

Toprak Dolgu Barajlarda Hazne Seviyesindeki Ani Düşmenin Şev Stabilitesine Etkilerinin Değerlendirilmesi

Melih Çalamak

Yard. Doç. Dr., İnşaat Müh. Bölümü, TED Üniversitesi, 06420, Ankara
Tel: (312) 585 01 01
E-Posta: melih.calamak@tedu.edu.tr

Meriç Selamoğlu

Dr., İnşaat Müh. Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, 06800, Ankara
Tel: (312) 210 24 84
E-Posta: smeric@metu.edu.tr

A. Melih Yanmaz

Prof. Dr., İnşaat Müh. Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, 06800, Ankara
Tel: (312) 210 54 45
E-Posta: myanz@metu.edu.tr

Öz

Toprak dolgu barajlarda çeşitli sebeplerle hazne seviyesinde ani düşüşler olmaktadır. Hazne su seviyesinin ani düşmesi problemine örnek olarak, haznesinde geçici bir süre taşkın suyunu depolayan sel kapanları verilebilir. Genellikle toprak dolgu gövdeden oluşan bir sel kapanı düşük akım dönemlerinde mambadan gelen suyu depolama yapmaksızın mansaba aktarır. Taşkın dönemlerinde, hazne giriş akımının yükselmesi esnasında haznedeki su seviyesi, haznenin depolama ve boşaltma kapasitesine bağlı olarak artar. Taşkın pik döneminden sonra çekilme aşamasında ise su seviyesi, yükselme dönemine oranla daha yavaş bir hızla haznedeki boşalır. Bu çalışmada, haznenin ani boşalmasının dolgu barajların şev stabilitesine etkileri araştırılmaktadır. Bu bağlamda, gövde yüksekliğinin, hazne boşalma hızının, gövde malzemesi tipinin (homojen veya zonlu) ve şev eğimlerinin stabilizeye etkileri limit denge analizine dayanan bir bilgisayar programı vasıtasıyla araştırılmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre bu koşulda toprak dolgu barajların mamba şevi stabilitesinin mansaba oranla daha kritik olduğu ortaya konulmuştur. Gerçekleştirilen analizlerde, farklı baraj geometrisi ve malzeme özellikleriyle çeşitli hazne boşalma hızlarının şev stabilitesine etkileri araştırılmıştır. Toprak dolgu barajların tasarım sürecinde ani hazne boşalması durumunun ele alınmasının önemi elde edilen bulgularla vurgulanmıştır.

Anahtar sözcükler: Dolgu barajlar, Ani hazne boşalması, Şev stabilitesi, Şev eğimi, Limit denge analizi.

Giriş

Hazne seviyesinin ani düşme hali, dolgu barajların karşılaşılabileceği en kötü yükleme durumlarından biridir. Özellikle sel kapanı olarak kullanılan kontrolsüz dolgu barajlarda, memba su seviyesi gelen bir taşkınla birlikte bir süre boyunca maksimum seviyede sabit kalabilir. Bu süre boyunca baraj gövdesinde neredeyse kararlı akım durumu oluşur ve memba şevi göreceli olarak büyük bir emniyet katsayısıyla stabilitesini korur. Fakat taşkının çekilme döneminde haznedeki su seviyesi aniden düşer. Bu durumda baraj gövdesindeki boşluk suyu basıncı hazne seviyesi düşmesine rağmen durumunu uzun bir süre korur ve daha sonra zamanla birlikte yavaş yavaş azalmaya başlar. Boşluk suyu basıncının azalma hızı baraj dolgu malzemesinin hidrolik iletkenliğine bağlıdır. Bu hız, düşük hidrolik iletkenliğe sahip killi karışımlardan oluşan dolgu barajlarda oldukça düşüktür. Boşluk suyu basıncının azalma hızı hazne seviyesi düşme hızından yavaş olduğundan bu süre boyunca özellikle barajın memba şevindeki boşluk suyu basıncı şevin kaymasını tetikleyebilmektedir (Fredlund ve diğ., 2011).

Baraj haznesinin ani boşalma durumu baraj işletmesinde zaman zaman karşılaşılabilecek bir durum olduğundan kapsamlı olarak araştırılmaktadır. Literatürde, hazne seviyesindeki düşme hızı 0.1 m/gün olan durumlar normal, 0.5 m/gün olanlar önemli, 1.0 m/gün ve daha yüksek olanlar ise olağan dışı düşme hızı olarak tanımlanmıştır (Alonso ve Pinyol, 2009). Bugüne kadar birçok dolgu baraj, haznesinin aniden boşalması nedeniyle memba şevi stabilitesini yitirerek çökmüştür ve bu çökmelerden birçoğu baraj hazne seviyesi yaklaşık yarı seviyesine kadar düştüğünde gerçekleşmiştir (Sherard ve diğ., 1963). Ayrıca, bu çökmelerdeki su seviyesi düşme hızının, normal düşme hızı (0.10-0.15 m/gün) olduğu belirtilmiştir. Gerçek dolgu baraj çökmeleri üzerinde ICOLD (1980) tarafından yapılan bir araştırmaya göre memba şevi kaymalarının üçte biri ani hazne boşalması sebebiyle gerçekleşmektedir. Bunların en önemlilerinden biri Kaliforniya'daki San Luis Barajı memba şevinin 1981'deki ani bir hazne boşalması sebebiyle kaymasıdır. Bu göçmedeki hazne boşalma hızının 0.3 m/gün olduğu ve rezervuar su seviyesindeki değişimin 55 m olduğu Thun (1985) tarafından bildirilmiştir.

