

ŞEV STABİLİTESİ ANALİZİNDE GERİ HESAP YÖNTEMİ KULLANILARAK BİR VAKA ANALİZİ: GÖKTÜRK KAYMASI

**A CASE STUDY BY USING BACK-CALCULATION METHOD IN SLOPE
STABILITY ANALYSIS: GOKTURK FAILURE**

Önder AKÇAKAL¹ Turan DURGUNOĞLU² Aykut ŞENOL³ Sadık ÖZTOPRAK⁴

ABSTRACT

Because of time and economic limitations it is also common to face slope failures in unsupported excavations in city centers. Obviously it is crucial to understand the failure mechanism and failure conditions in order to employ proper remedial measures against safety. In the scope of this paper, slope stability concept, analysis methods and specifically back calculation method that is utilized within the reconnaissance study are given. Subsequently, a slope failure is investigated which happened during excavation for the foundations at Gokturk in Istanbul. During the investigation, the computer programs using limit equilibrium and finite elements method are used concurrently with the approach to back calculate the shear strength parameters from the geometry of the failed slope. Consequently, the determined shear strength parameters are compared for various ground water conditions and possible alternative methods for remedial measures are developed.

ÖZET

Zaman ve ekonomik sınırlamalar nedeniyle, şehir içinde, desteksiz yapılan kazıların sık sık stabilite sorunu yarattığı gözlemlenmektedir. İyileştirme önlemlerine karar verirken, bu şev hareket mekanizmalarının ve göçme koşullarının hassas bir şekilde belirlenmesi son derece önem taşımaktadır. Bu bildiride esas olarak şev stabilitesinin kaybolduğu veya başka bir deyişle göçmenin gerçekleştiği durumlarda geri hesap yöntemi kullanılarak zemin parametrelerine nasıl ulaşıldığı konusunda bilgiler verilmiştir. Bu araştırma kapsamında, İstanbul Göktürk'te gerçekleştirilen bir toplu konut inşaatı sırasında desteksiz olarak açılan temel kazısında meydana gelen şev hareketi, önce limit denge yöntemi, daha sonra sonlu elemanlar yöntemini kullanan bilgisayar programları yardımıyla incelenmiştir. Elde edilen kesme dayanımı parametreleri karşılaştırılmış ve geri hesaplanan zemin parametrelerine göre çözüm için yapılan iyileştirme projesi hakkında bilgi verilmiştir.

¹ İnş. Yük. Müh., Zetaş, onder.akcikal@zetas.com.tr

² Prof. Dr., Zetaş, durgunoglut@zetas.com.tr

³ Y. Doç. Dr., İTÜ, senol@itu.edu.tr

⁴ Y. Doç. Dr., İÜ, oztoprak@istanbul.edu.tr

1. GİRİŞ

Her yıl ülkemizin pek çok yerinde görülen şev hareketleri çok sayıda can ve mal kayıplarına yol açmaktadır. Heyelanların yaygın bir şekilde meydana gelmesi ve sonucunda büyük kayıpların ortaya çıkması, ülkemizin sosyoekonomik yapısından da kaynaklanmaktadır. Bilindiği gibi arazi ve laboratuvar çalışmalarından elde edilen bilgiler arazinin sınırlı noktalarını temsil ederken, geri hesap yöntemi ile modellenen bir şev kayması o bölgenin özelliklerini daha iyi temsil eden zemin parametrelerine ulaşmamızı sağlayabilmektedir. Günümüzde, gelişen bilgisayar programları ile, limit denge, sonlu elemanlar vb. yöntemler kullanılarak zemin davranışını esas alan (observational methods) kısa zamanda çok sayıda analiz yapılabilmektedir. Kayma anındaki ortam koşullarına daha doğru bir şekilde ulaşabilmek için bu bilgisayar programları kullanılarak zemin kayma parametrelerinin gerçek değerleri hesaplanabilmektedir.

Bir yenilme durumundan koşulları belirleme ve şev için uygun bir modelin ortaya konması işlemine “*Geri Analiz Yöntemi*” denir. Bu yöntemle model oluşturulurken bilinen parametreler girilir. Bilinmeyenler, uygun bir aralıkta öngörülerek değer olarak verilir ve göçmenin gerçekleştiği anda güvenlik sayısının 1.0’ e eşit olması durumundan, bilinmeyen bir parametreye karar verilir (Duncan ve Wright, 2005). Geri hesap yöntemi, göçmenin gerçekleştiği şevlerde iyileştirme projelerinin güvenilir ve ekonomik bir şekilde yapılmasına efektif bir şekilde katkı sağlamaktadır (Popescu ve Sasahara, 2009).

Bu bildiriye sunulan çalışmada, kayma gerçekleştikten sonra alınacak iyileştirme tedbirlerinin daha güvenilir ve daha ekonomik yapılabilmesi adına yürütülen geri analiz sonuçlarının, değişen yeraltı suyu ve farklı yöntemlerin kullanılması durumları için ne gibi farklılıklar gösterebileceği, gerçekleşen bir şev kayması üzerinde araştırılmıştır.

2. BİR “GERİ HESAP YÖNTEMİ” UYGULAMASI

İstanbul Göktürk’de yapılmakta olan bir toplu konut inşaatı kapsamında, temel kotuna inilmek için açılan desteksiz kazı sonrasında Şekil 1 a ve b’de görüldüğü gibi mevcut altyapı ve komşu yapıları tehdit eden şev kayması gözlenmiş ve çözüm için bir önlem projesi hazırlanması gerekmiştir. Önlem projesi için seçilecek parametrelere sahada gerçekleşen şev hareketi incelenerek ulaşılmıştır. Kaymaya etki eden en önemli faktörlerden biri de boşluk suyu basıncı olduğundan, gerçekleşmiş ve geometrisi kaydedilebilmiş bir şev kayması mekanizması incelenerek stabilite bozukluğuna (güvenlik sayısı=1.0) neden olabilecek kayma mukavemeti ve yeraltı suyu durumu kombinasyonları belirlenebilmektedir (Durgunoğlu ve diğ., 1990).



