



Homojen Toprak Dolgu Barajın Suyun Üstten Aşması ve Borulanma Nedeniyle Yıkılması Üzerine Deneysel Çalışma

Experimental Study on the Homogeneous Earth-fill Dam Break due to Overtopping and Piping

Ebru Taşkaya ¹, Zehra Büyüker ^{2*}, Adile Nur Solmaz ³, Onurhan Karakaya ⁴, Gökçen Bombar ⁵, Gökmen Tayfur ⁶

^{1,2,4,5} İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE

³ İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, TÜRKİYE

⁶ İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: zehrabuyuker@ikcu.edu.tr

Öz

Toprak dolgu baraj yıkılmalarının çoğu üstten aşma ve borulanmadan kaynaklanmakta ve ciddi can ve mal kayıplarıyla sonuçlanabilmektedir. Bu sebeple, baraj yıkılmasıyla oluşan taşkın ilerleyişinin incelenmesi ve riskli alanların tespiti, mansap bölgesinde oluşabilecek zararların önceden belirlenmesi ve önlenmesi açısından önem arz etmektedir. Bu çalışmada, homojen toprak dolgu barajların üstten aşma ve borulanma sebebiyle yıkılması sonucu oluşan taşkın ilerlemesi ve baraj gövdesinden taşınacak sedimentin taşkın dalgası ile mansaptaki hareketi deneysel olarak incelenmiştir. Baraj gövdesi, medyan tane çapı 0,441 mm olan sediment kullanılarak 30 cm yüksekliğinde, 2 m genişliğinde inşa edilmiştir. Baraj gövdesi, standart bir teknikle sıkıştırılmış her biri 10 cm yüksekliğe sahip üç kattan meydana gelmektedir. Deneyler 2 farklı noktadaki kamera ile kayıt altına alınmıştır. Deney sonunda limnometre ile ölçülen sediment kalınlıkları verileri kullanılarak batimetri grafikleri elde edilmiştir. Borulanma nedeniyle barajın yıkılması, baraj rezervuarındaki suyun baraj gövdesindeki sedimenti mansap bölgesine taşıması ve kret genişliğinin zamanla azalmasından sonra başladığı için suyun üstten aşması durumundakine göre daha uzun sürmüştür. Taşkın dalgası, üstten aşma deneyinde baraj gövdesinin orta kısmını mansap bölgesine taşımıştır. Borulanma deneyinde ise baraj mansap bölgesindeki erozyonun zamanla genişlemesi ile rezervuardaki suyun sağ sahile 60 cm mesafedeki en zayıf kesitten barajı yıkmaya başlaması, baraj gövdesinin sağ sahile daha yakın bölgesinin mansap bölgesine taşınmasıyla sonuçlanmıştır. Deney sonuçları taşkın dalgası ekseninde yayılan sedimentin kalınlığının daha az olduğunu göstermiştir. Borulanma deneyinde sızma-erozyon boyunca baraj gövdesinden taşınan sediment, taşkın dalgasının etkisini ve yayılımını azaltmıştır. Bu azalma, borulanma deneyinde baraj mansabına yayılan sedimentin kalınlığını arttırmış, üstten aşma deneyinde daha uzun ve daha geniş sediment yayılımıyla sonuçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Toprak Dolgu Baraj Yıkılması, Borulanma, Üstten Aşma, Dolgu Malzemesi Yayılımı

Abstract

Most earth-fill dam failures are caused by overtopping and piping and which can result in serious losses of life and property. Therefore, investigating the progress of the flood caused by the dam's break and detection of risky areas is of importance in terms of predetermining and preventing the damages that may occur in the downstream region. In this study, the progression of the flood caused by the homogeneous earth-fill dam break due to overtopping and piping and the movement of the sediment to the downstream by the flood wave were experimentally investigated. The dam body was constructed 30 cm high and 2 m wide by using uniform sediment with a median grain diameter of 0.441 mm. The dam bodies consist of three layers with a height of 10 cm, which were compacted with a standard technique. Experiments were recorded with cameras at 2 different points. At the end of the experiment, bathymetry graphs were obtained by using the sediment thickness data measured with a limnimeter. The dam failure due to piping started after the water in water reservoir passed through the gaps in the dam body, the sediment in the dam body was transported to the downstream region, and the crest width decreased over time, so it took longer than overtopping case. With the flood wave, the middle part of the dam body in the overtopping experiment were moved to the downstream region. In the piping experiment, as the erosion in the downstream area of the dam expanded over time, the water in the reservoir started to failure the dam body from the weakest section 60 cm away from the right shore, resulting in the part of the dam body close to the right shore being moved to the downstream area. Experimental results showed that the depth of the propagated sediment is less in the flood wave axis. In the piping experiment, sediment moved from the dam body during infiltration and erosion reduced the effect and propagation of the flood wave. This decrease increased the thickness of the propagated sediment at the downstream of the dam in the piping experiment and resulted in a longer and wider sediment propagate in the overtopping experiment.

Keywords: Earth-fill Dam Failure, Piping, Overtopping, Filling Material Propagation

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

A dam is a structure that is constructed as a barrier across a valley or natural depression to stop or restrict the flow of water or underground streams and to create a water storage which is called reservoir. Such reservoirs are required for three main purposes as provision of a dependable water supply for domestic and/or irrigation use, flood mitigation and generation of electric power.

Most of the dams built to date are earth fill dams [1]. The failure mechanism of earth fill dams may be related to one or more of the factors such as unexpectedly large inflow, insufficient foundation, different settlement, landslides, earthquakes, inadequate project design and construction, poor construction materials use, and faulty operations. Most failures in earth-fill dams are caused by piping from internal erosion and overtopping.

As a result of dam failure, a huge amount of water accumulated in the dam reservoir exceeds the dam body and this uncontrolled water moves to the downstream region with the dam body sediment which causes devastation. For this reason, it is an important issue to determine the flood movement in order to obtain the possible risks that may occur in the settlement areas which is located in the downstream region of the dam.

Models related to the hydrodynamics of the flood wave resulting from the failure of dams are available in the literature, but there are fewer studies on the movement of the sediment to the downstream by the flood wave during dam failures [13-15].

In this study, the failure of earth-fill dams due to overtopping and piping were examined experimentally and the progression of the sediment moving towards the downstream of the dam with the flood wave resulting from both types of failure was examined.

Materials and Methods

Homogeneous earth-fill dam break was carried out with two different scenarios, namely, overtopping and piping.

The experiments were performed in a reinforced concrete channel with 18 m in long, 2 m in wide and 0.88 m in deep, located in the hydraulic laboratory of Izmir Katip Çelebi University.

The homogeneous earth-fill dam bodies were constructed 30 cm high and 2 m wide by using uniform sediment with a median grain diameter of 0.441 mm. The dam bodies consist of three layers with a height of 10 cm, which were compacted with a standard technique. At the beginning of the experiment process, the dam was covered with a nylon cover until the level of the water coming from the channel stabilized. After the water reached the desired level, the cover on the dam was removed (Fig. 2).

Experiments were recorded with cameras at 2 different points. At the end of the experiment, bathymetry graphs were obtained by using the sediment thickness data measured with a limnimeter.

Results and Discussion

The dam failure due to piping started after the water in water

reservoir passed through the gaps in the dam body, the sediment in the dam body was transported to the downstream region, and the crest width decreased over time, so it took longer than overtopping case (Table 1). Due to piping and overtopping, the dam reached its final state 620 and 920 seconds after failure, respectively.

In the overtopping experiment, as the breach widened in the middle of the dam, the flood wave passed from there to the downstream region and it was observed that the sediment spread symmetrically to the downstream of the dam. In the piping experiment, as the erosion in the downstream area of the dam expanded over time, the water in the reservoir started to failure the dam body from the weakest section 60 cm away from the right shore, resulting in the part of the dam body close to the right shore being moved to the downstream area (Fig. 12).

Experimental results showed that the depth of the propagated sediment is less in the flood wave axis (Fig. 12).

In the piping experiment, sediment moved from the dam body during infiltration and erosion reduced the effect and propagation of the flood wave. This decrease increased the thickness of the propagated sediment at the downstream of the dam in the piping experiment and resulted in a longer and wider sediment propagate in the overtopping experiment. The propagated sediment was 1.85 m wide and 4.8 m long in the overtopping experiment, while in the piping experiment the body was transported across the dam width due to initial erosion and the width of the dispersed sediment was 2 m, the length was 1.7 m on the bank, 6 m in total (Table 1).

The breach volumes of dam bodies were 189461 and 72447 cm³ after failure, in piping and overtopping experiments, respectively. In the piping experiment, due to the erosion before dam failed, although the breach volume was smaller than the overtopping, the volume of sediment carried and spread from the dam body was higher (Table 1).

Conclusion

Investigating the progress of the flood wave caused by the dam's break and detection of risky areas is of great importance in terms of predetermining and preventing the damages that may occur in the residential areas in the downstream region.

In the piping experiment, sediment moved from the dam body during infiltration and erosion reduced the effect and propagation of the flood wave. This decrease increased the thickness of the propagated sediment at the downstream of the dam in the piping experiment and resulted in a longer and wider sediment propagate in the overtopping experiment.

While the middle part of the dam body was moved to the downstream region in the overtopping experiment, in the piping experiment, due to the internal dynamics that occurred during the 27-hour seepage-erosion period, dam failure started from the section 40 cm from the middle of the dam body and the area close to the right bank was moved.

1. Giriş

İnsanlık tarihi boyunca suya olan ihtiyaçla beraber suyun sel gibi afetlere neden olması, suyun kontrol edilmesi gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Bu amaçla birçok yapı inşa edilmiştir ve barajlar da

bu yapılardan biridir. Barajlar, gövdenin statik tasarımına ve gövde şekline göre ağırlık barajları, kemer barajlar, payanda barajlar, tersip bendi barajlar ve kompozit barajlar olarak sınıflandırılabilir. Dolgu barajlar ise dolguda kullanılan malzeme türüne göre toprak dolgu barajlar (homojen, zonlu), kaya dolgu

barajlar ve önyüzü güçlendirilmiş dolgu barajlar olarak sınıflandırılabilir [1]. Bugüne kadar yapılan barajların çoğu toprak dolgu barajlardır. Türkiye’de barajların %71’i toprak dolgu, %20’si kaya dolgu tipindeki barajlardır [2]. Toprak dolgu barajlar için taşkınlar sonucu, zayıf temel, toprak kayması, deprem, yetersiz tasarım ve yapı, kötü inşaat malzemesi kullanımı ve hatalı işçilik başlıca yıkılma sebepleri arasında gösterilebilir. Yıkılmanın türü, yıkılma nedenine ve barajın özelliklerine göre değişmektedir. Toprak dolgu barajların en yaygın yıkılma şekli üstten aşma ve borulanmadır. Baraj yıkılmalarının %38’ini dolusavak kapasitesinin yetersizliğinden dolayı üstten aşma, %33’ünü borulanma ve %23’ünü ise yukarıda bahsedilen diğer sebepler oluşturmaktadır [3]. 1975 yılında Çin’de Banqiao Barajı’nın fazla yağışlardan dolayı yıkılması üstten aşma ile yıkılan barajlara örnek olarak verilebilir. Barajın yıkılması, yaklaşık on milyon nüfusu etkilemiş, yaklaşık 30 şehir ve ilçe olmak üzere toplamda 12,000 km² alan sular altında kalmıştır ve tahmini ölü sayısı 26,000 ile 240,000 arasında değişmektedir [4]. Aynı zamanda 1976 yılında ABD’de dolgu barajı olan Teton Barajı, borulanma sebebi ile yıkılan toprak dolgu barajlara örnek olarak verilebilir. 93 m yüksekliğindeki Teton Barajı’nın yıkılması sonucunda on bir kişi ve 13,000 sığır ölmüştür [5]. İki barajın da yıkılması çok sayıda can kaybı ve büyük maddi kayıplar ile sonuçlanmıştır.

Borulanma, suyun baraj gövdesindeki malzemeyi harekete geçirmesi ile oluşur ve dolgu içinde veya temel zemininde görülmeyen su kanalları haline gelir. Bu kanallar kısa sürede büyüyerek gövdede yarılmaya, göçmeye neden olur [6]. [7] toprak dolgu barajların yıkılma sebeplerini incelemiş, özellikle borulanma sebebi ile baraj yıkılması üzerine istatistiksel analizlerinin sonuçlarını açıklamışlardır. [8] dolgu barajlar ve temellerinde iç erozyon ve borulanmanın ilerlemesi ve yıkılmaya sebep olan bir borulanma gelişmesi için zamana bağlı tahmini için bir yöntem sunmuştur. Bu çalışmanın sonucunda barajlarda borulanmadan kaynaklı yıkılma süresinin kısa olması sebebiyle borulanmalardan kaynaklı sızıntıların tespit edilmesi için barajların sürekli olarak izlenmesinin gerekliliğini vurgulamışlardır. [9] toprak dolgu barajda borulanma üzerine yapılan çalışmaları derlemiştir. [10] bir taşkın dalgası nedeniyle baraj yıkılmalarını incelemiş ve çalışmalarında mansap yönündeki morfolojik gelişimi gözlemlemeye çalışmışlardır. Araştırma sonuçlarına göre, baraj yıkılmasının başlangıcında sediment erozyonu nedeniyle barajın mansabında bir hidrolik sıçramanın meydana geldiğini ve ilerleyen sürelerde kaybolduğunu gözlemlemişlerdir. [11] benzer bir şekilde taşkın dalgası nedeniyle baraj yıkılması sonucu oluşan yatak formlarını araştırmışlardır. [12] Ürkmez Barajı’nın üç boyutlu çarpık modelini kullanarak barajın yıkılması sonucu oluşan taşkın dalgasını incelemişlerdir. [13] baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın dalgasının iki boyutlu yayılımını mansabında Eskişehir bulunan Porsuk Barajı ve mansabında İstanbul bulunan Alibey Barajı için modellemişlerdir. Her iki baraj yıkılması senaryosu için HEC-RAS ve FLO-2D’de yapılan analizlerle baraj yıkılması sonucu oluşacak maksimum akım derinlikleri ve hızları belirlenmiş ve taşkın dalgası oluşma süreleri detaylı olarak verilmiştir. [14] baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın dalgasının üç boyutlu yayılımını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışmada baraj yıkılması, barajı temsil eden düşey kapağın ani olarak kaldırılması ile simüle edilmiştir. Elde edilen veriler, dalga önünde hızın en büyük olduğu, geriye doğru gidildikçe hızın azaldığı ve rezervuarda ise akımda hareketlenmenin çok az olduğunu göstermiştir. Ayrıca dalganın akım doğrultusundaki hız bileşenlerinin yanıl yöndeki hız bileşenlerinden daha büyük olduğunu gözlemlemişlerdir. [15], NWS FLDWAV adlı bilgisayar modelini kullanarak Kozan Barajı

üzerinde yaptığı çalışmada, gedik genişliği maksimum ve gedik oluşum süresi minimum iken gedikten çıkan debinin en büyük olduğunu elde etmiştir. [16] baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın dalgalarını, Ürkmez Barajı’nın çarpıtılmış fiziksel modeli üzerinde ani yıkılma, trapez gedik ve üçgen gedik senaryolarını incelemiştir. Ani yıkılma senaryosunda, maksimum su derinliklerinin oluştuğunu ve maksimum su derinliğine ulaşma süresinin en kısa olduğunu gözlemlemiştir. [17] yaptığı çalışmada, toprak dolgu barajlarda borulanma ve borulanma nedenli gedik oluşumunu araştırmıştır. Deneysel ve sayısal çalışmaların sonucunda, barajların mansaptan başlayarak membaya doğru borulanmaya maruz kaldığı görülmüştür. [18] farklı uzunluktaki yatay bir borunun farklı yerlere yerleştirilmesi ile borulanmanın tetiklendiği, baraj gövdesi yüksekliğinin 20 ile 35 cm ve memba-mansap eğimlerinin 35° ile 45° arasında değiştiği 12 deney gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları deneyler sonucunda mansap bölgesinde ıslak alan oluşumu, mansap bölgesinde erozyon başlaması ve ilerlemesi (baraj gövdesindeki sedimentin kademeli olarak taşınması) ile gedik oluşumunu içeren 4 yıkım süreci gözlemlemişlerdir. Borulanma nedeniyle oluşan erozyonun genişlemesiyle rezervuardaki su seviyesinde bir düşüş meydana gelmiş ve gedik oluşana kadar düşmeye devam etmiştir. En zayıf kesitten baraj üst kısmının çökmesiyle yıkılma hızlanmıştır. [19] ve [20] yapmış oldukları deneylerde, mansapta yerleşim yerini simüle eden küplerin bulunmasının üstten aşma ve borulanma sonucu meydana gelen baraj yıkılması üzerindeki etkisini araştırmışlar ve mansapta yerleşim yeri olması durumunda yayılan sediment kalınlığının arttığını görmüşlerdir. [21] deneysel ve sayısal olarak yaptığı çalışmalarda baraj yıkılması senaryosunda bitki örtüsünün etkisini incelemiştir. Elde edilen veriler bitki örtüsü olarak yapılmış deneylerle karşılaştırılmış ve bitki örtüsü mevcudiyetinin yerleşim yerlerini taşkın dalgasının olası zararlarından koruduğu belirlenmiştir.

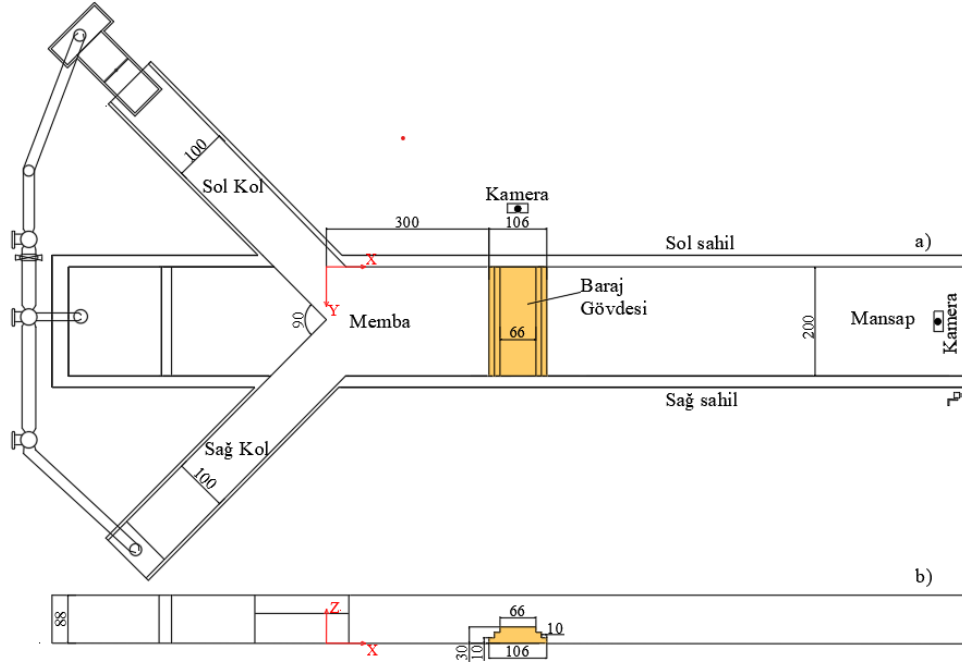
Tarih boyunca verilen örneklerde de görüldüğü gibi barajların yıkılması maddi zararların yanı sıra ciddi felaketlere de neden olabilmekte, insan ve diğer canlıların yaşamında önemli tehlikeler yaratabilmektedir. Bu nedenle, baraj yıkılmalarının nedenlerini ve sonuçlarını incelemek oldukça önemlidir. Barajın yıkılması sonucu taşkın dalgasının yayılma ve hidrodinamik özelliklerinin anlaşılması mühendislik çalışmaları arasında özel bir önem taşımaktadır. Taşkın dalgası ile beraber ilerleyen baraj gövdesindeki malzemeler, dipteki katı maddeler ve sediment taşınarak mansap bölgesindeki vadide boşluklar ve birikimler oluşturur. Bu sebeple barajın yıkılması sonucu yayılan sedimentin barajın mansabındaki etkisini incelemek de taşkın dalgasının hareketi kadar önemlidir.

Barajların yıkılması sonucu oluşan taşkın dalgasının hidrodinamiği ile ilgili modeller literatürde yer almaktadır ancak baraj yıkılmalarında sediment hareketi ve yayılması ile ilgili çalışmalar daha azdır.

Bu çalışmada, suyun üstten aşması ve borulanma nedeniyle toprak dolgu barajların yıkılması deneysel olarak ele alınmış ve her iki tip yıkılma sonucu oluşan sel dalgası ile barajın mansabına doğru hareket eden sedimentin yayılımı incelenmiştir.

2. Deneysel Düzenegi ve Deneysel Yöntem

Bu çalışmadaki deneyler, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi Hidrolik Laboratuvarı’nda bulunan 18 m uzunluğunda, 2 m genişliğinde ve 0,88 m derinliğinde betonarme bir kanalda gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Ana kanala 45° açıyla bağlı ve her biri 1 m genişliğinde ve 4,9 m uzunluğunda olan iki adet kol yan kol rezervuar hacmini arttırmak amacıyla kullanılmıştır.



Şekil 1. Deney düzeneği a) plan, b) kesit görünümü (birimler cm'dir)

Figure 1. Experimental set-up a) plan, b) side view

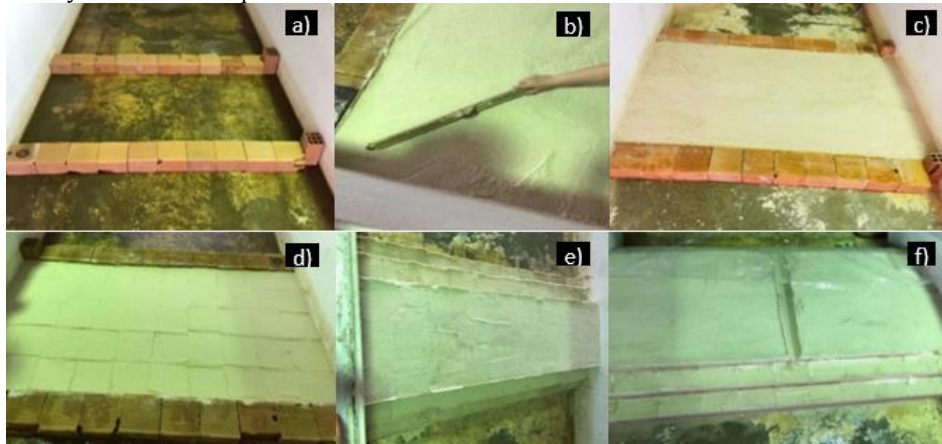
Bodrum katta bulunan depoya bağlı iki paralel hat üzerinde bulunan iki pompa sırasıyla sağ ve sol yan kolu beslemekte olup rezervuar içindeki su bu pompalar yardımıyla depodan sisteme aktarılmıştır.

Dolgu baraj gövdesi 2 m genişliğinde, 1,06 m uzunluğunda ve 0,3 m yüksekliğindedir. Baraj gövdesi, kanalın üçüncü metresine inşa edilmiştir. Homojen tipteki baraj gövdesinin yapımında dolgu malzemesi olarak medyan dane çapı $d_{50}=0,441$ mm üniform sediment kullanılmıştır. Baraj inşası üç aşamada gerçekleşmiştir. İlk aşamada $19 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 19 \text{ cm}$ boyutlarındaki tuğlalar, kanal üzerine baraj gövdesinin inşa edileceği yere çizilen referans çizgilerine uyularak yerleştirilmiştir (Şekil 2.a). Daha sonra 2 m genişliğinde, 1,06 m uzunluğunda ve yaklaşık 12 cm yüksekliğindeki dolgu malzemesi tuğlalar ile sınırlanan alanın içine düz bir şekilde serilmiş ve su terazisi ile kontrol edilmiştir (Şekil 2.b, Şekil 2.c). Yerleştirme işlemi tamamlandıktan sonra, $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 'lik metal plaka alanın bir köşesine yerleştirilmiş ve 1,5 kg ağırlığın 20 cm yükseklikten bu plaka üzerine 10 kez

düşürülmesiyle gövde malzemesinin sıkışması sağlanmıştır. Metal plaka 20 cm kaydırılarak aynı işlem tekrarlanmış ve işlem tüm alan standart bir şekilde sıkıştırılıncaya kadar devam edilmiştir (Şekil 2.d). Ardından yeni bir sıra tuğla ile ikinci katın sınırları boyunca yerleştirilmiştir. Son olarak üçüncü kat dolgu malzemesinin aynı yöntem ile sıkıştırılması ile tamamlanmış ve tuğlalar ortamdan uzaklaştırılmıştır (Şekil 2.e). Her bir katman 10 cm, baraj yüksekliği 30 cm olacak şekilde gövde oluşturulmuştur.

Baraj yapım süreci hem borulanma hem üstten aşma nedeniyle yıkılma senaryoları için toplam iki kere aynı yöntem izlenerek gerçekleştirilmiştir. Baraj gövdeleri inşa edilirken her bir düzenek için yaklaşık 461 kg sediment kullanılmıştır.

Üstten aşma nedeniyle baraj yıkılmasının inceleneceği deneyde yıkılmanın baraj gövdesinin ortasından başlamasını sağlamak için baraj gövdesinin ortasına yaklaşık 5 cm derinliğinde gedik açılmıştır (Şekil 2.f).



Şekil 2. Baraj gövdesi yapım aşamaları a) tuğlaların baraj gövdesinin 1. katı için yerleştirilmesi ,b) sediment yerleştirme işlemi, c) baraj gövdesinin 1. katı, d) sıkıştırılmış katman, e) borulanma deneyinde baraj gövdesi, f) üstten aşma deneyinde baraj gövdesi

Figure 2. Construction steps of the dam body a) placement of bricks for the 1st floor of the dam body, b) process of sediment laying, c) 1st floor of dam body, d) compressed floor, e) dam body in piping experiment, f) dam body in overtopping experiment

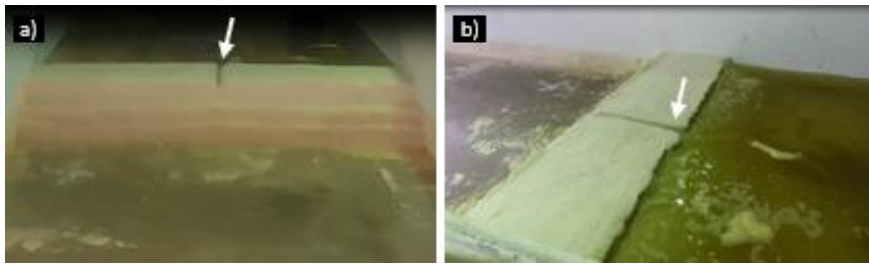
Her iki deneyde de baraj membasındaki hazne su ile doldurulurken baraj gövdesinin zarar görmemesi için baraj memba yüzüne plastik örtü örtülmüştür ve su seviyesi 25 cm'e ulaşana kadar baraj bu örtüyle korunmuştur (Şekil 3).



Şekil 3. Baraj gövdesinin korunması

Figure 3. Protection of the dam body

Üstten aşma deneyinde memba 25 cm'e kadar doldurulduğunda,



Şekil 4. Üstten aşma deney başlangıcı a) baraj mansabı, b) baraj gövdesi

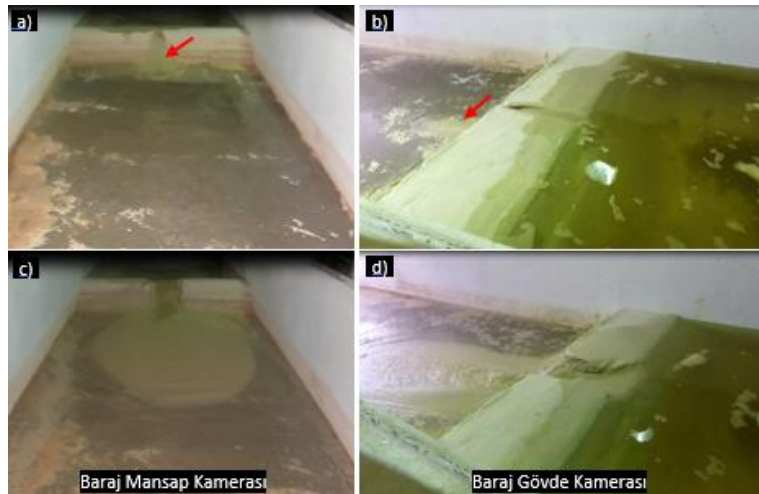
Figure 4. Beginning of the overtopping experiment a) downstream of dam body, b) dam body

3. Deneysel Bulgular

Üstten aşma ve borulanma sonucu yıkılma senaryosunun incelendiği deneylerden elde edilen veriler bu bölümde ele alınmıştır.

3.1. Baraj gövdesinin üstten aşma senaryosu ile yıkılması

Şekil 5'te soldaki şekiller baraj mansap, sağdaki şekiller baraj gövdesi kamerasından alınan görüntüler olmak üzere, deney



Şekil 5. Üstten aşma deneyi başladıktan a)-b) 43 sn, c)-d) 85 sn sonra baraj mansabı ve baraj gövdesi

Figure 5. Downstream of the dam and dam body a)-b) 43 s,c)-d) 85 s after the beginning of overtopping experiment

Şekil 6'da soldaki şekiller baraj mansap, sağdaki şekiller baraj gövdesi kamerasından alınan görüntüler olmak üzere, deney başladıktan 108, 128 ve 159 saniye sonraki durum sırasıyla a-b,

su gedik seviyesine ulaşmış olup bu deneyde, baraj membasındaki su kret seviyesini aşarak baraj mansabına ulaştığında pompa kapatılmıştır (Şekil 4).

Üstten aşma deney başlangıcı ($t=0$ sn), suyun barajın mansap yüzünü aşarak baraj kret genişliği boyunca memba yüzüne ilerlemesi ile gediği geçtiği an olarak tanımlanmıştır [22, 23]. Borulanma deneyinde mambadaki su seviyesi 27 cm'e ulaştığı an deney başlangıcı ($t = 0$ s) olarak kabul edilmiştir. Borulanmanın etkisi deney başında gözlenmeye başlanmış olup baraj gövdesindeki aşınma (sızma-erozyon) yavaş geliştiğinden borulanma deneyi üstten aşmaya göre daha uzun sürmüştür.

Her iki deneyde de kanal mansabına ve baraj gövdesine yerleştirilen kameralar ile yıkılmanın her aşaması kaydedilmiştir. Deneylerin sonunda, sedimentin yayılma uzunlukları ve genişlikleri belirlenmiştir. Kanal boyunca limnometre yardımı ile x ve y eksenlerinde 10 cm aralıklarla yapılan ölçümlerle yıkılma sonrası sediment derinlik profili elde edilmiştir.

başladıktan 43 ve 85 saniye sonraki durum sırasıyla a-b ve c-d ile ifade edilmiştir.

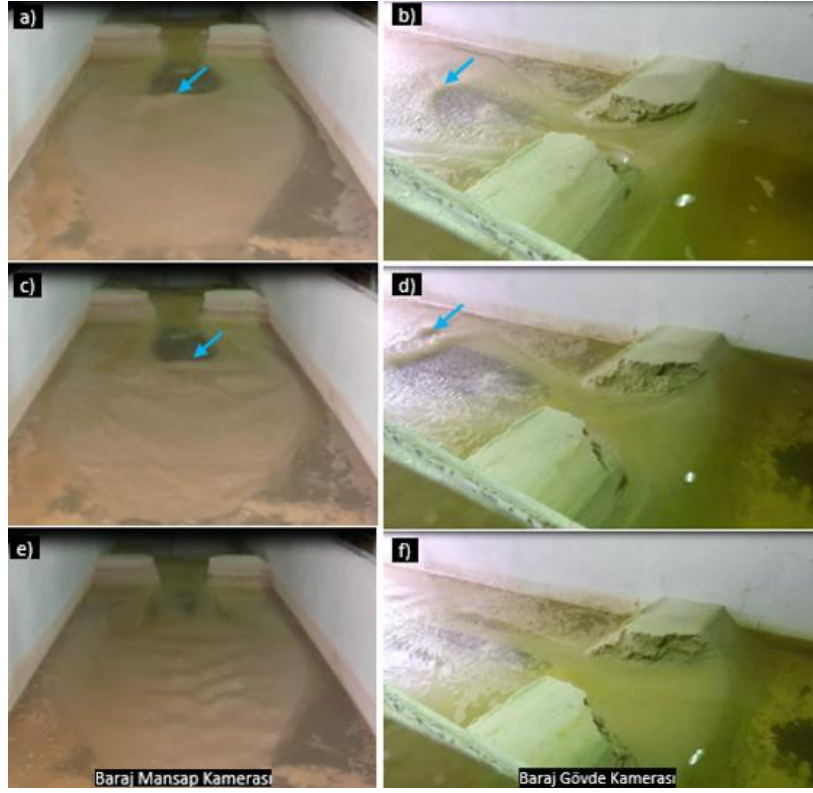
Suyun gediği aşarak baraj mansabına geçmesiyle mambadaki suyun hızı baraj gövdedeki malzemesini sürüklemiş (Şekil 5.a, Şekil 5.b) ve sonrasında kanal tabanındaki sedimenti mansap bölgesine taşımaya başlamıştır. Böylece sedimentin yayıldığı alan artmıştır (Şekil 5.c, Şekil 5.d). Şekil üzerine dikkat çekmek için eklenen kırmızı oklar sediment yayılımını göstermektedir.

c-d ve e-f ile ifade edilmiştir. Taşkın dalgasının başlangıçta daha büyük kinetik enerjiye sahip olması sebebiyle sürüklenen ve kanal tabanı boyunca taşınan sediment zamanla bir eşik

oluşturmuş, bu bölgede su derinliğindeki ani artışla beraber suyun kabarması gözlemlenmiştir (Şekil 6.a, Şekil 6.b). Şekil 6.c ve Şekil 6.d'de görüldüğü üzere, deney başladıktan 128 saniye sonra sağ ve sol sahile doğru da genişleyerek maksimum seviyeye ulaşan su kabarması, 159. saniyede etkisini kaybetmiştir

(Şekil 6.e, Şekil 6.f). Deney başlangıcından itibaren 920 saniye sonunda sediment yayılımı nihai haline ulaşmıştır.

Şekil üzerine dikkat çekmek için eklenen mavi oklar su kabarmasını göstermektedir.

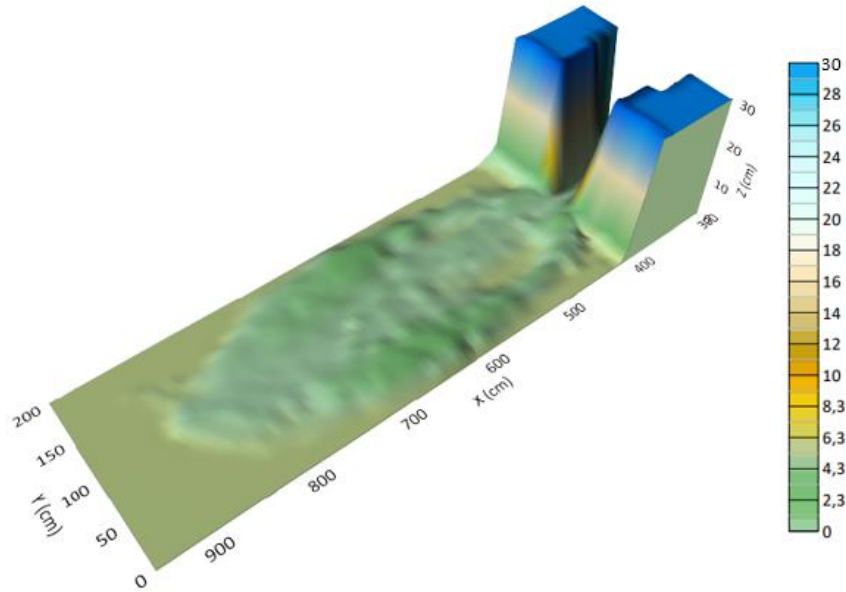


Şekil 6. Üstten aşma deneyi başladıktan a)-b) 108 sn, c)-d) 128 sn, e)-f) 159 sn sonra baraj mansabı ve baraj gövdesi

Figure 6. Downstream of the dam and dam body a)-b) 108 s, c)-d) 128 s, e)-f) 159 s after the beginning of overtopping experiment

Baraj gövdesinin nihai durumuna ulaşmasından sonra alınan derinlik ölçümleri kullanılarak Şekil 7'de gösterilen, barajın 3 boyutlu topografik çizimleri elde edilmiştir. Şekil 7 [13]'ün gözlemlerine göre değerlendirildiğinde, x yönündeki sediment yayılımının y yönündekine göre daha uzun olması taşkın

dalgasının x yönündeki hızının daha büyük olmasının bir sonucu olduğu söylenebilir. Taşkın dalgasının geçtiği kanal ortasında biriken sediment kalınlığının, sağ ve sol sahile göre daha az olması ise dalga eksenindeki hızın daha büyük olması ile açıklanabilir.



Şekil 7. Üstten aşma deneyi sonunda sediment yayılımının üç boyutlu haritası

Figure 7. Three dimensional map of the sediment distribution at the end of the overtopping experiment

3.2. Baraj gövdesinin borulanma senaryosu ile yıkılması

Borulanma deneyinde $t=0$ sn'de rezervuardaki su seviyesi 27 cm iken borulanma etkisiyle baraj mansabında gözlenen erozyon kırmızı ok ile Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. Borulanma deney başlangıcında baraj mansabı

Figure 8. Downstream of the dam at the beginning of the piping experiment

Rezervuarda bulunan su, baraj gövdesi içinden çok düşük bir hızla geçerek gövde mansabından, özellikle gövdenin tabana yakın kısmından gövdeyi terk etmiştir. Bu esnada gövde mansabının eteklerindeki sedimenti de harekete geçirerek mansap bölgesindeki erozyona sebep olmuştur. Baraj gövdesinin mansap eteklerinde oluşan erozyon çok yavaş ilerlediğinden tam yıkılma başlayana kadar 27 saat geçmiştir.

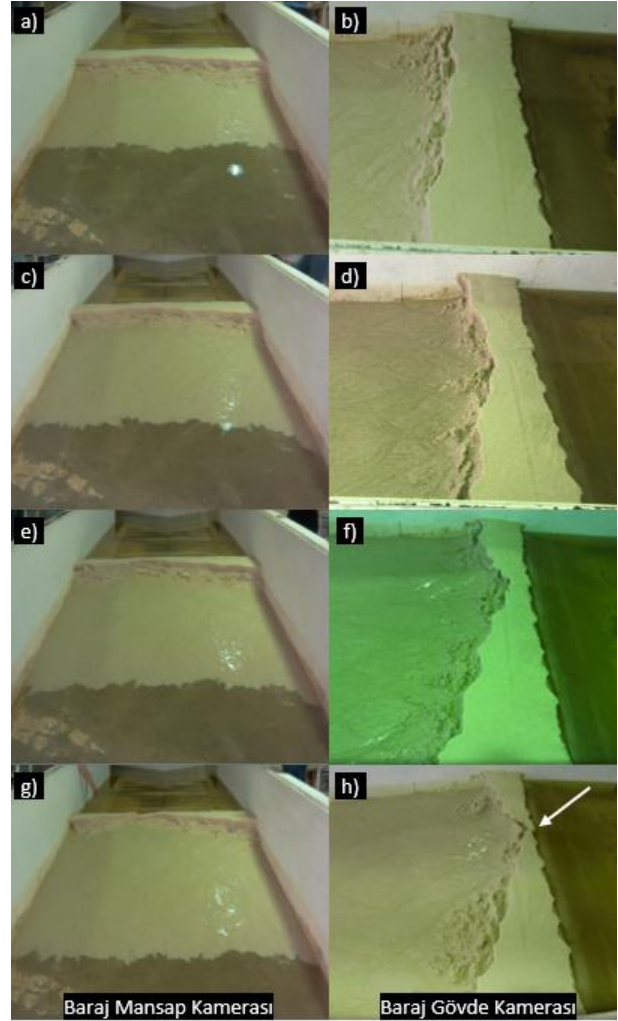
Şekil 9'da soldaki fotoğraflar mansap, sağdakiler baraj gövdesi kamerasından olmak üzere sırasıyla borulanma deneyi başladıktan 3, 23, 24, 27 saat sonra alınan görüntüler a-b, c-d, e-f ve g-h ile gösterilmektedir.

Borulanmanın etkisiyle baraj gövdesi mansap bölgesine doğru yayılmış ve yıkılma gerçekleşinceye kadar baraj kret kesit genişliği azalmaya devam etmiştir. Deney başladıktan 27 saat 4 dakika sonra yaklaşık $y = 140$ cm'de baraj üst kısmının çökmesiyle yıkılma hızlanmıştır. (Şekil 9.h).

Yıkılma başladıktan sonra, Şekil 10'da görüldüğü gibi, yıkılmanın başladığı noktadan mansap bölgesine doğru sedimentin yayılımı devam etmiştir. [10] tarafından yapılan çalışmayla benzer olarak, yıkıcı taşkın dalgasının etkisiyle başlangıçta baraj mansabına yayılmış olan sediment, (Şekil 10.a, Şekil 10.b ve Şekil 10.c'de verilen mavi elips ile gösterilen alan) oyulmaya başlamıştır.

Zamanla kademeli olarak oyulma bölgesinin uzunluğunun ve derinliğinin arttığı, yıkılma başladıktan 155 saniye sonra

($t=27$ s 4 dak+155 sn) maksimuma ulaştığı Şekil 10.c'de görülmektedir.



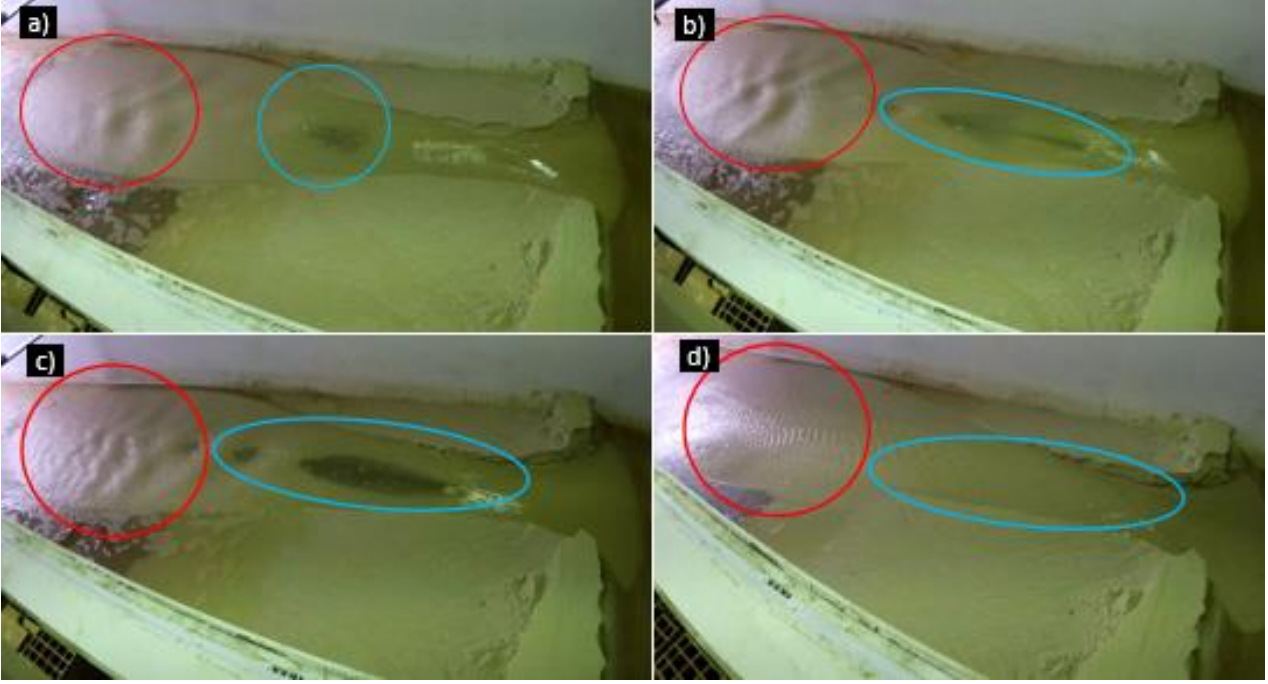
Şekil 9. Borulanma deneyinde baraj mansabı ve baraj gövdesi a)-b) 3 saat, c)-d) 23 saat, e)-f) 24 saat, g)-h) 27 saat

Figure 9. Downstream of the dam and dam body in piping experiment at a)-b) 3 h, c)-d) 23 h, e)-f) 24 h, g)-h) 27 h

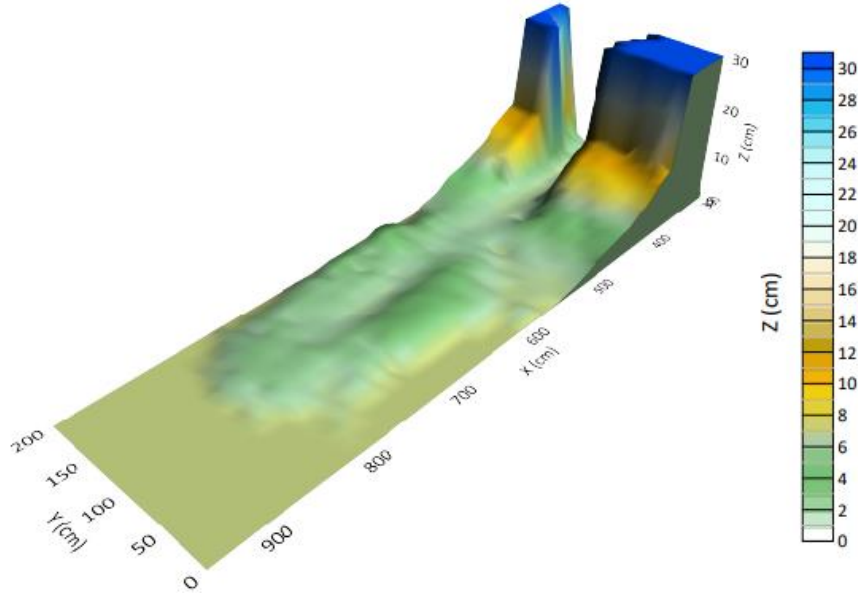
Yıkılmanın ilk 150 saniyesi içinde su kabarmaları gözlemlenmiş olup, başlangıçta baraj mansabında meydana gelen erozyona bağlı olarak üstten aşma deneyinde gözlenen su kabarmasına göre daha sönük özelliktedir (Şekil 10.a, Şekil 10.b, Şekil 10. c'de verilen kırmızı elips). Taşkın dalgasının şiddetinin azalmasıyla yıkılma başladıktan 614 saniye sonra sedimentin tekrar biriktiği gözlemlenmiş (Şekil 10.d'de verilen mavi elips) ve mansap bölgesindeki su kabarması etkisini kaybetmiştir (Şekil 10.d'de verilen kırmızı elips).

Yıkılma başlangıcından itibaren 690 saniye sonunda sediment yayılımı nihai haline ulaşmıştır. Borulanma deneyi boyunca, [18] ile benzer yıkılma süreçleri gözlemlenmiştir.

Deney sonundaki sediment kalınlığı verileri kullanılarak elde edilen 3 boyutlu topografik çizim Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 10. Borulanma deneyinde baraj yıkıldıktan a) 106 sn, b) 116 sn, c) 155 sn, d) 614 sn sonra sediment yayılımı
Figure 10. Sediment distribution in piping experiment a) 106 s, b) 116 s, c)155 s, d) 614 s after dam break



Şekil 11. Borulanma deneyi sonunda sediment yayılımının üç boyutlu haritası

Figure 11. Three dimensional map of the sediment distribution at the end of the piping experiment

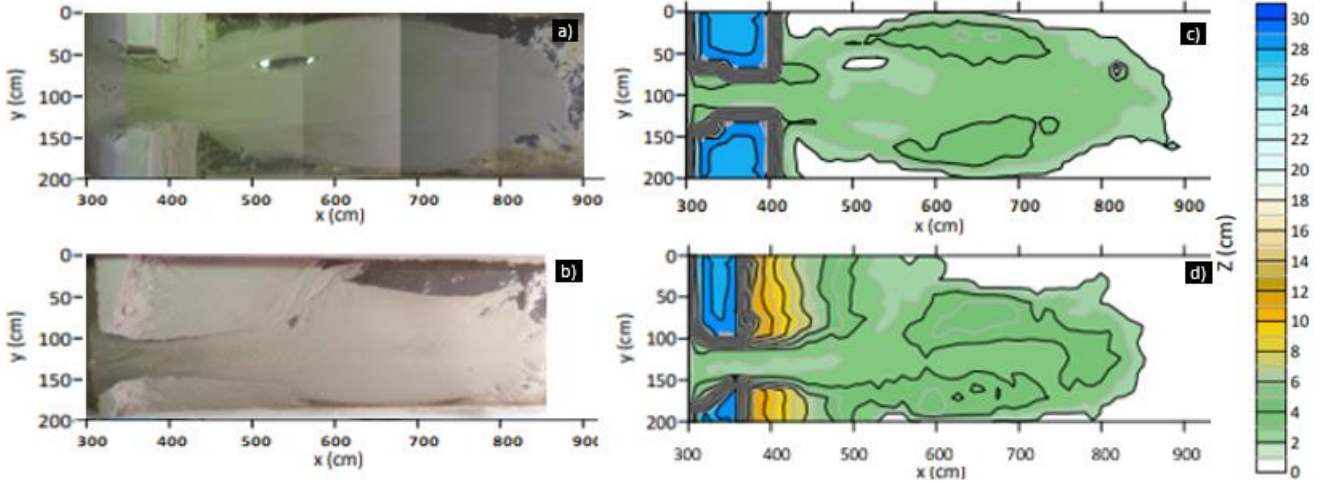
3.3. Yıkılma senaryolarının karşılaştırılması

Şekil 12'de üstten aşma ve borulanma senaryoları için sırasıyla a-b harfleriyle ifade edilen şekillerde deney sonunda barajın kanal boyunca üstten görünümü ve c-d harfleriyle ifade edilen şekillerde ise batimetri grafikleri verilmiştir.

Baraj gövdelerinin hazırlanma koşulları aynı olmasına rağmen, borulanma deneyinde yıkılmanın başlamasına kadar geçen 27 saatlik süre içinde gövdenin içinden geçen düşük hızdaki suyun

izlediği yol ve zayıf hale getirdiği bölgenin (iç dinamik) etkisiyle, gedik ekseninin 40 cm sağ sahile kaydığı ve baraj gövdesinin sağ sahile yakın bölgesinin taşındığı görülmektedir. Ayrıca, 27 saatlik süre içinde baraj gövdesinin mansap kısmı kayarak ilerlemiştir. Üstten aşma deneyinde bu süreç yaşanmadığından yayılan sediment hacmi ve kalınlığı farklılık göstermiştir.

Üstten aşma ve borulanma deneyinden elde edilen genel özellikler Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 12. Üstten aşma ve borulanma deney sonunda sediment yayılımı a) üstten aşma fotoğrafı, b) borulanma fotoğrafı, c) üstten aşma iki boyutlu harita, d) borulanma iki boyutlu harita

Figure 12. Sediment distribution at the end of the overtopping and piping experiments a) overtopping picture, b) piping picture, c) overtopping two dimensional map, d) piping two dimensional map

Tablo 1. Baraj yıkılma senaryolarının karşılaştırılması

Table 1. Comparison of the dam break scenarios

	Üstten aşma senaryosu	Borulanma senaryosu
Rezervuar Özellikleri:		
Su yüksekliği (cm)	25 cm	27 cm
Su hacmi (m ³)	6,41 m ³	6,92 m ³
Deney süresi ve önemli anlar:		
Baraj yıkılmasına kadar geçen süre	0 saat	27 saat 10 dakika
Toplam yıkılma süresi (sn)	920 sn	690 sn
Mansaba yayılan sediment özellikleri:		
Maksimum genişlik	1,85 m	2 m
Maksimum uzunluk	4,8 m	Bank üzerinde: 1,7 m Gedik mansabında: 4,3 m
Minimum yükseklik	0	Gedik mansabında: 0,78cm
Maksimum yükseklik	3,265 cm	Bank üzerinde: 18,8 cm Gedik mansabında: 6,09 cm
Maksimum yüksekliğin koordinatı (x, y)	(410 cm, 130 cm)	Bank üzerinde: (370, 10) Gedik mansabında: (400, 110)
Ortalama sediment kalınlığı (cm)	1,14 cm	2 cm
Baraj gövdesi gedik özellikleri:		
Genişliği (cm)	140 cm (3 m) / 70 cm (4 m)	80 cm (3 m) / 45 cm (4 m)
Gedik minimum kotu (cm)	9,45 mm	10,7 mm
Deney öncesi gövde hacmi (cm ³)	516000 cm ³	516000 cm ³
Deney sonunda gövde hacmi (cm ³) (300 cm ≤ x ≤ 406 cm arası)	443553 cm ³	326539 cm ³
Gedik hacmi (cm ³) (300 cm ≤ x ≤ 406 cm arası)	72447 cm ³	189461 cm ³

Tablo 1 incelendiğinde, borulanma deneyinde baraj mansap eteğinde meydana gelen erozyon deney başlayıncaya kadar geçen süreyi uzatmıştır. Baraj yıkıldıktan sonra nihai duruma kadar geçen süre üstten aşma deneyinde 920 sn iken borulanma deneyinde 690 sn'dir.

Nihai durumda, yayılan sediment üstten aşma deneyinde 1,85 m genişliğinde ve 4,8 m uzunluğundayken borulanma deneyinde başlangıçta meydana gelen erozyona bağlı olarak baraj genişliği boyunca gövde taşınmıştır ve 2 m genişliğinde, bank üzerinde 1,7 m; gedik mansabında 4,3 m uzunluğunda sediment yayılmıştır.

Borulanma deneyinde sızma-erozyonla baraj gövdesinden taşınan bölgenin taşkın dalgası hızını azaltması; üstten aşma deneyinde meydana gelen daha geniş, daha uzun sediment yayılımını ve yayılan sedimentin kalınlığının daha az olmasını açıklamaktadır.

Üstten aşma deneyinde gediğin baraj ortasından genişlemesiyle taşkın dalgası buradan ilerlemiş ve sedimentin baraj mansabına simetrik yayıldığı gözlemlenmiş, baraj mansabında kanalın sağ ve sol duvarlarına yakın bölgelerde daha fazla sediment biriktiği görülmüştür. Barajın sağ ve sol tarafı ayakta kalmıştır.

Borulanma deneyinde baraj kanalın sağ sahiline yakın bölgeden yıkıldığından, taşkın dalgası baraj gövdesinden taşınan sedimentin sol sahilde birikmesine neden olmuş ve kanalın sol sahilinde yayılan sediment kalınlığının, sağ sahile göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Borulanma deneyinde deney başlangıcından önce geçen zamanda gelişen erozyona bağlı olarak gedik hacmi üstten aşmaya göre daha küçük olmasına rağmen baraj gövdesinden taşınarak yayılan sediment hacmi daha fazla olmuştur.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışma kapsamında, homojen toprak dolgu barajların üstten aşma ve borulanma sebebiyle yıkılması sonucunda taşkın dalgasının etkisiyle gerçekleşen sediment taşınımını ve yayılımını belirleyebilmek için iki deney yapılmıştır.

Borulanma nedeniyle barajın yıkılması, baraj rezervuarındaki suyun baraj gövdesindeki sedimenti mansap eteğine taşınması ve kret genişliğinin zamanla azalmasından sonra başladığı için suyun üstten aşması durumundakine göre daha uzun sürmüştür.

Taşkın dalgasının etkisiyle mansap bölgesine üstten aşma deneyinde baraj gövdesinin orta kısmı taşınmışken, borulanma deneyinde 27 saatlik sızma-erozyon süresince suyun izlediği yol ve zayıf hale getirdiği bölgeler gibi iç dinamikler nedeniyle baraj ortasından 40 cm mesafedeki kesitten yıkılma başlamış ve sağ sahile yakın bölge taşınmıştır.

Her iki deneyde de taşkın dalgasının geldiği eksen boyunca yayılan sedimentin kalınlığının daha az olduğu görülmüştür. Ayrıca taşkın dalgasının etkisiyle oluşan su kabarmasının şiddeti borulanma deneyinde daha düşüktür.

Borulanma deneyinde erozyon, baraj mansap eteğinde sediment kalınlığının üstten aşmaya göre daha fazla olmasına yol açmıştır. Borulanma deneyinde sızma-erozyonla baraj gövdesinden taşınan bölgenin taşkın dalgasını şiddetini azaltması, üstten aşma deneyinde daha uzun ve daha geniş sediment yayılımıyla sonuçlanmıştır. Borulanma deneyinde nihai durumdaki ortalama sediment kalınlığının üstten aşmaya göre daha fazla elde edilmiştir.

Daha sonra yapılacak çalışmalarda baraj rezervuarındaki suyun anlık hızları, taşkın dalgasının hızı, taşkın dalgasının yayıldığı bölgede noktasal anlık hız ve türbülans parametreleri ile sediment kalınlığının anlık değişim değerlerinin belirlenmesi daha kapsamlı bilgi edilmesini sağlayacaktır.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 119M959 No'lu Proje ile desteklenmektedir.

Yazar katkılarının beyanı

Deneylerin yapılması ve literatür taraması aşamasında Zehra Büyüker, Ebru Taşkaya, Adile Nur Solmaz, Onurhan Karakaya görev almıştır. Verilerin analiz edilmesi ve makale yazımı kısmını Zehra Büyüker ve Ebru Taşkaya üstlenmiştir. Fikir oluşturma, deneylerin tasarımı ve eleştirel incelemeleri Gökçen Bombar ve Gökmen Tayfur gerçekleştirmiştir.

Kaynaklar

- [1] Orhon, M. 1997. Baraj Tipleri ve Yapım Kriterleri, Türkiye Mühendislik Haberleri, Cilt. 391, s. 12-16.
- [2] Çalamak, M., Arıcı Y., Yanmaz A.M. 2013. Türkiye'de Baraj Mühendisliğinin Gelişimi Üzerine Bir Değerlendirme. 3rd Hydraulic Structures Symposium. Ankara. Sayı 1. DOI:10.13140/2.1.2943.9686.
- [3] Bozkuş, Z. 2004. Afet Yönetimi İçin Baraj Yıkılma Analizleri, Teknik Dergi, Cilt. 74, s. 3335-3350.
- [4] Xu, Y., Zhang, L.M., Jia, J. 2008. Lessons From Catastrophic Dam Failures in August 1975 in Zhumadian, China. Hong Kong University of Science and Technology, American Society of Civil Engineers, Archived from the original on 2020-03-25.
- [5] Solava, S., Delatte, N. 2003. Lessons from the Failure of the Tton Dam. Forensic Engineering, s. 178-189. San Diego: American Society of Civil Engineers.
- [6] Zorluer, I. 2001. Toprak Dolgu Barajlarda Borulanma ve Bir Borulanma Göçmesi: Teton Barajı, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Cilt. 1, s. 135-141.
- [7] Foster, M.A., Fell, R., Spannagle, M. 2000. The Statistics of Embankment Dam Failures and Accidents, Canadian Geotechnical Journal, Cilt. 37, s. 1000-1024.
- [8] Fell, R., Wan, C.F., Cyganiewicz, J., Foster, M. 2003. Time for Development of Internal Erosion and Piping in Embankment Dams, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Cilt. 129, s. 307-314.
- [9] Wu, W., Altınakar, M., Al-Riffai, M., Bergman, N., Bradford, S., Cao, Z., et al. 2011. