

# Dolgu Barajların Göçmesi ve İçsel Erozyon Mekanizması<sup>1</sup>

Sadettin Topçu<sup>2</sup>

Hasan Savaş<sup>3</sup>

Hasan Tosun<sup>4</sup>

## Özet

Son yıllarda baraj göçme vakaları ve sonuçları tüm dünyada ilgi çeken felaketler arasına girmiştir. Rezervuarlarında biriktirdikleri milyonlarca metreküp suyun ani bir şekilde sellenmesiyle mansap bölgelerinde yer alan yerleşim alanlarında can ve mal kayıplarına yol açan baraj göçme vakaları, afet kapsamında değerlendirilen bir konu haline gelmeye başlamıştır. Ülkelerin altyapı yatırımlarını tehdit eden baraj göçmeleri, uzun yıllar boyunca yaşanan vakalardan tecrübe edinilerek elde edilen verilere dayalı bir konudur. Bu nedendir ki özellikle yer yapısının taklit edilmesiyle tasarlanan dolgu barajların göçme nedenleri ve mekanizmaları oldukça fazla başlık halinde değerlendirilmektedir. Bu kitap bölümü çalışması kapsamında da dolgu barajların göçme nedenleri anlatılmış ve bununla birlikte dolgu barajların göçme nedenlerinin başında gelen içsel erozyon mekanizması detaylı bir şekilde sunulmuştur.

- 1 Bu bölüm Prof. Dr. Hasan Tosun danışmanlığında Dr. Öğr. Üyesi Sadettin Topçu tarafından Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsünde hazırlanan “*İnce Daneli Zeminlerin Farklı Gerilme Koşullarında İçsel Erozyon Davranışının Mukayeseli Analizi*” başlıklı doktora tezinden üretilmiştir.
- 2 Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, Türkiye, sadettin.topcu@dpu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-1306-2502
- 3 Doç. Dr., Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, hsavas@ogu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-3138-5308
- 4 Prof.Dr., Baraj Güvenliği Derneği, Ankara, Türkiye, hasantosun26@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9481-7956

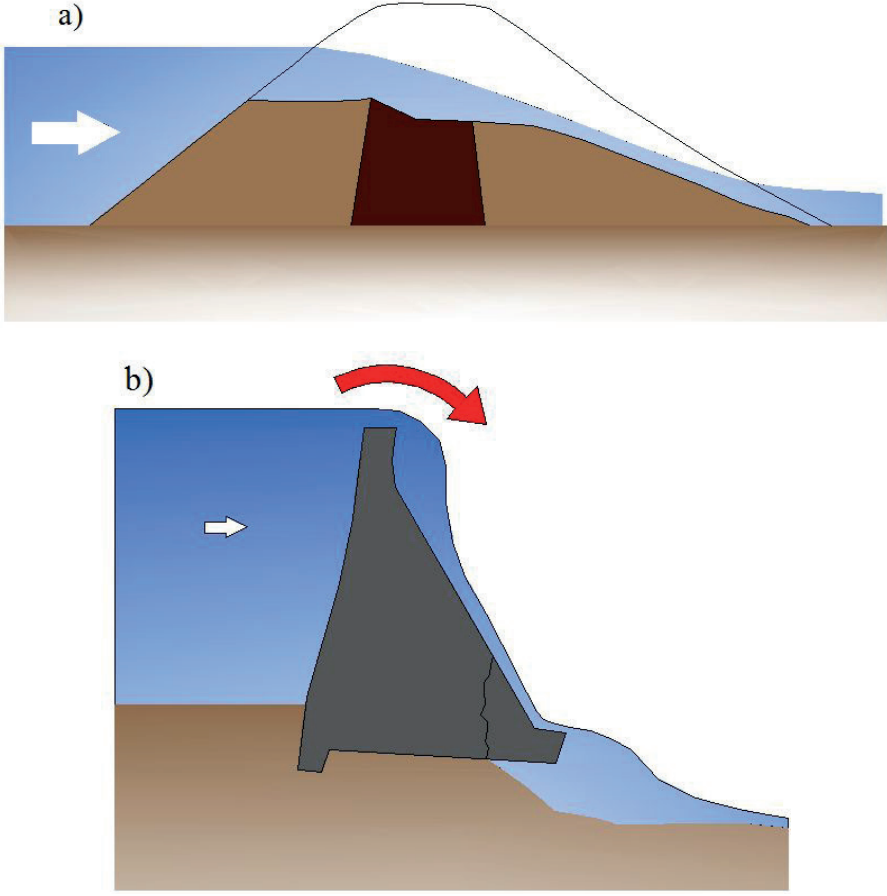
## 1. GİRİŞ

Baraj yapılarında oluşan hasar ve/veya göçme, farklı nedenlerle oluşmaktadır. ICOLD (2015), baraj yapılarında oluşan göçme olayını, “gövde ve yardımcı yapılarda oluşan hasarlardan dolayı, yapının işlevselliğini kaybederek kısmen veya tamamen göçmesi sonucunda suyun tutulamama durumu” olarak tanımlamıştır. Dolgu ve rijit barajlarda göçme nedenleri aynı olsa bile göçme mekanizmaları birbirinden farklı olabilmektedir. Örneğin; dolgu barajlarda üstten aşmada malzemenin erozyon etkisine bağlı olarak taşınması sonucunda dolguda bir gedik açılırken, beton gövdeli baraj yapılarında ise üstten aşan akım, gövdenin topuğunu oymaktadır. Benzer tanımlamalar, farklı baraj tipleri için de geçerlidir.

Baraj yapılarında oluşacak göçmelerin nedeni olarak; üstten aşma, sızma erozyonu, şev koruma kusurları, dolgu ve temel zemininde oluşan kaçaklar ve borulanma, baraj gövdesinde oluşan kayma, oturma ve yaşlanma, deprem, dolgu malzemesi özelliklerinden kaynaklanan içsel erozyon ve teknik kusurlar gösterilebilir. Bir baraj yapısında göçme, çoğu zaman yukarıda tanımlanan faktörlerin bir veya birden fazlasının etkisiyle gerçekleşmektedir. Bu kitap bölümünde baraj yapılarında göçmeye neden olan faktörlere değinilecek ve içsel erozyon detaylı değerlendirilecektir.

### 1.1. Üstten Aşma

Baraj rezervuarlarında şiddetli yağışlar neticesinde oluşan aşırı yüklenme, dolusavak deşarj kapasitesinin yetersiz kalması halinde suyun gövde üzerinden aşmasına neden olur. Şekil 1’de iki genelleştirilmiş tip için üstten aşma mekanizması verilmektedir. Dolgu barajlarda üstten akan akımın oluşturduğu kayma gerilmeleri, dolgu malzemesinin taşınmasını sağlayan kritik kayma gerilmelerini aşması sonucunda dolgunun erozyona uğrayarak taşınmasına neden olur. Başlangıçta “V” şeklinde oluşan gedik zamanla ters trapez şekline dönüşür. Wahl (1997) dolgu barajlarda dışsal faktörlerle oluşan gedğin genelde ters trapez şeklinde sonuçlandığını ifade etmiştir.



Şekil 1. Genelleştirilmiş üstten aşma göçme mekanizması: a) dolgu gövdeli baraj, b) beton gövdeli baraj.

Dolgu barajlarda üstten aşma nedeni ile oluşan göçme prosesinin mekanizması; dolgunun geometrisine, rezervuar hacmine ve şekline, havzadan rezervuara gelen akımın debisine, yardımcı yapıların (doluşavak ve dipsavak) deşarj kapasitesine, dolguda kullanılan malzeme tipine göre değişkenlik arz etmektedir. ABD'deki 18 metre yüksekliğindeki Lake Delhi Barajı, 2010 yılında rezervuar havzasına 12 saat içerisinde düşen 250 mm'lik rekor yağışla oluşan aşırı yüklenme nedeniyle üstten aşmayla göçmüştür (McDaniel vd., 2011).

Dolgu barajların gedik oluşturarak yırtılma mekanizmalarının analizinde iki ayrı model kullanılır: (1) parametrik model ve (2) fiziksel model. Parametrik model, genelde edilen deneyime bağlı olarak oluşturulur. Bu model, geçmişte göçmüş dolgu barajların dolgu yüksekliği, rezervuar hacmi

ve şekli ile göçme biçimi gibi parametreler kullanılarak gediğin fiziksel parametreleri, taşkın pik debisi ve göçme süresinin regresyonla belirlenmesi esasına dayanır. Fiziksel model ise Hidrolik ve Zemin Mekanığı bilim dalları esasında katı madde taşınımı prensibi kullanılarak gediğin oluşma sürecini ve taşkın pik debisinin tahmin edilmesini sağlar.

Beton ağırlık barajlarda gövdeye etkiyen yatay kuvvetlerin etkisiyle bozulan statik dengeyle topuk etrafında devrilme sonucunda üstten aşma gerçekleşebilir. Bunun yanında beton barajların temel zemininde gelişen içsel erozyon sonucu malzeme taşınımıyla meydana gelen aşırı ve farklı oturmalar ile gövdenin stabilitesi bozulur ve yine üstten aşma gerçekleşebilir. Amerika Montana’da bulunan 60,6 m yüksekliğindeki beton kemer Gibson Barajı’nın drenaj havzasına 30 saatte düşen 406 mm yüksekliğindeki yağışın etkisiyle oluşan aşırı yüklenme sonucu 1964 yılında üstten aşma gerçekleşmiştir. Gövdenin üzerinden taşan sular abatanların devamındaki toprak kütlelerini aşındırmış, baraj gövdesinde yapısal bir hasar gerçekleşmemiştir (Anderson vd., 1998).