Şekil 1. Desteksiz Kazıda Karşılaşılan Şev Kayması (a), Taç Bölgesi (b)

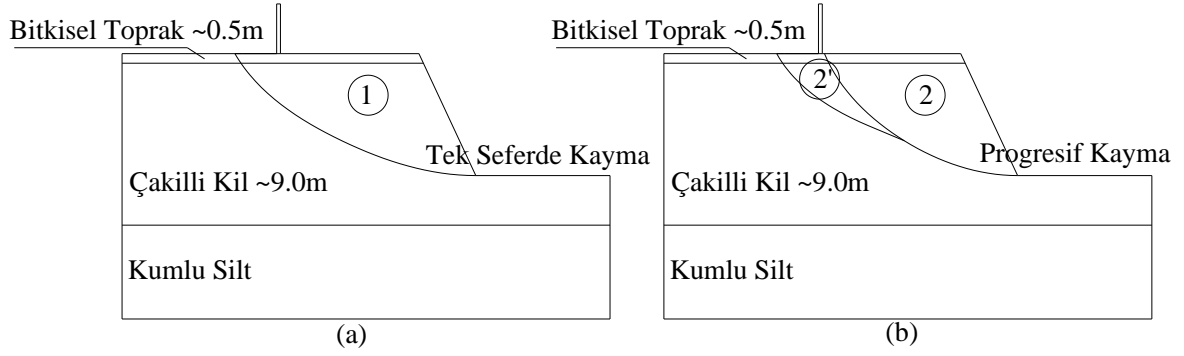
Bu doğrultuda, geri hesap yöntemi kullanılarak limit denge yöntemi ve sonlu elemanlar yöntemi kullanan bilgisayar programları ile şev kayması, farklı boşluk suyu basınçlarında ve farklı zemin özelliklerinde modellenmiş, göçme durumunu veren parametreler belirlenmiştir.

2.1. Zemin Yapısı ve Göçme Anında Çevre Koşulları

Sahada gerçekleştirilen sondajlardan elde edilen zemin profilinde üç ayrı birim tanımlanmıştır. Üstte 0.40-0.50 m kalınlığında bitkisel toprak bulunmaktadır. Bu birimin altında 8.40 m ila 9.50 m arasında değişen derinlikte kumlu, orta sıkı, yarı yuvarlak, köşeli çakıllı, sert kil ile karşılaşmıştır. Bu birim altında ise sarımsı-kahve renkli, orta sıkı kumlu, silt birimin yer aldığı belirtilmiştir. Konut projesi kapsamında temel kazısı için zemin yaklaşık 6.50 m 2:1 (d:y) geçici şevle açılmış ve yaklaşık 1 hafta sonra göçme gerçekleşmiştir. Göçme Aralık ayının ortalarında yağışlı bir dönemde gerçekleşmiştir. Arazide yeraltı su seviyesinin kazı seviyesinin altında kaldığı bilirse de, göçmenin gerçekleştiği sırada şevin bir miktar ıslak olması muhtemeldir. Bu durumda, göçmenin kil tabakasında oluşan boşluk suyu basınç artışları doğrultusunda bir miktar konsolide olduktan sonra gerçekleştiği düşünülebilmektedir (kısmi drenajlı davranış). Bu nedenle kayan zemin kütlelerinde bir miktar su basıncının bulunduğu kabul edilmesi gerekmektedir. Göçme ile birlikte, Şekil 1a'da görüldüğü gibi alanın üzerinde bulunan ve ulaşım yolu olarak kullanılan sokak heyelan eden kütlelerin içinde kalmış ve hizmet veremez duruma gelmiştir. Ayrıca Şekil 1b'de görüldüğü gibi komşu parseli ayıran duvarda ve bu duvarın gerisinde yer alan komşu site içi parke taşı döşeli yolda bir kısım zarara yol açmıştır. Kaymanın gerçekleştiği dolgu tabakasının, kayma aynası incelendiğinde çakıllı kil olduğu görülmüştür. Zeminin kohezyonlu yapısı sayesinde şev, kazı yapıldıktan sonra hemen göçmemiş bir haftalık bir süreçte stabilitesini korumuştur. Sahada yapılan incelemelerden kazıyı yapan teknik elemanların yanığıya uğradığı anlaşılmaktadır. Dolgu tabakasının killi yapısı, kazı yapılırken kısa süreliğine şevin dik açılı ile durabileceği kanısını verdiği fakat göçmenin meydana geldiği gün yağın yoğun yağmur şevin hareket etmesine neden olduğu anlaşılmaktadır. Hareket sonucu Şekil 2'de görülen su borusu kırılmıştır. Yapılan sondajlarda yeraltı su seviyesi ile karşılaşılmamış olması yanığıya neden olmuş ve sonuçta muhtemelen kritik denge konumundaki şevde kırılan su borusu ile birlikte şevdeki su miktarı bir anda yükselmiş ve göçmeyi tetiklemiştir. Geri hesap analizine geçmeden önce kayma mekanizmasının tanımlanması çerçevesinde sahadaki göçme, Şekil 3 (a)'da gösterildiği gibi tek seferde 1 numaralı kayma hareketini veya (b)'de gösterildiği gibi progresif olarak 2 ve 2' hareketlerini yaptığı kanaati hasıl olmuştur. Geri analiz bu kayma mekanizmalarını da değerlendirecek şekilde yapılmıştır.



