



BİR DOLGU BARAJIN REZERVUARINDAKİ SUYUN ANİ ÇEKİLMESİ SIRASINDAKİ STABİLİTE ANALİZİ

Emre TOPÇU^{1*}, Baki BAĞRIAÇIK², Ahmet ERDAĞ³

¹ Kafkas Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kars, Türkiye

² Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana, Türkiye

³ Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
Şev, Dolgu Baraj, Ani Su Çekilmesi, Stabilite.	Bu çalışma, geçirimsiz yatak üzerinde kil çekirdekli kurgusal dolgu barajının stabilite analizine ve SLIDE V.6.0 ve PLAXIS yazılımları kullanılarak sonuçların hesaplanmasına odaklanmaktadır. Dolgu şevlerinin stabilitesi beş farklı analiz yöntemi ile kontrol edilmiştir: sırasıyla Fellenuis, Bishop, Janbu, Morgenstern-Price ve Spencer yöntemleri. Suyun ani çekilme hızının 3m/gün olduğu ve rezervuar su seviyesinin 8 günde 3 m'ye düştüğü varsayılmaktadır. Gözlem sonuçlarına göre barajın memba eğiminin stabilitesi önemli ölçüde azalmıştır, ancak suyun çekilmesi durumunda hala stabildir. Rezervuar su seviyesinin tüm durumları için güvenlik faktörü 1.3'ten büyüktür. Rezervuarda ani su çekilmesinin başlamasından sonra kısa sürede baraj yamaçlarının kaymasına karşı güvenlik faktörünün bir miktar azaldığı, ardından artmaya başladığı sonucuna varılmıştır. Bu, zemindeki efektif gerilmelerin artmasına ve dolayısıyla kayma mukavemetinin artmasına yol açan aşırı boşluk suyu basıncının zamanla azalmasından kaynaklanmaktadır.

STABILITY ANALYSIS OF AN EMBANKMENT DAM DURING RAPID DRAWDOWN OF WATER IN RESERVOIR

Keywords	Abstract
Slide, Embankment Dam, Rapid Drawdown, Stability.	This paper focuses on stability analysis carried out on fictional embankment dam with clay core on impervious bed and calculating results using SLIDE V.6.0 and PLAXIS softwares. The stability of embankment slopes was checked by five different analysis methods: Fellenuis, Bishop, Janbu, Morgenstern-Price and Spencer methods respectively. It is assumed that rapid drawdown rate 3m/day and reservoir water level falling down to 3 m within 8 days. The stability of the upstream slope of the dam decreased dramatically but still in stable during drawdown condition. The factor of safety was greater than 1.3 for all reservoir condition. It was concluded that the factor of safety against sliding of the dam slopes decreases slightly within the short period after the start of rapid drawdown of water in the reservoir, then starts to increase. This is caused by dissipation of excess pore water pressure with time which leads to increase the effective stresses in the soil and hence increase its shear strength.

Alıntı / Cite

Topçu, E., Bağrıaçık, B., Erdağ, A., (2022). Bir Dolgu Barajın Rezervuarındaki Suyun Ani Çekilmesi Sırasındaki Stabilite Analizi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(1), 50-60.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process
E. Topçu, 0000-0003-0728-7035	Başvuru Tarihi / Submission Date 11.05.2021
B. Bağrıaçık, 0000-0002-1860-2881	Revizyon Tarihi / Revision Date 19.09.2021
A. Erdağ, 0000-0001-9380-9439	Kabul Tarihi / Accepted Date 18.11.2021
	Yayın Tarihi / Published Date 23.03.2022

* İlgili yazar / Corresponding author: emretopcu01@gmail.com, +90-474-225-1279

1. Giriş (Introduction)

Kentleşme ve insan faaliyetlerinin olumsuz etkileri sebebiyle kuraklık artmıştır. Dünya nüfusunun yaklaşık %13'ü şu anda içme suyundan mahrumdur. Su kıtlığı mevcut su talebi doğrultusunda artacaktır. Dolgu barajlar, suyun depolanması için en önemli ve hayati yapılardan biridir ve su kaynakları yönetiminde kullanılırlar (Ramachandra ve Khaled 1999).

Suyun ani geri çekilmesi sırasında stabilite analizi, dolgu barajlarının tasarımında önemli bir husustur. Ani su çekilmesi sırasında, suyun memba yüzü üzerindeki dengeleyici etkisi kaybolur, ancak set içindeki gözenek suyu basınçları yüksek kalabilir. Sonuç olarak, barajın memba yüzünün stabilitesi çok azalabilir. Dolgudaki boşluk suyu basıncının yayılması, büyük ölçüde dolgu malzemelerinin geçirgenliği ve depolama karakteristiğinden etkilenir. Yüksek geçirgenliğe sahip malzemeler ani çekilme sırasında hızla boşalır, ancak geçirgenliği düşük malzemelerin süzülmesi uzun zaman alır. Bu uç durumlar, taşkın sularının ani olarak geri çekilme evresinde ya da uzun süren kuraklığın son dönemlerinde maksimum seviyeye ulaşan tarımsal ve toplumsal su ihtiyacı nedeniyle oluşabilmektedir.

Toprak dolgu barajlarda değişik nedenlerle hazne seviyesinde ani düşüşler meydana gelmektedir. Hazne su seviyesinin ani düşmesi olayına örnek olarak, haznesinde geçici bir süre taşkın suyunu depolayan sel kapanları gösterilebilir (Çalamak vd. 2015).

Yapının stabilitesini korumak için dolgu barajlarda stabilite ve sızıntı analizi çok önemlidir. Dolgu barajlar, yapının ömrü boyunca gelişen her türlü kuvvet/zorlama durumuna karşı stabil olarak inşa edilecek şekilde tasarlanmalıdır. Çoğunlukla yükleme koşulları, ani düşme ve sürekli sızıntı gibi kritiktir ve bu da temel boyunca veya set içinde borulanmaya neden olabilir (Devi ve Anbalagan 2017).

Bu çalışmada, rezervuardaki suyun ani aşağı çekilme koşulunun bir dolgu barajının stabilitesi üzerindeki etkisi, özellikle memba yamacı için incelenmiştir. Ani çekilme hızı 3m/gün olarak seçilmiştir. Depolanan suyun 8 günde, rezervuarın taban kotuna 3 m kalana kadar düştüğü varsayılmıştır. Ani su çekilme sırasında farklı su seviyelerine karşılık gelen 5 farklı limit denge yöntemi için güvenlik değerleri faktörü SLIDE V.6.0 Rocscience (2010) yazılımı ile hesaplanmıştır. Ayrıca, set barajında 8 günlük rezervuar ani çekilme süresi boyunca baraj gövdesi boyunca boşluk suyu basıncı (kPa) değerleri de belirlenmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında ise, sonlu elemanlar yöntemini kullanan PLAXIS yazılımı ile memba şev güvenlik katsayıları incelenmiştir. Son olarak sayısal analiz ve sonlu elemanlar yöntemi sonuçları karşılaştırılmıştır.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Pek çok dolgu baraj, haznesinin aniden boşalması sebebiyle memba şevi duraylılığını kaybederek çökmüştür ve bu çökmelerden birçoğu baraj hazne seviyesi yaklaşık yarı seviyesine kadar azaldığında meydana gelmiştir (Sherard vd. 1963).

