kadar ulaşmadığı ve maksimum hareketin yayılı yükün uygulandığı bölgede yoğunlaştığı görülmüştür.

Tablo 7. İkinci Aşama için Güvenlik Sayılarının Karşılaştırılması

2.Aşama	Güvenlik Sayısı
Geo 5 (Bishop)	1.61
Geo 5 (Fellenius)	1.55
Geo 5 (Spencer)	1.62
Geo 5 (Janbu)	1.62
Plaxis 2D UM Pasif (FEM)	1.49
Plaxis 2D UM Aktif (FEM)	1.56

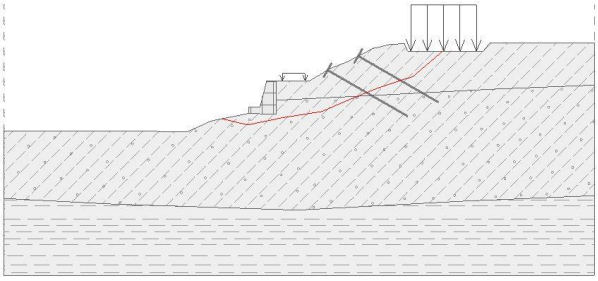
İki farklı sayısal analiz programından elde edilen, kaymaya karşı güvenlik sayıları Tablo 7'de verilmiştir. Sonuçlara göre, en düşük güvenlik sayısı (1.49) değeri UM seçeneğinin etkinleştirilmediği Plaxis 2D analizinden elde edilmiştir. UM seçeneğinin aktif olduğu analiz sonucu ise, analitik yöntemlere göre analiz yapan Geo5 program çıktıları ile oldukça uyumlu güvenlik sayısı değeri vermiştir.

Plaxis analizlerinde; şev stabilitesi probleminin ikinci aşama analizinde UM seçeneğinin etkinleştirilmesi, kaymaya karşı güvenlik sayısını %4 oranında arttırmıştır. Her ne kadar bu artış, mertebe olarak çok önemsenecek düzeyde olmasa da, kayma yüzeyinin ve şevin hareket alanının değerlendirmesinde oldukça ciddi bir fark oluşturmuştur.

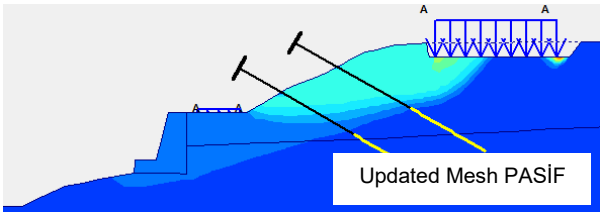
Üçüncü Aşamanın Karşılaştırılması

Son aşama analizlerde ise, probleme ait eğimli yüzeyin ilgili yükler altında 2 sıra ankraj ile desteklenmesi durumu modellenmiştir. Geo5 programı, eğimli zemin yüzeyi üzerinde tanımlanan ankrajların herhangi bir destek elemanına bağlantısı olmaksızın direkt zemine bağlanabilmesine izin vermektedir. Ancak; Plaxis 2D analizlerinde, ankraj elemanın zemin ortamına direkt bağlanması durumunda çözüme gidilememektedir. Bu nedenle, ankrajların zemini kestikleri noktaların hareketlerinin payanda elemanlar ile desteklenmesi durumunda problemin Geo5 ile benzer koşullar altında çözümü sağlanabilmiştir.

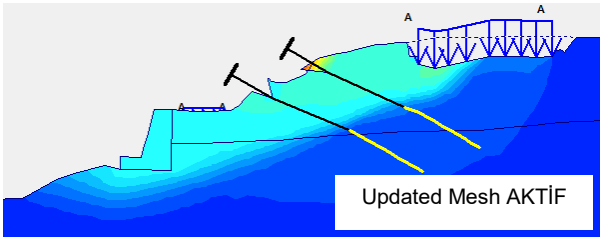
Ankraj desteği altında çözülen problemin üçüncü aşamasına ait Geo5 ve Plaxis 2D programlarından elde edilen kayma yüzeyleri Şekil 13, 14 ve 15'te verilmiştir.