235 metre yüksekliğindeki toprak dolgu Oroville Barajı’nda 2017 yılında aşırı yağışları sonucunda gelişen taşkın akımının etkisiyle servis dolusavağının tabanında hasar meydana gelmiştir. Kapakları kapatılan servis dolusavağından bağlama yapısı şeklinde inşa edilen acil durum savağına yönelen taşkın akımı, bağlamanın topuğunun ve devamındaki toprak yüzeylerin aşınmasına neden olmuştur. Acil durum dolusavağının devrilmesi sonucu mansap bölgesinde can ve mal kaybına neden olacak katastrofik taşkın akımını engellemek için servis dolusavağının kapakları tekrar açılarak akım, bu dolusavağa yönlendirilmiştir. Akımın etkisiyle dolusavağın tabanındaki hasar iyice büyümüş ve dolusavaktan taşan akım dolusavağın sol tarafında bulunan yamaçları oymuştur (France vd., 2018).

## **1.2. Sızma Erozyonu**

Tüm zeminlerin, taneler arasındaki içsel bağıntılı boşluklarda serbest akış koşullarının oluşması nedeniyle, geçirimli olduğu dikkate alınır. Zemin içinde biriken suyun üst seviyesi “su tablası” olarak tanımlanır ve bu seviyenin altında zeminin bütünüyle doymun olduğu düşünülür. Su tablası altında su yükünün oluşturduğu boşluk suyu basıncı, statik konuma sahiptir ve hidrostatik davranış arz eder. Ancak zemin içindeki su, hidrolik eğime bağılı olarak sızma davranışı gösterir. Zeminde suyun sızma davranışı, sızma hızı yükünün çok düşük olması nedeniyle Bernoulli enerji denkleminde iki parçalı bir büyüklük olarak tanımlanır ve sızma işleminde toplam yük, boşluk suyu basıncının bir fonksiyonu olarak tanımlanan basınç yükü ile yerçekimi

yükünün toplamına eşit alınır. Özetle sızma, zemin suyunun sızma ve yer çekimi yükü etkisi altında zemin içindeki davranışı olarak tanımlanır.

Zemin içindeki kontrollü sızma hareketi, yapı stabilitesi açısından sorun yaratmamaktadır. Bu nedenle ilgili denge koşullarının sağlanması halinde süzülen suyun ortamdaki zararsız olarak alınması, bir inşaat önlemi olarak değerlendirilmektedir. Toprak yapılarında tane boyutuna bağlı olarak birbirini koruyan filtrasyon sisteminin oluşturulması, buna örnek olarak gösterilebilir. Ayrıca yapı mansap topoğrafyasında oluşan boşluk suyu basınçlarının düşürülmesi de bir tasarım önlemi olarak dikkate alınmaktadır.

Sızma işlemi özellikle homojen toprak dolgu barajlarda sorun yaratmaktadır. Bu baraj tiplerinde gövde içinde gelişen sızma akımı, topoğrafya erozyonuna ve yapı mansap seviğinde göçmeye neden olur. Bununla birlikte sızma erozyonu ile gelişen boşluk suyu basınçları ve sızma kuvvetleri efektif dayanım parametrelerinin ve dolayısı ile zeminin kayma dayanımının düşmesini sağlayarak şev göçmesine neden olabilir (Okeke ve Wang, 2016). Sızma erozyonunu etkileyen en önemli faktörler; mansap seviyesinin eğimi, sızma hızı ve dolgu malzemesinin erozyon hassasiyetidir. Chu-Agor vd. (2008) mansap seviyesinin yatayla yaptığı açının 60° büyük olması durumunda sızma erozyonu etkisiyle şevin göçebileceğini belirtmişlerdir. Sızma erozyonu dolgu barajlardan ziyade malzemeye sistematik sıkıştırma işlemi uygulanmadığı doğal olarak oluşan heyelan sedlerinde görülür (Schuster ve Costa, 1986). 1972 yılında 18 m yüksekliğinde maden atık barajı olarak inşa edilen Buffalo Creek Barajı sızma erozyonuyla birlikte görülen çamurlu su kaçağının görülmesinin ardından mansap seviyesinin kayması sonucu göçmüştür (Wahler, 1973).

### 1.3. Şev Koruma Kusurları ve Rezervuarda Şev Kayması

Dolgu barajlar, özellikle toprak dolgu barajlarda memba şevi, bir riprap zonu ile korunur. Kaya malzemedeki oluşan bu zon, rezervuarda oluşan dalgalara karşı bir dalgakıran görevi görür ve dalga etkisinin daha iç seviyelerde yer alan geçiş zonuna ve geçirimsiz zona ulaşmasına engel olur. Aksi halde şev malzemesi aşınmaya başlar ve dolgu yırtılarak baraj hasarı ve göçmesi yaşanır. Uygun korumanın yapılmadığı hallerde, şevde meydana gelen aşınmanın miktarı; baraj gölünde dalga oluşturan rüzgâr akımlarının yönü ile dolgunun bu rüzgâr yönlerine göre konumuna, şevin eğimine, rezervuar su seviyesinin değişimine ve göldeki işletme kotunun sık sık ve hızlı olarak değişmesine bağlıdır. Rezervuar işletme kotunda görülen hızlı değişimlerde, memba yönünde oluşması muhtemel kaymaları tetikler ve dolgu içinde ilerleyen bir göçme biçimi ortaya çıkar. Bu durumda stabilizeyi

artırıcı önlemler alınmazsa, gövde toplam göçme moduna ulaşabilir. Özellikle maden atık barajlarda bu tip göçme biçimlerine çok rastlanmaktadır.

Rezervuarda oluşabilecek şev kaymaları, dolaylı olarak baraj gövdesinin hasarına neden olmakta ve buna bağlı toplam göçmeler oluşmaktadır. İtalya'daki Vaiont Barajı buna güzel bir örnektir. İtalya'nın kuzeydoğusunda 267 m yüksekliğinde ve beton kemer tipinde inşa edilen bu baraj, rezervuarında oluşan kayma nedeniyle 9 Ekim 1963 tarihinde göçtü ve 2000'den fazla insanın ölmesine neden oldu. Vaiont Barajı'nda oluşan katastrofik göçme, farklı jeolojik faktörlere dayandırıldı. Göçmeye neden olan temel etkinin, kanyon rezervuar duvarlarındaki oluşumlar ile rezervuar alanı içinde yer alan ve eski bir kayma düzlemini oluşturan fay ve rezervuar suyunun neden olduğu kaldırma basıncı olarak görüldü (Tosun vd., 1999). Kayma, 1,8 km uzunluğunda ve 1,6 km genişliğinde bir alanda oluştu. Kayan kütle çok büyüktü (270 milyon m<sup>3</sup>) ve baraj gövdesi üzerinden aşan 125 m yüksekliğinde dalga oluşturdu (Kiersch, 1988).

#### 1.4. Dolgu ve Temel Zemininde Oluşan Su Kaçakları ve Borulanma

Dolgu içinde değişik fiziki faktörlerle akış yönüne dik oluşan boyuna çatlaklar ile temel biriminde bulunan fisür, eklem, foliasyon yüzeyi, fay gibi jeolojik yapısal unsurlar (eğer su tutmadan önce uygun şekilde enjekte edilmemişse) rezervuardaki suyun akış yollarını oluşturur, bu akış yolları zaman içinde gelişerek ilgili malzeme içinde borulanmaya neden olur. Bu oluşum süreci, yapıda toplam göçmeye veya rezervuardaki suyun ani boşalımı sağlayarak yapının işlevselliğinin kaybolmasına neden olur.

Lowe'a (1970) göre dolgu barajların gövdesinde; enine çatlak, yatay çatlak, boyuna çatlak ve kuruma(büzülme) çatlakları oluşur. Dolguda su kaçağının başlaması için çatlağın memba-mansap doğrultusunda gelişen bir çatlak olması gerekir. Bu nedenle enine ve yatay çatlaklar dolgu içinden oluşabilecek kaçak suları açısından büyük önem arz etmektedir. Enine çatlakların duvarları düşeyde; yatay çatlakların duvarları yataydadır. Yatay çatlaklar, duvarı yatayda olan enine çatlak olarak da değerlendirilebilir. Boyuna çatlaklar, dolgu eksenine boyunca oluşan çatlaklardır. Bu çatlaklarda su kaçağının oluşma ihtimali yoktur. Dolgu barajın yapıldığı bölgede yıllık yağış miktarı 250 mm'den az ve kullanılan dolgu malzemesi yüksek plastisiteye sahip değil ise dolgunun üzeri çakıl, asfalt vb. bir koruma tabakası ile kapatılmazsa kuruma çatlakları görülebilir (Bonelli, 2013). Kuruma çatlakları yüzeyeldir. Rezervuar seviyesinin dolgu üst seviyesine yakın olması durumunda su kaçağı açısından risk oluştururlar.



Su kaçakları esnasında akımın etkisiyle çatlak duvarları erozyona uğrar ve borulanmanın gelişmesiyle baraj göçmesi yaşanır. Dolguda oluşan su kaçaklarında barajın göçmesi; kaçağa neden olan çatlakların yerine, çatlak üzerinde kalan rezervuarın su seviyesine ve dolguda kullanılan malzemenin erozyon hassasiyetine bağlıdır. Özellikle erozyon hassasiyeti yüksek dispersif zeminlerin kullanılması durumunda yüksek olasılıkla baraj göçmeleri gözlenir. Amerika Oklahoma'da dispersif zeminin kullanıldığı homojen dolguya sahip Wister Barajı'nda oluşan enine çatlakla birlikte meydana gelen kaçak sonucu 1949 yılında kısmi göçme hadisesi yaşanmıştır (Redlinger, 2013). Bunun yanında kondüvi borunun dolgu içerisinde inşa edildiği durumlarda da kondüvi boru ile dolgunun temas ettiği yüzeylerde meydana gelen kaçak sonucunda da barajlarda göçme hadisesi yaşanabilir. Ülkemizde Afyon'da bulunan Tınaztepe Barajı, kullanılan dispersif zeminin de etkisiyle kondüvi boru boyunca gelişen kaçak sonucu göçmüştür (Tosun ve Kilbiyik, 2006). 2019 yılında Giresun'da bulunan 56 metre yüksekliğindeki kil çekirdekli kaya dolgu olan Alucra Barajı'nda gövde dolgusuyla doğal zemin birleşiminde su kaçağı görülmüştür. Benzer sebeple oluşan kaçak, 2020 yılında Alucra Barajı'yla aynı tip Uşak'da bulunan 49 metre yüksekliğindeki Bahadır Barajı'nda görülmüştür (Şekil 2).



