

## Toprak Dolgulu Barajlarda Gövde Duraylılığının Limit Denge ve Sayısal Analiz Yöntemleri ile Değerlendirilmesi: Türkiye'den Bir Atık Barajı Örneği

Selçuk ALEMDAĞ\*

Gümüşhane Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane, Türkiye

Geliş tarihi/Received 27.06.2016

Düzeltilerek geliş tarihi/Received in revised form 12.07.2016

Kabul tarihi/Accepted 19.07.2016

### Öz

*Bu çalışmada sıkıştırılmış kil dolgu olarak inşa edilmiş ve ömrünü tamamlamış atık barajı gövdesinin 3m yükseltilmesi sonrasında oluşacak yeni baraj gövdesinin duraylılığı, limit denge ve sayısal analiz yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Limit denge analizlerinde öncelikle işletme ömrünü tamamlamış atık barajının siltasyon ve sismik yük etkisi altındaki duraylılığı Bishop yöntemi ile değerlendirilmiş ve güvenlik sayısı 2.167 bulunmuştur. Daha sonra, yüksekliği 3 m artırılmış olan baraj gövdesinin duraylılığı limit denge analizleri ile 4 aşamada değerlendirilmiştir. İlk aşamada siltasyon ve sismik yükler dikkate alınmaksızın inşaat sonrası durum için duraylılık analizi gerçekleştirilmiş ve güvenlik sayısı 2.171 olarak bulunmuştur. Diğer aşamalarda ise duraylılık analizleri siltasyon yükü ve hem siltasyon hem de sismik yük dikkate alınarak yapılmıştır. Güvenlik sayıları sırasıyla 1.946 ve 1.443 olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde, yeni baraj gövdesinin duraylılığı siltasyon ve sismik yük dikkate alınmaksızın kayma dayanımı azaltma yöntemi (FE-SSR) ile analiz edilmiş ve güvenlik sayısı 2.16 bulunmuştur. Siltasyon yükü ve hem siltasyon hem de sismik yükler dikkate alınarak yapılan duraylılık analizlerinde, güvenlik sayıları sırasıyla 1.97 ve 1.23 olarak belirlenmiştir. Duraylılık analizlerinden elde edilen sonuçlar, güvenlik sayılarının dolgu barajlar için alt limit olan 1.2 den büyük olduğunu ve baraj yüksekliğinin artırılmasından sonra herhangi bir duraysızlık sorunun oluşmayacağını göstermektedir.*

**Anahtar kelimeler:** Atık Barajı, Bishop yöntemi, Duraylılık, Maden atığı, Sonlu elemanlar yöntemi

## Evaluation of Stability of Embankment Dam by Limit Equilibrium and Numerical Analyses Methods: Example of a Waste Dam in Turkey

### Abstract

*In this study, stability of a lifetime ended old waste clay fill dam body was evaluated after increasing the dam height of 3 meters using limit equilibrium and numerical analyses. In the limit equilibrium analyses, stability of the old waste dam was evaluated by Bishop Method considering the effect of silting and the seismic loads and the factor of safety determined as 2.167. Afterwards, stability of the dam which increased body height of 3m was evaluated in four stages using the limit equilibrium*

\* Selçuk ALEMDAĞ, selcukalemdag@gmail.com, Tel: (0456) 233 10 00

analyses. In the first stage, stability analysis for condition after construction was realized without siltation and seismic loads using and the factor of safety was found as 2.171. In other stages, stability analyses were conducted considering effect of the silting load and both seismic and silting loads. The factors of safety were determined as 1.946 and 1.443, respectively. Similarly, stability of new dam body was analyzed without siltation and seismic loads using shear strength reduction method (FE-SSR) and the factor of safety was found 2.16. In the stability analyses by considering siltation load and both siltation and seismic load, the factors of safety were determined as 1.97 and 1.23, respectively. The results obtained from stability analyses show that the factor of safety values is higher than 1.2 which is the lower limit for earth dams and no stability problem is expected after increasing the dam height.

**Keywords:** Bishop Method, Finite element method, Mine waste, Stability, Waste dam

## 1. Giriş

Genellikle içme suyu, enerji, sulama, taşkın koruma gibi çeşitli amaçlar için tasarlanan barajlar, özellikle son 20 yıldır atık (katı atık ve maden atıkları) biriktirme amaçları için de yapılmaktadır. Farklı amaçlar için tasarlanan baraj gövdelerinin tasarımında gövdede kullanılacak malzemenin jeoteknik özellikleri, gövdenin oturacağı temel kayasının taşıma gücü, geçirimsizliği, deformasyon özellikleri ve gövdenin duraylılığı gibi birçok mühendislik parametresi dikkate alınmaktadır. Gövde tasarımının gerçekçi olmaması durumunda (menba ve mansap şev açılarının tasarımı, sıkıştırma ve kullanılan malzeme kalitesi) gerek yapım aşamasında, gerekse inşaat sonrası işletme durumunda ciddi duraysızlık problemleri gelişebilmektedir. Bu durum ekonomik zararlara, can kayıplarına ve çevre kirliliği açısından tüm canlıların yaşamını tehdit edecek problemlerin oluşmasına yol açmaktadır. Bu sebeple baraj gövdelerinin tasarımında gövdenin duraylılık özelliklerinin bilinmesi büyük önem taşımaktadır.

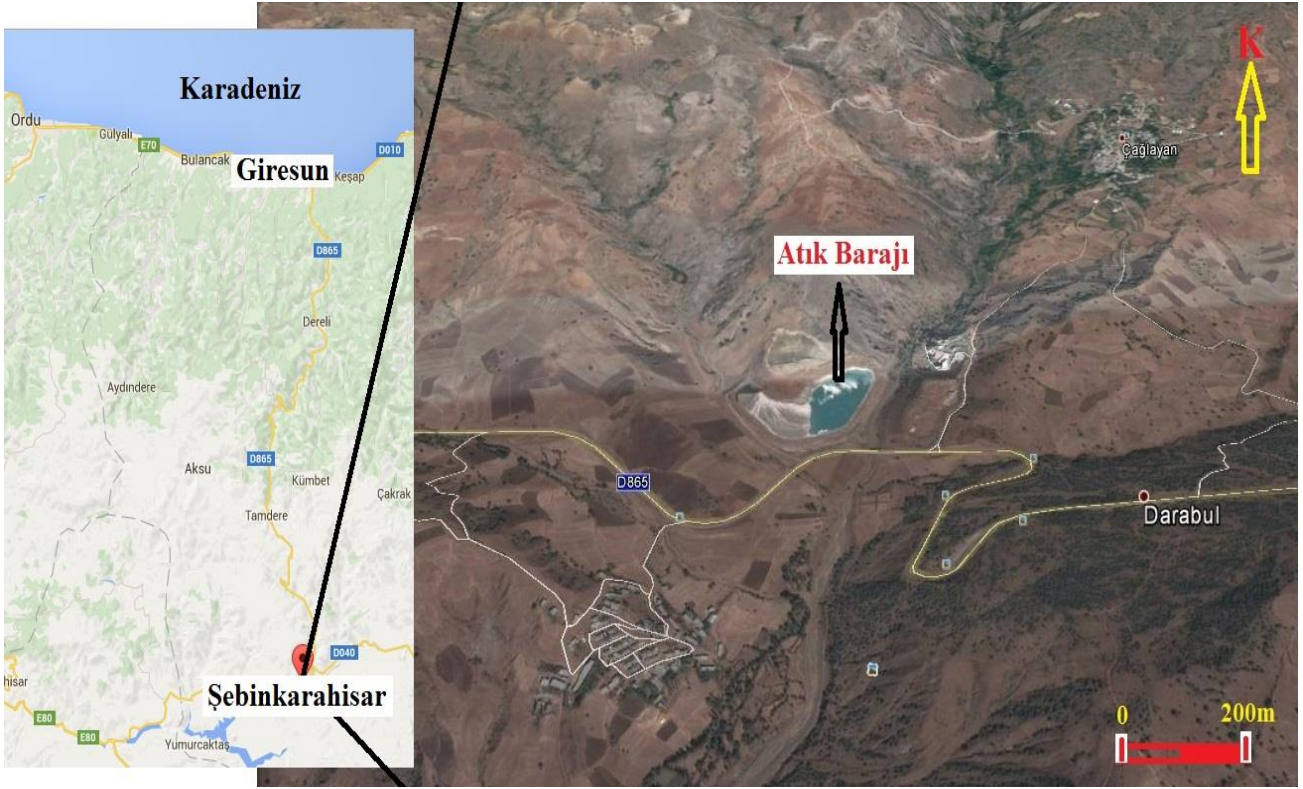
Giresun ili Şebinkarahisar ilçesi, Çağlayan Köyü civarındaki (Şekil 1), kurşun-çinko-bakır maden işletmesi için kullanılan atık barajının ömrünü tamamlaması nedeniyle (Şekil 2) gövde yüksekliğinin 3 m artırılması planlanmaktadır. Mevcut atık barajının memba ve mansap şev açıları  $30^\circ$ , yüksekliği ise 27 metredir. Yeniden tasarlanan barajın gövde yüksekliği ise 30 metre, mansap şev açısı ise  $35^\circ$  şeklinde olacaktır. Bu çalışmada, yeniden tasarlanan atık

barajı gövdesinin hem dinamik (sismik etki) hem de statik yükler (siltasyon yükü) altındaki uzun süreli duraylılığı limit denge ve sayısal analiz yöntemleri ile araştırılmıştır.

