

Limit denge analizi (Bishop Yöntemi) ile kütle hareketinin mekanizması ve önlem yapısının analizi: Van ili örneği

The analysis of mass movement mechanism using limit equilibrium method (Bishop Method) and the analysis of retaining structure: a case study for Van province

Mesut GÖR*^{1,a}

¹Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 23119, Elazığ

• Geliş tarihi / Received: 30.12.2020 • Düzeltilek geliş tarihi / Received in revised form: 15.03.2021 • Kabul tarihi / Accepted: 26.03.2021

Öz

Şevler, doğal şev veya inşa edilmiş şevler olarak iki farklı şekilde tanımlanabilir. Şevlerin doğal veya inşa edilmiş olması her zaman duraylı olabilecekleri anlamına gelmemektedir. Zeminin kayma mukavemetinin aşılması sonucunda şevde bir duraysızlık meydana gelir. Bu duraysızlığa sebep olan kuvvet, hareket yüzeyi boyunca oluşan kayma gerilmeleri, zeminin kayma mukavemeti parametreleri cinsinden belirlenir ve karşılaştırılır. Günümüzde teknolojik gelişmelere paralel olarak sayısal analiz ve limit denge metotlarını kullanarak şev duraylılık analizleri yapan paket programları geliştirilmiştir. Bu çalışmada, Slide v.06 limit denge programı kullanılarak şev duraylılık analizleri yapılmıştır. Van ilinde meydana gelmiş bir kütle hareketinin sebebi belirlenmiştir. Aynı bölgede bulunan ve henüz hareketin meydana gelmediği şev için ise farklı analizler yapılarak şevin duraylılığı hem dinamik, hem de statik durum için incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında şev duraylılığının devamlılığı için betonarme istinat duvarı önerisinde bulunulmuştur. Betonarme istinat duvarı geometrisi paket program içerisinde oluşturulup, malzemenin teknik özellikleri girilerek analizler yapılmıştır. Bu modeller sonucunda önerilen istinat duvarıyla dinamik koşullar altında şevin duraylılığı sağlanmıştır.

Anahtar kelimeler: İstinat duvarı, Limit denge, Slide, Şev duraylılığı

Abstract

Slopes can be defined in two different ways as natural slopes or constructed slopes. Just because the slopes are natural or constructed does not always mean that they can be stable. As a result of exceeding the shear strength of the ground, instability of a slope occurs. The force causing this instability is determined and compared in terms of the shear stresses occurring along the movement surface and the shear strength parameters of the soil. Today, in parallel with technological developments, software has been developed that carry out slope stability analysis using numerical analysis and limit equilibrium methods. In this study, slope stability analyzes have been performed using the Slide v.06 software based on limit equilibrium method. The reason of a mass movement in Van province was determined with the aid of back analysis. Additional analyzes were carried out and the stability of the slope was examined for both dynamic and static conditions. In the light of the results obtained from the stability analyses, a reinforced concrete retaining wall has been suggested for slope stability durability. Reinforced concrete retaining wall geometry was modelled in the software and analyzes were made by using its technical specifications as input parameters. As a result of these constituted models, the slope is stable under dynamic conditions with the aid of the proposed retaining wall.

Keywords: Retaining wall, Limit equilibrium, Slide, Slope stability

*^a Mesut GÖR; mgor@firat.edu.tr, Tel: (0424) 237 00 00, orcid.org/0000-0002-5463-9278

1. Giriş

Şevler, doğal şev veya inşa edilmiş şevler olarak iki farklı şekilde tanımlanabilir. Şevlerin doğal veya inşa edilmiş olması her zaman duraylı olabilecekleri anlamına gelmemektedir. Zeminin kayma mukavemetinin aşılması sonucunda şevde bir duraysızlık meydana gelir. Bu duraysızlığa sebep olan kuvvet hareket yüzeyi boyunca oluşan kayma gerilmeleri, zeminin kayma mukavemeti parametreleri cinsinden belirlenir ve karşılaştırılır. Bu parametreler ile yapılan hesaplamalara şev duraylılık analizleri denilmektedir (Das, 1994).

Günümüzde teknolojik gelişmelere paralel olarak sayısal analiz ve limit denge metotlarını kullanarak şev duraylılık analizleri yapan paket programları geliştirilmiştir. Limit denge yöntemini kullanan paket programlar muhtemel hareket olacak bölgeleri dilimlere bölerek analizler gerçekleştirmektedir (Özbay ve Çabalar, 2015). Bu analizler sonucunda kritik kayma yüzeyleri belirlenmektedir. Bu yüzeyler, kayma dairesinin merkezi ve yarıçapında yapılan değişikliklere bağlı olarak şekillenmektedir (Yılmaz ve Özsoy, 2003).

Şevlerin duraysızlığı yenilme zamanındaki zemin ve ortam koşulları ile ilgili bilgiler vermektedir. Geriye dönük analizler yapılarak inceleme alanlarındaki zeminlerin dayanım parametreleri, yer altı suyunun durumu ve duraysızlık modeli öğrenilmeye çalışılır (Akbulut vd., 2013). Bu analizler sonucunda bir şevin yenilme durumu esas yenilmenin olduğu zamandaki zemin koşullarının ve bu duruma uygun kayma modelinin belirlenmesi işlemi geriye dönük analiz olarak adlandırılmaktadır (Duncan ve Wright, 2005).

Duraysızlık anında yapılan analizler için bu andaki zemin dayanım parametreleri ve boşluk suyu basıncı parametreleri esas alınmalıdır (Zhang vd., 2010). Geriye dönük analizler için birçok araştırmacı hem deterministik yöntemler (Wesley ve Leelaratham, 2001; Tiwari vd. 2005; Alemdag vd., 2015; Kaya vd., 2016; Alemdağ, 2016), hem de olasılıklara dayalı yöntemler kullanmışlardır (Luckman vd., 1987; Gilbert vd., 1998; Chowdhury vd., 2004; Zhang vd., 2010; Akbaş, 2015). Jeolojik süreksizlikler, yeraltı ve çevre suları, zemin parametreleri, deprem vb. dinamik etkiler ve şev geometrisi hem doğal hem inşa edilmiş şevlerin duraylılığını kontrol eden en önemli parametrelerdir (Rai, 2017).