Bu çalışmada, ani hazne seviyesi düşmelerinin toprak dolgu barajların memba ve mansap şevi stabilitelere olan etkileri çeşitli koşullar için araştırılmaktadır. Bu amaçla bir homojen dolgu baraj ele alınarak ani hazne boşalması durumu altında, barajın çeşitli geometrik özelliklerinde, farklı hazne boşalma hızlarında ve barajın farklı malzemelerden yapılması halinde şev stabilitesi davranışları incelenmiştir. Bu incelemelerde öncelikle barajın ele alınan durumunun sonlu elemanlar yöntemi ile sızma analizleri gerçekleştirilmiş; daha sonra limit denge analiziyle memba ve mansap şev stabilite analiz edilmiştir. Ele alınan her durum için memba ve mansap emniyet faktörlerinin zamana göre değişimleri incelenmiş ve bahsedilen farklılıkların etkileri ortaya çıkarılmıştır.

Çalışmada Kullanılan Yöntemler

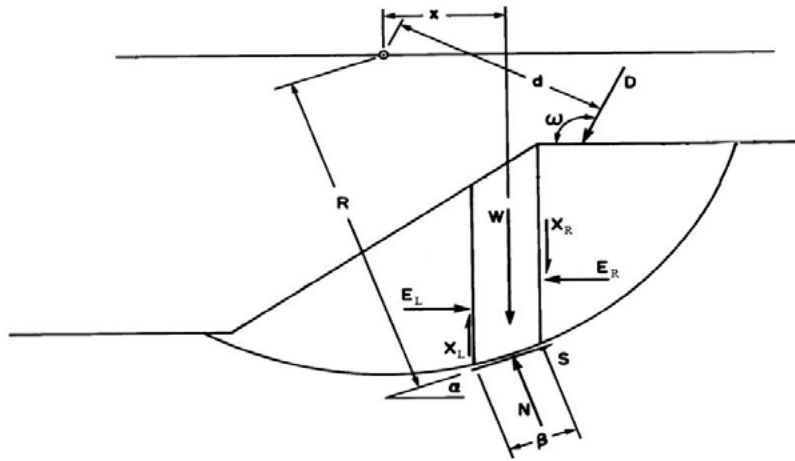
Sızma Analizleri

Şev stabilitesine etkileyen en önemli unsurlardan biri boşluk suyu basıncı olduğu için, bu analize başlamadan önce boşluk suyu basınçlarının tespit edilmesi gerekmektedir.

Dolgu barajların gövdesindeki zamana bağlı, iki boyutlu sızma Darcy kanunu ile tanımlanmaktadır (Papagianakis ve Fredlund, 1984). Baraj gövdesindeki serbest sızma hattının altındaki bölge doymun alan, üzerindeki zemin alanı ise doymun olmayan bölge olarak adlandırılır. Sızmanın gerçekçi olarak modellenmesi, doymun olmayan zeminde gerçekleşen sızmanın da hesaba katılmasıyla mümkündür. Bu bölgede zeminin hidrolik iletkenliği doymun bölgeninkinden oldukça farklıdır ve zeminin su muhtevası ve basınç arasındaki ilişkisiyle belirlenmektedir (Pham ve diğ., 2005). Zeminin su muhtevası ve basınç arasındaki ilişkisi zemin-su karakteristik eğrisiyle tanımlanır ve bu eğri çeşitli matematiksel modellerle (Gardner, 1956; Mualem, 1976; van Genuchten, 1980; Fredlund ve Xing, 1994) belirlenebilir. Bu modellerin en bilineni van Genuchten modelidir. Bu çalışmada barajın doymun olmayan kısmındaki sızmanın belirlenmesinde bu model kullanılmıştır. Dolgu barajın gövdesindeki boşluk suyu basıncının tayini iki boyutlu Darcy denkleminin belirli başlangıç ve sınır koşulları altında çözülmesiyle mümkündür. Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemiyle çözümlenmeler yapıldığı SEEP/W (Geo-Slope Int Ltd, 2013a) yazılımı kullanılarak sızma analizleri gerçekleştirilmiş ve baraj gövdesindeki boşluk suyu basınçları tayin edilmiştir. Bilgisayar destekli sızma analizleriyle ilgili daha geniş bilgi Çalamak (2014) ve Çalamak ve Yanmaz (2014) kaynaklarında bulunabilir.

Şev Stabilitesi Analizleri

Şev stabilitesi hesaplamaları genellikle limit denge analiziyle gerçekleştirilir. Bu analizde, kayan zemin kütesinin yer çekimi ve boşluk suyu etkileri altındaki denge durumu incelenir. Kayması olası zemin kütesini tutan ve harekete geçiren kuvvetler, momentler ya da gerilmeler karşılaştırılır. Bu karşılaştırmada, tutan ve harekete geçiren etkenler oranlanır ve şevin emniyet faktörü bulunur. Emniyet faktörünün 1.0'den küçük olması şevin stabil olmadığını gösterir. Analizler Dilim Yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemde kayma olasılığı bulunan zemin kütesi düşey dilimlere bölünür ve her bir dilime etkiyen kuvvetler (dilim ağırlığı (W), dilim taban normal (N) ve kesme (S) kuvvetleri ve dilimler arası normal (E_L , E_R) ve kesme (X_L , X_R) kuvvetleri) belirlenir (Craig, 2004) (bkz. Şekil 1).