Şekil 2. Kırılan Su Borusu



Şekil 3. Kayma mekanizmalarının karşılaştırılması

2.2. Limit Denge Yöntemi ile Geri Analiz

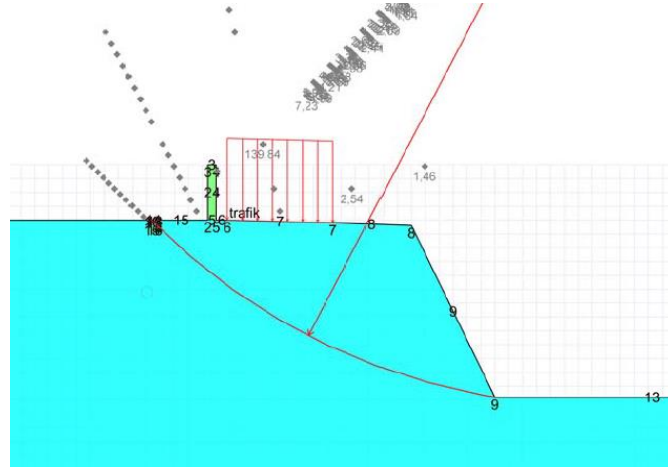
Göçen şev, limit denge yöntemleri ile çözüm yapan Talren programında modellenerek, Bishop yöntemi ile farklı zemin ve yeraltı suyu koşullarında güvenlik sayıları tespit edilmiştir. Önalp ve Arel (2004) tarafından hem kuvvet hem moment denge koşullarını sağladığı belirtilen Bishop Yöntemi seçilmiştir. Limit denge analizleri ile kaymanın belli bir yüzey boyunca oluştuğu kabulü yapılır ve kayan kütle bir bütün olarak veya dilimlere ayrılarak, kayma yüzeyi boyunca oluşan gerilmeler ile kayma mukavemeti karşılaştırılır. Bu analiz yöntemleri ile temelde, Mohr-Coulomb kayma kriterleri kullanılarak şevin üç ana statik denge eşitliği aranmaktadır (Hammouri ve diğ., 2008). Singh ve diğerleri (2008) tarafından yapılan çalışmaya göre ise limit denge yöntemleri içerdikleri sınırlamalara karşın güvenilir sonuçlar verdiğini ispatlamış fakat aynı anda tüm kesme dayanımının mobilize olduğu varsayıldığı için olduğundan daha düşük güvenlik sayıları verdiği belirtilmiştir.

Bir şev kaymasında, kayan bölgenin içinde kalan su kütlelerinin yarattığı boşluk suyu basıncının, kayan zemin kütlelerine oranına boşluk suyu basıncı oranı denir (Smith, 1993) ve şev için aşağıdaki şekilde hesaplanabilmektedir. Bu bağlamda γ_t zeminin toplam birim hacim ağırlığıdır.

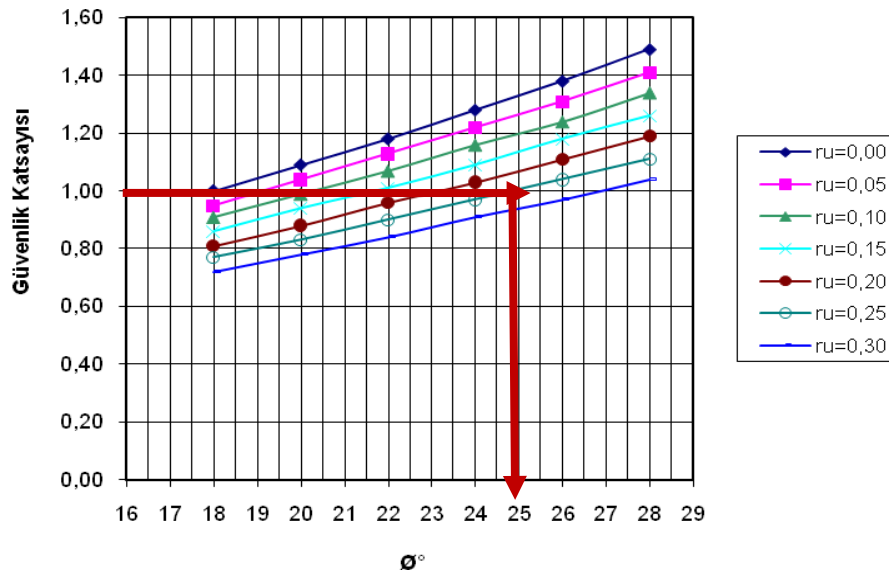
$$r_u = \frac{\text{Kayan şev parçasının hacmi (su altındaki)} \times \gamma_{su}}{\text{Kayan şev parçasının hacmi} \times \gamma_t} \quad (1)$$

Göçmenin yağışlı bir sezonda gerçekleşmesi nedeniyle r_u için 0.0 ila 0.3 arasında değişen değerler alınmıştır. Durgunoğlu ve diğerleri (1990) tarafından geri hesap yöntemi ile incelenen Buğralar Heyelanı'nda yeraltı su seviyesinin yüzeye yakın olmasından dolayı r_u değerleri 0.30-0.50 arasında alınmış ve 0.50 değeri için artezyen, basınçlı yüksek yeraltı suyu tanımlaması yapılmıştır. Burada incelenen şevin drenaja açık yapısı dikkate alındığında şevdeki su hacmi, kayan kütlelerin hacminin yarısı mertebesinde olduğu kabul edilebilmektedir. Suyun birim hacim ağırlığının, zeminin doygun birim hacim ağırlığına oranının 0.5 olduğu dikkate alınır, yukarıda verilen formülden, r_u değerinin bu proje için 0.25 olarak seçilmesi uygun olacaktır. Ayrıca, r_u değeri için 0.0'dan 0.3'a kadar değerler alınmış olup bu değerler için aranan zemin içsel sürtünme açısı ϕ' değerinin hangi hassaslıkta değiştiği gözlemlenmiştir. Alınan her r_u değeri için 18° - 28° arasında değişen ϕ' değerleri alınmış ve Şekil 4'de gösterildiği şekilde Talren programında stabilite modellenmiştir. Şekil 1-b'de görülebileceği gibi komşu parselin içine kadar uzanan şevin

taç noktası sahada başarılı bir şekilde tespit edilmiştir. Talren programında şev modellenirken taç noktası olarak bu nokta sabitlenmiş olup kritik kayma dairesi, bu noktadan geçen kayma daireleri arasında aranmıştır (Analiz 1A-T). Geri hesap analizinde kullanılan kesitler Talren 4.0 programı ile çözülmüştür. 1 no'lu göçme için elde edilen güvenlik sayıları Şekil 5'de değişen r_u ve ϕ değerlerine göre grafiğe aktarılmıştır. Bu güvenlik sayısı dağılımlarına bakılarak $r_u = 0,25$ değeri için güvenlik sayısını 1,00 yapan ϕ değeri 25° olarak belirlenmiştir (Akçakal, 2009).