Bu duraylılık analiz yöntemleri, günümüze değin birçok araştırmacı tarafından (Bishop, 1955; Bishop ve Morgenstern, 1960; Morgenstern ve Price, 1965; Strang ve Fix, 1973; Sarma, 1973; Hughes, 1987; Duncan, 1996; Yu vd., 1998; Kim vd., 1999; Griffiths ve Lane, 1999; Abramson vd., 2001; Kim vd., 2002; Duncan ve Wright, 2005; Hammah vd., 2006; Li, 2007; Gürocak vd., 2008; Akgun, 2011; Alemdağ vd. 2013, 2014, 2015a, 2015b; Alemdağ, 2015; Kaya vd., 2015; Alemdağ vd., 2016; Kaya vd., 2016; Kaya, 2016) büyük mühendislik yapılarının tasarımında yaygın bir şekilde kullanılmıştır.

## 2. Çalışma Alanının Jeolojisi ve Depremselliği

Çalışma alanı Doğu Pontid Tektonik Birliği'nin güney zonunda bulunmakta olup, bu zonda, Permo-Karbonifer'den Pliyo-Kuvaterner'e kadar değişen zaman aralığında oluşmuş metamorfik, plutonik, volkanik ve sedimanter kayalar yüzeylemektedir. İnceleme alanı ve yakın civarında gözlenen birimler yaşlıdan gence doğru; Eosen yaşlı Yeşilce Formasyonu, Miyosen yaşlı Karşıkent Formasyonu ve Kuvaterner yaşlı alüvyonlardır (Şekil 3). Yeşilce Formasyonu, bölgede andezit, bazalt ve bunların proklastitlerinden oluşmaktadır (Terlemez ve Yılmaz, 1980).



Şekil 1. İnceleme alanının yer belirleme haritası



Şekil 2. İşletme ömrünü tamamlamış atık barajı



Karşıkent Formasyonu, litolojik olarak kumtaşı, kiltası, silttaşı ve konglomeralardan oluşmakta olup, Şebinkarahisar İlçesi'nin güneyinde D-B doğrultusu boyunca genişçe bir alanda yayılım göstermektedir. Formasyona ait kiltaların ayrışması ile yaklaşık 10 m kalınlığına sahip killer oluşmuştur (Şekil 4). Bu killer inceleme konusu atık barajının temel zeminini oluşturmaktadır.

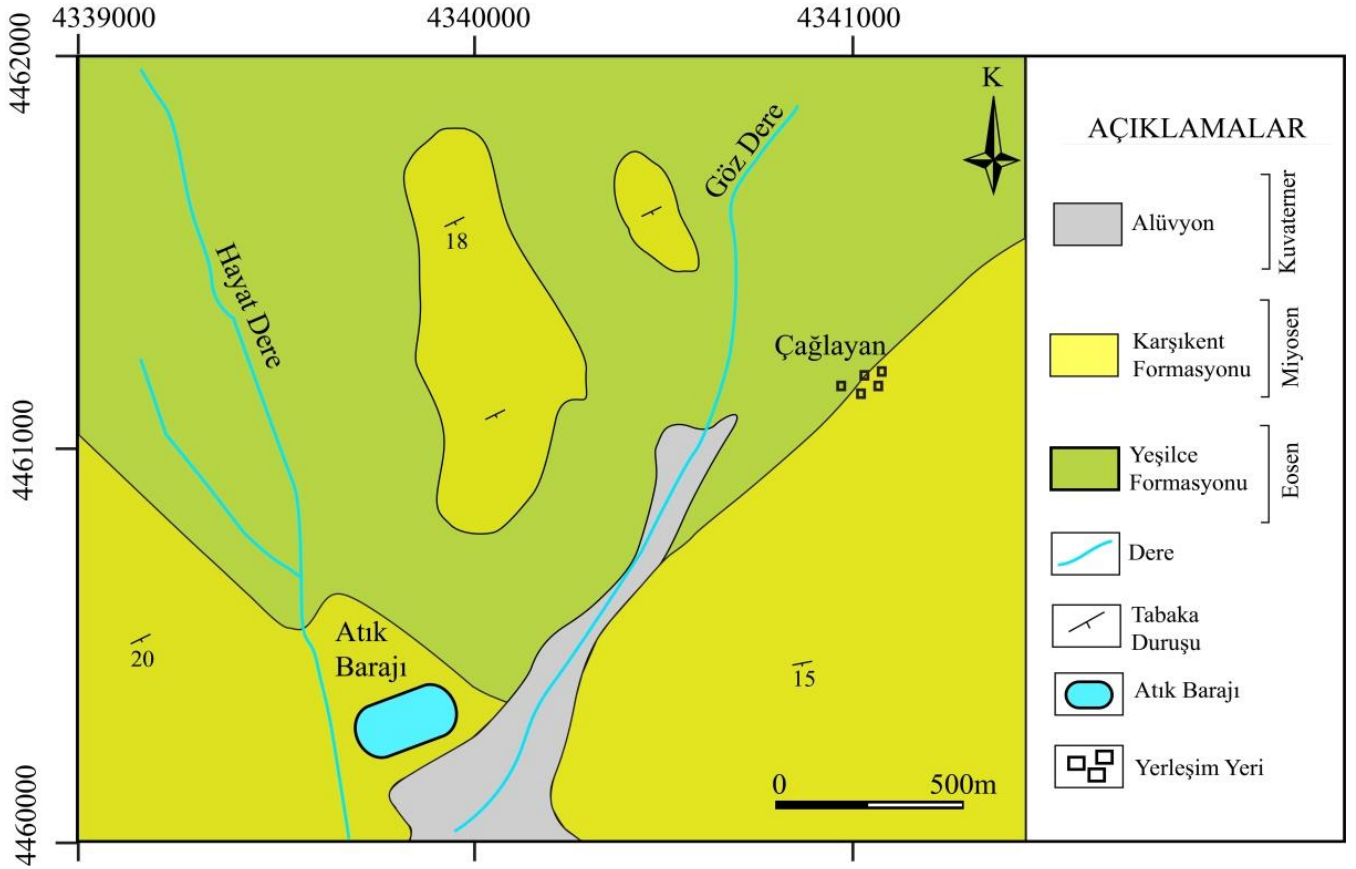
Çalışma alanı, Kuzey Anadolu Fay Hattı'nın yaklaşık olarak 20 km kuzeyinde yer almakta olup, Türkiye Deprem Bölgeleri Haritasına göre 1. derece deprem bölgesi içerisinde yer almaktadır. Gövde duraylılığı modellerinde kullanılacak etkin yer ivmesi afet yönetmeliğinde 0.4 g olarak belirtilmiştir.

Ancak, çalışmada deprem durumu sabit ivme olarak girileceği için Towhata (2008) tarafından önerilen yatay eşdeğer deprem katsayısı (k) değeri kullanılmıştır. Buna göre Towhata 0.2 g'den küçük değerler için pik zemin ivmesini, 0.2 g'den büyük ivme değerleri için aşağıdaki eşitlikten hesaplanan ivme değerinin kullanılabileceğini önermiştir.

$$k = (PGA^{0.333})/3 \quad (1)$$

Burada; PGA: Pik zemin ivmesidir (1. Derece deprem bölgesi için 0.4 g kullanılmıştır)

1 nolu eşitliğe göre inceleme alanında yapılan atık barajının modellenmesinde kullanılacak etkin yer ivmesi 0.25 g olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3. Çalışma alanı ve çevresinin jeoloji haritası



Şekil 4. Karşıkent Formasyonu'na ait kiltaşlarının ayrışmasıyla oluşmuş killerin arazideki görünümü

### 3. Jeoteknik Çalışmalar

Atık barajının yerinde ve gövdesinde yapılan jeoteknik çalışmalar laboratuvar ve arazi deneyleri olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalardan elde edilen veriler gövde duraylılığının tasarımında girdi parametresi olarak kullanılmıştır.