Şekil 1 Dilim Yöntemi ile şev stabilitesi analizi (Geo-Slope Int Ltd, 2013b).

Emniyet faktörü en genel haliyle moment (FS_m) ve kuvvet (FS_k) dengeleri için sırasıyla Denklem (1) ve Denklem (2) ile hesaplanabilir (Geo-Slope Int Ltd, 2013b):

$$FS_m = \frac{\Sigma(c'\beta R + (N - u\beta)R \tan \phi')}{\Sigma Wx - \Sigma Nf \pm \Sigma Dd} \quad (1)$$

$$FS_k = \frac{\Sigma(c'\beta \cos \alpha + (N - u\beta) \tan \phi' \cos \alpha)}{\Sigma N \sin \alpha - \Sigma D \cos \alpha} \quad (2)$$

Yukardaki denklemlerde c' , efektif kohezyon, ϕ' , efektif içsel sürtünme açısı, N , dilim tabanındaki normal kuvvet, W , dilim ağırlığı, α , dilim alt yüzeyinin eğimi, u , boşluk suyu basıncı, D , noktasal yük, β , R , x , f , d ve ω ise geometrik değişkenlerdir.

Dilim Yöntemi ile şev stabilitesi hesaplamaları için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan bir kısmı sadece kuvvet veya moment dengesini göz önünde bulundururken diğerleri, hem kuvvet hem de moment dengelerini göz önünde bulundurmaktadır. Bu yöntemlerden bazıları Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1 Dilim Yöntemi'nde kullanılan yöntemler ve kabulleri

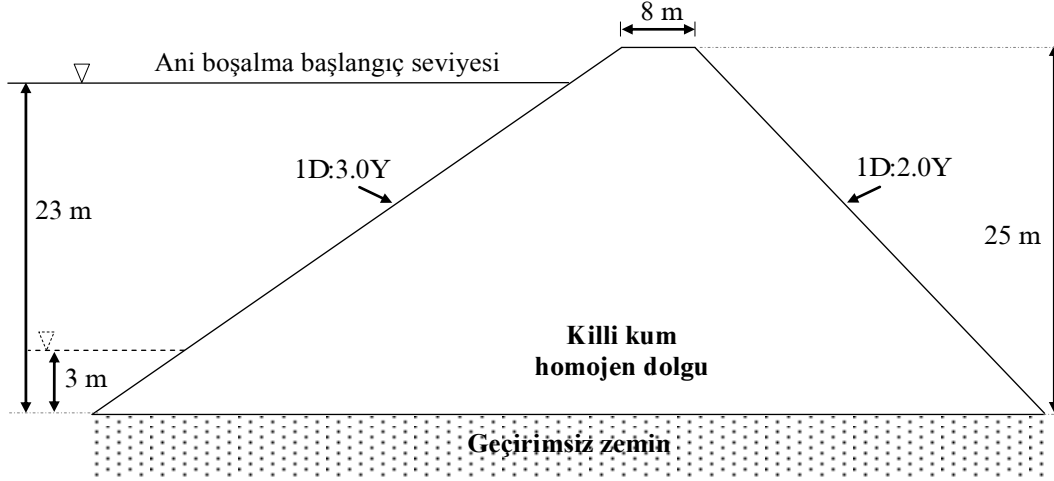
Yöntem	Gereken denge tipi	Göz önünde bulundurulmuş dilimler arası kuvvetler
Fellenius	Moment dengesini	-
Bishop	Moment dengesini	Dilimler arası normal kuvvet
Janbu	Kuvvet dengesini	Dilimler arası normal kuvvet
Morgenstern-Price	Moment ve kuvvet dengesini	Dilimler arası normal ve kesme kuvvetleri
Spencer	Moment ve kuvvet dengesini	Dilimler arası normal ve kesme kuvvetleri

Dilim Yöntemi'nde kullanılan Morgenstern-Price ve Spencer yaklaşımları hem kuvvet ve moment dengelerini hem de dilimler arası tüm kuvvetleri gözetmektedir. Dolayısıyla bu teknikler şev stabilitesi analizlerinde en güçlü ve hassas yöntemler olarak nitelendirilmektedir (Malkawi ve diğ., 2000; Geo-Slope Int Ltd, 2013b). Bu çalışmadaki şev stabilitesi analizlerinde Morgenstern-Price yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca bazı çözümler karşılaştırma amacı ile Fellenius metodu ile gerçekleştirilmiştir. Dilimler arası kuvvetlerin hesaplanmasında emniyet faktörü de kullanıldığından bu yöntemlerle yapılan analizler ardışık (iteratif) çözümleme ile gerçekleştirilmiştir. Şevin kritik kayma yüzeyi çeşitli teknikler kullanılarak belirlenebilir. Bunlardan bazıları optimizasyon yöntemi (Bolton ve diğ., 2003; Zolfaghari ve diğ., 2005), rasgele sonlu elemanlar yöntemi (Griffiths ve Fenton, 2004) ve bu çalışmada da kullanılan deneme yöntemidir. Bu bağlamda kritik kayma yüzeyi (minimum emniyet faktörüne sahip kayma yüzeyi) yüzlerce kayma yüzeyi ve kayma merkezi sınanarak tespit edilmiştir. Bu çalışmadaki şev stabilitesi analizleri SLOPE/W yazılımı (Geo-Slope Int Ltd, 2013b) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Uygulama