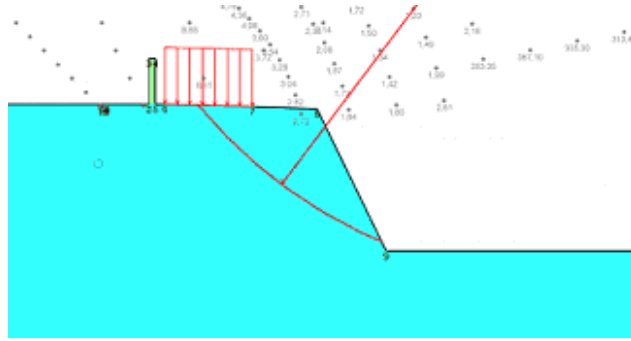
Şekil 4. 1 No'lu Kayma Dairesinin Talren Programı ile İncelenmesi (1A-T)



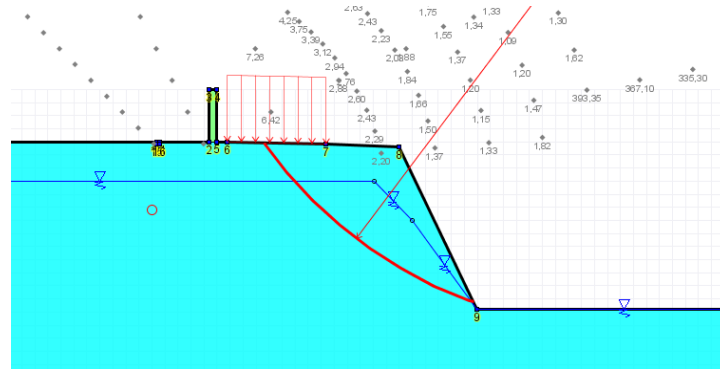
Şekil 5 1A-T Analizi: Değişen ϕ - r_u Değerlerine Göre Elde Edilen Güvenlik Sayıları

Talren programında göçme noktası tanımlanmadan bulunan kritik kayma daireleri 2 no'lu kayma dairesine yakın bir şekilde elde edilmiştir. Bu şekilde 2 no'lu kayma dairesi de Talren programında geri hesap yöntemi ile incelenmiş (Şekil 6 ve 7) ve göçme koşullarında ϕ değeri elde edilmiştir. Yukarıda da belirtildiği şekilde, şev stabilitesi problemlerinde yeraltı suyu koşullarının doğru modellenmesi önem arz etmektedir (Karikari ve Agyei, 2000). Bir stabilite probleminde yeraltı suyu, boşluk suyu basıncı oranı, piyezometrik çizgi veya boşluk basıncı dağılımı dikkate alınarak modellenebilmektedir (Walker ve Mohen,

1987). Analiz, Talren programında hem r_u katsayısı ile (Analiz 2A-T) hem de bu r_u katsayısının eşdeğeri olan yeraltı su seviyesi girilerek (Analiz 2B-T) kullanılmıştır.

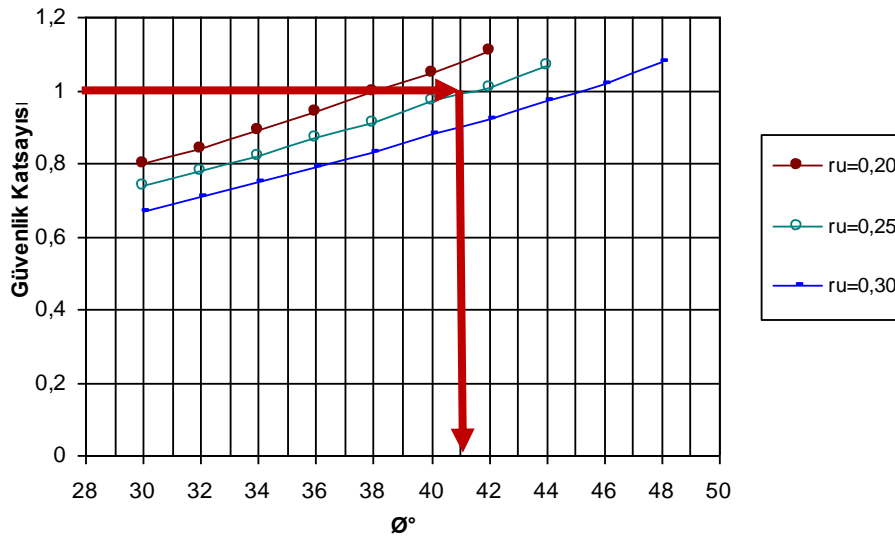


Şekil 6 2 No'lu Kayma Dairesinin Talren Programı ile İncelenmesi (2A-T)



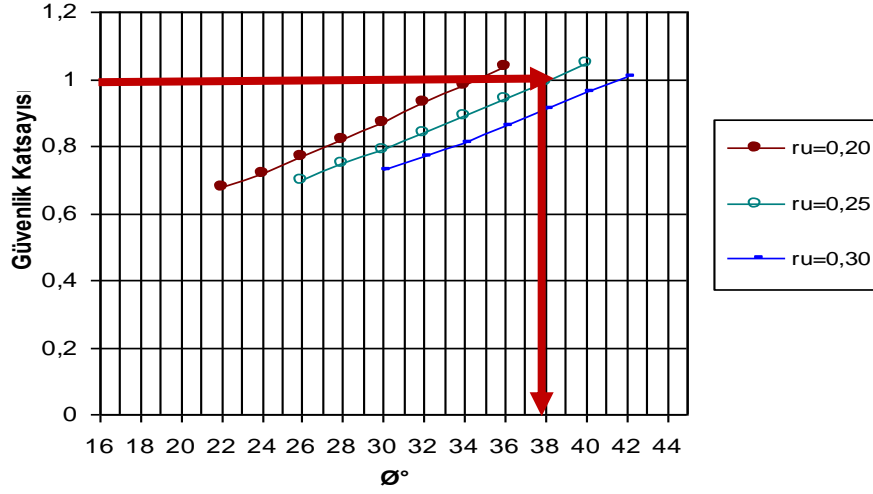
Şekil 7 2 No'lu Kayma Dairesinin Talren Programı ile İncelenmesi (2B-T)

2A-T göçmesi için Şekil 8'de $r_u = 0,25$ değeri için güvenlik sayısını 1,00 yapan \emptyset' değeri 41° olarak belirlenmiştir. Yeraltı su seviyesinin r_u katsayılarına göre belirlendiği 2B -T göçmesi için güvenlik sayıları ayrıca Şekil 9'da değişen r_u ve \emptyset' değerlerine göre grafiğe aktarılmıştır (Akçakal, 2009).