*Şekil 2. Uşak Bahadır Barajı'nda dolgu gövdesi ile doğal zemin birleşiminde meydana gelen su kaçağı*

Bu barajda meydana gelen borulanmayla birlikte dolgu malzemesinin taşınımı gerçekleşmiş ve boşalan malzeme nedeniyle krette memba tarafına doğru yayılım gösteren ciddi büyüklükte kayma meydana gelmiştir (Şekil 3).



*Şekil 3. Krette borulanma sonucu meydana gelen kayma*

Yine dolusavak ve dolgunun birleşim noktalarında oluşacak boşluklardan da su kaçakları gözlemlenebilir. Vuola vd.,'ne (2007) göre dolgu kretinde meydana gelen donma-çözülme döngüsü sonucunda çok sık olmasa da enine çatlaklar gelişebilmektedir. Enine çatlak gelişmese bile çözülme esnasında meydana gelen kabarmalardan dolayı permeabilitesi yüksek zonlar oluşmaktadır. Dolgu çekirdeğinde plastisite indeksi 12'den küçük ve silt, killi silt ve killi kum malzemeler kullanıldığında donma-çözülme olayı kaynaklı kusurlar sıklıkla görülmektedir.

Dolgu barajların temellerinde kohezyonsuz zeminler bulunması durumunda sızma akımının etkisiyle dolgunun mansap topuğu civarında su kaçakları gelişebilir. Ayrıca dolgu-yamaç birimi veya dolgu-temel birimi temas noktasında oluşabilecek kaçaklar, genişleyerek borulanma mekanizmasının ve buna bağlı toplam göçmelerin oluşmasına neden olur. ABD'deki St. Francis ve Teton Barajları ile Fransa'daki Malpasset Barajı, göçme nedenleri bu esasta oluşan kaçak suları oluşturmaktadır. Ancak bu barajlara "Jeolojik kusurlar ve tanımlama eksikliği" başlığı altında Bölüm 1.7.'de değinilecektir.



### 1.5. Kayma, Oturma ve Zamanla Oluşan Deformasyonlar

Baraj Mühendisliğinin tasarım aşamasında yapı genel stabilitesi için dikkate alınan temel bazı hususlar vardır. Bunlardan biri de kret tasarımıdır. Kret tasarımında dikkate alınan önemli esaslardan biri, hava payı yüksekliğidir. Esas itibarıyla hava payı, baraj rezervuarında rüzgar etkisi ile oluşacak dalga yüksekliğine bağlıdır ve “feç” uzunluğuna göre tahmin edilir. Hava payı, daha önce yapılmış çalışmalar doğrultusunda ampirik olarak da tanımlanabilmektedir. Ancak tasarımda çevresel fiziki parametrelere bağlı olarak tanımlanan bu parametrenin, yapının zamanla maruz kalacağı oturma değerlerini de sağlaması gereklidir. Bu amaçla çok genel bir tanımlama yapılmıştır. USBR (1987), dolgu barajlar için krette oluşacak en büyük oturmaların dolgu yüksekliğinin % 2’sini geçmeyeceğini ifade etmiştir. Özetle tasarım aşamasında dikkate alınan hava payının, aynı zamanda dolguda kullanılan malzemenin doğası gereği ortaya çıkacak oturmaları da sağlaması gereklidir.

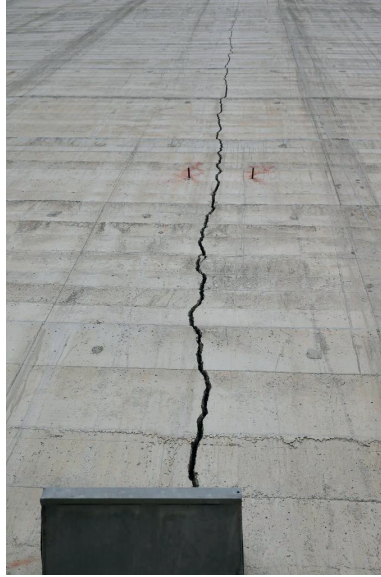
Dolgu içinde gerek inşaat aşamasında gerekse işletme aşamasında oluşacak içsel kaymalar, zamana bağlı oluşan oturmalar ve nihayetinde kalıcı oturmalara neden olabilir (eğer yapı uygun tasarlanmamışsa). Atatürk barajı bunun en güzel örneğidir. 169 m yüksekliğe sahip Atatürk barajı “merkezi kil çekirdekli kaya dolgu” tipinde tasarlanmış ve bu esasta inşa edilmiştir. 1992 yılında bitirilen bu barajın merkezinde kullanılan malzeme, yüksek plastisiteli-kil-silt’tir. Bu malzeme yüksek hacim değiştirme potansiyeline sahiptir. Atatürk Barajı’nın inşası esnasında kret 6.5~7 m civarında aşırı oturma yapmıştır (Çetin vd., 2000).

Dolgu barajlarda dolgunun düşük su muhtevasında kötü sıkıştırılması sonucunda özellikle de dolgunun ilk su tutulması esnasında aniden doygun hale gelmesiyle barajın bütünlüğünü bozacak düzeyde distorsiyon oturmaları meydana gelir. Dolgu barajlarda farklı oturmalarından kaynaklanan enine çatlaklar sonucunda da oluşacak kaçaklardan dolayı göçme hadiseleri yaşanabilir.

Dolgu inşasında kullanılan malzeme ve bu malzemede bulunan bazı maddelerde barajın göçmesine neden olacak şekilde oturmasına neden olabilir. Dolgu malzemesinde su ile çözünebilen jipsin bıraktığı kanalcıklardan dolayı meydana gelecek oturmalar dolguya zarar verebilir. Yine aynı şekilde ağaç kökleri ve organik maddelerin zamanla çürümesiyle oluşacak boşluklarda dolgunun farklı oturmasına neden olabilir. Dolgu barajlarda zamanla malzemenin durumu ve özellikleri değişir. Bununla beraber dolgu içerisinde dayanımı düşük zonlar gelişebilir. Bu dayanımı düşük zonların yeri; dolgu barajların uzun dönemde deformasyon davranışını belirleyen

en kritik etkindir (Jansen, 1983). Dolgunun inşa edildiği temel zemininin yumuşak ve sıkışabilir olması durumunda da dolgunun stabil halde kalması imkansızdır ve göçme hadisesi yaşanabilmektedir.

Beton barajlar için uygun tasarım yapılmışsa ve uygulama bu tasarıma göre gerçekleştirilmişse, dolgu barajlarda görülen kayma, oturma ve zamana bağımlı deformasyonlar kritik değildir. Ancak bu tip yapılar için uzun dönemli olarak beton yaşlanması ve durabilite sorunlarının yaşanması mümkün gözükmemektedir. Beton veya yarı rijit yapı olarak tasarlanan silindire sıkıştırılmış beton dolgu tiplerinde, temel zeminin taşıma kapasitesi yeterli değilse, yapı dönme, farklı oturma çatlağı gibi kusurlar oluşabilir. İstanbul İçmesuyu Projesi kapsamında tasarlanan ve silindire sıkıştırılmış beton tipinde inşa edilen Melen Barajında görülen çatlak sistemi, tipik temel zemini probleminden kaynaklanmaktadır (Şekil 4). 110 m yüksekliğinde olan bu barajda temel zeminindeki ayrışmış kaya üzerindeki gevşek malzemenin iyi temizlenmemesi nedeniyle farklı oturmalar oluşmuş ve düşük çekme dayanımına sahip silindire sıkıştırılmış beton gövde çatlamıştır.

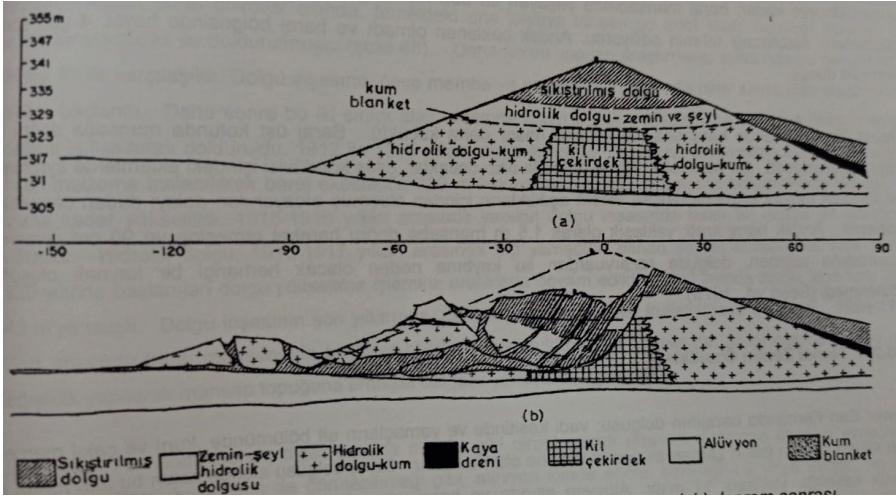


Şekil 4. Melen barajı gövdesinde görülen çatlak (Anonim, 2020).

## 1.6. Deprem

Deprem etkisi ile ortaya çıkan yer hareketleri, deprem esnasında ve sonrasında baraj gövde ve yardımcı yapılarını direk veya dolaylı şekilde etkileyerek göçmelerine neden olabilir. Direk etkiler; dolgunun yapısal

bütünlüğünü bozan deformasyonlar, dolgu şev kaymaları, sıvılaşma ve seiche dalgalarıdır. Dolaylı etkiler ise dolguda oluşan enine çatlaklar ve rezervuar yamaçlarının stabilitesinin bozularak kaymasıdır. Sıvılaşma nedenli göçmeler genelde gevşek kohezyonsuz zeminlerin kullanıldığı hidrolik dolgularda görülmüştür. 1971 yılında  $M_w = 6,4$  büyüklüğündeki depremde Kaliforniya’da bulunan Lower San Fernando Barajı’nın büyük bir bölümünde sıvılaşma oluşmuş ve baraj göçmüştür (Şekil 5). Lower San Fernando Barajı’nda deprem hareketinden dolayı kayma, memba ve mansap şevlerinin üst kısmında meydana geldi. Yapılan gözlemlerde; depremin son aşamasında gövde zeminin büyük bir kısmı sıvılaşmıştır. Sıvılaşan zemin, sıvılaşmayan kabuk zonu ile örtülüydü. Kayma; sıvılaşmanın etkisi ile kabuğun ileri geri hareket etmesiyle gerçekleşmiştir (Tosun, 2002).