Yapılan bu çalışmada Slide v.06 (Rocscience, 2014) limit denge programı kullanılarak şev stabilite analizleri yapılmıştır. Bu çalışmada Van ilinde meydana gelmiş bir kütle hareketinin sebebi

mevcut zemin koşulları ve doygun durum için belirlenmiştir. Aynı bölgede bulunan ve henüz hareketin meydana gelmediği şev için ise farklı analizler yapılarak şevin stabilitesi hem dinamik, hem statik durum için incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında duraysızlık oluşan şevde duraylılığı sağlamak için zemin iyileştirme yöntemi (betonarme istinat duvarı) kullanılarak öneride bulunulmuştur.

2. Genel jeoloji

Van Gölü üzerine yapılmış araştırmalar (Gürel, 1995; Kadioğlu, 1995; Degens ve Kurtman, 1978; Kempe vd., 1978) incelendiğinde; havzada ilk kez günümüzden yaklaşık 60,000-100,000 yıl kadar önce su birikmeye başladığından su seviyesinde alçalıp yükselmesine bağlı olarak Van Gölü Havzası'nda depolanan eski ve yeni göl çökelleri, bölgede bulunan Pliyo-Kuvaterner öncesi yaşlı birimlerin üzerinde aşılma uyumsuzlukla yer almaktadırlar. Yine bu yükselme-alçalma süreci neticesinde göl çökelleri ile akarsu çökelleri, çalışma alanında yer yer, ardalanmalı olarak bulunmaktadır (Özkaymak, 2003). Şev duraylılık sorunu oluşan (Şekil 1) alan eski göl çökelleri pekişmemiş kumlu seviyeler ile çok gevşek ve yumuşak karbonatlı-killi seviyelerden oluşur. Birimin en alt kesimlerinde görülen kumlu seviyeler, farklı boy ve türde çakıl boyutunda malzeme de içerir. Bu birimlerin üzerine beyaz-kirli beyaz-gri renkli, karbonatlı-killi seviyeler gelir. İnceleme alanının farklı kısımlarında 1800 metreye kadar varan yüksekliklerde eski göl ve akarsu çökellerine rastlanılmaktadır (Özkaymak, 2003).

3. Arazi ve laboratuvar çalışmaları

İnceleme alanında 4 adet toplam derinliği 36.0 m olan araştırma sondajı, 4 adet çok-kanallı yüzey dalgası analizi (MASW) (Şekil 2) ve arazide gözlemler yapılmıştır (Şekil 3). Yapılan sondajlar sonucunda yeraltı suyuna rastlanılmamıştır. Sondajlardan ve jeofizik ölçümlerden elde edilen kesit Şekil 4'te verilmiştir. Ayrıca laboratuvarında zemine ait mühendislik özelliklerini belirlemek için araştırma sondajlarından örselenmemiş numune (UD) ve karot örnekleri derlenmiştir (Şekil 5). Kayma olan bölgeden doğrudan alınacak örneklerde örselenme ihtimali olduğundan dolayı bölgede yapılan sondajlardan elde edilen örselenmemiş örnekler tercih edilmiştir. Ayrıca hareketin meydana geldiği bölgeye iş makinası ulaşımı sağlanamadığı için o bölgeden UD alınamamıştır. Zemin ve kaya örnekleri ilgili standartlar tarafından (TS 1900-1, 2006; TS 1900-

2, 2006; ISRM, 2007) önerilen yöntemlere göre hazırlanarak, deneyler Hazar Zemin ve Yapı Malz. Lab. Sondaj Jeoloji Hizm. San. ve Tic. Ltd. Şti.'ne

yaptırılmıştır. Deney sonuçları doymun ve doğal zemin koşulları için Tablo 1 ve 2'de verilmiştir.



Şekil 1. İnceleme alanının jeoloji (Özkaymak, 2003'ten değiştirilerek) ve yer bulduru haritası

Tablo 1. Doymun durumdaki zemine ve kaya malzemesine ait mühendislik parametreleri

Laboratuvar Deneyleri							
	Üç Eksenli Basınç Deneyi (UU)		Direkt Kesme		Kaya Üç Eksenli Basınç Deneyi		Seçilen Karakteristik Değerler
	c (kg/cm ²)	φ (°)	c (kg/cm ²)	φ (°)	c (kPa)	φ (°)	
SM	-	-	Min: 0.37 Mak: 0.35 Ort: 0.33	Min: 12 Mak: 14 Ort: 13	-	-	c: 0.33 kg/cm ² φ: 13°
CL	Min: 0.45 Mak: 0.57 Ort: 0.51	Min: 4 Mak: 7 Ort: 6	-	-	-	-	c: 0.50 kg/cm ² φ: 6°
Kiltışı	-	-	-	-	-	-	-

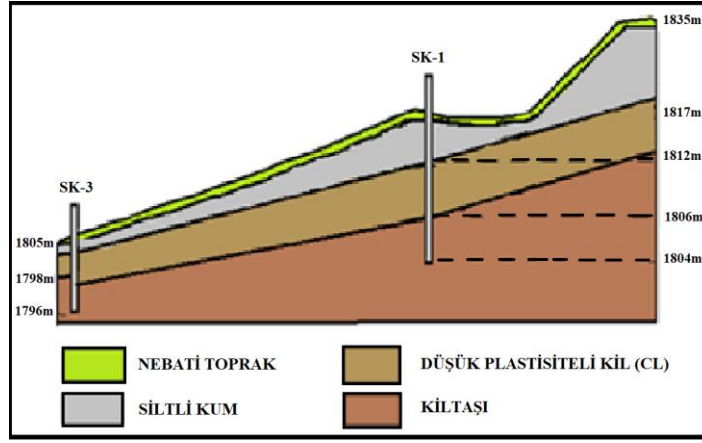
Arazi gözlemleri esnasında bölgede meydana gelen hareketin sebeplerine ait ipuçları araştırılırken şev üzerinde hareketin meydana gelmediği bölgelerin bir kısmının daha yüksek eğime sahip ve doğal durumda aynı tür zemin özelliklerinde olduğu görülmüştür. Bu hususlar göz önüne alındığında, duraysızlığa sebebiyet veren etkenin, mevcut eğimde zemin parametrelerindeki değişimlerden kaynaklı olduğuna işaret etmektedir. Bu sebeple su deposunun bulunduğu bölge incelenerek herhangi