#### 3.1. Laboratuvar Deneyleri

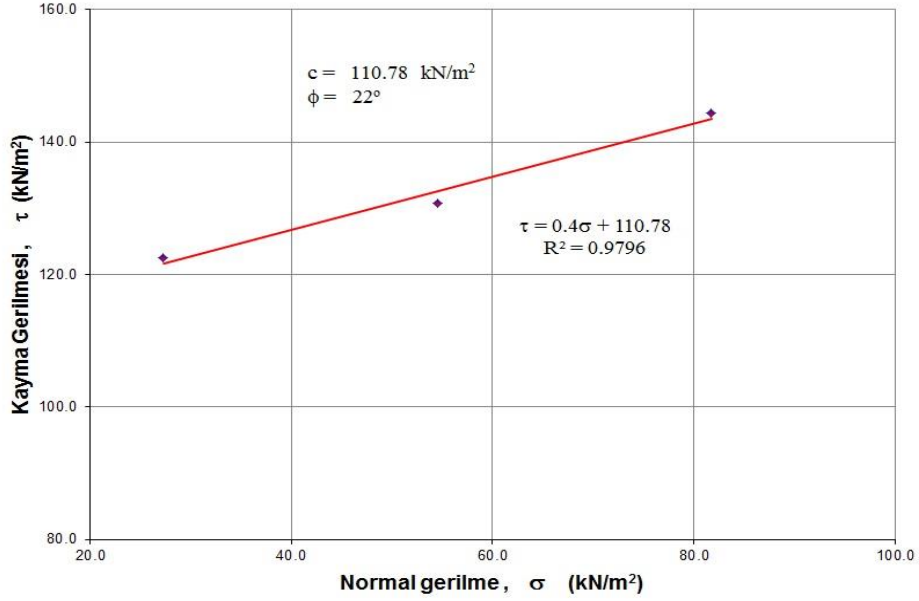
Baraj gövdesinde kullanılan kil malzemesinin jeoteknik özelliklerini belirlemek amacıyla baraj gövdesi üzerinden çelik tüpler ile iki adet örselenmemiş örnek alınmıştır. Alınan zemin örnekleri üzerinde Gümüşhane Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Kaya ve Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda deneyler yapılarak zeminin jeoteknik özellikleri belirlenmiştir.

Zemin örneklerinin kayma dayanımı parametreleri ( $c$  ve  $\phi$ ) ASTM (2012) standardına göre kesme kutusu deneyleri ile belirlenmiştir. Zeminin birim hacim ağırlığı belirlenirken TS1900-1 (2006) standardı esas alınmıştır. Kesme kutusu deneyleri, zeminin

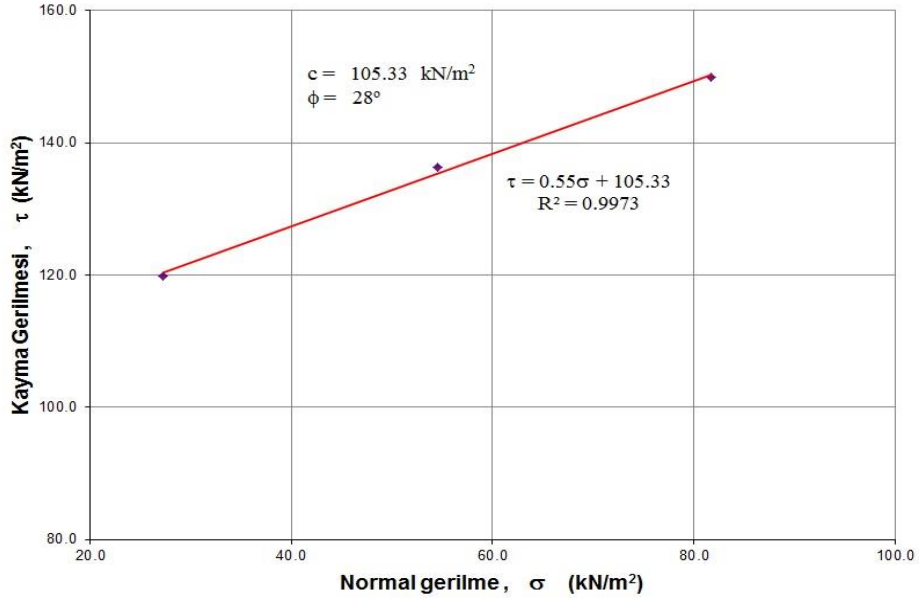
doygun olduğu varsayılarak en kötü koşullara göre yapılmıştır. Bu nedenle deneyler konsolidasyonlu-drenajsız (CU; Consolidated-Undrained) olarak gerçekleştirilmiştir. CU deneyinde örnek 24 saat su içerisinde bekletilerek konsolide olması sağlanmış ve suyun drenajına izin verilmeyerek örnekler kesilmiştir. Elde edilen verilerden normal gerilme ( $\sigma$ ) - kayma gerilmesi ( $\tau$ ) grafikleri çizilerek (Şekil 5-6) zeminin doruk kohezyon ( $c$ ) ve doruk içsel sürtünme açısı ( $\phi$ ) değerleri tespit edilmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda, gövdedeki sıkıştırılmış zemine ait doruk içsel sürtünme açısı değerlerinin  $22^\circ$  ve  $28^\circ$ , doruk kohezyon değerlerinin ise  $110 \text{ kN/m}^2$  ve  $105 \text{ kN/m}^2$  olduğu saptanmıştır.

Ayrıca, atık barajı rezervuar alanından alınan örselenmemiş örneklerde gerçekleştirilen birim hacim ağırlık (TS-1900-1, 2006) deneylerinde siltasyon malzemesine ait ortalama birim hacim ağırlık değeri  $16 \text{ kN/m}^3$  olarak belirlenmiştir.



Şekil 5. 1 nolu örneğe ait kayma gerilmesi-normal gerilme grafikleri



Şekil 6. 2 nolu örneğe ait kayma gerilmesi-normal gerilme grafikleri

Ayrıca, baraj gövdesinin oturacağı temel zeminin özelliklerini belirlemek için alınan örselenmiş ve örselenmemiş örnekler üzerinde yapılan laboratuvar deneyleri sonucunda temel zeminin yüksek plastisiteli kil (CH) sınıfında olduğu, içsel sürtünme açısı ile kohezyon değerlerinin sırasıyla  $5^\circ$  ve  $98.07 \text{ kN/m}^2$  olduğu ve birim hacim ağırlığının  $19.50 \text{ kN/m}^2$  olduğu saptanmıştır.

### 3.2. Arazi Deneyleri

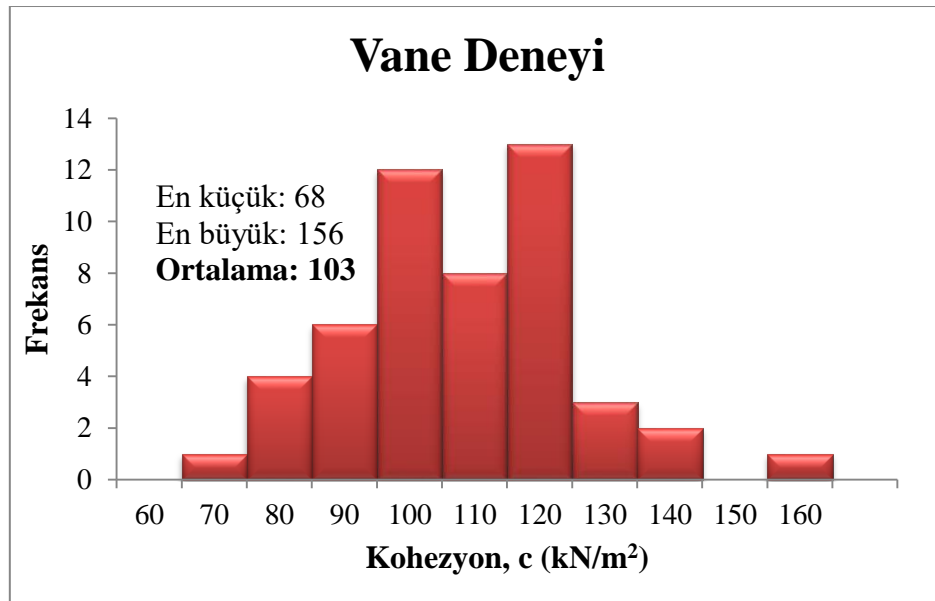
Bu çalışmada gerçekleştirilen arazi deneyleri; Vane (ASTM D 2573-01, 2007), cep penetrometresi (ASTM C403, 2008) ve kum konisi ASTM D 1556-00 (2003) deneyleri ile jeofizik çalışmalarını kapsamaktadır. Atık barajının gövdesini oluşturan sıkıştırılmış killerin kayma dayanımı parametreleri baraj

gövdesi üzerinde gerçekleştirilen Vane ve cep penetrometresi deneyleri ile de belirlenmiştir. (Şekil 7). Gövde üzerinde Vane ve cep penetrometresi aletlerini kullanarak gerçekleştirilen 50 adet deneye ait sonuçlar istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve Vane deneyinden elde edilen kohezyon değeri ortalama  $103 \text{ kN/m}^2$ , cep penetrometresinden

elde edilen kohezyon değeri ise  $187 \text{ kN/m}^2$  olarak belirlenmiştir (Şekil 8-9). ASTM D 1556-00 (2003) standardına göre baraj gövdesi üzerinde gerçekleştirilen kum konisi deneyleri sonucunda da gövdedeki sıkıştırılmış zeminin birim hacim ağırlığı  $19.70 \text{ kN/m}^3$  olarak hesaplanmıştır.