Şekil 8 2A-T Analizi: Değişen \emptyset - r_u Değerlerine Göre Elde Edilen Güvenlik Sayıları

Bu güvenlik sayısı dağılımlarına bakılarak $r_u = 0,25$ değeri için güvenlik sayısını 1,00 yapan ϕ' değeri 38° olarak belirlenmiştir.



Şekil 9 2B-T Analizi: Değişen ϕ -ru Değerlerine Göre Elde Edilen Güvenlik Sayıları

2.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Geri Analiz

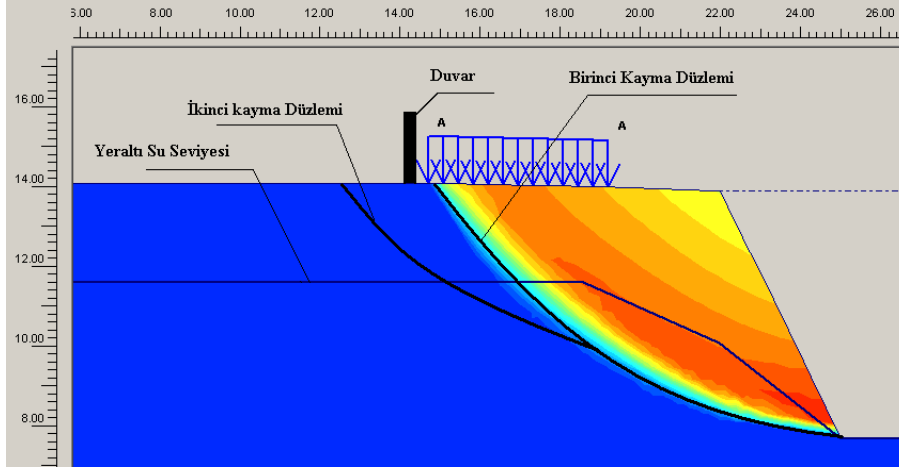
Sonlu elemanlar analizi, zeminin düğüm noktalarında birleşen elemanlara bölüdüğü, her düğüm noktasındaki deplasmanlardan yola çıkılarak gerilme ve şekil değiştirmelerin bulunduğu, diferansiyel denklem veya sınır değer problemleri içeren mühendislik uygulamalarının modellenebildiği bir yöntemdir. Limit denge yöntemlerine göre üstünlüklerinden bir tanesi kritik kayma dairesinin şekli ve konumu için hiç bir varsayımda bulunulmasına gerek duyulmamasıdır. Bununla birlikte, bu yöntem sayesinde zeminde oluşan gerilmeler, yer değiştirmeler, boşluk basıncı dağılımları, oturmalar ve yeraltı suyu sızıntıları başarılı bir şekilde ortaya konulmaktadır (Hammouri ve diğ., 2008). Kim ve Lee (2002) homojen olmayan ve düzensiz yüzeye sahip şevlerde limit denge analizinin ve sonlu elemanlar analizinin benzer güvenlik sayısı verdiğini, limit denge analizi ile bulunan kritik kayma dairesinin sonlu elemanlar yöntemi ile bulunan kayma dairesi konumuna yakın olduğunu ortaya koymuşlardır. Analizlerde dikkate alınan zemin modeli Çizelge 1’de verilmektedir.

Çizelge 1 Analizlerde Kullanılan Zemin Modeli

Model	Mohr-Coulomb
γ	18 kN/m ³
E	5000 kN/m ²
ν	0,35
c'	5,00 kN/m ²
ϕ'	Değişken

2 no’lu göçme mekanizması sonlu elemanlar yöntemi ile çözüm yapan Plaxis programında da modellenerek, farklı zemin ve yeraltı suyu koşullarında sağlanan güvenlik sayıları tespit edilmiştir. Yapılan analizlerde, r_u değeri 0.20-0,25-0,30’u temsil edecek şekilde yeraltı su

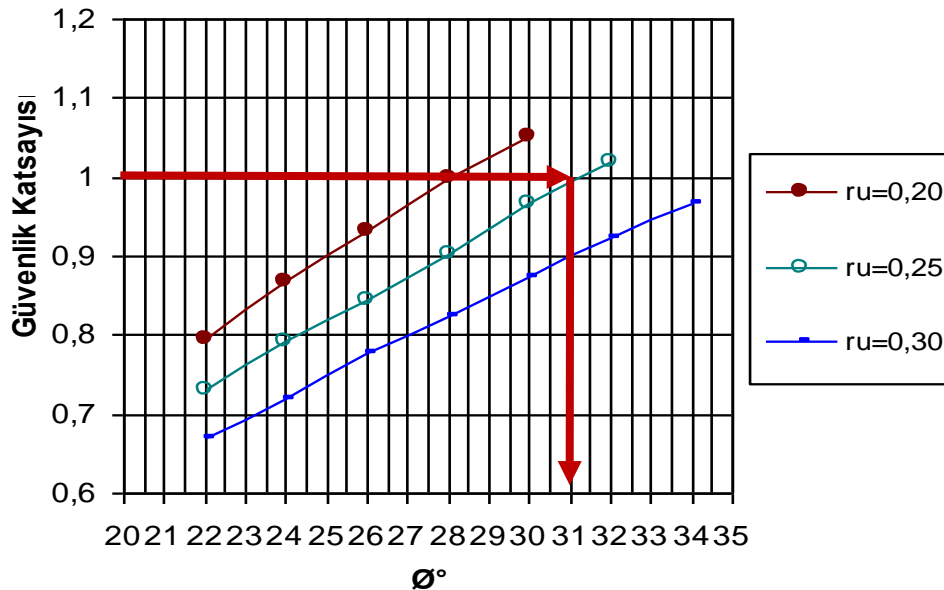
seviyeleri dikkate alınmış olup her r_u değeri için 22° - 34° arasında değişen ϕ' değerleri alınmış ve Şekil 10'de gösterildiği şekilde Plaxis programında modellenmiştir. Sürşarj yükünün dikkate alınması durumu 2B-Pq analizi ile, dikkate alınmaması durumu ise 2B-P analizi ile irdelenmiştir.