bir su sızıntısı olup olmadığı kontrol edilmiştir. Bunun sonucunda mevcut su deposundan ve/veya su hattından sızıntıların olduğu görülmüştür. Bu sebeple kayan kütlelerin hangi zemin koşullarında duraysız hale geldiğini belirlemek için laboratuvar da doymun zemin koşullarında deneyler gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2. Doğal durumdaki zemine ve kaya malzemesine ait mühendislik parametreleri

Laboratuvar Deneyleri							Seçilen Karakteristik Değerler
	Üç Eksenli Basınç Deneyi (UU)		Direkt Kesme		Kaya Üç Eksenli Basınç Deneyi		
	c	ϕ	c	ϕ	c	ϕ	
	(kg/cm ²)	(°)	(kg/cm ²)	(°)	(kPa)	(°)	
SM	-	-	Min: 0.11 Mak: 0.14 Ort: 0.125	Min: 21 Mak: 25 Ort.: 23	-	-	c: 0.12 kg/cm ² ϕ : 23°
CL	Min: 0.41 Mak: 0.47 Ort: 0.43	Min: 13 Mak: 16 Ort: 15	-	-	-	-	c: 0.43 kg/cm ² ϕ : 15°
Kiltaş	-	-	-	-	214	12	c: 214 kPa ϕ : 12°

**Şekil 2.** Jeofizik ölçüm noktalarının yerleri**Şekil 3.** Çalışma alanı içerisinde bulunan su deposu ve su deposu civarının görünümü



Şekil 4. Sondajlar ve jeofizik ölçümlerden faydalanılarak oluşturulmuş jeolojik kesit



Şekil 5. UD ve karot örneklerinin alındığı sandıklar

4. Bulgular ve tartışma

4. 1. Şev duraylılık analizleri

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen duraylılık analizlerinin bütününde “Sadeleştirilmiş Bishop Yöntemi” kullanılmıştır. Zemin ve ayrışarak zemin özelliği kazanmış kaya kütlelerine uygulanabilir olması, İsveç Dilim Yöntemi’ne göre her koşulda elde edilen güvenlik katsayısının daha güvenilir olması birçok şev duraylılık probleminde Basitleştirilmiş Bishop Yöntemi’nin kullanılabilirliğini artırmaktadır. Dairesel kayma yüzeyinin dengesini inceleyen Bishop metodu, ilk kez genel şekilli yüzey için geliştirilmiştir (Bishop, 1955). Sonradan dairesel yüzey varsayımında da önemli bir hata meydana getirmediği buna karşılık hesaplamalarda çabukluk sağlamıştır. Bu yöntemde dilim kenarlarındaki kuvvetlerin yatay olduğu, yani dilimler arasındaki kesme gerilmelerinin sıfır olduğu varsayılmaktadır. Bu

yöntemde düşey yöndeki dengeyi sağlamak amacı ile oluşturulan her bir dilim tabanındaki normal gerilme elde edilir. Şekil 6’da görülen bir dilim için düşey yöndeki kuvvetleri bileşenlerine ayırmak mümkün olmaktadır. Bu durumda aşağıdaki bağıntı (1) ortaya çıkarılabilir;

$$N * \cos \alpha + S * \sin \alpha - W = 0 \quad (1)$$

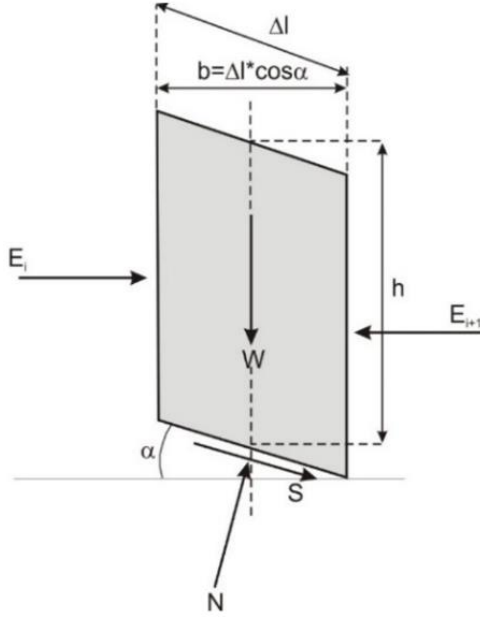
Tabana etkiyen kesme gerilmesi efektif gerilmeler cinsinden yazılacak olursa;

$$S = \frac{1}{F} * [c' - \Delta l + (N - u * \Delta l) * \tan \phi'] \quad (2)$$

(2) bağıntısı elde edilmiş olur. Yukarıdaki düşey kuvvetler bağıntısında S kesme gerilmesi yerine ilgili bağıntı yazıldığında ise;

$$N = \frac{W - (1/F) * (c' * \Delta l - u * \Delta l * \tan \phi') * \sin \alpha}{\cos \alpha + (\sin \alpha * \tan \phi') / F} \quad (3)$$

(3) bağıntısı elde edilir.