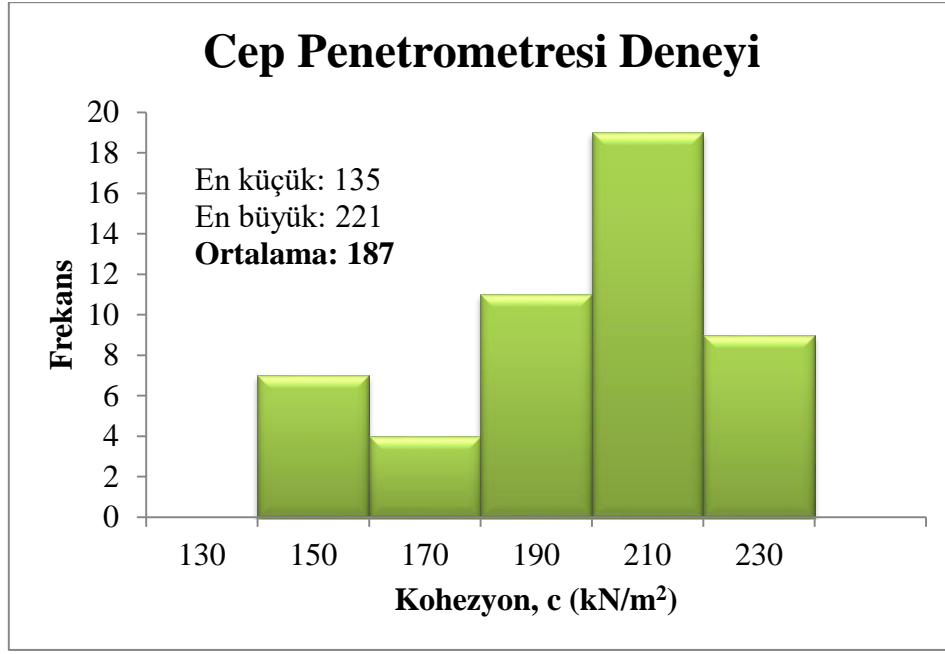


Şekil 7. Atık barajı gövdesindeki killerde Vane ve cep penetrometresi deneylerinin uygulanması



Şekil 8. Baraj gövdesindeki killerde yapılan Vane deneyi sonuçlarına ait histogram

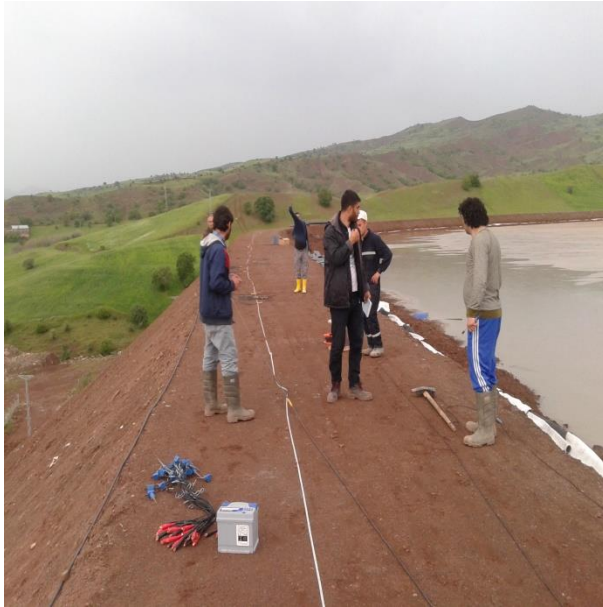




Şekil 9. Baraj gövdesindeki killerde yapılan cep penetrometresi deneyi sonuçlarına ait histogram

Ayrıca, sıkıştırılmış kil dolgunun dinamik- elastik parametrelerini belirlemek için 3 profilde sismik kırılma ve MASW (yüzey

dalgalarının çok kanallı analizi) yöntemleri kullanılarak jeofizik çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Şekil 10).



Şekil 10. Atık barajı kretinde yapılan sismik kırılma ve MASW çalışmaları



Baraj kreti üzerinde belirlenen 3 profil boyunca gerçekleştirilen jeofizik çalışmalarda  $V_p$  dalga hızı sismik kırılma yönteminden,  $V_s$  dalga hızı ise MASW yönteminden belirlenmiştir. Her bir profildeki tabakalara ait  $V_p$  ve  $V_s$  hızları kullanılarak Bowles (1988) tarafından önerilen 2, 3 ve 4 nolu eşitlikler yardımıyla dinamik elastisite modülü ( $E_{dyn}$ ) ve dinamik poisson oranı ( $\nu_{dyn}$ ) değerleri hesaplanmıştır (Tablo 1).

Yoğunluk değeri ise Keçeli (2012) tarafından önerilmiş 5 nolu ampirik eşitlik yardımıyla belirlenmiştir.

$$\nu_{dyn} = (V_p^2 - 2V_s^2) / 2(V_p^2 - V_s^2) \quad (2)$$

$$E_{dyn} = \mu (3V_p^2 - 4V_s^2) / (V_p^2 - V_s^2) \quad (3)$$

$$\mu = \rho V_s^2 / 100 \quad (4)$$

$$\rho = 0.44V_s^{0.25} \quad (5)$$

Burada,  $V_p$ : boyuna dalga hızı (m/sn),  $V_s$ : enine dalga hızı (m/sn),  $\rho$ : yoğunluk ( $gr/cm^3$ ),  $\nu$ : poisson oranı,  $\mu$ : kesme modülü ( $kg/cm^2$ ) ve  $E_m$  ise elastisite modülüdür ( $kg/cm^2$ ).

Tablo 1. Baraj gövdesindeki sıkıştırılmış killere ait  $V_p$  ve  $V_s$  dalga hızları ile dinamik elastik parametreler

Jeofizik Profiller	Tabaka No	Derinlik (m)	$V_p$ (m/s)	$V_s$ (m/s)	E ( $kg/cm^2$ )	Poisson Oranı ( $\nu$ )
PROFİL-1	1	3.6	422.2	347	2100	0.55
	2	26.4	718.6	450.8	9687	0.18
PROFİL-2	1	4.3	369	200	1710	0.29
	2	25.7	652.7	339	5708	0.32
PROFİL-3	1	5.2	333	170	1216	0.32
	2	24.8	891	325	5617	0.42

#### 4. Duraylılık Analizleri

Atık baraj gövdesinin yükseltilmesinden sonra baraj gövdesinin duraylılığını belirlemek amacıyla limit denge ve sayısal analiz yöntemlerinden yararlanılmıştır. Duraylılık analizleri, mevcut atık baraj gövdesi ve yeniden tasarlanan baraj gövdesi için gerçekleştirilmiştir.

##### 4.1. Gövde Duraylılığının Limit Denge Analizi ile Değerlendirilmesi

Atık barajı gövdesinin duraylılığını belirlemede kullanılan Limit Denge (LE) yönteminde, Mohr-Coulomb yenilme kriteri esas alınmakta olup, yenilme olasılığı olan bir yüzey seçilerek bu yüzey boyunca yenilmeye yol açacak gerilme durumu araştırılmakta ve kayma bölgesindeki kütle için dengede kalması için gerekli olan kayma gerilmesi hesaplanmaktadır.

Belirlenen bu gerilme değerleri karşılaştırılarak güvenlik sayısı ( $G_s$ ) elde edilmektedir.