Bu çalışma kapsamında bir homojen toprak dolgu barajın hazne seviyesinin ani olarak düşmesinin çeşitli koşullar altında şev stabilitesine olan etkileri araştırılmaktadır. Ele alınan örnek baraj USBR (1987) kriterlerine göre boyutlandırılmıştır. Yüksekliği 25 m olan baraj, homojen dolgu olarak killi kumdan yapılmıştır. Barajın memba şevi eğimi 1D:3.0Y, mansap şevi eğimi ise 1D:2.0Y'dir. Başlangıç koşulunda barajın membaında 23 m'lik su yükü bulunmakta iken mansabında kuyruk suyu bulunmamaktadır. Ayrıca,

barajın geçirimsiz bir zemin üzerine inşa edildiği varsayılmıştır. Ele alınan baraj Şekil 2’de gösterilmiştir. Baraj malzemesinin özellikleri barajın sızma ve şev stabilitesi davranışlarını büyük ölçüde belirlediğinden bu özellikler literatürde gerçek veriler içeren kaynaklardan alınmıştır. Bu bağlamda dolgu malzemesinin hidrolik iletkenliği 3.33×10^{-7} m/s (Carsel ve Parrish, 1988), kuru birim ağırlığı 18.2 kN/m^3 ; kohezyonu 34.5 kN/m^2 ; ve içsel sürtünme açısı 34° alınmıştır (USBR, 1987).

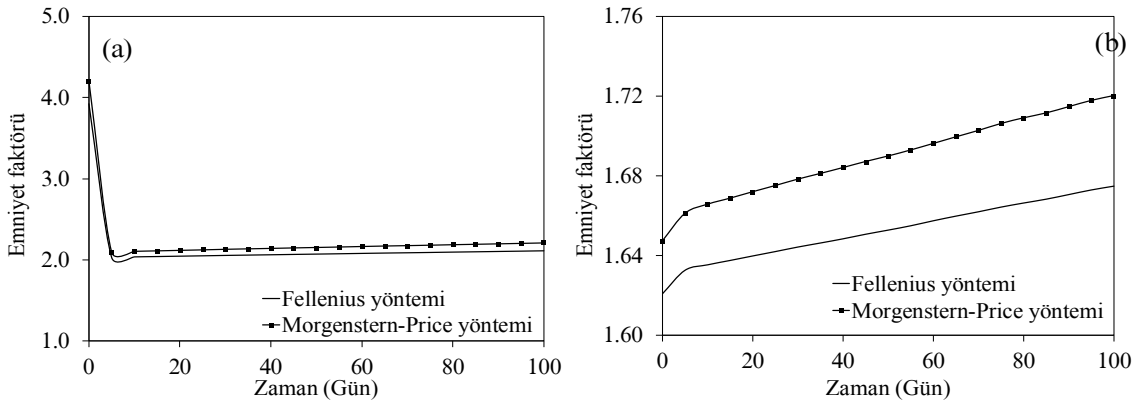


Şekil 2 Analiz edilen homojen dolgu barajın gövde kesiti.

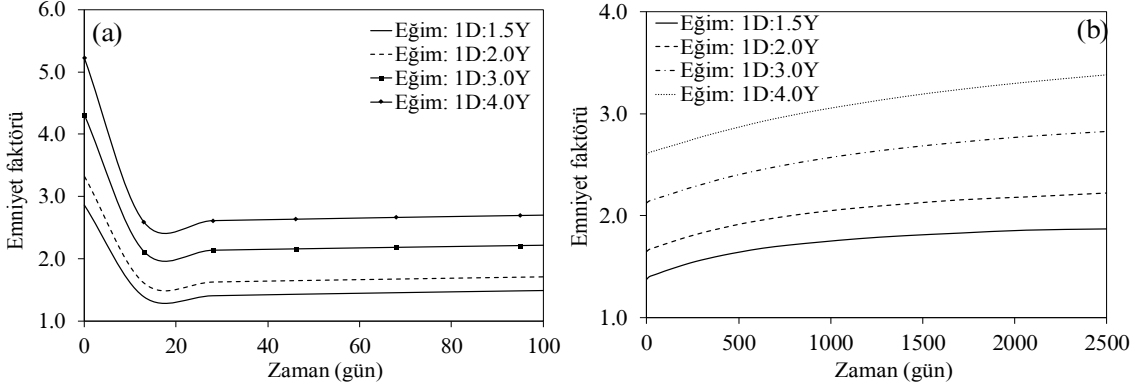
Çalışmadaki barajın hazne su seviyesinin ani boşalma durumu barajın membana atanan sınır koşuluyla belirlenmiştir. Bu sınır koşulunda, barajın membanda başlangıç durumundaki 23 m'lik su seviyesi 4 gün içinde doğrusal olarak 3 m'ye düşürülmüştür. Bu durum, 5 m/gün'lük bir boşalma hızına karşı gelen olağan dışı hızlı bir boşalma olup, kontrolsüz sel kapanlarında taşkının çekilme döneminde görülmesi olasıdır. Barajın şev stabilitesi analizleri Fellenius ve Morgenstern-Price yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar memba ve mansap şevleri için Şekil 3'te sunulmuştur. Bu grafiklerde şevlerin kaymaya karşı olan emniyet faktörünün zamanla değişimleri gösterilmiştir. Şekil 3(a)'dan anlaşılacağı üzere memba şevi emniyet faktörü haznenin boşalmasıyla birlikte aniden düşmektedir. Emniyet faktörü minimum bir değere ulaştıktan sonra bir miktar yükselerek sabit bir değere yaklaşmaktadır. Emniyet faktörünün bu davranışı ani hazne boşalmasıyla membadaki suyun şevi tutan etkisinin ortadan kalkması ve bu sürede şevi kaydıran boşluk suyu basıncının baraj gövdesinde bulunmasıdır. Bir süre sonra, boşluk suyu basıncının gövdedeki suyun tahliyesiyle azalması nedeniyle şevin emniyet faktörü artmaktadır. Boşluk suyunun tahliye olmasının tamamlanmasıyla, emniyet faktörü maksimum değerine ulaşmakta ve bu değerinde sabit kalmaktadır. Mansap şevinde ise emniyet faktörü düzenli olarak artmaktadır (bkz. Şekil 3(b)). Bunun sebebi burada şevi kaydırmaya çalışan boşluk suyu basıncının sürekli olarak azalmasıdır. Boşluk suyu basıncının tamamen ortadan kalkmasıyla buradaki emniyet faktörünün de sabit değerine ulaşacağı açıktır. Yalnız, memba şevinin aksine mansap şevinin emniyet faktöründeki değişimler çok küçük mertebelerde olmaktadır. Haznenin ani boşalması öncesi ve sonrasında oluşan emniyet faktörleri arasındaki fark membada %45 mertebesindeyken mansapta sadece %3'tür. Her iki yöntem karşılaştırıldığında ise Fellenius yöntemiyle hem membada hem de mansapta daha küçük emniyet faktörlerinin hesaplandığı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla bu yöntemin tasarımcıyı daha güvenli tarafta bırakacağı düşünülebilir. Fakat Morgenstern-Price yönteminin dilimler arası kuvvetleri de göz önünde bulundurduğu düşünüldüğünde, bu yöntemin daha gerçekçi olduğu ve daha hasas emniyet faktörleri verdiği söylenebilmektedir.

Şev Eğimi ve Baraj Yüksekliğinin Şev Stabilitesine Etkisi

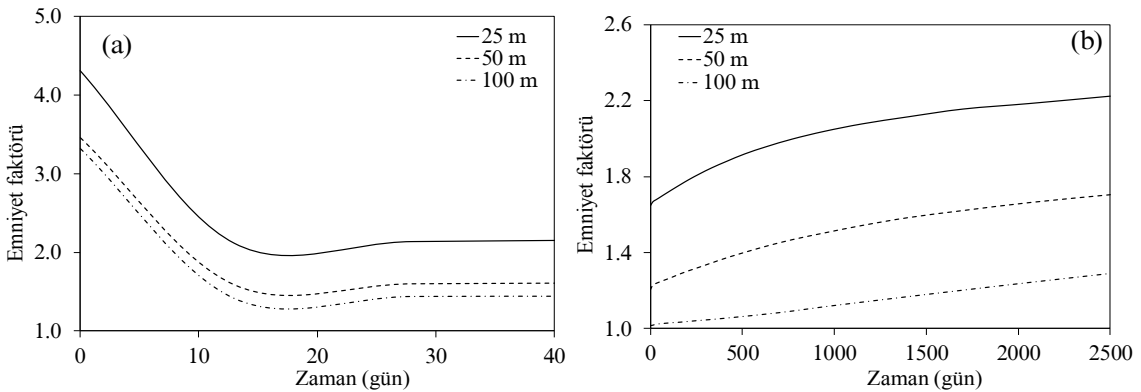
Çalışma kapsamında şev eğimlerinin ve baraj yüksekliğinin stabiliteye olan etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, sabit baraj yüksekliği için 1D:1.5Y (33°), 1D:2.0Y (26.5°), 1D:3.0Y (18.4°), 1D:4.0Y (14°) memba ve mansap eğimlerinde şev stabiliteleri irdelenmiş ve sonuçlar Şekil 4'te sunulmuştur. Bunların yanında sabit yanal eğimler için 25 m, 50 m ve 100 m yükseklikteki barajların şev stabiliteleri incelenmiş ve elde edilen bulgular Şekil 5'te gösterilmiştir. Sonuçlara göre hem memba hem de mansapta eğimin azalmasıyla birlikte şev topuğunda ve olası kayma düzleminde kayma gerilmeleri azalmakta ve dolayısıyla şevin stabilitesi artmaktadır. Bunun aksine, baraj yüksekliği sabit eğimlerle artırıldığında şevin ağırlığı artmakta; bu da olası kayma düzleminde gelişen kayma gerilmelerini artırmaktadır. Dolayısıyla da şevin stabilitesi azalmaktadır.



Şekil 3 (a) Memba; (b) Mansap şevi emniyet faktörlerinin zamana göre değişimi.