Şekil 6. Basitleştirilmiş (sadeleştirilmiş) Bishop Yöntemi'nde dilime etkiyen kuvvetler

Yöntem, sonuç olarak bir güvenlik katsayısının belirlenmesini sağlar ve bu amaçla aşağıdaki bağıntı (4) kullanılır;

$$F = \frac{\sum \left[\frac{c' * \Delta l * \cos \alpha + (W - u * \Delta l * \cos \alpha) * \tan \phi'}{\cos \alpha + (\sin \alpha * \tan \phi') / F} \right]}{\sum W * \sin \alpha} \quad (4)$$

Yukarıdaki bağıntıda da görüleceği gibi analiz efektif gerilmeler cinsinden ifade edilen kesme dayanımları kullanılarak yapılmıştır. Ancak aynı analizleri toplam gerilmeler cinsinden yapmak da mümkündür. Toplam gerilmelere dayalı bir güvenlik sayısı ifadesi, efektif gerilmeler kullanılarak elde edilmiş olan denklemdeki efektif parametreler (c' ve ϕ') yerine toplam gerilme eşdeğerlerini (c ve ϕ) koymak ve boşluk suyu basıncını sıfıra eşitlemekle elde edilebilmektedir. Toplam gerilmeler cinsinden Basitleştirilmiş Bishop Yöntemi aşağıdaki bağıntı (5) ile ifade edilmektedir;

$$F = \frac{\sum \left[\frac{c * \Delta l * \cos \alpha + W * \tan \phi}{\cos \alpha + (\sin \alpha * \tan \phi) / F} \right]}{\sum W * \sin \alpha} \quad (5)$$

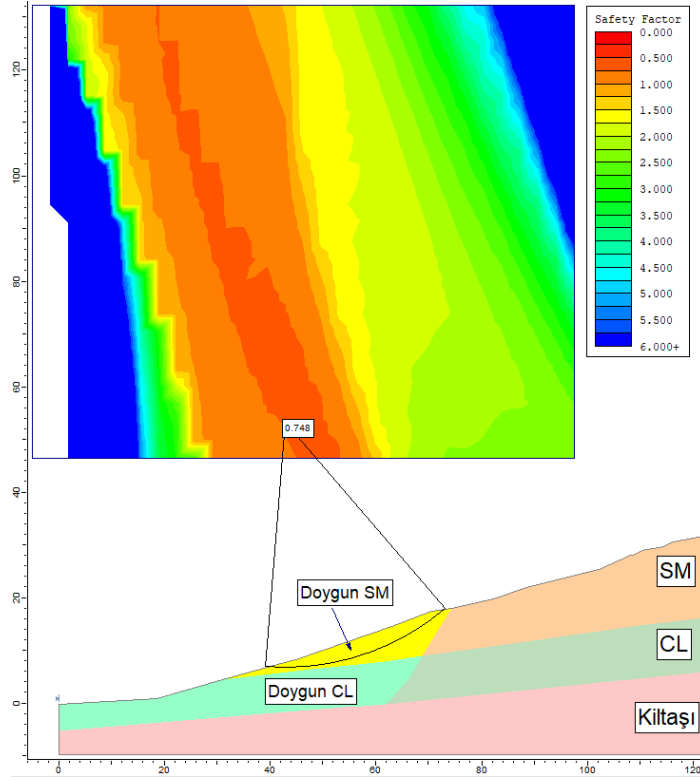
Şev duraylılık analizleri, duraysızlık sorununa net bir çözüm ortaya koyabilmek için iki farklı şekilde yapılmıştır. İki farklı şekilde analizlerin yapılmasının sebebi ise duraysızlık sorununa sebep olan koşulların net olarak ortaya çıkarmaktır. Detaylı analizlere geçilmeden önce arazi incelemelerinde duraysızlığa sebep olan en kuvvetli ihtimalin su deposu ve/veya su hattından kaynaklanan su sızıntıları olduğu düşünülerek doygun zemin durum için modellemeler yapılmıştır. Aynı şevde doğal zemin durumu da göz önüne alınarak yeni analizler yapılmıştır. Bu analizlerin tamamında Rocscience (2014) tarafından üretilmiş Slide v.06 paket programı kullanılmıştır.

4. 1. 1. Doygun zemin koşullarındaki duraylılık analizi

Çalışma alanında, Şekil 3'te su deposu civarının görünümünü içeren şekilde daha yüksek eğimli olan bölge görülmektedir. Bu bölgede mevsimsel yağışlar ve çevresel sular etkisi dahilinde herhangi bir şev duraysızlığına rastlanmamıştır. Yapılan incelemelerde su deposu ve/veya su hattından kaynaklanan uzun süreli su sızıntıları mevcut şevde oluşan duraysızlığın ana sebebi olduğu tahmin edilmiş olup hareketin gerçekleştiği zamana kadar meydana gelmiş su kaçağı miktarı belirlenememiştir. Bu durumun tahmin edildiği gibi duraysızlığa sebebiyet verip vermediğinin ortaya konabilmesi için geriye dönük analizler yapılmıştır (Şekil 7).

Bu analizlerde, su sızıntıları sebebiyle zeminin doygun hale geçtiği esastan yola çıkılarak zeminin doygun haldeki mühendislik parametreleri kullanılıp analizler yapılmış ve analiz sonuçları gerçek durumda kayan bölge (Şekil 8) ile karşılaştırılmıştır.

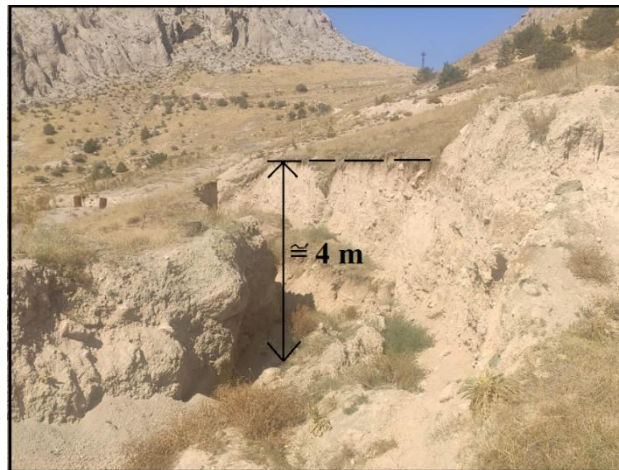
Hareketin meydana geldiği bölgede yaklaşık 3.0 – 4.0 m derinliklere kadar bir kaymanın meydana gelmiş olduğu görülmüştür (Şekil 9). Yapılan analiz sonuçları da incelendiğinde kayma derinliğinin gerçek durumdakine benzer olarak 3.0-4.0 m'ye ulaşan muhtemel kayma daireleri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Bu kayma dairelerinden 0.748 güvenlik katsayısına sahip olan kayma dairesinin gerçek durumda meydana gelmiş olan kütle hareketini temsil ettiği görülmektedir.