Bu çalışmada, ilk önce işletme ömrünü tamamlamış olan mevcut atık barajının sismik ve siltasyon yükleri altındaki duraylılık durumu Bishop (1955) yöntemi kullanılarak araştırılmıştır. Daha sonra atık barajı gövdesinin 3 m yükseltilmesi durumu için limit denge duraylılık analizleri yapılmıştır. Bu analizler; inşaat sonrası, siltasyon yükü etkisinde, hem sismik hem de siltasyon yükleri altındaki durumları için Slide v5.0 (Rocscience, 2003) bilgisayar programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Analizlerde kullanılan parametreler Tablo 2’de verilmiştir. Duraylılık analizlerinde kullanılan zeminin kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri belirlenirken laboratuvar ve yerinde deneylerden elde edilen sonuçlar

karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırma sonucunda kohezyon değerlerinin birbirleri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Bu nedenle duraylılık analizlerinde kesme kutusu deney sonuçları tercih edilmiştir. Ayrıca, ek dolgu için kullanılacak malzeme ile mevcut barajda kullanılan malzemenin aynı olacağı ve benzer kompaksiyon koşullarında sıkıştırılacağı dikkate alınarak duraylılık analizlerinde mevcut gövde için kullanılan parametreler ek dolgu için

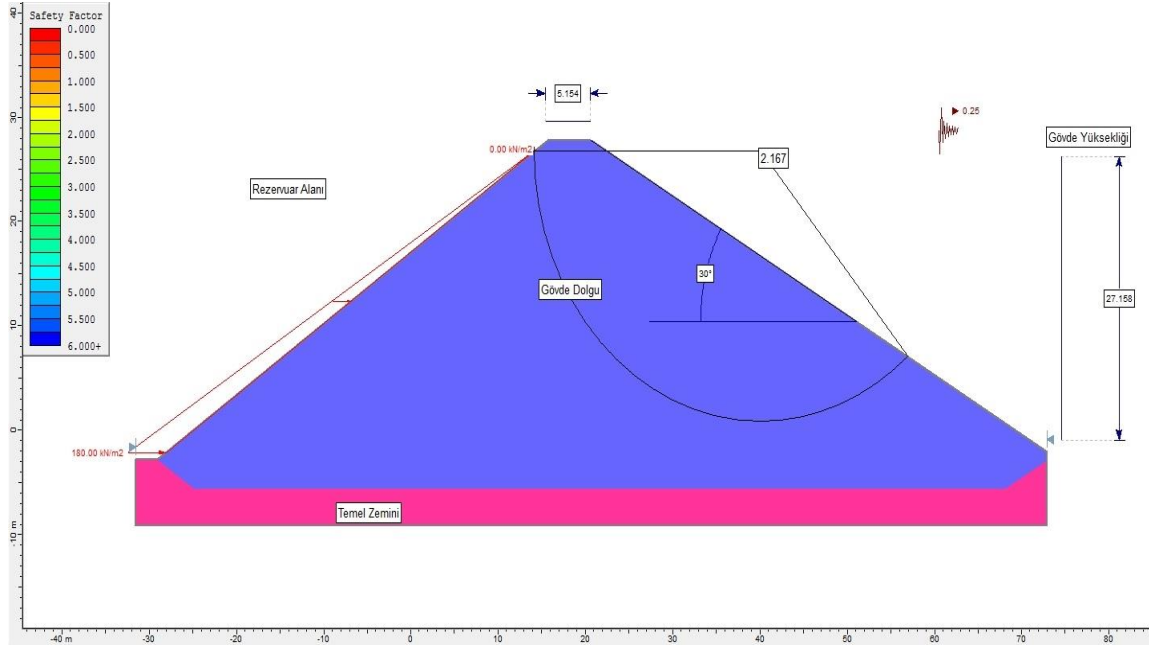
de kullanılmıştır.

Yükseltilmemiş ve yükseltilmiş gövdeye etkiyecek siltasyon yükleri sırasıyla 180 kN/m<sup>2</sup> ve 201 kN/m<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır.

Duraylılık analizlerinde ilk önce ömrünü tamamlamış olan atık barajının siltasyon ve sismik yük etkileri altındaki durumu değerlendirilmiştir (Şekil 11).

Tablo 2. Limit Denge (LE) analizlerinde kullanılan parametreler

Uygulama yeri	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	c, kohezyon (kN/m <sup>2</sup> )	İçsel Sürtünme açısı ( $\phi^\circ$ )	Yatay yer ivmesi (g)	Memba şevindeki siltasyon basıncı (kN/m <sup>2</sup> )
Eski Baraj Gövdesi	19.70	105	22	0.25	180 (h=26m)
Planlanan Baraj Gövdesi	19.70	105	22	0.25	201 (h=29m)
Temel Zemin	19.50	98.07	5	0.25	-
Rezervuar	16.00	-	-	-	h: Siltasyon yüksekliği



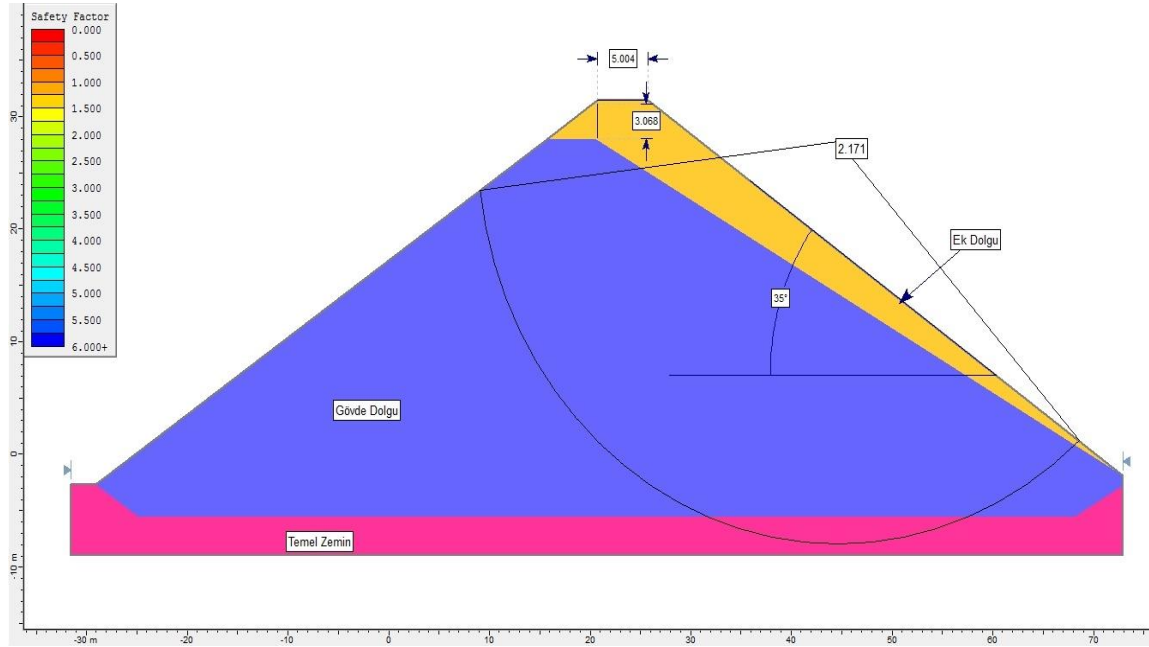
Şekil 11. Ömrünü tamamlamış baraj gövdesinin siltasyon ve sismik yükler etkisindeki duraylılığının Bishop Yöntemi ile değerlendirilmesi

Yapılan limit denge analizi sonucunda güvenlik sayısı 2.167 olarak belirlenmiştir. Bu değer işletme durumundaki dolgu tipi barajların sismik yük altındaki duraylılığı için kabul