Şekil 5. Lower San Fernando Barajı’nda meydana gelen sıvılaşma nedenli göçme (Seed vd.’den, 1975).

Dolgunun ve temelinin depremdeki sarsıntılar etkisiyle mukavemetini kaybetmesi sonucu şev kaymaları veya krette aşırı oturmalar meydana gelerek üstten aşma ile göçme gerçekleşebilmektedir. Yine rezervuar yamaçlarının kaymasıyla ve sarsıntı etkisiyle rezervuarın çalkalanmasıyla oluşan seiche dalgaları sonucunda da üstten aşma ile dolgu barajlar hasar ve göçmeler oluşabilmektedir.

2008 yılında  $M_w = 7,9$  büyüklüğündeki Sichuan depreminde yakın kaynak etkisi altında kalan 156 m yüksekliğindeki ön yüzü beton kaplı Zipingpu Barajı’nda gövde de 20 cm’ye varan farklı oturma sonucu meydana gelen enine çatlaklar ve kret ile mansap şevi birleşiminde 40 cm civarında ayrılmalar

oluşmuştur (Zhang vd., 2015). Yine yakın kaynak etkisinde 2011 yılında  $M_w=9,0$  büyüklüğündeki Tohoku depreminde 18 m yükseklikteki homojen dolgu Fujinuma Barajı, sismik salınımlar etkisiyle kretin büyük düşey deplasmanlar yapmasıyla birlikte üstten aşan akımın etkisiyle göçmüştür (Pradel vd., 2013).

Büyük bir depreme maruz kalan dolgu barajlar büyük oturma yaparlar. Bu oturmaların yanında dolgu; memba-mansap doğrultusunda yayılma davranışı gösterir. Bu oturma ve yayılma davranışı sonucunda çoğu zaman enine çatlaklar görülebilir (Forster ve Donald, 1998). Depreme maruz kalan dolgu barajlarda oluşan bu enine çatlaklar dolgunun üst kesimlerinde oluşur (Bonelli, 2013). Oluşan bu çatlaklardan dolayı birçok dolgu barajda depremden 24 saat sonra içsel erozyon nedeniyle göçme gerçekleşmiştir (Seed vd., 1978).

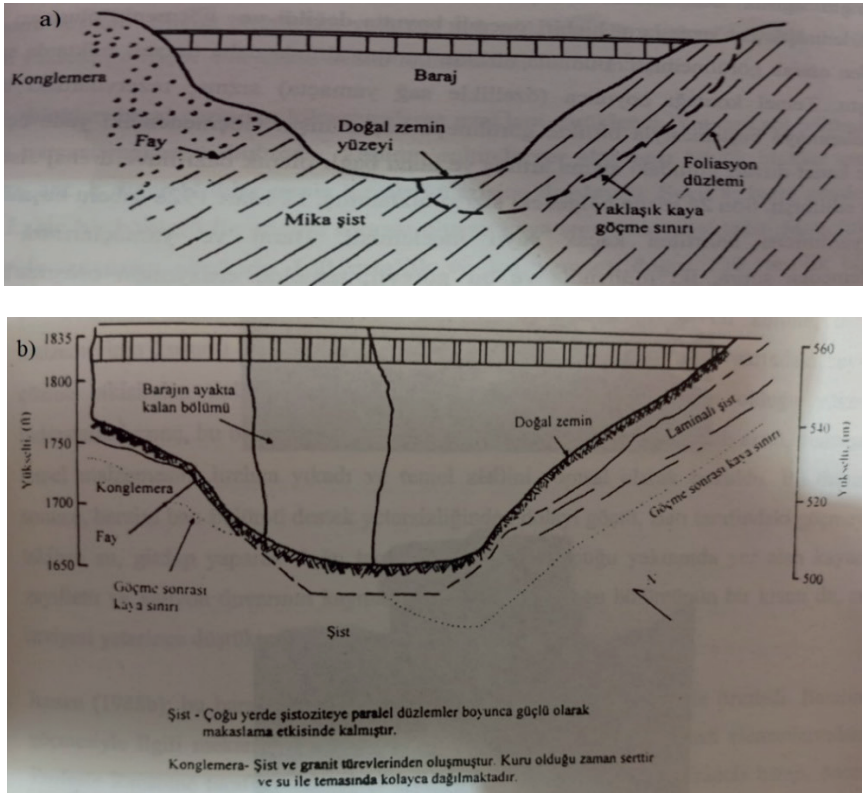
Beton barajlarda deprem etkisi çok daha farklı ortaya çıkmaktadır. Genelde beton barajlar kompozit bir yapı gibi çalıştıklarından oluşan kalıcı deformasyonlar azdır. Ancak büyük ve yakın kaynak etkisi altında kalan beton baraj ve yardımcı yapılarında ciddi hasarlar görülebilmektedir. Buna en güzel örnek 1990 yılında meydana gelen  $M_w=7,7$  büyüklüğündeki Manjil depreminde ağır hasar gören payandalı baraj olarak inşa edilen Sefid Rud Barajı'dır (Tosun, 2015). 106 metre yüksekliği bulunan barajda kretin hemen alt bölgesinde 18 metre uzunluğunda yatay çatlaklar oluşmuştur. Gövde de meydana gelen bu çatlaklardan su kaçakları gözlemlenmiştir.

Ayrıca büyük rezervuarlara sahip barajların depremleri tetiklediği bilinmektedir. 1964 yılında işletmeye alınan beton ağırlık Koyna Barajı 2,8 milyar  $m^3$  gibi büyük bir rezervuar hacmine sahiptir. Bu büyük rezervuarın etkisiyle 1967 yılında 6,3 büyüklüğünde deprem tetiklenmiştir.

### **1.7. Jeolojik Kusurlar ve Tanımlama Eksikliği**

Baraj yapılarında oluşan hasarların, göçmelerin ve yaşanan diğer sorunların en önemli nedeni, temel biriminde yer alan jeolojik kusurlar ve bunların tanımlama eksikliğidir. Temel kaya biriminin cinsi, temel biriminde yer alan jeolojik süreksizlikler (tabakalanma düzlemi, fay, foliasyon düzlemleri, eklem sistemleri gibi), yeraltısuyunun konumu oluşabilecek en temel problem kaynağı olarak değerlendirilebilir. Baraj yapılacak alan için genel jeolojik unsurlar ile aks yeri ve rezervuar alanındaki birimlerin geoteknik özellikleri, yapının kısa ve uzun dönem stabilitesi ile işlevselliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Baraj yeri ve çevresindeki jeolojik süreksizliklerin varlığının tasarım aşaması öncesinde bilinmesi, olası problemlerin önlenmesi yönünde çok önemli bir aşamadır.

ABD'nin Kaliforniya eyaletinde 1926 yılında beton kemer tipinde tamamlanan 62,5 m yüksekliğindeki su temin amaçlı St. Francis barajı, 1928 yılında göçtü (Tosun vd., 1999). Baraj yeri ve rezervuar da iki ayrı kaya tipi mevcuttu. Vadi tabanı ve sol yamaçta mika şist mevcuttu. Sağ yamaçta ise kırmızı renkli konglomera yer almaktaydı. İki birim arasındaki kontakta, doğrultusu dere yatağına paralel ve talveg seviyesinin yaklaşık 15 üstünde bir fay bulunuyordu. Bu fayın varlığı başlangıçta bilinmiyordu. Fay zonu 1,2 m kalınlığında bir kil dolgu ihtiva ediyordu ve fay boyunca mika şist içinde serpantin bandı vardı. Baraj su tutulduktan yaklaşık 2 yıl sonra göçtü. Göçmeden sonra yapılan çalışmalarda, genel kanı sağ yamaçta yer alan konglomeranın suyun etkisi ile yumuşadığı ve ayrışma etkisine maruz kaldığı ve fay zonunun içinde yer alan kil dolgunun yıkanması sonucunda da barajın göçtüğü kanısına varılmıştır (Jansen, 1988). St. Francis barajı, beton kemer tipinde göçmenin olduğu ilk örnektir. Bu baraj yeri jeolojik birimleri ile göçme sonrası oluşan kaya sınırları şekil 6'da sunulmaktadır.



Şekil 6. St. Francis Baraj yeri jeolojik birimleri ve göçme sonrası oluşan kaya sınırları: a) Baraj yeri jeolojik birimleri, b) Göçme sonrasında oluşan kaya sınırları (Tosun vd.'den, 1999).



St. Francis barajı gibi göçen diğer bir baraj yapısı ise, Fransa'daki Malpasset Barajıdır. Fransa'nın Riviera bölgesinde ve deniz kıyısından 12 km içerde ve 66,7 m yükseklikte ve çift eğrilikli kemer tipinde inşa edilen baraj, 1954 yılında işletmeye alındı. Baraj yeri, metamorfik kayalardan oluşmaktaydı. Sağ yamaçta masif gnays, sol yamaçta ise alterasyon etkisi ile kompozisyonunda değişiklik oluşmuş ve mikro çatlaklar ihtiva eden ayrılmış gnays birimi mevcuttu. Göçme sonrası yapılan gözlem ve incelemelerde iki ayrı baraj yerinde iki ayrı eklem setinin olduğu tespit edildi. Baraj temelinde eklemlerle aynı orientasyona sahip çok sayıda kayma zonu ve fay bulunuyordu. Kayaç birimleri 1 Lugeon'dan düşük değerlere sahip olduğu için perde enjeksiyonu yapılmamış, ancak beton gövdenin hemen altında kontakt enjeksiyonları gerçekleştirilmiştir (Leonards, 1987). Yapılan analizlerde, sol yamaçta yer alan mikro çatlaklı kaya kaması, baraj gövdesi memba yüzü boyunca oluşan çekme gerilmelerine dayanamadı ve temel birimi içinde bir çatlak oluşturdu. Bu çatlak, rezervuar su yükü altında gelişti ve barajda toplam göçmeye neden oldu.

ABD'de merkezi kil çekirdekli kaya dolgu baraj tipinde projelendirilen ve 126 m yüksekliğe sahip Teton barajı, 5 Haziran 1976 yılında rezervuarın ilk dolumu esnasında göçtü. Göçme esnasında su seviyesi, talveg kotundan 84 m yukardaydı. Temelde ve yamaçlarda bulunan sık eklemli kayalardan oluşabilecek sızmanın, 21 m<sup>2</sup>'den oluşan dar bir katof hendeği ve bunun altında oluşturulan derin bir enjeksiyon perdesi ile bu perdenin her iki tarafında tasarlanan konsolidasyon enjeksiyonu ile önlenileceği düşünülmüştü. Göçme sonrası yapılan çalışmalar sonucunda barajın; (1) sağ yamaç katof hendeğinde, aşırı derecede eklemli rayolit içinde oluşturulmuş enjeksiyon perdesi içinden veya üstünden oluşan aşırı kaçak suyunun gevrek ve kolayca erozyona uğrayabilir lös zeminin sıkıştırılması ile oluşturulmuş çekirdek zonu alt bölümünü erozyona uğratması, (2) Dik sağ yamaç boyunca farklı oturmadan dolayı katof hendeği içindeki malzemede oluşan boylamsal çatlakların erozyonu ve (3) Çekirdek zon malzemesinin kemerleşmesinden dolayı bu zon içinde oluşan hidrolik çatlakların erozyonundan dolayı göçtüğü tespitinde bulunuldu. Teton Barajı'nda göçme öncesi ve göçme sırası alınan görüntüler, şekil 7'de sunulmaktadır. Tosun vd. (1999) konuyla ilgili çok detaylı bir çalışma yapmıştır. Bölüm 1.4'de değerlendirilen Uşak Bahadır Barajı'ndaki göçmede de benzer biçimde kaçak sağ sahilde başlamış, ancak memba tarafında rezervuara doğru oluşan bir kaymadan dolayı borulanma olarak gerçekleşmiştir.





Şekil 7. Tetan barajı göçme öncesi ve göçme anı görüntüleri (Ponce vd.'den, 2020).

### 1.8. İçsel Erozyon

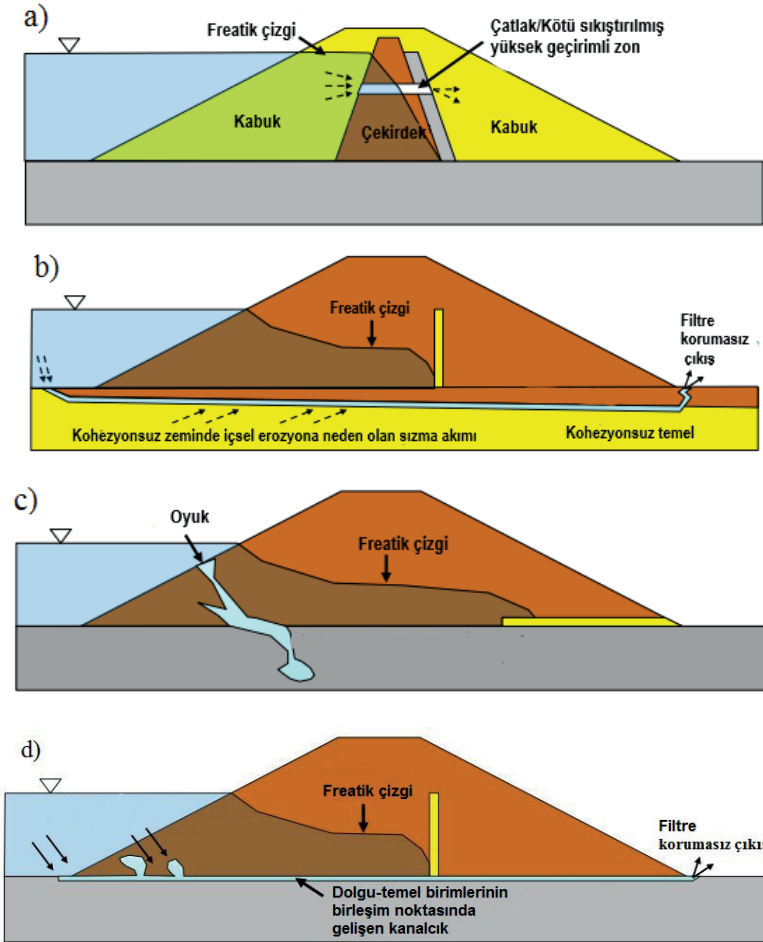
İnşaat mühendisliği toprak işleri uygulamalarında, zemin içinde yer alan ince daneli malzemelerin, sızma ortamında bulunan boşluklardan veya değişik faktörlerin etkisi ile dolgu içinde oluşan çatlaklardan sızma ve yerçekimi kuvvetleri etkisi altında taşınması ve bu işleme bağlı olarak ortamda su taşınmasına neden boşlukların oluşması, genel olarak “içsel erozyon” olarak tanımlanır. Bu işlemin, zemin yüzeyinde yağmur, rüzgar, akarsu ve buzul gibi değişik yüzey etkisiyle oluşmasına “yüzey erozyonu” adı verilir. Yüzey erozyonu, zemin ve kaya oluşumu döngüsündeki doğal bir süreçtir. Yüzey erozyonu, insan yapısı toprak yapılarında (karayolu ve demiryolu dolguları ile sulama kanalları toprak kaplamalarında) da meydana gelebilmektedir.

İçsel erozyonda yüzey erozyonundan farklı olarak malzemelerin taşınması sadece su akımı ile gerçekleşir. Bu su akımı bazen sızma akımı iken bazen de basınçlı boru akımı şeklinde olabilmektedir. İçsel erozyon, özetle dolgu barajların dolgu gövdesi ve temellerindeki malzemelerin sızma ve basınçlı akımla taşınmasıdır. İçsel erozyon, su depolayan yapılarda kendini su kaçağının görülmesiyle belli eder. Bu iki farklı erozyon tipinde de, erozyona neden olan suyun kimyasal özellikleri ile erozyona uğrayan zeminlerin

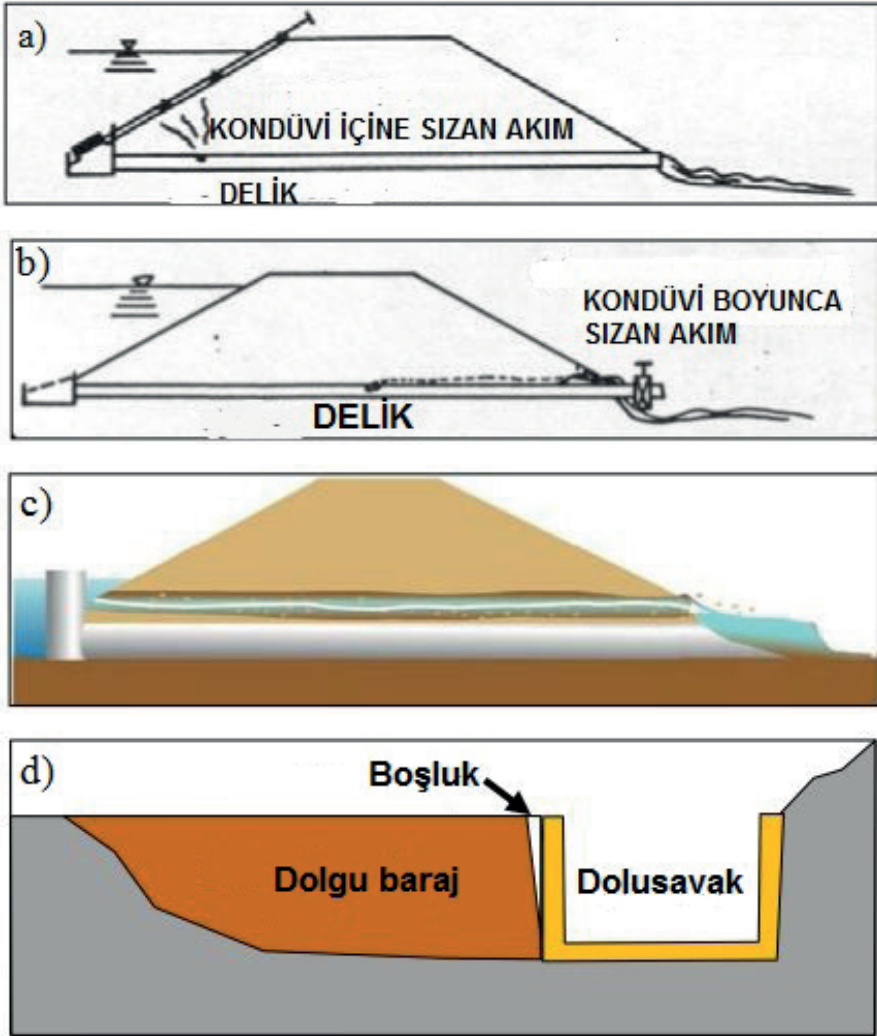
fiziko-kimyasal içerikleri erozyonla taşınan malzeme miktarını büyüklüğünü belirlemekte ve işlemin oluşma hızını etkilemektedir.

### 1.8.1. İçsel erozyon biçimleri

Baraj göçmeleriyle ilgili verilen istatistiklerde içsel erozyon nedeniyle göçen dolgu barajlarda tek bir içsel erozyon biçimi görülmemektedir. Bunun yanında verilen istatistiklerde içsel erozyon yerine içsel erozyon türlerinden olan borulanma kavramı da kullanılmıştır. Şekil 8'de dolgu ve temel zemini içinde veya bu iki malzemenin temas noktasında gelişen içsel erozyon biçimleri, sunulmaktadır. Şekil 9'da ise kondüvi ve dolusavak gibi yardımcı yapılarda oluşan göçme biçimleri özetlenmektedir.



Şekil 8. Dolgu ve temel zemini ile bu iki malzeme temas noktalarında oluşan içsel erozyon biçimleri: a) dolgu içinde, b) temel zemini içinde, c) temel malzeme içine dolgu malzemesinin erozyonu ve d) dolgu-temel zemini birleşim yerinde (USBR'dan, 2015).



Şekil 9. Gömülü yardımcı yapılar ile dolgu temas noktalarında oluşan içsel erozyon: a) Kondüvi içine sızma, b) Kondüvi borusundan çıkan akımdan dolayı boru boyunca oluşan sızma, c) Rezervuardan gelen akımdan dolayı kondüvi boyunca sızma d) dolusavak duvarı-dolgu arasında yer alan boşluktan dolayı oluşan sızma (FEMA'dan, 2005; 2008 ve Fell vd.'den, 2008).

Sherard ve Dunnigan (1985) dolgudaki çatlaklarda meydana gelen içsel erozyon olayını borulanma olarak tanımlamışlardır. Wan ve Fell (2002), içsel erozyonun iki biçiminin bulunduğunu bunların da borulanma ve süfüzyon olduğunu belirtmişlerdir. Fell ve Fry (2007) ise içsel erozyonun kaçak erozyonu, geriye doğru erozyon, kontak erozyonu ve süfüzyon gibi biçimleri

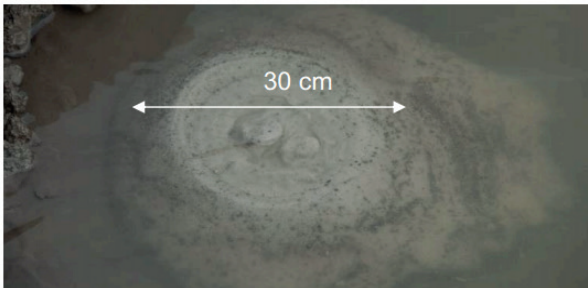
olduğunu söylemişlerdir. USBR'a (2015) göre içsel erozyon beş farklı şekilde oluşmaktadır. Bunlar; geriye doğru erozyon (borulanma), kaçak erozyonu, toplam geriye doğru erozyon, kontak erozyonu ve süfzyon/sufozyondur.

Dolgu barajlarda içsel erozyon mekanizmasının çalışıldığı bazı gelişmiş ülkelerde, içsel erozyon biçimleri ile ilgili farklı terminoloji kullanılmıştır. Bu çalışmada esas itibarıyla, ABD Su İşleri Teşkilatı (USBR) tarafından kullanılan terimlere ve tanımlara bağlı kalınmıştır. USBR (2015) tarafından tanımlanan içsel erozyon biçimleri, aşağıda özet halinde sunulmaktadır.

**Geriye Doğru Erozyon (Borulanma)**; kohezyonsuz zeminlerde dolgu ve/veya temelden sızan akımın mansap tarafındaki çıkış noktasından başlayarak geriye yani memba tarafına doğru zemin danelerini taşıması sonucu gelişir. Akımın geçtiği kısımların boru şeklini almasıyla gelişen içsel erozyon türüdür. Borulanmanın gelişebilmesi için; sürekli bir sızma akımı ve bu sızma akımının çıkış noktasının korumasız olması, erozyona uğrayabilir zemin olması ve bu zeminin boru şeklini alarak göçmesi gerekir. Geriye doğru erozyonda yukarı yönlü sızma akımı sırasında hidrolik eğimin artmasıyla efektif gerilmeler azalır. Efektif gerilmelerin sıfır olduğu anda dolgu barajların veya seddelerin mansap topuğunda kabarma (Şekil 10) veya kum kaynaması (Şekil 11) görülebilir.



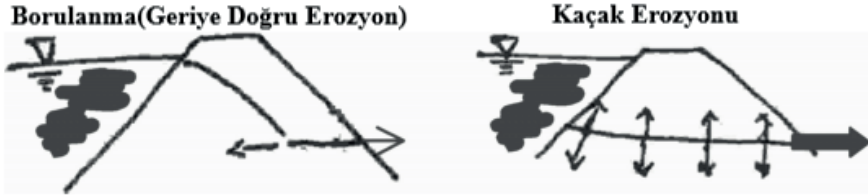
Şekil 10. Dolgunun mansap topuğunda borulanma sonucu meydana gelen kabarma (Pabst vd.'den, 2012).



Şekil 11. Kum kaynaması (van Beek vd.'den, 2010).

**Kaçak Erozyonu**; dolgu barajlarda özellikle enine çatlakların duvarlarını aşındırarak gelişen içsel erozyon biçimidir. Bunun yanında kondüvi ve dolusavak duvarları boyunca oluşan çatlaklarda, boşluklarda veya zayıf sıkıştırılmış dolgunun muhtemel bölgelerinde meydana gelen erozyon da kaçak erozyonuna girmektedir. Temellerde de meydana gelmektedir.

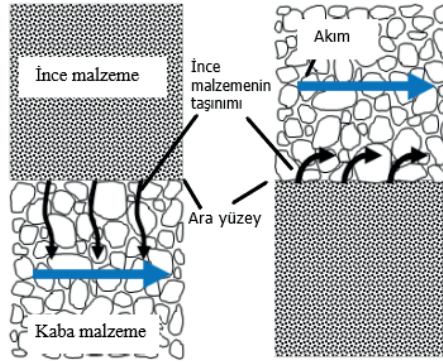
Kaçak erozyonu ile Geriye doğru erozyon biçimleri birbiriyle karıştırılmaktadır. İkisinde de erozyon sonucu boruya benzer bir kanal meydana gelmektedir. Fakat bu kanal kaçak erozyonunda basınçlı boru akımının etkisiyle zeminlerin aşınmaya uğramasıyla genişlerken; borulanmada bu kanal sızma akımının etkisiyle mansaptan membaya doğru gelişerek büyür (Şekil 12).



Şekil 12. Borulanma ve Kaçak Erozyonu mekanizmaları (Bonelli'den, 2012).

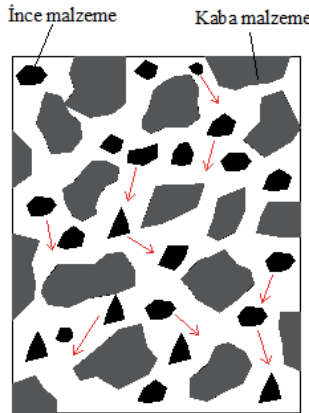
**Toplam Geriye Doğru Erozyon**; dolguda görülen bir içsel erozyon biçimidir. Dolguda yerçekiminin etkisiyle düşey yöndeki sızma akımı tarafından taşınan zemin danelerinin boşalttığı kısımlarda bir kanal (boru) oluşmadığı zamanlarda bu bölgelerde çökmeler görülür. Bu çökmeler krette oyukların oluşmasına neden olur. Bu şekilde oluşan içsel erozyon; dar, merkezi çekirdekli dolgu barajlarda ve üniform derecelenmiş kohezyonsuz zeminlerde görülürler.

**Kontak Erozyonu**; kaba malzemeler ile ince malzemelerin temas noktalarında meydana gelen içsel erozyon biçimidir. Akımın ince malzemeyi, iri malzemenin arasından taşmasıyla meydana gelir (Şekil 13). Homojen ve kil çekirdekli bir dolguda kontak erozyon meydana gelebilir.



Şekil 13. Kontakt erozyonu (ICOLD'dan, 2015).

*Sufüzyon/Sufozyon*; içsel stabilitesi olmayan zeminlerde görülür. Bu tür zeminlerde ince malzemeler; iri malzemelerin arasından akımla birlikte taşınır (Şekil 14). Bu taşınmayla birlikte zemin iskeletinde sadece iri malzemeler kalır. Eğer bu taşınma sonucu hacimsel bir değişiklik meydana gelmiyorsa, "sufüzyon", geliyorsa "sufozyon" adı verilir. İçsel stabilitesi olmayan zeminler genel anlamda kendi kendini filtrelemeyen zeminler olarak açıklanabilir. Diğer ifade ile sahip oldukları boşlukların büyüklükleri, sahip oldukları ince malzemelerin çapından daha büyüktür.



Şekil 14. Sufüzyon/Sufozyon tipi içsel erozyon biçimi

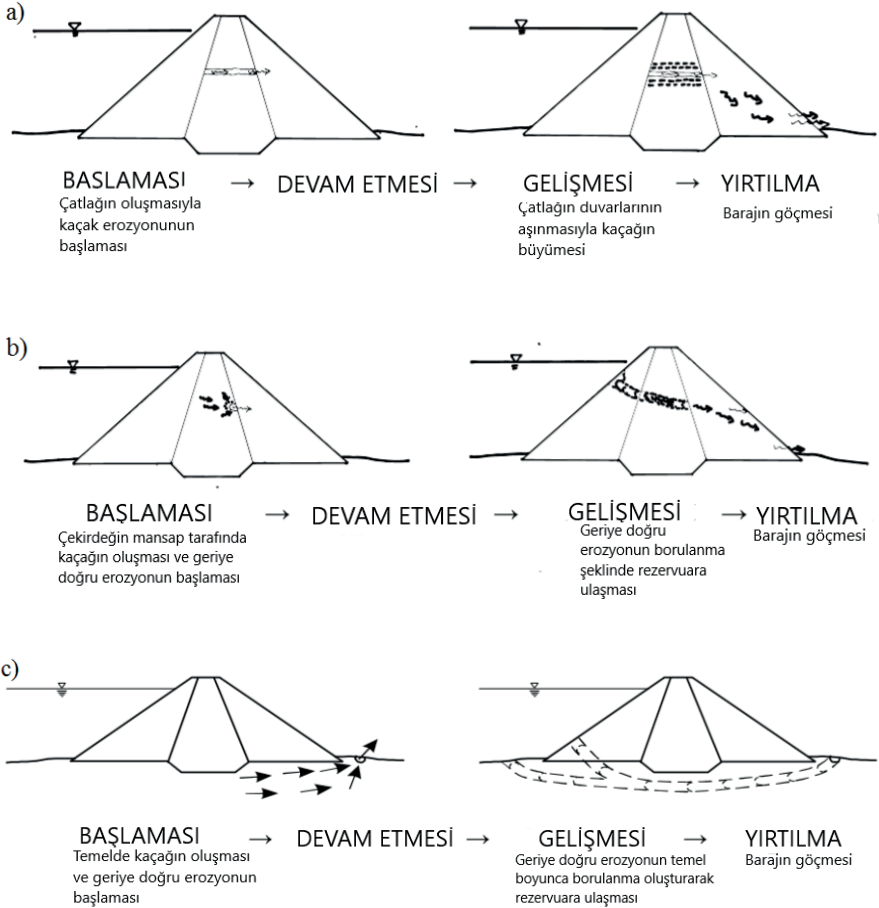
Dolgu barajlarda sadece kontakt erozyonu hem kohezyonlu hem de kohezyonsuz zeminlerde meydana gelebilmektedir. Kaçak erozyonu ve borulanma dışındaki içsel erozyon biçiminde erozyona sızma akımları neden olmaktadır. Borulanmada başlangıçta sızma akımıyla başlayan erozyon,

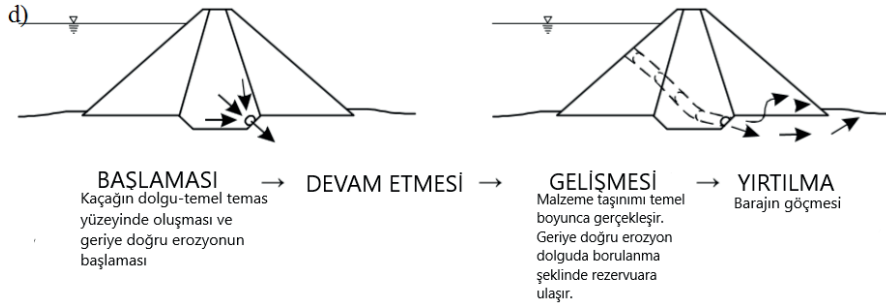


kanalın oluşmasından sonra basınçlı boru akımıyla devam eder. Toplam geriye doğru erozyon dışında tüm içsel erozyon biçimleri, barajın dolgu veya temelinde meydana gelebilmektedir.

### 1.8.2. İçsel erozyon aşamaları

İçsel erozyonun oluşmasıyla dolgu barajlarda aniden göçme gerçekleşmeyebilir. Bu işlem için dolgu ve temel malzemesinin belirli bir miktarda ve sürede taşınması gerekir. Bu süreç; Fell vd.'ne (2008) göre toplamda dört aşamadan oluşur ve son aşamada barajın göçmesiyle son bulur. Barajın göçmesine yani yırtılmasına kadarki ilk üç aşama içsel erozyonun başlaması, devam etmesi ve gelişmesidir. Kil çekirdekli dolgu barajlarda içsel erozyon mekanizmasının aşamaları, şekil 15'de görülmektedir.





*Şekil 15. İçsel erozyon gelişim aşamaları: a) Konsantrre bir çatlakta oluşan içsel erozyon, b) Dolguda geriye doğru erozyon (borulanma), c) Temelde geriye doğru erozyon (borulanma), d) Dolgunun temel boşluklarına taşınması ile oluşan içsel erozyon (Fell vd.'den, 2008).*

İçsel erozyonun başladıktan sonra devam etmesi malzemenin filtre ile korunmasına bağlıdır. Eğer içsel erozyona uğrayan malzeme USBR (2011), ICOLD (1994) ve USACE (2004)'de belirtilen kriterlerde uygun bir filtre ile korunursa içsel erozyon başlasa da durur. Bu filtre koruması yoksa içsel erozyon devam ederek gelişir ve barajın göçmesine neden olur.

### 1.8.3. İçsel erozyondan dolayı oluşan baraj göçmeleri

Bugün dünyada içsel erozyon nedeniyle hasara uğramış ve göçmüş çok sayıda baraj vardır. 1800-1986 yılları arasında (Japonya'da ve Çin'de 1930 yılından önce inşa edilmiş barajlar hariç) göçmüş ve hasara uğramış barajlar üzerinde ICOLD (1974; 1995) ve Foster vd. (1998; 2000) tarafından yapılan çalışmalara göre kayıtlı barajların istatistiklerine göre, toplam göçen baraj sayısı 136 adettir. Bu barajlara ait istatistiksel veriler çizelge 1'de sunulmaktadır. Bu barajların 2/3'ünün ilk dolum esnasında veya dolumdan sonraki 5 yıl içinde göçtüğü görülmüştür. Çizelge 2 ve çizelge 3'de sırasıyla dolgu ve temelde gelişen içsel erozyona ait istatistiksel veriler sunulmaktadır.

*Çizelge 1. İçsel erozyonun gözlemlendiği barajlarda kaza ve göçme istatistikleri (Foster vd.'den, 1998; 2000).*

Durum	Toplam	Dolgu ve temellerde	Kondüvi boru ve duvar etrafında
İçsel erozyondan dolayı göçme	36	19	17
İçsel erozyon kazası (göçme yok)	75	52	23
Erozyonun görülmediği sızma/kaçak	36	30	6
Göçme ve kazaların toplam sayısı	146	101	46
Toplam baraj sayısı	11 192	11 192	5 596
Kaza ve göçmelerin toplam geçmiş frekansı	0,013	0,009	0,0082
Rezervuarın ilk dolumu esnasındaki göçme ve kazaların toplam oranı	% 36		
Rezervuarın ilk dolumu sonrasında göçme ve kazaların toplam oranı	% 64		
Rezervuarın ilk dolumu esnası için geçmiş frekans		0,0032	0,0030
Rezervuarın ilk dolumu sonrası için geçmiş frekans		0,0058	0,0052
Rezervuarın ilk dolumu sonrası için yıllık geçmiş frekans		2,2x10 <sup>-4</sup>	2,0x10 <sup>-4</sup>

*Çizelge 2. Dolguda meydana gelen içsel erozyonun oluşma zamanıyla ilgili istatistik (Foster vd.'den, 1998; 2000).*

İçsel erozyonun oluşma zamanı	Sayı		Oran (%)	
	Göçme	Kaza	Göçme	Kaza
İnşaat aşamasında	1	0	2	0
İlk dolum esnasında	24	26	48	26
İlk dolum sonrası ilk 5 yıllık süre	7	13	14	13
İlk 5 yıllık süre sonrası	18	60	36	61
Bilinmeyen	1	3	—	—
Toplam	51	102	100	100

*Çizelge 3. Temelde meydana gelen içsel erozyonun oluşma zamanıyla ilgili istatistik (Foster vd.'den, 1998; 2000).*

İçsel erozyonun oluşma zamanı	Sayı		Oran (%)	
	Göçme	Kaza	Göçme	Kaza
İnşaat aşamasında	1	0	5	0
İlk dolum esnasında	4	23	20	30
İlk dolum sonrası ilk 5 yıllık süre	10	19	50	24
İlk 5 yıllık süre sonrası	5	36	25	46
Bilinmeyen	1	7	—	—
<b>Toplam</b>	<b>21</b>	<b>85</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

ABD'nin Kaliforniya eyaleti Los Angeles vadisinde 1951 yılında tamamlanan Baldwin Hills Barajı, temel zemininde kaynaklanan içsel erozyon için güzel bir örnektir. Baraj, 71 m yüksekliğinde homojen toprak dolgu olarak inşa edilmiştir (Leps ve Jansen, 1988). İlgili toprak yapısı, zaman içinde artan sızan su miktarına bağlı olarak 14.12.1963 tarihinde göçtü. Barajın göçme mekanizmasıyla ilgili değişik değerlendirmeler yapılsa bile, asıl etkinin temelde yer alan genç fayların rezervuar yükünden ve bölgede oluşan sismik aktiviteden dolayı hareket etmesi ve buna bağlı dolgu içinde çatlakların oluşması olarak görülmektedir. Tosun vd. (1999) konuyla ilgili detaylı değerlendirmeler yapmıştır.

ABD'nin Alabama eyaletinde Coosa nehri üzerinde 1967 yılında 50 m yükseklikte inşa edilen Walter Bouldin barajı, 10 Şubat 1975 yılında ani olarak göçtü. Bazı çalışmalarda, göçmeye su alma yapısının solunda yer alan kaymanın neden olduğu ifade edilse de, asıl nedenin temel zemininde oluşan borulanma olduğu bilinmektedir. Göçme, temel zemini içinde yer alan Kretase yaşlı siltli kum kaya ardalanmaları içinde yer alan dolgu zemin ile dolgu topuğunda içsel erozyon şeklinde başladı ve borulanma ile devam etti. Konuyla ilgili detaylı değerlendirme, Tosun vd. (1999) tarafından yapılmıştır.

Amerika Oklahoma'da 1986 yılında 10 metre yüksekliğindeki homojen toprak dolgu Upper Red Rock Site 20 Barajı da içsel erozyon nedeniyle göçmüştür. Dolguda kullanılan malzeme yüksek yoğunlukta dispersif kil ihtiva etmekteydi (FEMA, 2015). 1973 yılında taşkın kontrolü amacıyla inşa edilen barajın krete yakın noktalarında memba-mansap doğrultusunda uzanan kuruma ve farklı oturma çatlakları bulunmaktaydı. Yoğun yağış nedeniyle daha önce çıkmadığı seviyeye çıkan rezervuardaki su seviyesi, çatlaklardan akarak doygun olmayan dispersif kili aşındırmış ve dolgunun

yırtılarak göçmesine neden olmuştur. Konuyla ilgili detaylı değerlendirme FEMA (2015) tarafından yapılmıştır.

2006 yılında U tipi zonlu toprak dolguya sahip 11 metre yüksekliğindeki Watkins Barajı temel zemininde gelişen geriye doğru erozyon(borulanma) sonucu göçmüştür. Silt ve siltli kumdan oluşan temel zemininde hardpan tabakası boyunca geliştiği düşünülen borulanma kendini güney drenaj kanalının şevinde kum kaynamasıyla göstermiştir. Borulanmanın ilk gözlemlendiği güney drenaj kanalında 570~760 L/ min'lik bir debi ile sızan kaçak su tespit edilmiştir (Hanneman, 2011). Çimentolaşmış sert hardpan tabakasının varlığı borulanmanın gelişmesine çatı desteği sunmuştur. Güney drenaj kanalının şevinin filtre korumasız olması ve hayvanların temelde oluşturduğu tüneller geriye doğru erozyonun gelişmesine büyük katkı vermiştir. Konuyla ilgili detaylı değerlendirme Hanneman (2011) tarafından yapılmıştır.

## Kaynakça

- Anderson, C., Mohorovic, C., Mogck, L., Cohen, B., Scott, G., 1998, Concrete Dams Case Histories of Failures and Nonfailures with Back Calculations, DSO-05, p.89-93.
- Bonelli, S., (Ed.), 2013, Erosion in geomechanics applied to dams and levees, ISTE Limited, p.6-84.
- Bonelli, S., (Ed.). 2012, Erosion of geomaterials. John Wiley & Sons, p.156.
- Chu-Agor, M. L., Fox, G. A., Cancienne, R. M., Wilson, G. V., 2008, Seepage caused tension failures and erosion undercutting of hillslopes, *Journal of hydrology*, 359(3-4), 247-259.
- Çetin, H., Laman, M., Ertunc, A., 2000, Settlement and slaking problems in the world's fourth largest rock-fill dam, the Ataturk Dam in Turkey, *Engineering geology*, 56(3-4), 225-242.
- Fell, R., Foster, M., Davidson, R., Cyganiewicz, J., Sills, G., Vroman, N., 2008, A unified method for estimating probabilities of failure of embankment dams by internal erosion and piping, UNICIV Report R, 446, 10-8, 332 p. (unpublished).
- Fell, R., Fry, J.J. 2007, The state of the art of assessing the likelihood of internal erosion of embankment dams, water retaining structures and their foundations. In *Internal erosion of dams and their foundations*, CRC Press, 9-32.
- FEMA, 2005, *Conduits through embankment dams: Best practices for design, construction, problem identification and evaluation, inspection, maintenance, renovation and repair*, Federal Emergency Management Agency, Washington, D, p.7-9.
- FEMA, 2008, *Training aids for dam safety*, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, 41 p. (unpublished).
- FEMA, 2015, *Evaluation and monitoring of seepage and internal erosion*, FEMA P-1032 Report, Washington DC, 576 p. (unpublished).
- Forster, I.R., Donald, R.B.M, 1998, *Post-Earthquake Response Procedures for Embankment Dams-Lessons from the Loma Prieta Earthquake*, *Ancold Bulletin*, 46-64.
- Foster, M. A., Fell, R., Spannagle, M., 1998, *Analysis of embankment dam incidents*, UNICIV Report No. R-374, University of New South Wales, Sydney, Australia, p.1-169.
- Foster, M., Fell, R., Spannagle, M., 2000, *The statistics of embankment dam failures and accidents*, *Canadian Geotechnical Journal*, 37(5), 1000-1024.
- France, J. W., Alvi, I., Dickson, P., Falvey, H., Rigbey, S., Trojanowski, J., 2018, *Independent forensic team report: Oroville dam spillway incident*, Rep. No.: Riverside, CA: California Institution of Water Resources, p.23-28.



- ICOLD (International Commission on Large Dams), 2015, Internal erosion of existing dams, levees and dikes, and their foundations, 164(1), p.7.
- ICOLD, 1974, Lessons from dam incidents, International Commission on Large Dams, Paris, France, 387 p. (unpublished).
- ICOLD, 1994, Embankment dams: granular filters and drains: Bulletin No. 95, International Commission on Large Dams, Paris, France, p.1-260.
- ICOLD, 1995, Dam Failures – Statistical Analysis, Bulletin No. 99, International Commission on Large Dams, Paris, France, p.45-50.
- Jansen, R. B., 1983, Dams and public safety, US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 319 p.101-102.
- Jansen, R. B., 1988, Lessons from Notable Events: The St. Francis Dam Failure, Advanced Dam Engineering for Design, Construction, and Rehabilitation, Van Nostrand Reinhold, New York NY. p 28-34.
- Kiersch, G. A., 1988, Lessons from notable events: Vaiont reservoir disaster, Advanced Dam Engineering for Design, Construction, and Rehabilitation, Van Nostrand Reinhold, New York, NY, p 41-53.
- Leonards, G. A., 1987, Dam failures, Engineering Geology, 24(1).
- Leps, T. M., Jansen, R. B., 1988, Lessons from notable events: The Baldwin Hills reservoir failure, Advanced Dam Engineering for Design, Construction, and Rehabilitation, Van Nostrand Reinhold, New York NY, p 8-16.
- Lowe, J., 1970, Recent development in the design and construction of earth and rockfill dams, Trans. 10th Int. Congr. Large Dams, Montreal, 5, 1-28.
- McDaniel, L., Garton, J., Feidler, W., King, W., Schwanz, N., 2011, Lake Delhi dam breach—two perspectives, In: Association of state dam safety officials annual conference, Washington, DC, USA, 25–29.
- Okeke, A. C. U., Wang, F., 2016, Critical hydraulic gradients for seepage-induced failure of landslide dam, Geoenvironmental Disasters, 3(1), 9.
- Pabst, M., Engemoen, B., Hanneman, D., Redlinger, C., Scott, G., 2012, Heave, uplift, and piping at the toe of embankment dams - A new perspective, Association of State Dam Safety Officials - Dam Safety 2012, 1, 1-12.
- Ponce, V. M., 2020, Dr. Victor Miguel Ponce website, [http://ponce.sdsu.edu/teton\\_dam\\_failure\\_photos.html](http://ponce.sdsu.edu/teton_dam_failure_photos.html), erişim tarihi: 27.10.2020.
- Pradel, D., Wartman, J., Tiwari, B., 2013, Failure of the Fujinuma dams during the 2011 Tohoku earthquake, In Geo-Congress 2013: Stability and Performance of Slopes and Embankments III, p.1559-1573.
- Redlinger, C. G., 2013, Wister Dam-1949 Partial Failure, Presentation at ICOLD European Working Group on Internal Erosion Meeting, Vienna, p.34-47.

- Schuster, R.L., Costa, J. E., 1986, Perspective on landslide dams, R. L., Schuster (Eds), Landslide Dams Processes, Risk and Mitigation, ASCE Special Publication, vol. 3, p. 1-20.
- Seed, H. B., Lee, K. L., Idriss, I. M., Makdisi, F. I., 1975, The slides in the San Fernando dams during the earthquake of February 9, 1971, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 101(7), 651-688.
- Seed, H. B., Makdisi, F. I., De Alba, P., 1978, The performance of earth dams during earthquakes, Journal of the Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers, 104(7), 967-994.
- Sherard, J.L., Dunnigan, L.P., 1985, Filters and leakage control in embankment dams, In Seepage and leakage from dams and impoundments, ASCE, 1-30.
- Tosun H., Kilbiyik M., 2006, İnternal erosion resulted from dispersive soils in earthfill dams and a case study, Dam Safety 2006, ASDSO's Annual Conference, p.152-165.
- Tosun, H. (2002). Dolgu baraj depremselliği ve tasarım esasları, DSİ Genel Müdürlüğü, Ankara, 208 s. 99-100.
- Tosun, H., 2015, Earthquakes and dams, In Earthquake Engineering-From Engineering Seismology to Optimal Seismic Design of Engineering Structures, IntechOpen, p.189-202.
- Tosun, H., Zorluer, İ., Savaş, H., Taşkıran, Ö., Demirkol, H., Kar, A., 1999, Temel sorunlarından oluşan baraj göçmeleri. Osmangazi Üniversitesi, Geoteknik Yayınları Serisi: 99/1, Eskişehir, 95 s.
- USACE, 2004, General design and construction considerations for earth and rock-fill dams. Engineer Manual, U.S. Army Corps of Engineers, 130 p. (unpublished).
- USBR, (United States Bureau of Reclamation), 1987, Design of small dams, Water resources technical publication, p.452.
- USBR, 2011, Design Standard No. 13. Embankment dams, protective filters, U.S. Department of Interior Bureau of Reclamation, p.1-191.
- USBR, 2015, IV-4. Internal Erosion Risks for Embankments and Foundations, Bureau of Reclamation U.S, Technical Report, 134 p. (unpublished).
- Van Beek, V.M., De Bruijn, H.T.J., Knoeff, J.G., Bezuijen, A., Förster, U., 2010, Levee failure due to piping: A full-scale experiment., In Scour and Erosion, p.283-292.
- Vuola, P., Konrad, J.M., Bartsch, M., 2007, Effects of frost and thaw on dams, Report, Deutsches Talsperrenkomitee , 13, 56 p. (unpublished).
- Wahl, T. L., 1997, Predicting embankment dam breach parameters-A needs assessment. In Proceedings Of The Congress-International Association for Hydraulic Research, 48-53.

- Wahler, W. A., 1973, Analysis of coal refuse dam failure: Middle Fork Buffalo Creek, Saunders, West Virginia. Bureau of Mines, p.1-274.
- Wan, C.F., Fell, R., 2002, Investigation of internal erosion and piping of soils in embankment dams by the slot erosion test and the hole erosion test-interpretative report, 325 p. (unpublished).
- Zhang, J. M., Yang, Z., Gao, X., Zhang, J., 2015, Geotechnical aspects and seismic damage of the 156-m-high Zipingpu concrete-faced rockfill dam following the Ms 8.0 Wenchuan earthquake, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 76, 145-156.