Şekil 7. Doğun durum için yapılan analiz sonucu



Şekil 8. Kayan bölgenin çalışma alanındaki görünümü

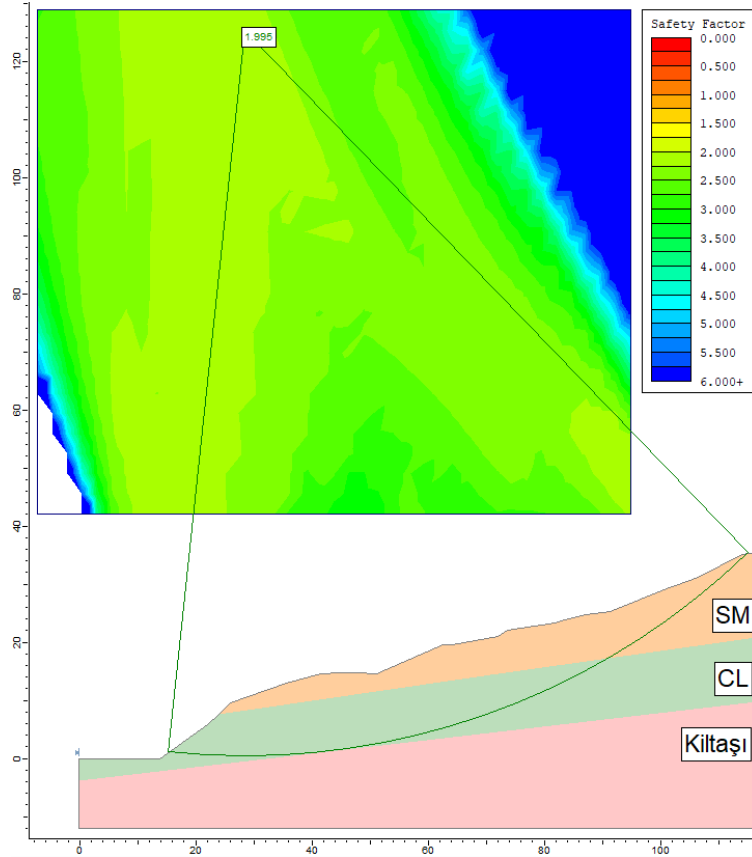


Şekil 9. Kayan kütle derinliğinin arazideki görünümü

4. 1. 2. Doğal zemin koşullarındaki duraylılık analizi

Bu çalışmada yapılan geriye dönük analizin sonucu, meydana gelmiş olan kayma hareketinin sebebinin zeminin doymun duruma geçmesi olduğunu ortaya koymuştur. Ancak bu kütle hareketi tüm şev boyunca meydana gelmemiştir. Aynı şevde su sızıntılarının olmadığı ve aynı eğim özellikleri göz önüne alınarak doğal zemin koşulları altında hem statik hem de dinamik durum için yeni analizler yapılmıştır. 2011 yılında Van

ilinde çalışma alanını da içine alan bölgede meydana gelen depremlerde PGA değerlerinin 0.182-0.251 g değerlerine ulaştığı bilinmektedir (Sayın vd., 2014). Çalışma alanı için dinamik durum modellemelerinde kullanılacak PGA (en büyük yer ivmesi) değeri AFAD'ın Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması kullanılarak 0.275 g olarak belirlenmiştir. İlk olarak şev duraylılık analizleri statik durum için değerlendirilmiştir. Statik durumda şev güvelik katsayısı 1.995 olarak belirlenmiştir (Şekil 10).



Şekil 10. Statik durum analizinden elde edilmiş olası kayma dairesi

Bu durumda şevde statik koşullar altında herhangi bir duraysızlık beklenmemektedir. Çalışma alanı deprem riski açısından yüksek riskli bir bölgede bulunduğundan dinamik durum analizlerinin de dikkate alınması önem arz etmektedir. Bu sebeple yapılan dinamik koşul analizlerinde (PGA=0.275 g) şevin güvenlik katsayısının 1.000 olduğu görülmüştür (Şekil 11). Bu değer kritik dengeyi temsil ettiğinden bu şev için önlem alınması gerekmektedir. Şev duraysızlıklarında teknik olarak en ekonomik çözüm basamaklandırma işlemidir. Basamaklandırma yönteminin amacı şev eğimini düşürmek, kayma ihtimali olan bölgeden ağırlık eksiltmek ve dolayısıyla kaydırıcı kuvvetlerin etkisini azaltmaktır. Ancak burada tüm şevi etkileyen bir durum söz konusu değildir.