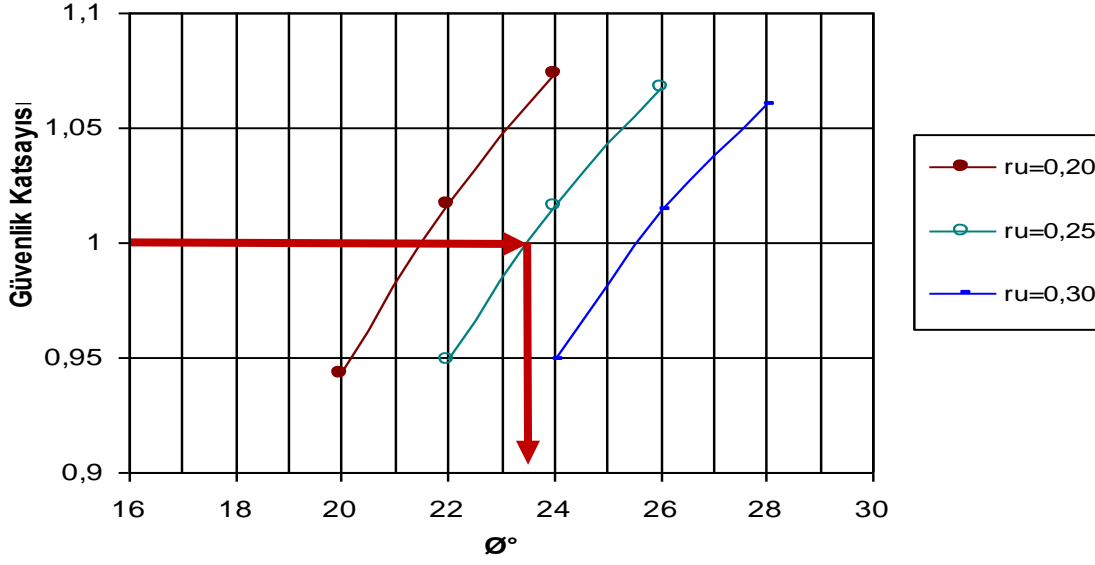
Şekil 10 Plaxis programında modellenen 2 no'lu kayma mekanizması (2B-Pq)

Göçme koşulları doğrultusunda deformasyon kontrollü analiz yapan Plaxis programı ile kayma dairesi bu yöntemle gerçeğe yakın bir şekilde çıkarılabilmektedir. Analizler sonucu ortaya çıkan kayma dairelerinin Şekil 10'da sahada gözlemlendiği gibi duvarın arkasından değil hemen önünden başladığı görülmektedir.

Son olarak sürşarj yükünün dikkate alınmadığı 2B-P analizi yine Plaxis programında modellenmiştir. 2B-P göçmesi için güvenlik sayıları ayrıca Şekil 11'de değişen r_u ve ϕ' değerlerine göre grafiğe aktarılmıştır. Bu güvenlik sayısı dağılımlarına bakılarak $r_u = 0,25$ değeri için güvenlik sayısını 1,00 yapan ϕ' değeri 31° olarak belirlenmiştir. 2B-Pq göçmesi için Şekil 12'de $r_u = 0,25$ değeri için güvenlik sayısını 1,00 yapan ϕ' değeri 23.5° olarak belirlenmiştir.



Şekil 11 2B-Pq Analizi Sonucu Değişen \emptyset - r_u Değerlerine Göre Bulunan Güvenlik Sayıları



Şekil 12 2B-P Analizi Sonucu Değişen \emptyset - r_u Değerlerine Göre Bulunan Güvenlik Sayıları

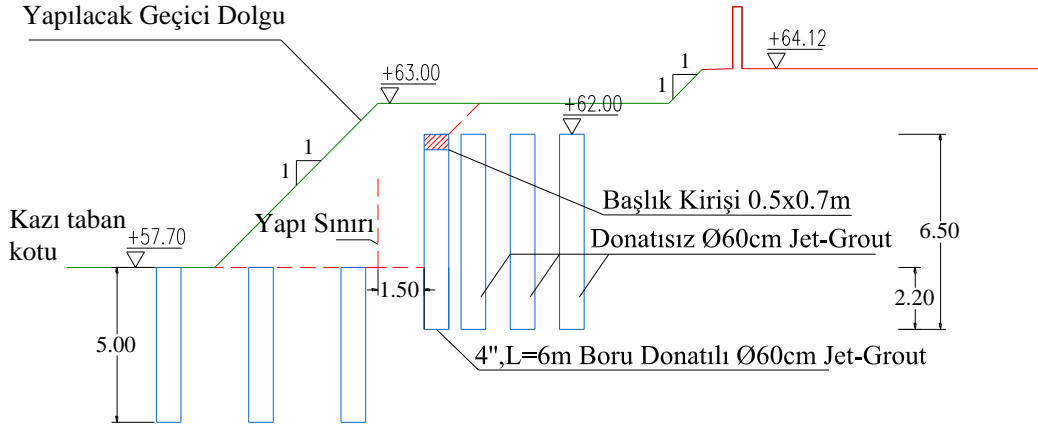
3. İYİLEŞTİRME PROJESİ

Bu araştırmada yapılmış olan geri analiz hesap yöntemi ile elde edilen parametrelerden bir iyileştirme projesi aşamasına geçildiğinde çeşitli alternatifler gözden geçirilerek, yapılabirlik analizleri ele alınmıştır. Bu bildirinin esas kısmını teşkil eden geri hesap yöntemine bir katkıda bulunacak ilave bir bilgi olan ve bu projenin başka bir kısmını oluşturan uygulamadan örnek kısmına ait bilgiler teorik çalışmaya destek ve kanıt olarak kısaca bu kısımda verilmektedir. Kaymanın gerçekleştiği bölgede temel inşaatının devam edebilmesi için şevin geçici bir destek yöntemi ile iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda uygun yöntemin belirlenmesi adına aşağıdaki yöntemler araştırılmıştır.