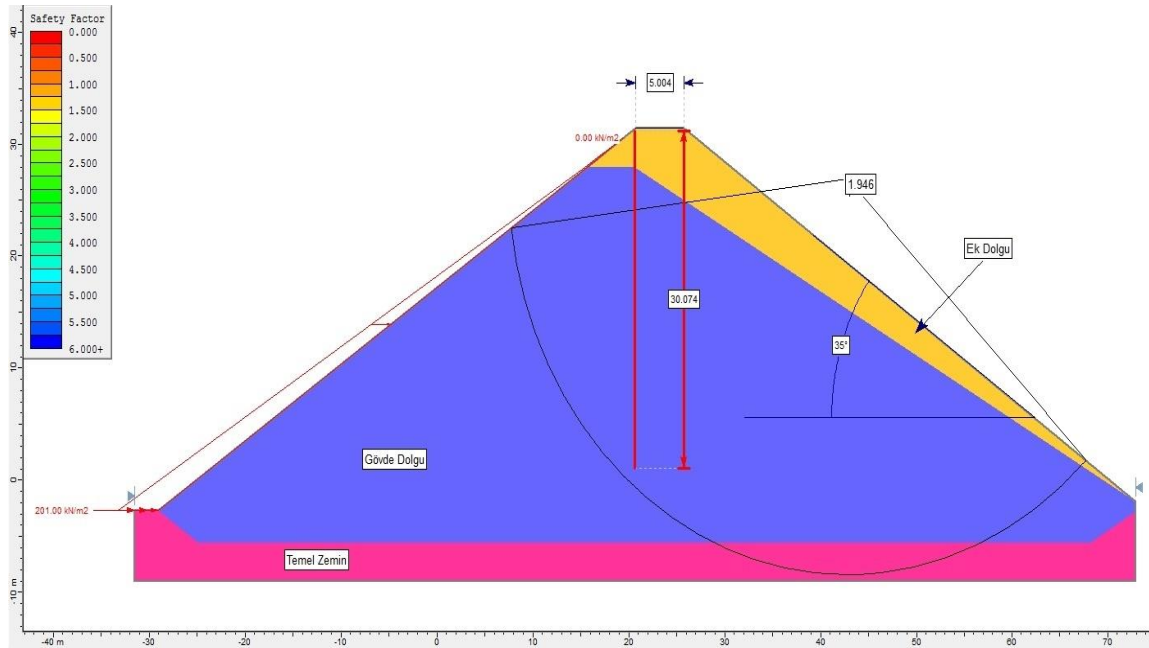
edilen 1.2 güvenlik sayısından büyüktür (DSİ, 2012). Mevcut baraj gövdesinin 3 m yükseltilmesi sonucunda oluşacak yeni gövde için limit denge analizleri; inşaat sonu (Şekil

12), işletme sonu siltasyon yükü etkisinde (Şekil 13) ve işletme sonu sismik yük ve

siltasyon yükü etkisi altındaki durumları (Şekil 14) için ayrı ayrı yapılmıştır.

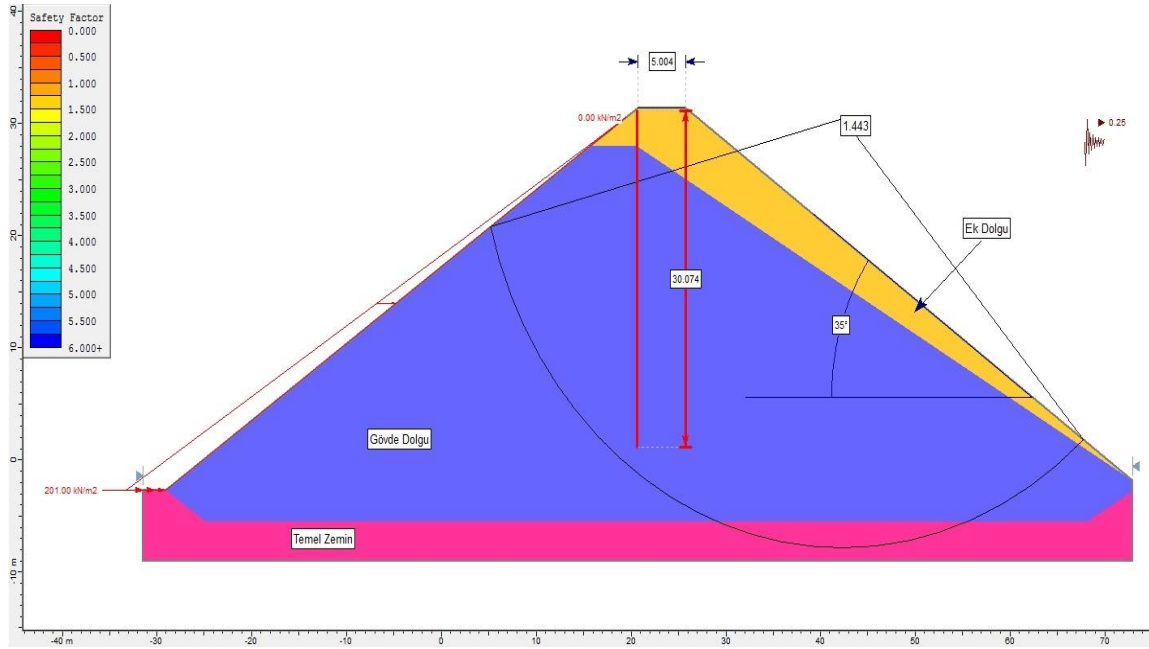


Şekil 12. Planlanan baraj gövdesinin inşaat sonu duraylılığının Bishop yöntemi ile değerlendirilmesi



Şekil 13. Planlanan baraj gövdesinin duraylılığının siltasyon yükü dikkate alınarak Bishop yöntemi ile değerlendirilmesi





Şekil 14. Planlanan baraj gövdesinin duraylılığının siltasyon ve sismik yükler dikkate alınarak Bishop Yöntemi ile değerlendirilmesi

Baraj gövdesi 3 m yükseltildikten sonra yapılan limit denge analizlerinden elde edilen güvenlik sayıları inşaat sonu durum için 2.171, işletme sonu siltasyon yükü etkisinde 1.946 ve işletme sonu sismik yük ve siltasyon yükü etkisinde ise 1.443 olarak hesaplanmıştır. Yapılan limit denge analizlerine göre gövde yükseltilmesi sonucunda modellemede kullanılan her koşul altında herhangi bir duraysızlık problemi beklenmemektedir.

#### 4.2. Gövde Duraylılığının Sayısal Analiz Yöntemi ile Değerlendirilmesi

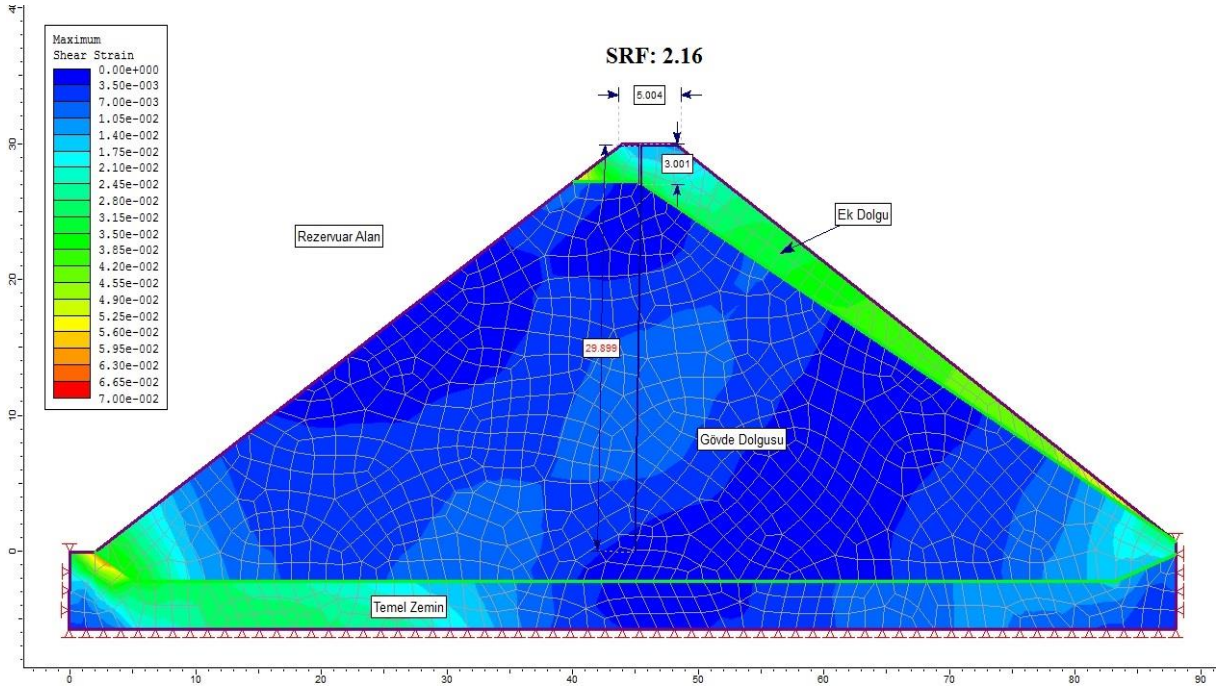
Bu yöntemde sonlu elemanlar tabanlı (FEM) Phase<sup>2</sup> 6.0 (Rocscience, 2006) bilgisayar programı kullanılarak, baraj gövdesinin 3m

yükseltildikten sonraki analiz kesitinde inşaat sonu (Şekil 15), işletme sonu siltasyon yükü etkisinde (Şekil 16) ve işletme sonu sismik yük ve siltasyon yükü etkisi altındaki duraylılık durumları araştırılmıştır (Şekil 17). Sonlu elemanlar olarak dört düğüm noktalı dörtgen ağ sistemi seçilmiş ve ağ türü üniform ve eleman sayısı 1000 olarak girilmiştir.