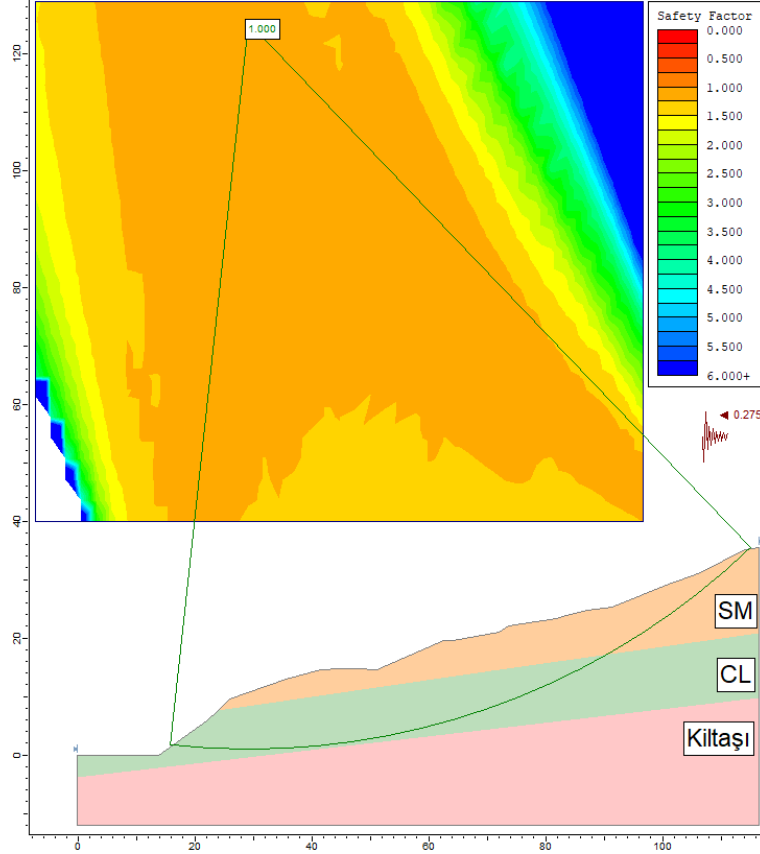
Sadece su kaçakları olan bölgede bir duraysızlık meydana gelmiştir. Su kaçakları ortadan kaldırıldığında mevcut eğimde doğal durumda duraysızlık beklenmemektedir. Bu sebeple su kaçakları ortadan kaldırıldıktan sonra basamaklandırma işlemine ihtiyaç duyulmamaktadır. Şevde meydana gelmiş olan duraysızlık incelendiğinde sorunun eğim kaynaklı olmadığı, esasında duraysızlığın zeminin doymun hale geçmesi sonucunda mühendislik parametrelerinin değişmesiyle meydana geldiği belirlenmiştir. Bu sebeple harekete geçen bölge ve gelecekteki olası su kaçakları sebebiyle duraysızlık gerçekleşmesi muhtemel bölgeler için şev topuğuna bir betonarme istinat duvarı tasarlanması ile parametre değişimleri sonucu da meydana

gelebilecek duraysızlıkların engellenebileceği ön görülmektedir.

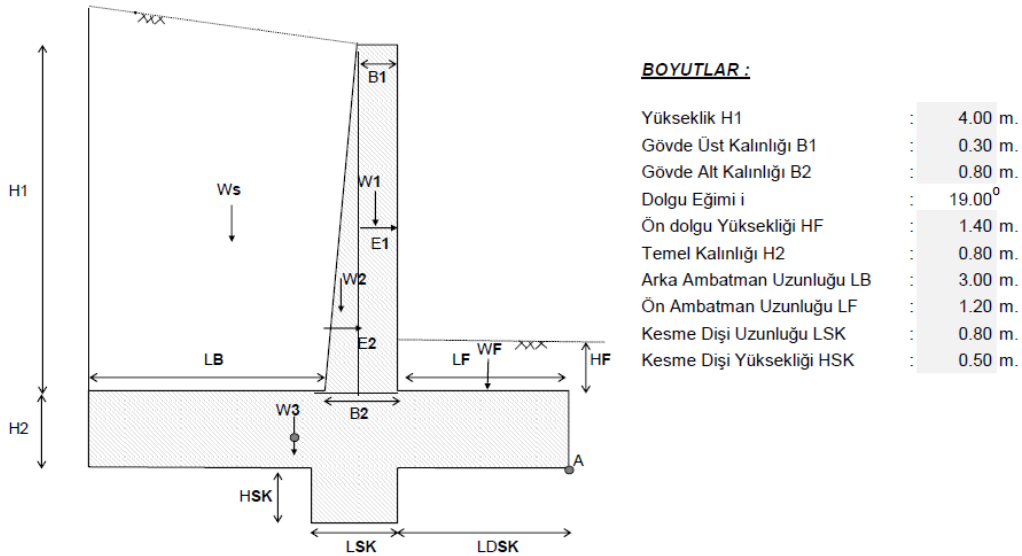
4. 2. Önlem yapısı analizleri

Uygulanacak betonarme istinat duvarı ve geometrisi kullanılan paket program içeriğinde

bulunmamaktadır. Bu sebeple Şekil 12’de verilen boyutlardaki betonarme istinat duvarı modeli programda farklı bir malzeme olarak tanımlanmıştır. Duvar için Tablo 3’te verilen malzeme özellikleri girdi parametreleri olarak kullanılmıştır.



Şekil 11. Dinamik koşul için elde edilmiş minimum muhtemel dairesel kayma yüzeyinin konumu

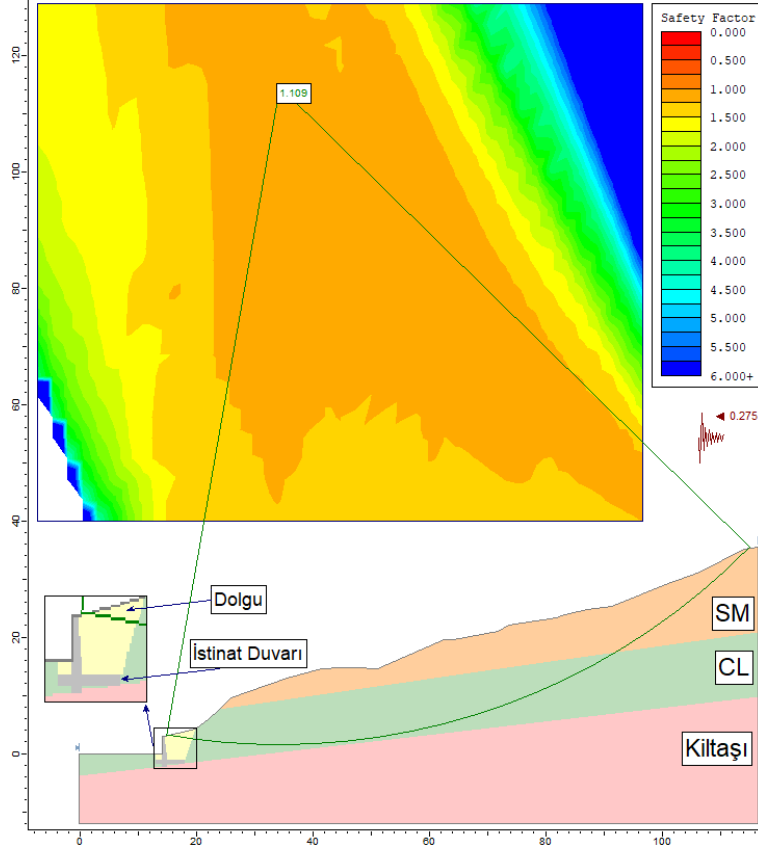


Şekil 12. Betonarme istinat duvarının geometrisi ve boyutları

Tablo 3. Analizlerde kullanılan betonarme istinat duvarına ait mühendislik parametreleri