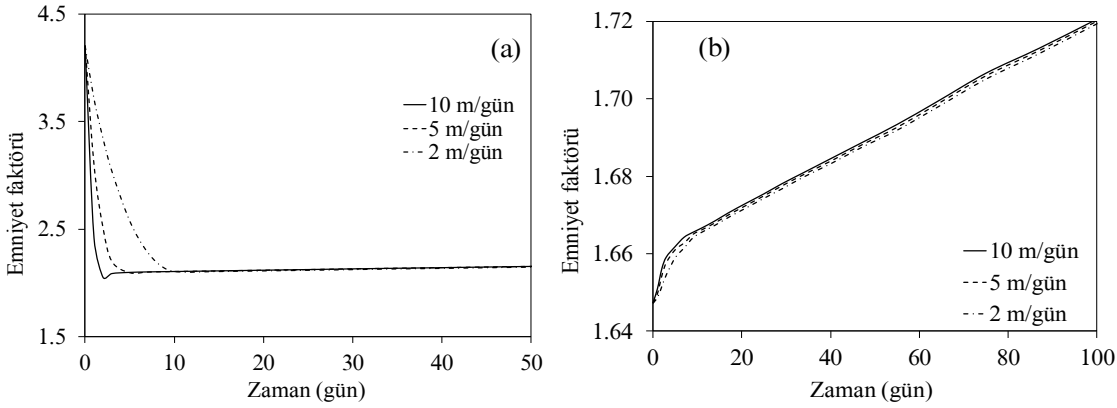
Şekil 4 (a) Memba; (b) Mansap şevi emniyet faktörünün eğime göre değişimi.



Şekil 5 (a) Memba; (b) Mansap şevi emniyet faktörünün yüksekliğe göre değişimi.

Hazne Boşalma Hızının Şev Stabilitesine Etkisi

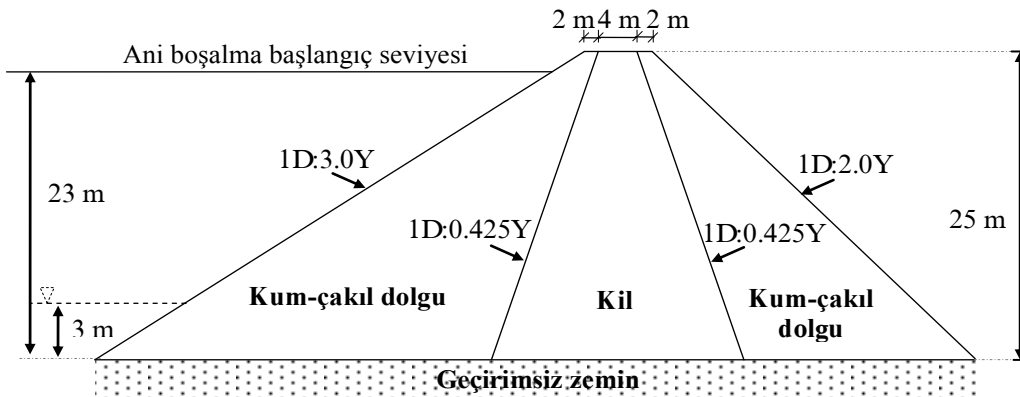
Çalışmada hazne boşalma hızının barajın memba ve mansap stabilitesine etkileri de incelenmiştir. Bu amaçla, 2 m/gün, 5 m/gün ve 10 m/gün olmak üzere üç farklı baraj boşalma hızında baraj şevlerinin kaymaya karşı emniyet faktörleri hesaplanmıştır. Memba ve mansap şevlerinin emniyet faktörlerinin değişimleri sırasıyla Şekil 6(a) ve Şekil 6(b)'de verilmiştir. Memba şevinin davranışı incelendiğinde buradaki minimum emniyet faktörünün her üç boşalma hızında da değişmediği ve minimum emniyet faktörüne ulaşma hızının boşalma hızı azaldıkça arttığı görülmüştür. Bunun sebebi boşalma hızıyla birlikte boşluk suyu basıncının azalma hızının artmasıdır. Diğer yandan mansap şevi emniyet faktörü büyüklüklerinin ve davranışının her üç boşalma hızında da neredeyse değişmediği gözlemlenmiştir. Bunun sebebi ise memba şartlarının mansap tarafındaki boşluk suyu basınçlarına olan etkisinin ihmal edilecek düzeyde olmasıdır.



Şekil 6 (a) Memba; (b) Mansap şevi emniyet faktörünün hazne boşalma hızlarına göre değişimi.

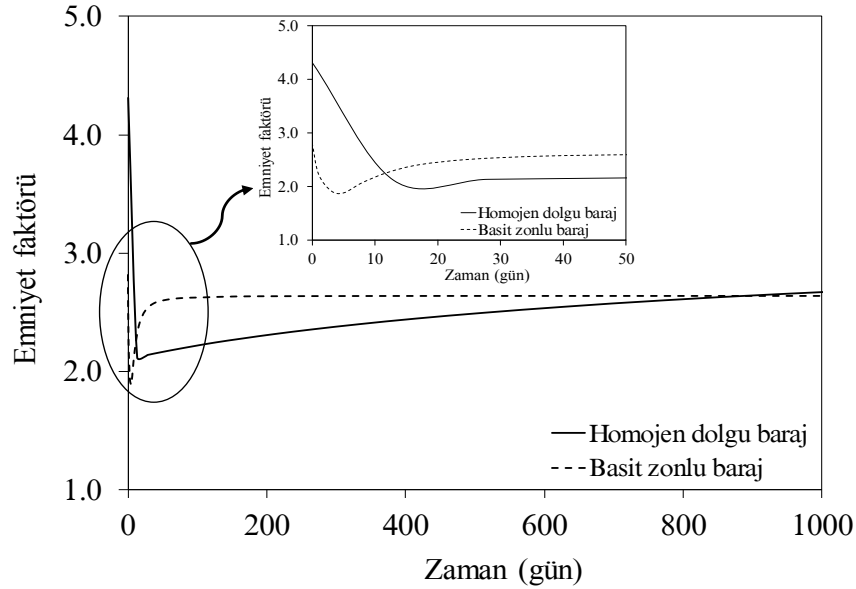
Malzeme ve Gövde Tipinin Şev Stabilitesine Etkisi