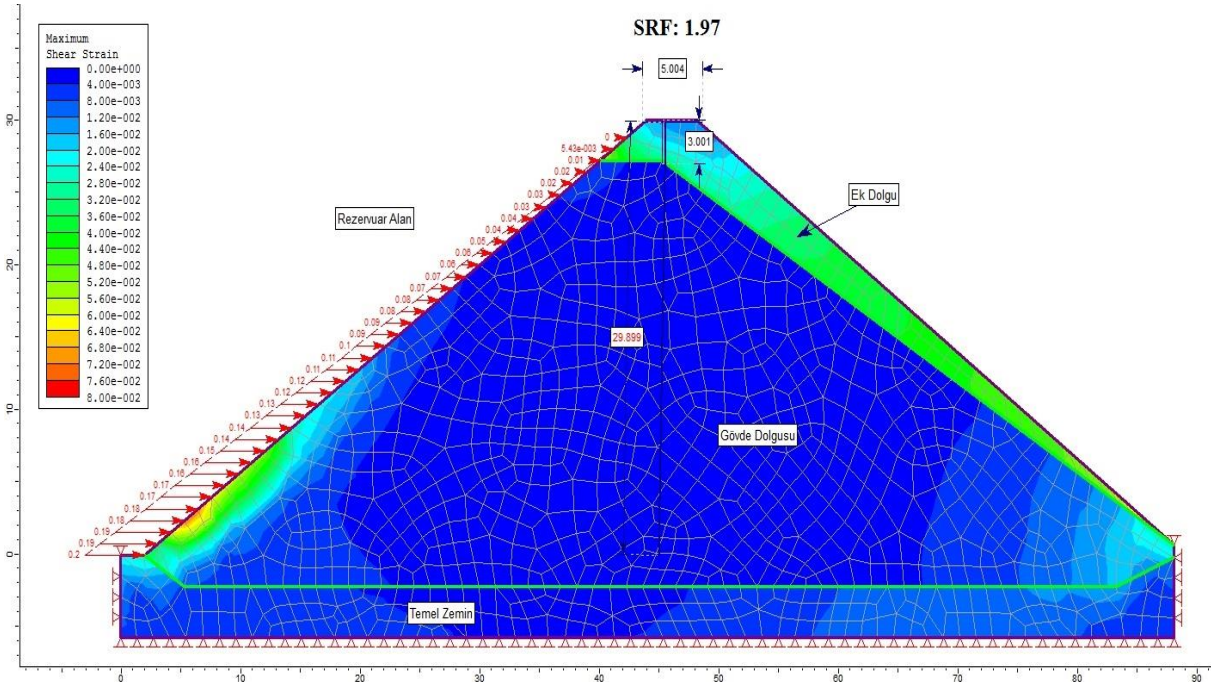
Analizlerde kullanılan parametreler Tablo 3’de özet olarak verilmiş olup, dinamik deformasyon modülü ( $E_m$ ) ve Poisson oranı ( $\nu$ ) değerleri jeofizik yöntemlerden elde edilen  $V_p$  ve  $V_s$  hız değerleri kullanılarak belirlenmiştir. Yükseltilmiş gövdeye etkiyecek siltasyon yükü 0.201 MPa olarak analiz modeline eklenmiştir.

Tablo 3. FEM-SSR duraylılık analizlerinde kullanılan parametreler

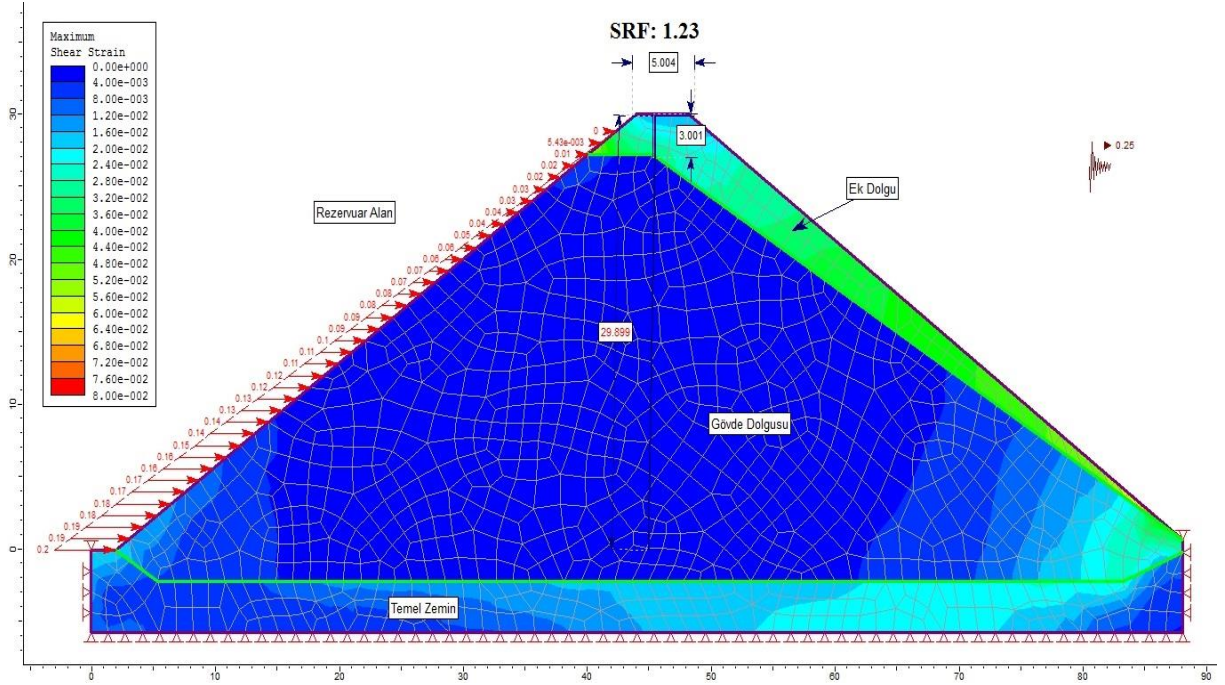
Parametreler	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\nu$	$E_m$ (MPa)	$c$ (MPa)	$\phi^\circ$	Yatay yer ivmesi (g)	Siltasyon Yükü (MPa)
Eski Baraj Gövdesi	19.7	0.42	551	0.105	22		
Planlanan Baraj Gövdesi	19.7	0.32	119	0.105	22	0.25	0.201
Temel Zemin	19.5	0.42	574	0.098	5		



Şekil 15. Planlanan Baraj Gövdesi duraylılığının FEM-SSR yöntemi ile değerlendirilmesi



Şekil 16. Planlanan Baraj Gövdesi duraylılığının siltasyon yükü dikkate alınarak FEM-SSR yöntemi ile değerlendirilmesi



Şekil 17. Planlanan Baraj Gövdesi duraylılığının siltasyon ve sismik yükler dikkate alınarak FEM-SSR yöntemi ile değerlendirilmesi

#### 4.3. Duraylılık Analizlerine Ait Sonuçların Değerlendirilmesi

Atık baraj gövdesinin 3 m yükseltildikten sonraki durumu için hem limit denge hem de sayısal analiz yöntemleri ile yapılan duraylılık değerlendirmeleri sonucunda elde edilen güvenlik sayıları Tablo 4’de verilmiştir.

Tablo 4’deki analiz sonuçları incelendiğinde, uzun süreli duraylılık durumu için elde edilen güvenlik sayısı değerleri dolgu barajların duraylılığı için kabul edilen 1.2 güvenlik sayısından büyük olduğu ve herhangi bir duraysızlık sorununun beklenmediği anlaşılmaktadır.

Tablo 4. Limit denge ve sayısal analiz yöntemleri ile belirlenen güvenlik sayısı değerleri

LİMİT DENGE ANALİZİ				
	İnşaat sonunda	İşletme sonunda (siltasyon yükü)	İşletme sonunda (sismik + siltasyon yükü)	Sonuç
Eski Baraj Gövdesi	-	-	2.167	Duraylı
Planlanan Baraj Gövdesi	2.171	1.946	1.443	Duraylı
SAYISAL ANALİZ				
Planlanan Baraj Gövdesi	2.16	1.97	1.23	Duraylı

## 5. Sonuçlar

Bu çalışmada, Giresun ili, Şebinkarahisar İlçesi’ndeki kurşun-çinko-bakır maden tesisi için yapılmış atık barajı gövdesinin 3 m

yükseltilmesi halinde uzun süreli duraylılık durumundaki değişimler jeoteknik açıdan araştırılmış ve elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.