Betonarme İstinat Duvarı Girdi Parametreleri	
Birim Hacim Ağırlık (γ), kN/m ³	24
Kohezyon (c), kPa	2000
İçsel Sürtünme Açısı (ϕ)°	35

Tüm bu veriler kullanılarak yapılan duraylılık analizleri dinamik durum koşulları altında yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda en düşük güvenlik katsayısı 1.109 olarak belirlenmiştir. Ayrıca 1.200' e kadar olan ve topuğu kesen kayma daireleri şev topuğuna inşa edilmesi planlanan betonarme istinat duvarı tarafından karşılanmaktadır (Şekil 13).

**Şekil 13.** Betonarme istinat duvarı inşası sonrası dinamik durum için olası kayma daireisi

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, limit denge analizi Bishop Yöntemi kullanılarak daha önce meydana gelmiş olan kütle hareketinin yenilme mekanizması ve yenilme meydana gelen şevin duraylı hale gelmesi için önerilen önlem yapısının yeterli olup olmadığı dinamik koşullar altında incelenmiştir. Aynı şevde hareketin meydana gelmediği bölgeler ise ayrıca değerlendirilerek muhtemel duraysızlık koşullarının önüne geçmek için çözüm önerilerinde bulunulmuştur. Çözüm önerisi olarak en ekonomik çözüm olan basamaklandırma yönteminden ziyade betonarme istinat duvarı önerilmiştir. Bu öneriye ulaşmadan önce yapılan analizler iki aşamada yapılmıştır. Bu aşamalardan önce arazide yapılan incelemeler sonucunda çalışma alanında bulunan su deposu ve/veya su hatlarından sızıntıların olduğu gözlemlenmiştir. Su deposu ve su hatlarının kütle hareketi bölgesine olan yakınlığı dolayısıyla

sızan sular zemini doygun hale getirmiş olup mühendislik parametrelerinin değişmesine sebep olduğu düşünülmüştür. İlk aşamada doygun durum için yapılan statik koşullardaki geriye dönük analizler neticesinde güvenlik katsayısının 0.748 olduğu görülmüştür. Yapılan bu analizler sonucunda ortaya çıkan kütle hareketinin gerçekte meydana gelmiş kütle hareketi ile benzer olduğu görülmüştür. Yapılan bu analizlerde statik durum koşullarının kullanılmasının sebebi ise kütle hareketinin gerçekleştiği zaman diliminde çalışma alanını etkileyecek herhangi bir depremin kaydedilmemiş olmasıdır. İkinci aşamada ise hareketin meydana gelmediği şev için su sızıntısının olmadığı doğal zemin koşulları göz önüne alınarak statik ve dinamik (PGA=0.275g) durum analizleri sonucunda güvenlik katsayıları sırasıyla 1.995 ve 1.000 olarak bulunmuştur. Bu hususlar göz önüne alındığında kütle hareketinin şevin mevcut eğiminde ve doğal zemin

koşullarında meydana gelmeyeceği sonucuna ulaşılmıştır. Bu sebeple şev duraylılığının devamı için önlem alınması gereklidir. Bu durum göz önüne alındığında hem şev topuğunda ağırlık olması sebebiyle hem de şev kaynaklı yükleri karşılması için şev topuğuna bir betonarme istinat duvarı inşasının uygun bir çözüm olduğu ön görülmüştür. Betonarme istinat duvarı modellemesi sonrası güvenlik katsayısı 1.109'a çıkmaktadır. Ayrıca 1.200'den küçük olan ve şev topuğunu kesen olası kayma daireleri de istinat duvarı tarafından bertaraf edilmektedir. Tüm bu veriler ışığında çalışma bölgesindeki su deposu ve su hatları da göz önüne alındığında basamaklandırma işlemi hem su deposunu hem de su hatlarını etkileyeceğinden dolayı çözüm önerisi olarak sunulmamıştır. Basamaklandırma yönteminin yerine betonarme istinat duvarı önerilmesinin diğer bir sebebi de inşa edilecek istinat duvarının arka tarafında granüler malzemeden yapılacak dolgu, drenaj sistemleri ve barbakanlar ile çalışma alanında etkili olacak çevresel sular ve olası su sızıntılarının problem teşkil etmesinin önlenmesidir. 2011 yılında Van ilinde çalışma alanını da içine alan bölgede meydana gelen depremlerde PGA değerlerinin 0.182-0.251 g değerlerine ulaştığı bilinmektedir. Bunun sonucunda dinamik analizlerde kullanılan $PGA=0.275$ g değerinin yeterli bir değer olduğu anlaşılabilmektedir.

Teşekkür

Yazar, bu çalışmada arazi çalışmaları ve laboratuvar deneylerini yapan Geo Tek Mühendislik İnş. San. ve Tic. Ltd. Şti.'ye, Hazar Zemin ve Yapı Malz. Lab. Sondaj Jeoloji Hizm. San. ve Tic. Ltd. Şti.'ye, desteklerinden dolayı Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nden Dr. Mustafa Kanık'a, makalenin inceleme ve değerlendirme aşamasında yapmış oldukları katkılardan dolayı editör/editörlere ve hakem/hakemlere teşekkür eder.

Kaynaklar

- Akbaş, B., (2015). Probabilistic slope stability analysis using limit equilibrium, finite element and random finite element methods. Master Thesis, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Ankara.
- Akbulut, İ., İlker, Ç. A. M., Aksoy, T., Çağlan, D. ve Ölmez, T. (2013). Açık ocaklarda şev duraysızlığı ve geriye dönük analizlere bir örnek: Afşin-Elbistan Kışlaköy açık kömür ocağı.

Maden Tetkik ve Arama Dergisi, 147(147), 115-126.

- Alemdağ, S. (2016). Toprak dolgulu barajlarda gövde duraylılığının limit denge ve sayısal analiz yöntemleri ile değerlendirilmesi: Türkiye'den bir atık barajı örneği. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 6(2), 157-173. <https://doi.org/10.17714/gufbed.2016.06.015>
- Alemdağ, S., Kaya, A., Karadağ, M., Gurocak, Z. and Bulut, F. (2015). Utilization of the limit equilibrium and finite element methods for the stability analysis of the slope debris: an example of the Kalebasi District (NE Turkey). Journal of African Earth Sciences, 106, 134-146. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.03.010>
- Bishop, A. W. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. Geotechnique, 5(1), 7-17. <https://doi.org/10.1680/geot.1955.5.1.7>
- Chowdhury, R., Zhang, S. and Flentje, P. (2004). Reliability updating and geotechnical back-analysis. In Advances in geotechnical engineering: The Skempton conference: Proceedings of a three day conference on advances in geotechnical engineering, organised by the Institution of Civil Engineers and held at the Royal Geographical Society, (pp. 815-821). London: Thomas Telford Publishing.
- Das, B.M. (1994). Principles of Geotechnical Engineering. Boston: Cengage Learning.
- Degens, E.T. and Kurtman, F. (1978). The Geology of Lake Van. Ankara: Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü Yayınları.
- Duncan, J.M. and Wright, S.G. (2005). Soil strength and slope stability. New York: John Wiley and Sons, Inc.
- Gilbert, R. B., Wright, S. G. and Liedtke, E. (1998). Uncertainty in back analysis of slopes: Kettleman Hills case history. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 124(12), 1167-1176. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1998\)124:12\(1167\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:12(1167))
- Gürel, N. A. (1995). Van Gölü su seviyesi değişimi ve arazi kullanımına jeomorfolojik yaklaşımlar. Van Gölü'nün Su Seviyesinin Yükselmesi Nedenleri, Etkileri ve Çözüm Yolları Sempozyumu (ss. 40-49). Van.
- ISRM (International Society for Rock Mechanics). (2007). The complete ISRM suggested methods for rock characterization. In: Ulusay, R., Kazan, Hudson, J.A. (Eds.), Testing and Monitoring. Offset Press, Ankara, p. 628.

- Kadıoğlu, M. (1995). Van Gölü'ndeki su seviye yükselmesinin meteorolojik faktörler ile olan ilgisi. Van Gölü'nün Su Seviyesinin Yükselmesi Nedenleri, Etkileri ve Çözüm Yolları Sempozyumu (21-38). Van.
- Kaya, A., Alemdağ, S., Dağ, S. and Gürocak, Z. (2016). Stability assessment of high-steep cut slope debris on a landslide (Gumushane, NE Turkey). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75(1), 89-99. <https://doi.org/10.1007/s10064-015-0753-6>
- Kempe, S., Degens, E. T. ve Göncüoğlu, M. C. (1978). Dünyanın en büyük soda gölü; Van Gölü. *Yeryuvarı ve İnsan*. 3(4).
- Luckman, P. G., Der Kiureghian, A. and Sitar, N. (1987). Use of stochastic stability analysis for Bayesian back calculation of pore pressures acting in a cut at failure. In *Proc., 5th Int. Conf. on Application of Statistics and Probability in Soil and Struct. Engr.* University of British Columbia Vancouver, Canada.
- Ozbay A. and Cabalar A. F. (2015). FEM and LEM stability analyses of the fatal landslides at Çöllolar open-cast lignite mine in Elbistan, Turkey. *Landslides*, 12(1), 155-163. <https://doi.org/10.1007/s10346-014-0537-2>.
- Özkaymak, Ç. (2003). Van şehri yakın çevresinin aktif tektonik özellikleri. Yüksek Lisans Tezi. Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Van.
- Rai, R. (2017). Factors affecting slope failure. *Lecture Notes of Chapter 2*. <https://seismicconsolidation.com/wp-content/uploads/2020/03/factors-affecting-slope-failure-1.pdf>
- Rocscience Inc. (2014). *Slide v. 06 Software*. 439 University Ave. Ste. 780, Toronto, Canada. <https://www.rocscience.com>
- Sayın, E., Yon, B., Calayir, Y. And Gor, M. (2014). Construction failures of masonry and adobe buildings during the 2011 Van earthquakes in Turkey. *Structural Engineering and Mechanics*, 51(3), 503-518. <http://dx.doi.org/10.12989/sem.2014.51.3.503>
- Tiwari, B., Brandon, T. L., Marui, H., and Tuladhar, G. R. (2005). Comparison of residual shear strengths from back-analysis and ring shear tests on undisturbed and remolded specimens. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 131(9), 1071-1079. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:9\(1071\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:9(1071))
- TS 1900-1. (2006). İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 1: Fiziksel özelliklerin tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 5-52.
- TS 1900-2. (2006). İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 2: Mekanik özelliklerin tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 15-51.
- Wesley, L. D. and Leelaratanam, V. (2001). Shear strength parameters from back-analysis of single slips. *Geotechnique*, 51(4), 373-374. <https://doi.org/10.1680/geot.2001.51.4.373>
- Yılmaz, G. ve Özsoy E. A. (2003). Bozüyük, Yediler Yerleşim Alanı kaymasının stabilite analizi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi* 16(2): 27-44.
- Zhang, J., Tang, W. H. and Zhang, L. M. (2010). Efficient probabilistic back-analysis of slope stability model parameters. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(1), 99-109. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000205](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000205)
- Zhang, L. L., Zhang, J., Zhang, L. M. and Tang, W. H. (2010). Back analysis of slope failure with Markov chain Monte Carlo simulation. *Computers and Geotechnics*, 37(7-8), 905-912. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2010.07.009>