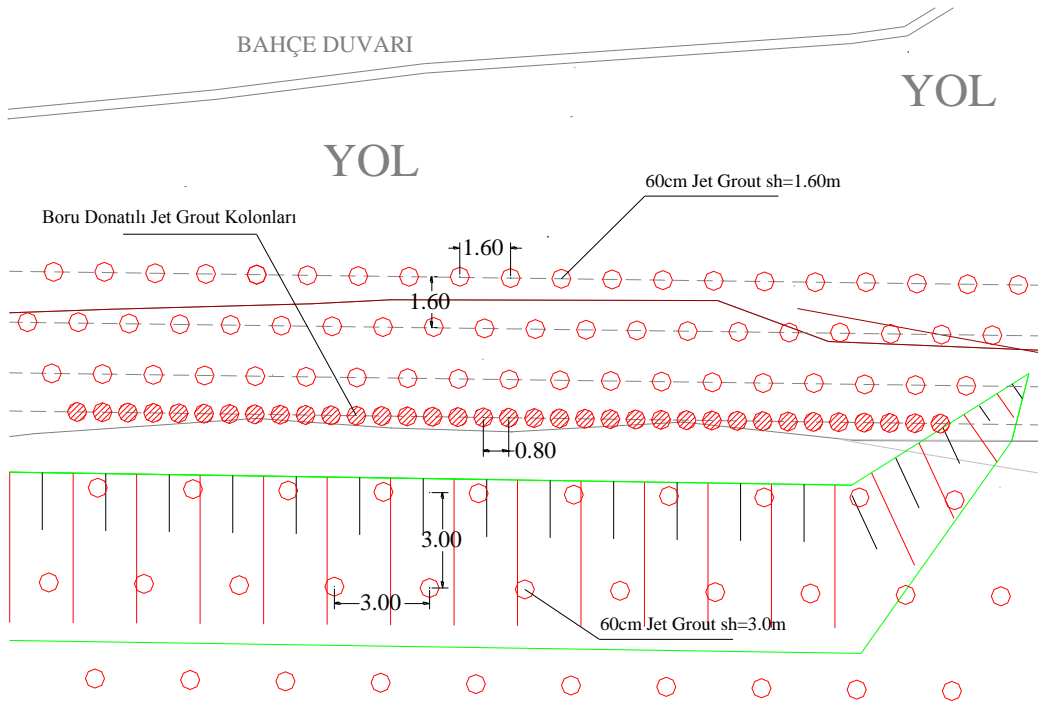
- 1. Alternatif: Jet grout yöntemi ile şevin hem üst hem topuk bölgelerinin iyileştirilmesi,
- 2. Alternatif: Jet grout yöntemi ile şevin sadece üst bölgesinin iyileştirilmesi,
- 3. Alternatif: Şevin fore kazıklı iksa yöntemi ile desteklenmesi.

Üç alternatif içinde, ilk olarak verilen şevin hem üst hem topuk bölgesinin jet grout yöntemi ile iyileştirilmesi alternatifi ile sadece üst bölgesinin iyileştirilmesi alternatifleri karşılaştırıldığında 1. Alternatifin daha güvenilir bir sonuç ortaya koyduğu görülmüştür. Şev kaymasından dolayı yapının oturacağı zeminde olası örselenmeleri bertaraf etmek adına topuk bölgesinin de iyileştirilmesine karar verilmiştir. Ayrıca kesit 3. alternatif olarak fore kazıklı iksa sistemi ile desteklenmiş olup 14 m boyunda fore kazıkların gerekli olduğu sonucuna varılmıştır. Jet grout ile şev iyileştirmesi, bu proje kapsamında fore kazıklı iksa alternatifine göre çok daha ekonomik ve daha hızlı bir çözüm ortaya koymaktadır. Tüm bu

nedenlerden dolayı iyileştirme projesi 1. alternatifine göre hazırlanmış olup tipik kesiti Şekil 13’de ve planı Şekil 14’de verilmektedir.



Şekil 13 Hem Üst Hem Topuk Bölgelerinde Jet Grout İle İyileştirme Yapılması-Kesit



Şekil 14 İyileştirilmiş Şev Planı

4. SONUÇLAR

Şev stabilitesinde geri hesap yöntemi, bir şev göçmesi vakası hakkında yeterli bilgilerin bulunması durumunda o bölgedeki zemin özelliklerinin belirlenmesinde son derece faydalı olabilecek bir yöntemdir. Bu araştırma kapsamında, şev stabilitesinde geri hesap yönteminin kullanılmasına yönelik bilgiler verilmiş, limit denge ve sonlu elemanlar yöntemleri kullanılarak göçmüş bir şev incelenmiştir. Bu iki yöntemin farkları, bu yöntemler kullanılırken dikkate alınan yeraltı suyu modelleri ve sonuca etkileri tartışılmıştır. Yapılan geri analizler içerdikleri varsayımlar ile birlikte Çizelge 3’de özetlenmiştir.

- Limit denge analizleri daha hızlı modellenebildiğinden çok sayıda parametre denenip birbirlerine olan etkileri araştırılması daha kolay olabilmektedir. Örneğin bu araştırmada, yüksek r_u değerlerinde, içsel sürtünme açısındaki artışın güvenlik sayıları üzerindeki etkisinin daha az olduğu görülmüştür. Diğer bir deyişle yüksek boşluk suyu basıncı ile kontrol edilmektedir.
- 1 no'lu kayma çözümlerinde elde edilen zemin sürtünme açısının, 2 no'lu (progresif kayma) kayma çözümlerinde elde edilen ϕ 'den yüksek olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, 1A-T analizinde şev in yerinde kaydedildiği gibi derinden kaymaya zorlanmasıdır. 2A-T analizi ile yenilmenin progresif olduğu anlaşılmıştır.