- 1) Duraylılık analizleri için kullanılan zemin tasarım parametreleri laboratuvar ve yerinde deneyler yapılarak belirlenmiştir. Baraj gövdesinde kullanılan killerin yüksek plastisiteli kil (CH) sınıfında olduğu, kohezyon (c) değerinin  $105 \text{ kN/m}^2$ , içsel sürtünme açısının ( $\phi$ )  $22^\circ$ , birim hacim ağırlığının ( $\gamma$ )  $19.7 \text{ kN/m}^3$ , dinamik poisson oranının ( $\nu$ ) 0.32 ve deformasyon modülünün ( $E_m$ )  $119 \text{ MPa}$  olduğu belirlenmiştir.
- 2) 3 m kadar yükseltilecek baraj gövdesinin duraylılığı Limit denge (Bishop yöntemi) ve sayısal analiz (FEM-SSR) yöntemleri ile araştırılmıştır. Limit denge yöntemine göre baraj gövdesinin statik ve dinamik yükler altındaki güvenlik sayısı 1.44, sayısal analizlere göre 1.23 olarak belirlenmiştir.
- 3) Her iki analiz yönteminden bulunan güvenlik sayısı değerleri, dolgu barajlar için kabul edilebilir güvenlik sayısı olan 1.2'nin üstündedir. Dolayısıyla işletme ömrünü tamamlamış atık barajının gövdesinde yapılacak 3 m yükseltme işlemi sonrasında herhangi bir duraysızlık sorununun oluşmayacağı tespit edilmiştir.

## 6. Katkı Belirtme

Yazar, bu çalışmayı destekleyen NESKO Madencilik A.Ş.'ye ve mühendislerine teşekkür eder. Ayrıca makalenin geliştirilmesinde eleştirileri ile önemli katkılar koyan hakemlere teşekkürlerini sunar.

## Kaynaklar

- Abramson, L.W., Lee, T.S., Sharma, S., Boyce, G.M., 2001. Slope Stability and Stabilization Methods, 2nd edn: Wiley, New York, 736p.
- Akgün, A., 2011. Assessment of Possible Damaged Areas Due to Landslide-Induced Waves at a Constructed Reservoir Using Empirical

Approaches, Kurtun (North Turkey) Dam Reservoir Area, Nat Hazards Earth Syst Sci, 11(5), 1341-1350.

- Alemdağ, S., Kaya, A., Karadağ, M., Gürocak, Z., Bulut F., 2013. Yamaç Molozlarının Duraylılık Analizlerinde Limit Denge Yönteminin Kullanılması, Kalebaşı Mahallesi (Gümüşhane) örneği, Cumhuriyet Yerbilimleri Dergisi, 30 (2) 49-62.
- Alemdağ, S., Akgün, A., Kaya, A., Gökçeoğlu, C., 2014. A Large and Rapid Planar Failure, Causes, Mechanism and Consequences (Mordut, Gumushane, Turkey), Arabian Journal of Geosciences, 7 (3), 1205-1221.
- Alemdağ, S., Kaya, A., Karadağ, M., Gürocak, Z., Bulut, F., 2015a. 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.
- Alemdağ, S., 2015. Assessment of Bearing Capacity and Permeability of Foundation Rocks at the Gumustas Waste Dam Site, (NE Turkey) Using Empirical and Numerical Analysis, Arabian Journal of Geosciences, 8, 1099–1110.
- Alemdağ, S., Gürocak, Z., Özkirişçi Oktay, C., 2015b. Bağlarbaşı-Tekke (Gümüşhane) Karayolundaki Kaya Şevlerinin Kinematik ve Limit Denge Yöntemleri İle Değerlendirilmesi, Artvin Çoruh Üniversitesi, Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 1, (1-2), 1-10.
- Alemdağ, S., Bostancı, H.T., Gürocak, Z., Gökçeoğlu, C., 2016. Yamaç Duraysızlığı Haritalarının Oluşturulmasında Coğrafi Bilgi

- Sistemleri Ve Bulanık Anlamlandırma Sistemlerinin Kullanımı: Ulusal Heyelan Sempozyumu 27-29 Nisan Ankara, Bildiriler Kitabı, 279-297.
- ASTM D 1556-00, 2003. Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil in Place by the Sand-Cone Method. Annual Book of ASTM Standards. American Society For Testing and Materials, 04.08, West Conshohocken, pp. 126-132.
- ASTM D 2573-01, 2007. Standard test method for field vane shear test in cohesive soil, ASTM Standards, ASTM International, Philadelphia, PA 283-289.
- ASTM C403, 2008. Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D3080/D3080M-11, 2012. Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions, West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM, 2011a. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM D2487-11, West Conshohocken, PA.
- Bishop, A.W., 1955. The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes, Geotechnique, 5, 7-17.
- Bishop, A.W., Morgenstern, N., 1960. Stability Coefficients for Earth Slopes, Geotechnique, 10(4), 129-150.
- Bowles, J.E., 1988. Foundation analysis and design. McGraw-Hill Book Company, New York
- DSİ, 2012. Dolgu Barajlar Tasarım Rehberi, Rehber No:003, 1.Barajlar Kongresi, Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Ekim, Ankara.
- Duncan, J., 1996. State of the art, Limit Equilibrium and Finite Element Analysis of Slopes, J. Geotech Geoenviron Eng ASCE, 122(7), 578-584.
- Duncan, J.M., Wright, S.G., 2005. Soil Strength and Slope Stability: Wiley, New York, 297p.
- Griffiths, D.V., Lane, P.A., 1999. Slope Stability Analysis by Finite Elements, Geotechnique, 49(3), 387-403.
- Gurocak, Z., Alemdag, S., Zaman, M., 2008. Rock Slope Stability and Excavatability Assessment of Rocks at the Kapıkaya Dam Site, Eastern Turkey, Engineering Geology, 96, 1-2, 17-27.
- Hughes, R., 1987. The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis, Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- Hammah, R.E., Yacoub, T.E., Curran, J.H., 2006. Investigating the Performance of the Shear Strength Reduction (SSR) Method on the Analysis of Reinforced Slopes. In: Proceedings of the 59th Canadian Geotechnical Conference, Vancouver.
- Kaya, A., Akgün, A., Karaman, K., Bulut, F., 2015. Understanding the Mechanism of a Slope Failure on Nearby a Highway Tunnel Route by Different Slope Stability Analysis Methods, a Case From NE Turkey, Bull Eng Geol Environ, Doi, 10.1007/s10064-015-0770-5.

- Kaya, A., Alemdag, S., Dag, S., and Gurocak, 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.
- Kaya, A., 2016. Geotechnical Assessment of a Slope Stability Problem in the Citlakkale Residential Area (Giresun, NE Turkey), Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Doi, 10.1007/s10064-016-0896-0.
- Keçeli, A., 2012. Soil parameters which can be determined with seismic velocities, Jeofizik, 16 (1), 17-29.
- Kim, J., Salgado, R., Yu, H., 1999. Limit Analysis of Soil Slopes Subjected to Pore-Water Pressures, J. Geotech Geoenviron Eng ASCE, 125(1), 49–58.
- Kim, J., Salgado, R., Lee, J., 2002. Stability Analysis of Complex Soil Slopes Using Limit Analysis, J. Geotech Geoenviron Eng ASCE, 128(7), 546–557.
- Li, X., 2007. Finite Element Analysis of Slope Stability Using a Nonlinear Failure Criterion, Comput Geotech, 34, 127–136.
- Morgenstern, R., Price, V., 1965. The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces, Geotechnique, 15(1), 79–93
- Rocscience, 2003. Slide v5.0, 2D Limit Equilibrium Slope Stability Analysis, Rocscience Inc., Toronto, Ontario, Canada.
- Rocscience, 2006. Phase<sup>2</sup> v6.0, 2D Finite Element Program for Calculating Stresses and Estimating Support Around the Underground Excavations, Geomechanics Software and Research, Rocscience Inc., Toronto, Ontario, Canada.
- Strang, G., Fix, J., 1973. An Analysis of the Finite Element Method. Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- Sarma, S.K., 1973. Stability Analysis of Embankments and Slopes, Geotechnique, 23(3), 423–433
- Terlemez, İ., Yılmaz, A., 1980. Ünye-Ordu-Koyulhisar-Reşadiye Arasında Kalan Yörenin Stratigrafisi, Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni, C. 23,179-191.
- Towhata, I., 2008. Geotechnical Earthquake Engineering, Springer-verlag Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-540-35782-7.
- TS–1900–1, 2006. İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvarı Deneyleri Bölüm 1. Fiziksel Özelliklerin Tayini, 5.2.1.
- Yu, H., Salgado, R., Sloan, W., Kim, J., 1998. Limit Analysis Versus Equilibrium for Slope Stability, J. Geotech Geoenviron Eng ASCE, 124(1), 1–11.