Şekil 13. Geo5 Yazılımından Elde Edilen Kayma Düzlemi



Şekil 14. Plaxis 2D UM Pasif Analizinden Elde Edilen Kayma Düzlemi



Şekil 15. Plaxis 2D UM Aktif Analizinden Elde Edilen Kayma Düzlemi

Elde edilen çıktılara göre, üçüncü aşama analizlerde de UM seçeneğinin etkisi ortaya çıkmaktadır. Ankrajın zemin yüzeyini kestiği noktada ortaya çıkan öngerme kuvvetinin neden olduğu zorlanma etkisi, UM seçeneğinin etkinleştirildiği analizlerde ağ dizilimini bozarak ortaya çıkmıştır (Şekil 15). Kayma yüzeyinin yeri ise, Geo5 programından elde edilen sonuçlar ile oldukça uyumlu çıkmıştır.

Tablo 8. Üçüncü Aşama için Güvenlik Sayılarının Karşılaştırılması

3.Aşama	Güvenlik Sayısı
Geo 5 (Sarma)	1.94
Geo 5 (Spencer)	1.93
Geo 5 (Janbu)	1.95
Geo 5 (Morgenstern-Price)	1.91
Plaxis 2D UM Pasif (FEM)	1.56
Plaxis 2D UM Aktif (FEM)	1.80

Üçüncü aşama analizlerin güvenlik sayılarının karşılaştırıldığı Tablo 8'deki verilere göre, en düşük güvenlik sayısı (1.56) değeri yine UM seçeneğinin etkinleştirilmediği Plaxis analizinden elde edilmiştir. UM seçeneği aktif olduğunda ise elde edilen güvenlik sayısı (1.80), analitik çözümlerden elde edilen güvenlik sayılarının altında kalmasına rağmen, sonuçlar etkinleştirilmemiş Plaxis UM analizine göre daha yakın çıkmıştır.

Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında, iki farklı sayısal analiz programı kullanılarak, eğimli bir arazide, inşaat faaliyetleri de dikkate alınarak bir şevin kaymaya karşı güvenlik sayıları ve kayma yüzeyleri araştırılmıştır. Aşağıda bu çalışmadan elde edilen sonuçlar sunulmuştur;

- Program çıktıları, hem analitik olarak hem de sonlu elemanlar yöntemine dayanan yaklaşık bir çözüm ile karşılaştırılmıştır.

- Birinci aşama analizlerde, Geo5 (Bishop), Plaxis 2D UM aktif ve UM pasif analizlerinden elde edilen güvenlik sayıları sırası ile, 1.80, 1.78 ve 1.74'tür.

- Birinci aşama analizlerde, UM seçeneğinin aktif ya da pasif olması güvenlik sayısını %2.3 oranında değiştirmiştir. UM seçeneğinin aktif halde olması, çözümü Bishop çözümüne yaklaştırmıştır.

- İkinci ve üçüncü aşama stabilite analizlerinde ise, UM seçeneğini kullanmak güvenlik sayılarını sırası ile %20 ve %15 oranlarında arttırmaktadır. Bu artış ile birlikte, kayma yüzeyleri Geo5 sonuçları ile oldukça uyumlu çıkmıştır.

- UM seçeneği kullanılmadan gerçekleştirilen analizlerden elde edilen göçme yüzeyleri daha sınırlı bir alanda kalırken, Updated Mesh (UM) seçeneğinin aktif halde olduğu analizlerden elde edilen göçme yüzeyleri daha geniş alana yayılarak, GEO 5 (analitik çözümlerden elde edilen) sonuçları ile daha uyumlu çıkmıştır.

- Üçüncü Aşamadaki (ankrajlı sistemde) Plaxis analizlerinde en fazla zorlanma ankrajların zemin yüzeyini kestiği bölgelerde oluşmuştur. Bunun nedeni; zorlanmanın olduğu bölgede herhangi bir iksa yapısı (yapı elemanı) olmaksızın ankrajların direkt zemine tek noktadan bağlanmasından kaynaklanmıştır. Ancak, UM seçeneğinin aktif olduğu durumdaki Plaxis analizleri göçme yüzeyinin şekli ve güvenlik sayısı açısından GEO 5 sonuçları ile oldukça uyumludur.