Baraj malzemesinin ve gövde tipinin şev stabilitesine olan etkileri de bu çalışmada araştırılmıştır. Bu amaçla, çalışmada ele alınan homojen dolgu barajın geometrik özellikleri, başlangıç ve tüm sınır koşulları sabit tutularak baraj kil çekirdekli basit zonlu bir baraja dönüştürülmüştür. Kabuk malzemesi olarak kum-çakıl karışımı seçilmiş, filtre tabakası ihmal edilmiştir. Basit zonlu barajın en-kesit görünümü Şekil 7'de sunulmuştur. Baraj malzemesinin özellikleri ise şöyle alınmıştır. Hidrolik iletkenlik, kuru birim ağırlık, kohezyon ve içsel sürtünme açısı dolgu ve çekirdekte sırasıyla 8.80×10^{-5} m/s ve 7.22×10^{-7} m/s (Carsel ve Parrish, 1988; Zeng ve diğ., 2012); 24 kN/m^3 ve 18.5 kN/m^3 ; 0 kN/m^2 ve 150 kN/m^2 ; 42° ve 0° (Çinicioğlu, 2012).



Şekil 7 Ele alınan kil çekirdekli kum-çakıl dolgu baraj.

Öncelikle barajın sızma analizleri, daha sonra şev stabilitesi hesaplamaları yapılmıştır. Memba şevi stabilitesi daha kritik olduğundan sonuçlar yalnızca bu şev için ve homojen dolgu barajınkilerle birlikte Şekil 8’de verilmiştir. Daha öncekilere benzer bir biçimde şevin emniyet faktörü her iki baraj tipi için de öncelikle azalmış ve daha sonra artmıştır. Yalnız, her iki barajda malzeme özelliklerinin farklı olmasından ötürü emniyet faktörünün davranışı da farklı olmuştur. Basit zonlu barajın memba şevinin stabilite özelliklerini, kum-çakıl dolgu kısmı belirlemektedir. Buradaki malzemenin hidrolik iletkenliğinin homojen baraj malzemesi olan killi kum karışımından büyük oluşu, buradaki boşluk suyunun daha hızlı bir biçimde tahliye olmasını sağlamıştır. Dolayısıyla zonlu barajın memba şevi emniyet faktörü homojen barajınkine kıyasla daha önce ve daha hızlı artmaya başlamaktadır. Basit zonlu barajın şev emniyet faktörü nihai değerine yine hızla ulaşırken, homojen barajın boşluk suyunun boşalması ve emniyet faktörünün artması yavaşça gerçekleşmektedir. Nihai emniyet faktörleri incelendiğinde ise (boşluk suyu basıncı etkisini yitirmeye başladığında, $t=1000$ günde), homojen barajın basit zonlu baraja göre stabilitesinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun sebebi ise killi kum karışımının hem belli bir koheziona hem de içsel sürtünme açısına sahip olması ve zonlu barajın kabuk malzemesi olan kum-çakıl karışımının yüksek içsel sürtünme açısına sahip olmasına karşın kohezyonsuz olmasıdır.



Şekil 8 Memba şevi emniyet faktörünün baraj tipine göre değişimi.

Sonuçlar

Bu çalışmada dolgu barajlardaki ani hazne boşalmasının şev stabilitelere olan etkileri farklı koşullar için araştırılmıştır. Bu amaçla ele alınan barajın önce sonlu elemanlar yöntemiyle zamana bağlı sızma analizi gerçekleştirilmiş; sonra da limit denge analiziyle şev stabilitesi hesapları yapılmıştır. Ele alınan barajların bahsedilen sınır koşulunda memba ve mansap şevleri emniyet faktörünün zamanla değişimleri araştırılmıştır. Elde edilen ilk sonuçlara göre bu durumda memba şevi stabilite davranışının mansabınkinden daha kritik olduğu gözlemlenmiştir. Memba şevi emniyet faktörü zamanla birlikte hızla azalır, daha sonra yavaşça artmaktayken, mansap şevi emniyet faktörü zamanla birlikte artmaktadır. Memba şevi emniyet faktörünün azalmadan sonraki artışının ilk durumdaki emniyet faktörüne ulaşacak kadar olmadığı görülmüştür. Ayrıca, şev stabilitesi hesaplarında sıklıkla kullanılan yöntemlerin farklılıklarını ortaya koymak için yapılan