Literatürde yer alan çalışmalarda, hazne seviyesindeki suyun azalma hızı 0.1 m/gün olanlar normal, 0.5 m/gün olanlar önemli, 1.0 m/gün ve daha yüksek düşme hızına sahip olanlar ise olağan dışı düşme hızı olarak belirtilmiştir (Alonso ve Pinyol 2009).

Suyun aşağıya doğru ani çekilmesi, memba yan eğimi için en tehlikeli koşullardan biri olarak bilinir. Karşı yöndeki memba su basıncı ortadan kalktığında, memba eğimi için tehlike oluşturur. Memba kabuğu, suyun ani düşüşü nedeniyle hidrodinamik basınç altında stabil kalmaz. Baraj gövdesi içindeki zeminler doymuş durumda kalır ve buradan memba eğimine doğru sızıntı başlar. Sızıntı ve hidrodinamik basınçlar, memba eğimine etki eden aşağı doğru kuvvetler oluşturur. Bunlar stabiliteye terstir ve memba eğimi için kritik bir koşul oluşturur. Ani Düşüş Koşulu, suyu tutmak için kullanılan bir şevin, su seviyesinde ani bir düşüş yaşandığında ve şevdeki iç gözenek basınçları yeterince hızlı düşemediğinde ortaya çıkar (Khassaf vd. 2013).

Şevler, eğimli ve desteksiz kütlelerdir. Doğa tarafından oluşturulabileceği gibi insan yapımı da olabilirler. Bunları dolgu ve kırıklar olarak gözlemleyebiliriz. Şev stabilitesi çalışmalarında, herhangi bir şevdeki istikrarsızlık günümüzde zorlu bir iştir. Kararsızlık birçok faktörle ortaya çıkabilir. Doğal eğimler bile, geometri değişikliği, dışarıdan kuvvetlerin etki etmesi, kesme kuvvetinin azalması gibi nedenlerle stabiliteyi kaybederler. Bunun nedeni, zemindeki kayma gerilmelerinin, zeminin karşılık gelen kesme dayanımından daha büyük olmasıdır. (Laxminarayana ve Naresh 2017).

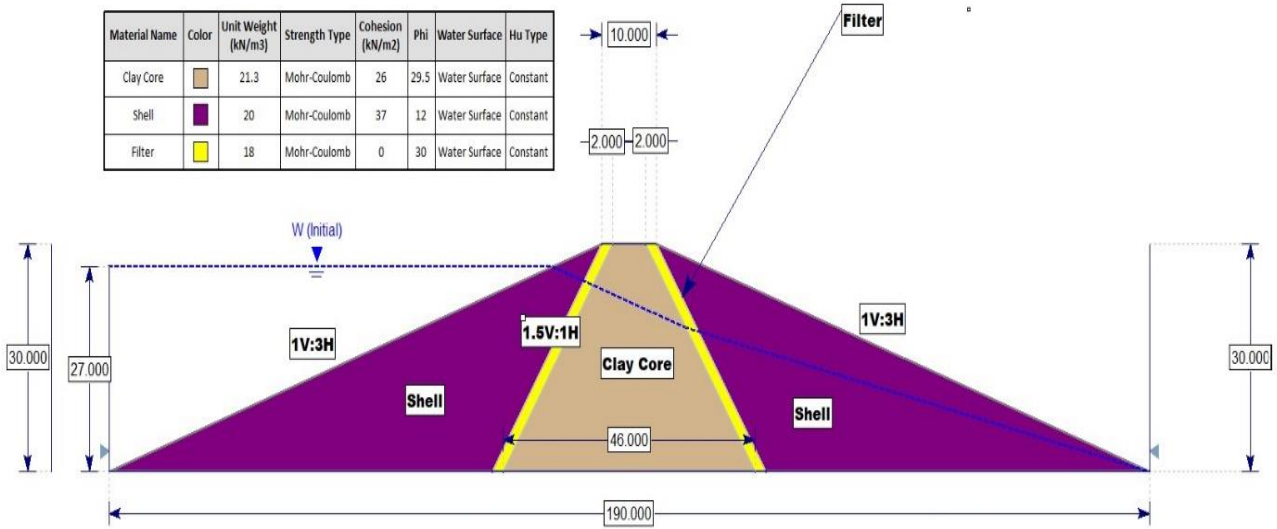
Toprak barajların duraylılığının bozulması; yapısal istikrarsızlık, aşırı hidrolik eğimler, baraj gövdesi veya baraj temelinden sızıntı, ani düşme ve sismik uyarımlar gibi etkenlerle meydana gelir. Şev analizi için Fellenius (1936)

tarafından önerilen ilk sınır denge yöntemi, dairesel kayma yüzeyi için potansiyel kayma kütlelerini ayrı dikey dilimlere bölme fikrine dayanmaktadır. Bishop (1955) ile Bishop ve Morgenstern (1960) yeni bir dilim arası normal kuvvet ekleyerek dilim yöntemini yeniden formüle etti ve güvenlik faktörünü (Factor of Safety) büyük bir hassasiyetle hesapladı. Aynı zamanda Janbu (1954) dairesel olmayan göçme yüzeyleri için basitleştirilmiş bir yöntem geliştirdi. Daha sonra, Morgenstern ve Price (1965), Spencer (1967), moment ve kuvvet dengesini tamamlayan hem dilimler arası normal kuvvetleri hem de dilimler arası kesme kuvvetlerini içeren, dairesel olmayan kırılma ve dairesel göçme yüzeyi için dilim yöntemini yeniden yapılandırmışlardır (Himanshu ve Burman 2017).

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

3.1. Material (Material)

Geçirimsiz tabaka üzerinde hayali bir dolgu barajı olduğu varsayılmıştır. Dolgu barajı USBR (1987) kriterlerine göre tasarlanmıştır. Toplam baraj yüksekliği 30 metredir. Kret genişliği 10 metredir. Memba ve mansap eğimleri 1V(vertical): 3H(horizontal)'dir. Dolgu barajının hem memba hem de mansap eğimi 1.5V: 1H olan bir kil çekirdeği (clay core) vardır. Kil çekirdek, her iki tarafında 2 metre kalınlığında filtrelere sahiptir. Su rezervuarında maksimum su seviyesi 27 metredir. Şekil 1'de dolgu baraj kesiti görülmektedir.