Çizelge 3 Farklı Koşullar Denenerek Yapılan Geri Analizlerin Özeti

	1A-T	2A-T	2B-T	2B-Pq	2B-P
Analiz Yöntemi	LDY	LDY	LDY	SEY	SEY
Program	Talren	Talren	Talren	Plaxis	Plaxis
Kayma Şekli	Tek seferde	Progresif	Progresif	Progresif	Progresif
Yeraltı Suyu Modellemesi	r_u	r_u	YASS	YASS	YASS
c' (kPa)	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
ϕ' (°)	25	41	38	31	23,5
r_u	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
q (kPa)	15,0	15,0	15,0	15,0	0,0
γ (kN/m ³)	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0
E (kPa)	5000	5000	5000	5000	5000
ν	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
GS	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

- Yeraltı suyunun r_u katsayıları ile tanımlandığı 2A-T analizi ile su seviyesinin doğrudan girildiği 2B-T analizi karşılaştırılmıştır. Yeraltı suyunun doğrudan girilmesi, güvenlik sayılarının daha yüksek çıkmasına dolayısıyla elde edilen ϕ değerlerinin daha küçük elde edilmesine neden olmuştur. Bunun nedeni olarak, yeraltı suyu modellemesinin r_u katsayıları ile yapıldığı durumda, kayan dilimde yeraltı su seviyesinin üst noktalarında da sudan dolayı ağırlaşma öngörüldüğünden, yeraltı su seviyesinin doğrudan girildiği analizlere oranla daha düşük güvenlik sayısı bulunduğu söylenebilir. Dolayısıyla geri hesap analizinde yeraltı su seviyesinin doğrudan girilmesi ile daha güvenli bir çözüm yapmak mümkündür.
- Son olarak da, kesit Plaxis programında modellenmiş olup, göçme anında elde edilen ϕ değerinin, Talren programıyla elde edilen değere göre daha düşük çıktığı görülmektedir. Bunun nedeni olarak limit denge analizlerinin göçme anında tüm kesme dayanımının mobilize olduğunu varsayması gösterilebilir. Plaxis programı ile sürşarj yükü girilmeden tespit edilen kesme dayanımı parametreleri ($c'=5\text{kPa}$, $\phi'=23.5^\circ$) bölgede yapılacak benzer kazılar için bu duruma paralel koşullarda emsal teşkil edebilecektir.

Sonuç olarak, şev stabilitesi tahkiki yapılan bir bölgede göçen bir şev incelendiğinde o bölgedeki zemin yapısı hakkında önemli bilgiler elde edilebilmektedir. Arazide ve laboratuvarlarda yapılan deneyler alanın sadece sınırlı bir bölgesini temsil ederken, şev göçmesinin geri hesap yöntemi ile incelenmesi o bölgenin kesme dayanımı bilgilerine daha kesin bir yolla ulaşılmasını sağlamaktadır. Geri hesap analizinde, hem limit denge yöntemi

hem de sonlu elemanlar yönteminin kullanılması şev in yenilme mekanizmasını anlama ve daha doğru kesme dayanımı parametrelerine ulaşılması adına önem arz etmektedir. Özetle, alınacak önlemler, modellenen geometrik şartlar ve geri hesap yöntemi ile hesaplanan zemin kayma mukavemeti aralığı için projelendirilerek, mühendislik yönünden doğru ve ekonomik bir önlemler paketi oluşturulabilmektedir.

KAYNAKLAR

- Akçakal, Ö., (2009) “Şev Stabilitesi Analizinde Geri Hesap Yöntemi ve Bir Vaka Analizi” İTÜ FBE Yüksek Lisans Tezi, İstanbul
- Duncan, J. M. and Wright, S. G. (2005), “Soil Strength and Slope Stability”, John Wiley & Sons.
- Durgunoğlu, H. T., Kulaç F., Karadayılar T. ve Baştürk, G. (1990), “Stabilitede Zemin Davranışından Geri Hesap Yöntemi: Buğrular Etüdü”, İstanbul
- Hammouri, N. A., Malkawi, A. I. H. and Yamin, M. M. A. (2008), “Stability Analysis of Slopes Using the Finite Element Method and Limiting Equilibrium Approach”, Bulletin of Engineering Geology: 67:471–478.
- Karikari, Y.O. and Agyei, Y.G. (2000), “Stability of Slopes Over Colluvium: Investigation, Analysis and Stabilisation”, In proceedings of Geotechnical Engineering GeoEng2000, Melbourne, Australia, November, 19-24 2000.
- Kim, J., Salgado, R. and Lee, J. (2002), “Stability Analysis of Complex Soil Slopes Using Limit Analysis”. J. Geotech. Geoenviron. Eng. ASCE 128-7:546–557.
- Önalp, A. ve Arel, E. (2004), “Geoteknik Bilgisi II Yamaç ve Şevlerin Mühendisliği”, Birsen Yayınevi, İstanbul
- Popescu, M.E. and Sasahara, K. (2009), “Landslides – Disaster Risk Reduction”, Springer Berlin Heidelberg, Germany
- Smith, M.J. (1993), “Soil Mechanics”, 4th Ed., Longman Scientific & Technical, Essex, UK
- Singh, T.N., Gulati, A., Dontha, L. and Bhadrwaj, V. (2008), “Evaluating Cut Slope Failure by Numerical Analysis - A Case Study”, Natural Hazards (2008) 47:263–279.
- Walker B.F. and Mohen, F.J. (1987), “Groundwater Prediction and Control, and Negative Pore Water Pressure Effects. Proceedings of Extension Course on Soil Slope Instability And Stabilization”, B.F. Walker and R.Fell (Eds), Sydney, A.A. Balkema, 1-52.