- Yapısal eleman desteği ve inşaat aşamalarının etkisinde olan bir şevin, ağ güncellemesi yapılmadan stabilite analizine tabi tutulması, çözümü plastik analiz etkisi altında tutmaktadır. Deformasyon görüntülerinin yüklü alan ve ankraj elemanları çevresinde yoğunlaşması da bunun açık bir göstergesidir. Ancak, ağ güncellemesi ile stabilite analizi yapmak, problemi bütünüyle ele almayı sağlarken, güvenlik sayıları ve kayma yüzeylerinin yerlerini limit denge çözümlerine yaklaştırmıştır.

Kaynaklar

Bell, J.M., (1968). General Slope Stability Analysis, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 94(SM6):1253-1270.

Bishop, A.W., (1955). The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes, *Geotechnique*, 5(1):7-17.

Fellenius, W., (1927). Erdstatische Berechnungen mit Reibung and Koaesion, Berlin:ERNST.

Budhu, M., (2000). Soil Mechanics and Foundations, *Wiley*, New York, 586p.

Janbu, N., (1973). Slope Stability Computations, *Embankment and Dam Engineering*, Cassagrande Memorial Volume, Wiley, New York, 47-86.

http://www.ggsd.com, Geotechnical & Geoenvironmental Software Directory

Keskin, M.S. ve Laman, M., (2007). Sonlu Elemanlar Yönteminin Şev Stabilitesi Problemlerinin Analizinde Kullanılması., *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi.* 22(1):101-114.

Morgenstern, N.R. and Price, V.E., (1965). The Analysis of Stability of General Slip Surfaces, *Geotechnique*, 15(1).

Plaxis, (2002). User Manual, 2D version8, (Edited by Brınkgreeve, R.J.B.), *Delft University of Technology&PLAXIS* b.v., The Netherlands.

Geo 5, (2016), User's Guide-Edition 2016, Fine Ltd., 1332p.

Sarma, S.K., (1976). Stability Analysis of Embankment and Slopes, *Proceedings ASCE, Geotechnical Engineering Division,* 105:1511-1524.

Spencer, E., (1967). A Method of Analysis Assuming Parallel Interslices Technique, *Geotechnique*, 17(1):11-26.

Comparative Solution of Slope Stability Problems Using Numerical Analysis

Extended abstract

In geotechnical engineering, an analysis of overall stability should be controlled for typical structures such as especially retaining structures, excavations, slopes, embankments, foundations on sloping ground (natural slopes) and foundations near an excavation. The stability of a slope is the process of calculating and evaluating how much stress a particular slope can withstand before failure. In another words, principle of the stability analysis is based on comparing the shear stress developed along the potential rupture surface with the shear strength of the soil. This comparison is expressed by factor of safety. The minimum safety factor and the corresponding sliding surface of it, are two important parameters evaluated in the stability test.

In this study, slope stability problems were analyzed comparatively by using two different numerical analysis software. GEO5 is a software, providing analytic solution for majority of geotechnical problems. It contains individual programs have the same user interface and communicate with each other, while each program verifies definite structure type. PLAXIS is based on finite element technique and requires advanced material models to simulate the non-linear, time dependent and anisotropic soil behavior. The selected problem is a complex problem involving the construction phases as excavations, uniformly loaded areas and anchor supports. The comparisons were made both based on the results obtained from GEO5 and PLAXIS softwares. The results were evaluated by considering the safety factor against sliding and the location of the slip surface. The safety factors obtained from Geo5 software were calculated from Swedish Slice, Bishop, Janbu, Morgenstern and Price, Spencer methods while the results obtained from the Plaxis 2D software were obtained from the strength reduction analysis method. Also; the effect of finite element mesh update option at each stage of the strength reduction process applied in Plaxis analyzes has also been investigated in this study.

The effect of the updated mesh option was obtained with a small difference as 2% at the model without the construction phase and structural element support. Therefore, it can be concluded that the usage of the updated mesh option have not been a significant effect on the safety factors for a standard slope stability problems. But, the safety factors have been found much lower than the results from the limit equilibrium methods in the case of solving the construction stages without updated mesh option. As much as the safety factor, slip surfaces of the slope were affected from the updated mesh option too.

The most unfavorable slip surfaces that occur when no mesh update is made are quite different from the results obtained from the Geo5 software. However, the safety factors and slip surfaces have been found to be very compatible with the results obtained from the Geo5 software, in the case of solving the construction stages by using updated mesh option.

Keywords: *Geo5, Plaxis 2D, Slope Stability, Safety Factor, Sliding Surface, Numerical Analysis*