karşılaştırmada Fellenius yönteminin daha küçük emniyet faktörleri verdiği görülmüş, fakat dilimler arası kuvvetleri de hesaba kattığından Morgenstern-Price yönteminin daha gerçekçi sonuçlar verdiği vurgulanmıştır. Malzeme özellikleri sabit bir dolgu baraj için şev eğiminin ve baraj yüksekliğinin artması, ani hazne boşalması durumunda şevlerin kaymaya karşı emniyet faktörünü azaltmaktadır. Bu durumlarda, benzer bir biçimde, memba şevi emniyet faktörü önce hızla azalır daha sonra artarken, mansap şevi emniyet faktörü zamanla artmaktadır. Hazne boşalma hızının memba ve mansap şevleri emniyet faktörlerinin davranışına çok büyük etkilerinin olmadığı gözlemlenmiştir. Geometrik özellikleri sabit, malzemeleri farklı dolgu barajlar için yapılan şev stabilitesi analizlerinde ise malzemelerin hem hidrolik iletkenliklerinin hem de zemin dayanım parametrelerinin farklılıklarından dolayı emniyet faktörü davranışlarının farklı olduğu görülmüştür. Yüksek hidrolik iletkenliğe sahip kabuk malzemesinden oluşan kil çekirdekli dolgu barajlarda memba şevi emniyet faktörü, ani hazne boşalmasında, hızla azalır yükselirken düşük hidrolik iletkenlikli homojen barajlarda uzun bir sürede değiştiği gözlemlenmiştir. Bu tip çalışmaların dolgu barajların tasarımı ve işletim esaslarına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Kaynaklar

Alonso, E. ve Pinyol, N. (2009) Slope stability under rapid drawdown conditions. First Italian Workshop on Landslides, s. 11–27. <http://hdl.handle.net/2117/11200>.

Bolton, H., Heymann, G. ve Groenwold, A. (2003) Global search for critical failure surface in slope stability analysis. Engineering Optimization, Vol. 35, No. 1, pp. 51–65.

Carsel, R.F. ve Parrish, R.S. (1988) Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. Water Resources Research, Vol. 24, No. 5, 755–769.

Craig, R.F. (2004) Craig's Soil Mechanics (7th Edition). Spon Press, Londra, İngiltere.

Çalamak, M. (2014) Uncertainty Based Analysis of Seepage through Earth-fill Dams, Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.

Çalamak, M. ve Yanmaz, A. M. (2014) Probabilistic Assessment of Slope Stability for Earth-fill Dams Having Random Soil Parameters. 5th International Symposium on Hydraulic Structures and Society: Engineering Challenges and Extremes, Brisbane, Avustralya.

Çinicioğlu, Ö. (2012) Temeller, Derin Kazılar, Şevler, Heyelanlar. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 14. Ulusal Kongresi, Isparta, Türkiye.

Fredlund, D.G. ve Xing, A. (1994) Equations for the soil-water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 31, No.4, pp. 521–532.

Fredlund, M., Lu, H. ve Feng, T. (2011) Combined Seepage and Slope Stability Analysis of Rapid Drawdown Scenarios for Levee Design. American Society of Civil Engineers Geo-Frontiers 2011, ss. 1595–1604, Dallas, Texas, ABD.

- Gardner, W. (1956) Mathematics of isothermal water conduction in unsaturated soils. International Symposium on Phsico-Chemical Phenomenon in Soils, ss. 78–87, Washington, D.C., ABD.
- Geo-Slope Int Ltd. (2013a) Seepage Modeling with SEEP/W. Geo-Slope International Ltd., Calgary, Kanada.
- Geo-Slope Int Ltd. (2013b) Stability Modeling with SLOPE/W. Geo-Slope International Ltd., Calgary, Kanada.
- Griffiths, D. ve Fenton, G. (2004) Probabilistic Slope Stability Analysis by Finite Elements. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 130, No. 5, pp. 507–518.
- Malkawi, H.A.I., Hassan, W.F. ve Abdulla, F.A. (2000) Uncertainty and reliability analysis applied to slope stability. Structural Safety, Vol. 22, No. 2, pp. 161–187.
- ICOLD (1980) Deterioration of dams and reservoirs: Examples and their analysis. International Commission on Large Dams, Paris, Balkema, Rotterdam.
- Mualem, Y. (1976) A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resources Research, Vol. 12, No. 3, pp. 513–522.
- Papagianakis, A.T. ve Fredlund, D.G. (1984) A steady state model for flow in saturated–unsaturated soils. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 21, No. 3, pp. 419–430.
- Pham, H.Q., Fredlund, D.G. ve Barbour, S.L. (2005) A study of hysteresis models for soil-water characteristic curves. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 42, No. 6, pp. 1548–1568.
- Sherard, J.L., Woodward, R. J. ve Gizienski, S. F. (1963) Earth and Earth Rock Dams: Engineering Problems of Design and Construction. John Wiley and Sons, New York, ABD.
- Thun, L. Von. (1985) San Luis Dam Upstream Slide. International Conference on Soil Mech. Found. Eng., ss. 2593– 2598.
- USBR. (1987) Design of Small Dams. United States Bureau of Reclamation, Washington, ABD.
- van Genuchten, M.T. (1980) A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils1. Soil Science Society of America Journal, Vol, 44 No. 5, pp. 892–898.
- Zeng, C., Wang, Q. ve Zhang, F. (2012) Evaluation of Hydraulic Parameters Obtained by Different Measurement Methods for Heterogeneous Gravel Soil. Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences, Vol. 23, No. 5, pp. 585–596.
- Zolfaghari, A. R., Heath, A. C. ve McCombie, P. F. (2005) Simple genetic algorithm search for critical non-circular failure surface in slope stability analysis. Computers and Geotechnics, Vol. 32, No. 3, pp. 139–152.