Şekil 1. Dolgu barajının kesiti (Cross section of embankment dam)

Toprak barajın hayali olmasına rağmen, kil çekirdek, kabuk (shell) ve filtrenin tüm parametreleri literatürdeki gerçek vaka çalışmalarından elde edilmiştir. Kil çekirdek, kabuk ve filtre parametreleri sırasıyla Khattab (2010), Laxminarayana ve Naresh (2017) ve Fattah vd. (2017) çalışmalarından alınmıştır. Analizde kullanılan malzemeler Tablo 1'de listelenmiştir.

Tablo 1. Kil çekirdek, filtre ve kabuğun malzeme özellikleri (Material properties of clay core, filter and shell)

	Kil Çekirdek	Filtre	Kabuk
Kuru birim hacim ağırlık (kN/m ³)	17.88	18	18.82
İçsel sürtünme açısı (°)	29.5	30	-
Kohezyon (kN/m ²)	26	0	37
Permeabilite (m/sec)	$3.5 \cdot 10^{-11}$	0.07	-
Poisson oranı	0.35	-	0.3

3.2. Method (Method)

Şevlerin stabilitesini değerlendirmek için limit denge tekniklerine dayanan farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bu denklemler arasında temel olarak dilim içi kuvvetler ve eğim yüzeyinin şeklinin yanı sıra dilim içi kesme ile normal kuvvetler arasındaki varsayılan ilişki arasındaki farklar dikkate alınır (Erdağ 2020).

Baraj gövdesi boyunca boşluk suyu basıncı SLIDE V.6.0 yazılımında B-bar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Güvenlik faktörünü belirlemeye yönelik stabilite analizi, 5 farklı limit denge yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Bunlar Fellenius, Bishop, Janbu, Morgenstern-Price ve Spencer yöntemleridir. Bu yöntemlerin kısa açıklamaları aşağıda listelenmiştir.

3.2.1 The B-bar Yöntemi (The B-Bar Method)

B-bar yöntemini kullanan aşırı boşluk basıncı kavramı, boşaltma senaryolarına uygulanabilir. Düşük geçirgenliğe sahip bir malzemeden bir yük hızlı bir şekilde kaldırılırsa, "negatif aşırı boşluk suyu basıncı" indüklenebilir. Boşluk suyu basıncındaki değişiklik Denklem 1'de verilmektedir:

$$\Delta u = \bar{B} \Delta \sigma_v \quad (1)$$

B (B-bar) bir malzeme için toplam boşluk basınç katsayısı olduğunda, σ_v dikey toplam gerilmelerdir. SLIDE V.6.0'da, bu, toprak barajlarındaki gölet suyunun hızlı çekilmesi nedeniyle boşluk suyu basıncı değişikliklerini simüle etmek için kullanılabilir (Rocscience 2018).

3.2.2 Fellenius Yöntemi (Fellenius Method)

Ordinary yöntemi, dairesel bir kayma yüzeyi için moment dengesini karşılar, ancak hem dilimler arası normal hem de kesme kuvvetlerini ihmal eder. Bu yöntemin avantajı, denklemin bir yineleme işlemi gerektirmemesinden kaynaklanan (F)'yi çözmedeki basitliğidir. F 'nin elde edilmesi Denklem 2'de gösterilmektedir.

$$F = \frac{\sum(c'l + N'tan\phi')}{\sum W sin\alpha} \quad (2)$$

$$N' = (W cos\alpha - ul) \quad (3)$$

Burada c ve ϕ , sırasıyla efektif gerilme terimleri olarak kohezyon ve içsel sürtünme açılarıdır.

l = dilim tabanının uzunluğu (m).

W = her bir dilimin ağırlığı (kN).

u = boşluk suyu basıncı (kN/m²)

α = dilimin ortasındaki kayma yüzeyinin eğimi

3.2.3 Basitleştirilmiş Bishop Yöntemi (Simplified Bishop Method)

Bishop yöntemi, dairesel kayma yüzeyi için uygulamada çok yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem dilimler arası normal kuvvetleri dikkate alır. Ancak dilimler arası kesme kuvvetlerini ihmal eder. Bu yöntem (F) için moment dengesini sağlar ve Denklem 4'deki gibi elde edilir.

$$N' = \frac{1}{m_\alpha} \sum \left(W - \frac{c'l sin\alpha}{F} - ul cos\alpha \right) \quad (4)$$

Deneme değeri olan m_α , güvenlik faktörü ve miktar için varsayılır ve Denklem 5 yardımıyla hesaplanır

$$m_\alpha = \cos\alpha \left(1 + \tan\alpha \frac{\tan\phi}{F} \right) \quad (5)$$

3.2.4 Basitleştirilmiş Janbu Yöntemi (Simplified Janbu Method)

Bu yöntem, bir kompozit kayma yüzeyine (yani dairesel olmayan) dayanır ve (Ff), yatay kuvvet dengesi ile belirlenir. (Bishop Basitleştirilmiş Yöntem) 'de olduğu gibi bu yöntem moment dengesini sağlamaz ve dilimler arası normal kuvvetleri (E) dikkate alır, ancak kesme kuvvetlerini (T) ihmal eder. Ff , Denklem 6 yardımıyla bulunur.

$$F = \frac{\sum(c'l + (N - ul)\tan\phi')\sec\alpha}{\sum W\tan\alpha + \sum\Delta E} \quad (6)$$

3.2.5 Morgenstern-Price Yöntemi (Morgenstern-Price Method)

Bu yöntem hem kuvvet hem de moment dengelerini karşılar ve dilim içi kuvvet fonksiyonunu varsayar. Morgenstern-Price yöntemine göre, dilim içi kuvvet eğimi, keyfi bir fonksiyonla ($f(x)$) şu şekilde değişebilir:

$$T = f(x)\lambda E \quad (7)$$

Burada: $f(x)$ = Kayma yüzeyi boyunca sürekli değişen dilim arası kuvvet fonksiyonu.

λ = varsayılan fonksiyonun ölçek faktörü.

E= dilim arası normal kuvvet (kN).

3.2.6 Spencer Yöntemi (Spencer's Method)

Bu yöntem, dilim içi kuvvetler için yapılan varsayım dışında aynı (Morgenstern-Price) yöntemine benzer. Kesitler arası kuvvetler için sabit bir eğim varsayılır ve (F) hem moment hem de kuvvet dengeleri için hesaplanır. Bu yöntemine göre, dilimler arası kesme kuvveti (T) Spencer ile ilgilidir.

$$T = E\tan\phi \quad (8)$$

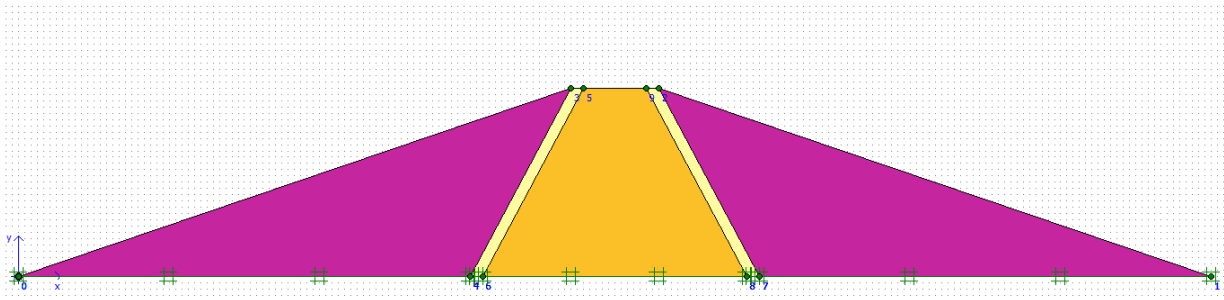
E= dilim arası normal kuvvet (kN).

ϕ = ara dilim sonuç kuvvetinin eğim açısı (Abbas vd. 2017)

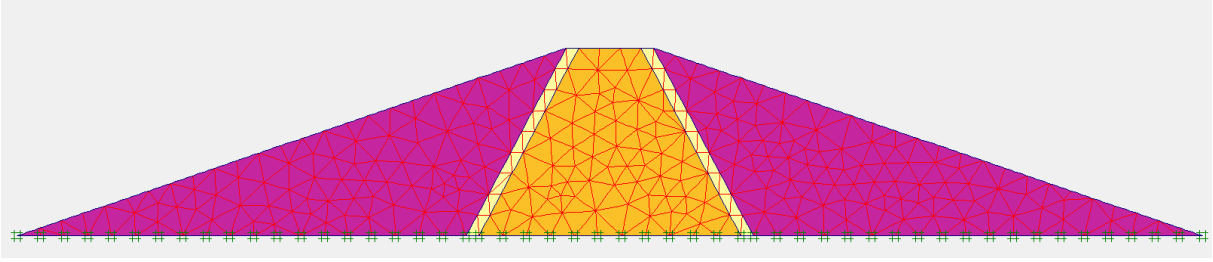
Tasarımcının şev stabilitesi analizlerinde uygun bir güvenlik faktörü sağlaması normaldir. Bu, tasarlanan eğimlerin güvenli olduğundan emin olunması ve zeminde hareket ettirilen gerilmenin kayma direncine eşit veya daha fazla olduğu kritik koşulları önlemek ve yanlış veri analizi, zayıf işçilik, ve denetleme gibi beklenmedik faktörleri engellemek için önemlidir. Güvenlik faktörü 1.0'dan küçükse şev güvensiz, 1.0 ile 1.2 arasında ise şevin güvenliğinden şüphe duyulur, güvensiz, 1.3 ile 1.4 arasında ise dolgular için tatminkar ama baraj için şüpheli, 1.5 ile 1.75 arasında ise baraj için güvenlidir (Khattab 2010).

3.2.7 Sonlu Elemanlar Yöntemi (Finite Element Method)

Geçirimsiz tabaka üzerine inşa edilen toprak dolgu barajı sonlu elemanlar yöntemine dayanan PLAXIS paket programı ile analiz edilmiştir. Toprak dolgu barajın yüksekliği 30 m ve kret yüksekliği 10 m olarak modellenmiştir. Toprak dolgu barajın şev kısmı da 1 düşey/3 yatay olacak şekilde modellenmiştir. Su rezervuarındaki su yüksekliği 8 günde 27 metreden 3 metreye düşmüştür. Modellemede de bu durum dikkate alınmıştır. Toprak dolgu baraj, PLAXIS paket programında modellenirken Mohr-Coulomb zemin modeli kullanılmıştır. Analizlerde zemin, çevre, sınır ve yükleme koşulları toprak dolgu baraj ile aynı seçilmeye çalışılmıştır. Deney kasasının geometrik modeli, iki boyutlu ve aksel simetrik olarak ve en sık ağ sıklığında oluşturulmuştur. Zemin ortamı 15 düğümlü üçgen elemanlarla modellenmiştir. Modellemede kullanılan zemin parametreleri Tablo 1'de görülmektedir. Modellemede kullanılan toprak dolgu barajın sonlu elemanlar programındaki kesiti Şekil 2'de ve sonlu elemanlar ağ sıklığı Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 2. Sonlu elemanlar programı kesit modeli (Finite elements program section model)

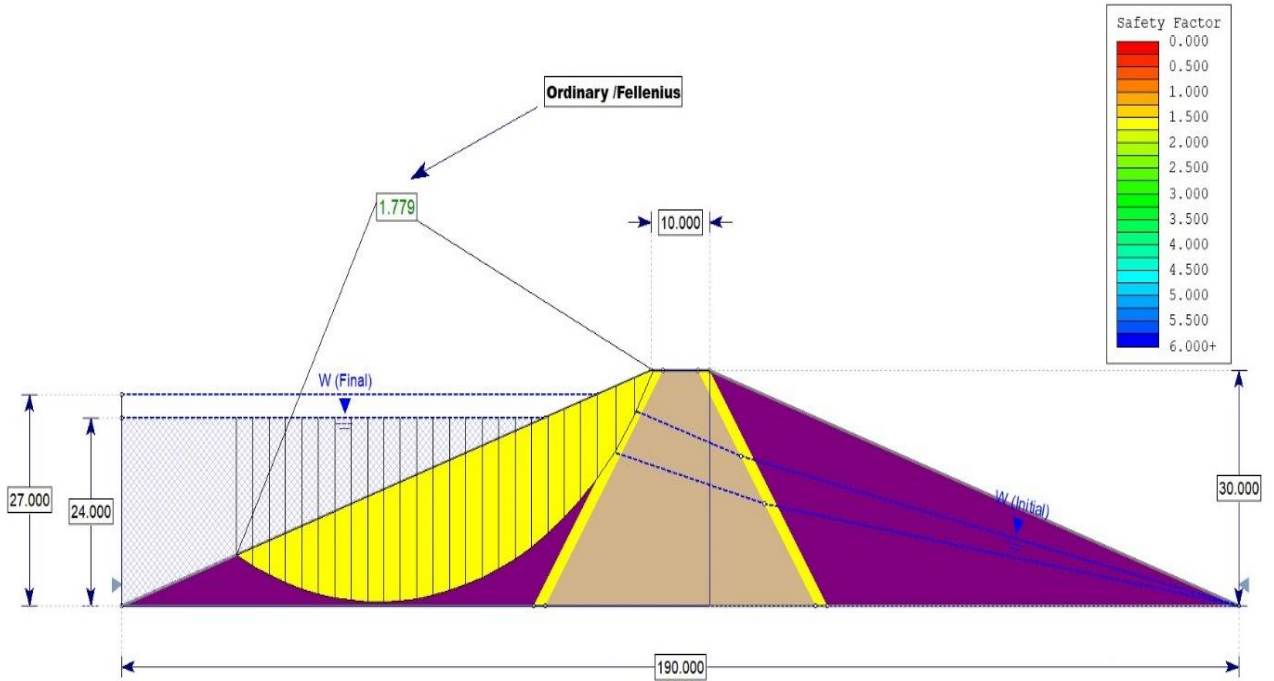


Şekil 3. Sonlu elemanlar programı ağ sıklığı (Finite element program network frequency)

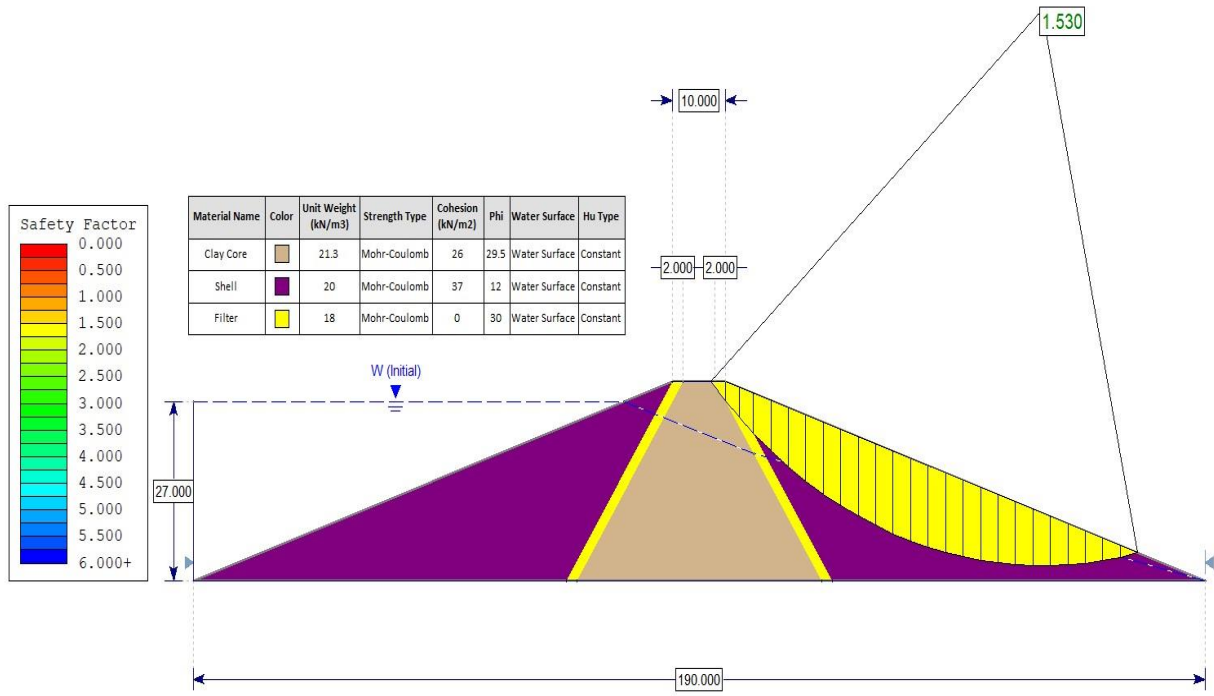
4. Analiz Sonuçları (Analysis Results)

4.1. Rezervuar Suyunun 8 Günde 3 m'ye Düşmesi (Reservoir Water Go Down to 3 m in 8 Days)

Bu bölümde, barajın memba yüzünün ani su çekilmesi sırasında kritik eğim olması nedeniyle stabilitesi incelenmiştir. Bu durumun sonuçları, su seviyesinin maksimum su seviyesinden (27 m'den) 24 m'ye düştüğünde SLIDE V.6.0 yazılımı ile Fellenius dilim yöntemi kullanılarak yapılan analiz sonrası dolgu barajının bir bölümünü temsil eden Şekil 4'te gösterilmiştir. Şekil 5'te görüldüğü gibi maksimum su seviyesinde mansap güvenlik faktörü 1.530'dur.



Şekil 4. 24 m su seviyesinde memba güvenlik faktörü (Upstream safety factor at 24 m water level)



Şekil 5. Mansabın maksimum su seviyesindeki kararlılığı (Stability of downstream at maximum water level)

Bu olgunun (ani düşmenin) tam mekanizması şu şekildedir: Rezervuarın yeterince uzun bir süre boyunca yüksek bir seviyede tutulduğu ve böylece barajın dolgu malzemesinin tamamen doyduğu ve sürekli sızıntı oluşturduğu varsayılmaktadır. Rezervuar bu aşamada aşağı çekilirse, akışın yönü tersine çevrilerek toprak barajının memba eğiminde istikrarsızlığa neden olur. "Anlık" aşağı çekilme varsayımsal bir durumdur ve kayan yüzey boyunca gözenek basınçları, sonlu elemanlar ağıнын farklı noktalarındaki "anlık" gözenek suyu basıncının incelenmesiyle belirlenir.

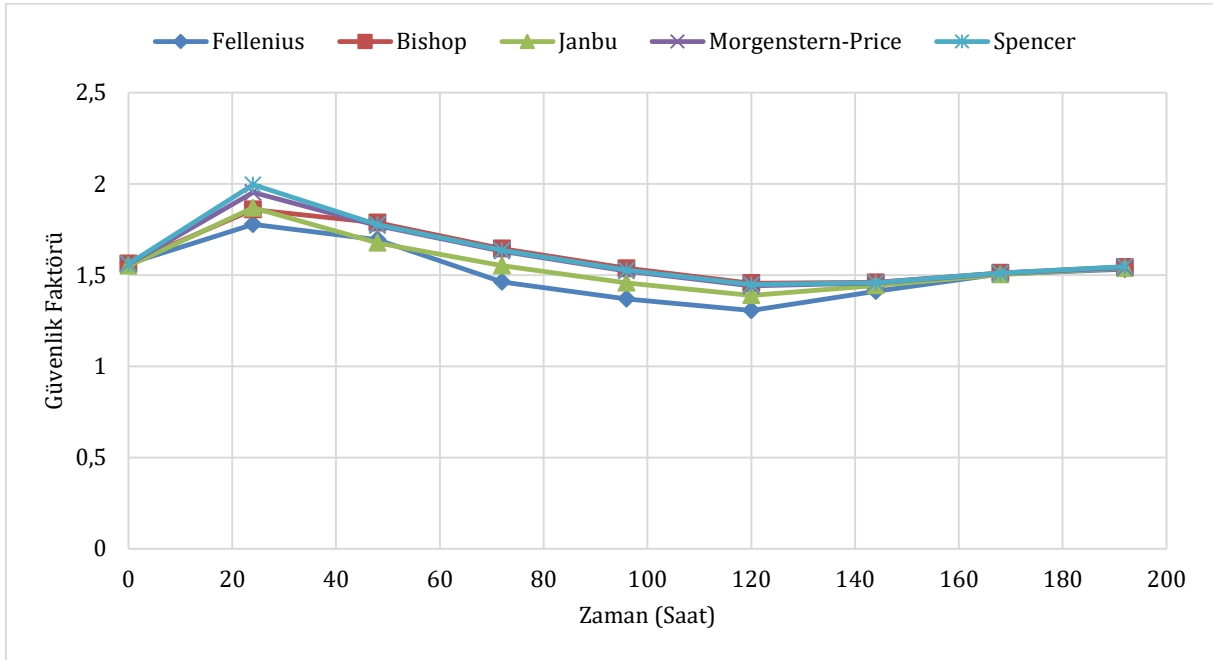
Ani su çekilmesinde en kritik koşul, "dolu rezervuar" durumunda memba eğimine etki eden su basıncı azalırken, baraj içindeki doymuş toprağın su içeriğinde kayda değer bir değişiklik olmaması durumunda meydana gelir (Fattah vd. 2017).

Beş yöntemle farklı zamanlarda tahmin edilen güvenlik faktörünün değerleri Tablo 2'de listelenmiştir. Minimum güvenlik faktörü değerleri koyu punto ile belirtilmiştir. 5 yöntem karşılaştırıldığında Fellenius yöntemiyle membada daha küçük emniyet faktörlerinin hesaplandığı görülmüştür. Bu sebeple Fellenius yönteminin tasarımcıyı daha güvenli tarafta bırakacağı düşünülebilir. Ancak Morgenstern-Price yönteminin dilimler arası kuvvetleri de hesaba kattığı göz önüne alınırsa, bu yöntemin daha hassas emniyet faktörleri verdiği söylenebilir.

Tablo 2. Memba için güvenlik faktörünü hesaplama yöntemleri (Methods for calculating factor of safety for upstream)

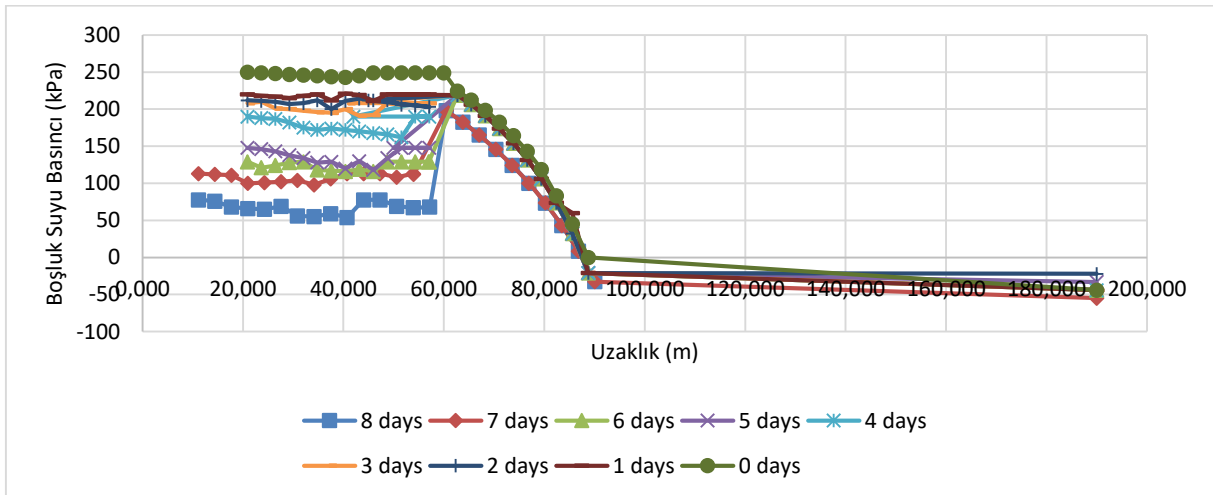
Yükseklik (h) (m)	Zaman (saat)	Fellenius Bishop Janbu Morgenstern-Price Spencer				
		Memba	Memba	Memba	Memba	Memba
27 (max.)	0	1.563	1.564	1.55	1.559	1.561
24	24	1.779	1.859	1.869	1.953	1.995
21	48	1.694	1.787	1.677	1.772	1.777
18	72	1.463	1.645	1.552	1.631	1.636
15	96	1.37	1.537	1.457	1.522	1.527
12	120	1.306	1.456	1.389	1.441	1.448
9	144	1.412	1.46	1.443	1.457	1.458
6	168	1.506	1.512	1.503	1.509	1.511
3 (min.)	192	1.532	1.544	1.539	1.541	1.547

Şekil 6, güvenlik faktörünün zaman içindeki değişimini göstermektedir. Rezervuar boşalmaya başladıktan sonraki ilk (120) saat güvenlik faktörünün biraz azaldığı, ardından hızla artmaya başladığı fark edilebilir. Bu, zemindeki efektif gerilmelerin artmasına ve dolayısıyla kayma mukavemetinin artmasına yol açan aşırı boşluk suyu basıncının zamanla azalmasından kaynaklanır. Memba şevi emniyet faktörünün azalmadan sonraki artışının ilk durumdaki emniyet faktörüne erişecek kadar olmadığı tespit edilmiştir.



Şekil 6. Beş farklı yöntem için güvenlik faktörü değerlerinin değişimi (Change of safety factor values for five different methods)

Şekil 7 ve Tablo 2'deki değerlerden, Fellenius yöntemindeki minimum güvenlik faktörü, 8 gün içerisinde rezervuar boşaltımı sırasında 5. günde elde edilen 1.306'ya eşittir ve bu sonuç, Bishop's yönteminde yer alan minimum güvenlik faktörü ile eşleşmektedir. Bishop's'ta da 5. gündür ve 1.456'ya eşittir. Ancak Janbu, Morgenstern-Price ve Spencer yöntemlerinde minimum değer sırasıyla 1.389, 1.441 ve 1.448'dir. Ani su çekilmesinin etkisini göstermek amacıyla, rezervuardan 8 günlük deşarj süresi için baraj kesiti boyunca boşluk suyu basıncındaki değişikliği hesaplamak için Şekil 1'de gösterilen kesit seçilmiştir. Sonuçlar Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 7. 8 Günlük rezervuarın deşarj süresince baraj gövdesi boyunca gözenek suyu basıncındaki değişim (The change in pore water pressure across the dam body during the 8-day reservoir discharge)

Burada Şekil 7'de, gözenek suyu basınç hattının davranışında önemli bir değişiklik fark edilir, Değişiklik 120. saat zamanında başlar ve bu, son beş eğride (8, 7, 6, 5 ve 4 günlük değişim grafiklerinde) görüldüğü gibi memba yönüne geri gelen suyun hızı üzerindeki çekirdek etkisini temsil eder.

Ani su çekilmesi sırasında, setin üst yüzündeki suyun stabilize edici etkisi kaybolur, ancak set içindeki boşluk suyu basınçları yüksek kalabilir. Sonuç olarak, barajın memba yüzünün stabilitesi çok azalabilir. Dolgudaki boşluk suyu

basıncının yayılması, büyük ölçüde dolgu malzemelerinin geçirgenliği ve depolama karakteristiğinden etkilenir. Yüksek geçirgenliğe sahip malzemeler ani çekilme sırasında hızla boşalır, ancak geçirgenliği düşük malzemelerin süzülmesi uzun zaman alır (GEO-SLOPE International Ltd 2007).

Karşı yöndeki memba boşluk suyu basıncı ortadan kalktığında, memba eğimi için tehlike oluşturur. Baraj gövdesi içindeki zeminler doymuş durumda kalır ve buradan memba şevine doğru sızıntı başlar. Sızıntı ve hidrodinamik basınçlar, memba şevine etki eden aşağı doğru kuvvetler oluşturur. Bunlar stabiliteyi etkiler ve memba şevi için kritik bir koşul oluşturur. Derin oturmuş göçme yüzeylerinin gelişmesi mümkün olsa da, zemin kenar eğimleri üzerindeki etki en yaygın olarak nispeten sığ şev bozulmaları şeklinde görülür, bu da gözetimsiz bırakılırsa tüm barajın kademeli olarak bozulmasına yol açabilir (Reddi 2003).

Rezervuar ani bir şekilde tahliye edildiğinde ve aşağı çekildiğinde, baraj gövdesindeki boşluk suyu basınçları iki şekilde azaltılır: drenaj nedeniyle gözenek suyu basıncında daha yavaş bir dağılım olur ve su yükünün tamamının ve bir kısmının kaybolması nedeniyle anında elastik bir etki oluşur.

4.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Şev Güvenlik Katsayılarının Belirlenmesi (Determination of Slope Safety Coefficients with Finite Element Method)

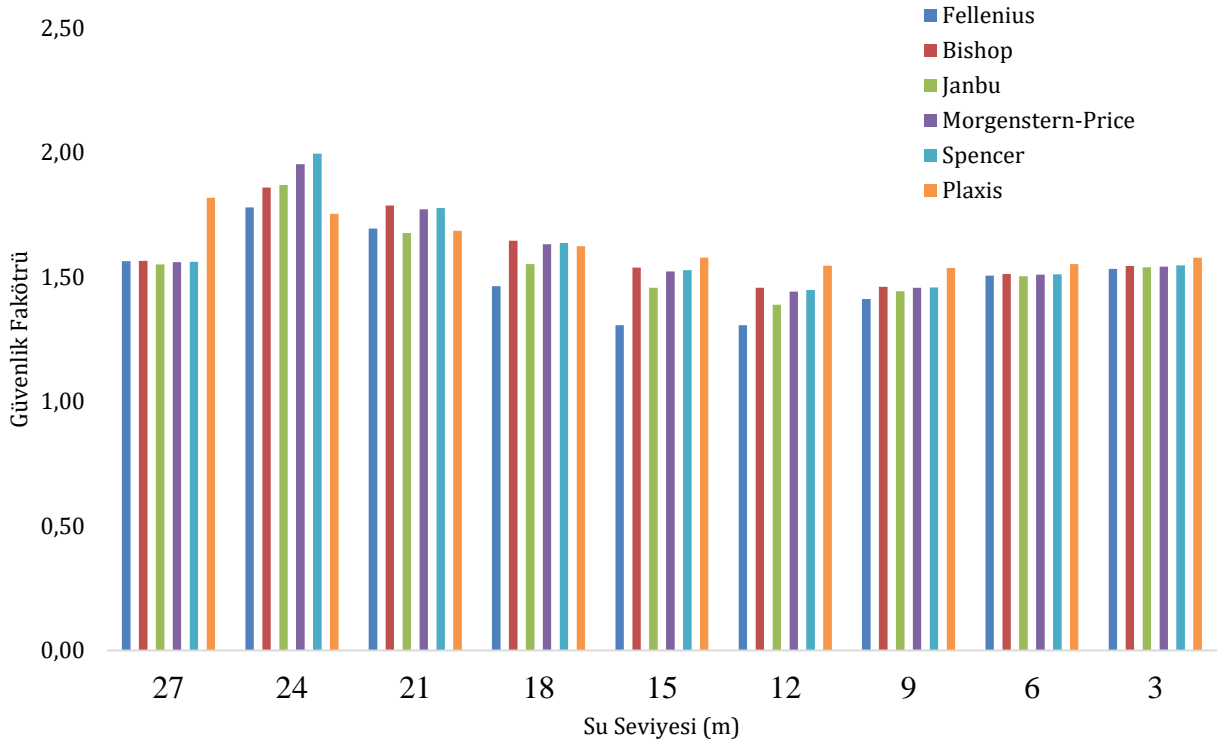
Sonlu elemanlar yöntemine dayanan PLAXIS paket programı ile yapılan analizler sonrasında güvenlik faktörünün değişimi, Tablo 3'te sunulmuştur. Sonuçlara göre tüm su seviyelerinde güvenlik sayılarının 1'in üzerinde ve güvenilir olduğu görülmüştür. Su seviyesi 9 metreye kadar güvenlik sayısının 1.818'den 1.536'ya kadar düştüğü gözlenmiştir. Bu seviyeden sonra ise, güvenlik sayısı tekrar artarak 1.577 seviyelerine kadar yükselmiştir. Rezervuar boşalmaya başladıktan güvenlik faktörünün biraz azalması ve ardından hızla artmaya başlaması, toprak dolgudaki gerilmelerin artmasına ve dolayısıyla kayma mukavemetinin artmasına yol açan aşırı boşluk suyu basıncının zamanla azalmasından kaynaklandığı göstermektedir.

Tablo 3. PLAXIS paket programı ile elde edilen memba yüzeyi güvenlik faktörleri (Upstream surface safety factors obtained with the PLAXIS package program)

Yükseklik (h) (m)	Zaman (saat)	Memba
27	0	
24	24	1.754
21	48	1.685
18	72	1.624
15	96	1.578
12	120	1.545
9	144	1.536
6	168	1.552
3	192	1.577

4.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması (Finite Element Method and Comparison of Numerical Analysis Results)

Sayısal analizler sonucu elde edilen güvenlik faktörleri ve sonlu elemanlar analizi ile belirlenen güvenlik faktörleri Şekil 8'de sunulmuştur. Sonuçlara göre, sayısal analizlerle elde edilen güvenlik faktörleri ile sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen güvenlik faktörlerinin uyumlu olduğu gözlenmiştir. Ancak, bütün su seviyelerinde Sonlu elemanlar yöntemi ile belirlenen güvenlik faktörlerinin daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, sayısal analizlerde su seviyesi 9 metreye kadar güvenlik faktörlerinde azalma sonrasında artış meydana gelirken sonlu elemanlar yönteminde 12 metreye kadar güvenlik faktörlerinde azalma sonrasında artış meydana gelmiştir.



Şekil 8. Sonuçların karşılaştırılması (Comparison of results)

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

SLIDE V.6.0 ve PLAXIS yazılımları kullanılarak yapılan bu çalışmada, toprak dolgu barajda stabilite analizleri incelenmiştir. Ani çekilme sırasında, baraj gövdesindeki boşluk suyu basıncı azalır ve bu da kararlı hal akımının gerçekleştiğini gösterir. Barajın mansabındaki bazı noktalar, suyun aşağı çekildiği dönemde negatif boşluk suyu basıncından etkilenebilir, bu da su seviyesinin bu noktaların altına düştüğünü gösterir. Rezervuardaki ani su çekilmesinin başlamasından sonra kısa süre içinde baraj yamaçlarının kaymasına karşı güvenlik faktörü biraz azalır, ardından artmaya başlar. Bunun sebebi aşırı boşluk suyu basıncının azalmasıdır.

Ani düşme koşullarında CU (konsolidasyonlu-drenajsız koşul) ve CD (konsolidasyonlu-drenajlı) deneylerine bağlı kompozit kayma dayanım parametrelerinin kullanılması daha uygun olacaktır. Ani düşmede kullanılan kayma dayanımları CU ve CD deney zarflarının en düşük kombinasyonuna göre seçilir. Bu durum için yapılan analizde, ani düşme esnasında boşluk suyu sönümlenmesinin oluşmayacağı ve su seviyesinin ani olarak düştüğü varsayılır Tosun (2020).

Yapılan çalışmanın, iyiden iyiye kendini hissettiren küresel iklim değişikliğine, kuraklığa, susuzluğa çare olabilecek su depolama barajlarının yapımında, yapısal güvenlik açısından fikir vermesi beklenmektedir. Yapısal güvenliğe önem verilmeden sadece amaç doğrultusunda kullanılması göz önüne alınarak yapılan herhangi bir toprak dolgu baraj hem işlevini yerine getiremeyecektir hem de zaman ve mal kaybına neden olacaktır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Abbas, M.J., Aljanabi, A.Q., Mutiny AZ, 2017. Slope stability analysis of an earth dam, Diyala Journal of Engineering Sciences, Vol. 10, No. 01, pp. 106-117.
- Alonso, E., Pinyol, N., 2009. Slope stability under rapid drawdown conditions. First Italian Workshop on Landslides, s. 11-27. <http://hdl.handle.net/2117/11200>.
- Bishop, A.W., 1955. The use of slip circle in the stability analysis of slopes. Geotechnique 5(1):7-17.
- Bishop, A.W., Morgenstern N, 1960. Stability coefficients for earth slopes. Geotechnique 10(4):164-169.
- Çalamak, M., Selamoğlu, M., Yanmaz, A. M., 2015. Toprak Dolgu Barajlarda Hazne Seviyesindeki Ani Düşmenin Şev Stabilitesine Etkilerinin Değerlendirilmesi, 4. Su Yapıları Sempozyumu, 278-287.

- Devi, L.N.D.D., Anbalagan, R., 2017. Study on Slope Stability of Earthen Dams by using GEOSTUDIO Software, International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology. Volume 3, Issue 6, 408-414.
- Erdağ, A., 2020. Suya Doygun Olmayan Zemin Şevlerinde Yağış Yoğunluğunun Stabiliteye Etkisi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 97 sf., Ankara.
- Fattah, Y.M., Omran, A.H., Hassan, A.M., 2017. Flow and stability of Al-Wand earth dam during rapid drawdown of water in reservoir. Acta Montanistica Slovaca. Vol 22, Number 1, 43-57.
- Fellenius, W., 1936. Calculation of stability of earth dams. In: Proceedings of the second congress of large dams, vol 4, pp 445-463.
- GEO-SLOPE International Ltd, 2007. Calgary, Alberta: Rapid Drawdown with Multi-Stage, Canada, 2007, www.geoslope.com (Erişim Tarihi: 19.12.2020).
- Himanshu, N., Burman, A., 2017. Seepage and Stability Analysis of Durgawati Earthen Dam: A Case Study. Indian Geotech J, 49(1):70-89.
- Janbu, N., 1954. Applications of composite slip surfaces for stability analyses. In: Proceedings of the European conference on the stability of earth slopes, Stockholm, vol 3, pp 39-43.
- Khassaf, I.S., Abdoul-Hameed, R.M., Al-deen, S.N.N., 2013. Slope Stability Analysis under Rapid Drawdown Condition and Siesmic Loads of Earth Dam (Case Study: Mandali Dam), International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. Vol. 2, Issue 12, 7114-7118.
- Khattab, A.A.S., 2010. Stability Analysis of Mosul Dam Under Saturated and Unsaturated Soil Conditions. Al-Rafidain Engineering, Vol 18, No 1, 13-27.
- Laxminarayana, A., Naresh, M., 2017. Analysis of Embankments with Different Fill Materials using PLAXIS-2D, International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT) – Volume 45 Number 6, 280-284.
- Morgenstern, N.R., Price, V.E., 1965. The analysis of the stability of general slip surfaces. Geotechnique 15(1):79-93.
- Plaxis 2002. User Manual, 2D version 8, (Edited by Brinkgrève, R.J.B.), Delft University of Technology Plaxis., The Netherlands.
- Ramachandra, R.A., Khaled H.H., 1999. Flood Frequency Analysis, CRC-Press. (ISBN: 9780849300837).
- Reddi, L.N., 2003. Seepage in Soils Principles and Applications, Hoboken (NJ): John Wiley & Sons.
- Rocscience Inc, 2010. Slide Version 6.0-2-D Limit Equilibrium Slope Stability Analysis, www.rocscience.com, Toronto, Ontario, Canada.
- Rocscience, 2018. Tutorial 13 Rapid Drawdown (B-bar method). <https://www.rocscience.com/>(Erişim Tarihi: 19.12.2020).
- Sherard, J.L., Woodward, R.J., Gizienski, S.F., 1963. Earth and Earth Rock Dams: Engineering Problems of Design and Construction. John Wiley and Sons, New York, ABD.
- Spencer, E., 1967. A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces. Geotechnique 17(1):11-26.
- Tosun, H., 2020. Dolgu Barajların Şev Stabilité Analizi: Temel Yaklaşımlar Ve Parametre Seçimi. Su Kaynakları 5:13-21.
- USBR, 1987. Design of Small Dams. United States Bureau of Reclamation, Washington, ABD.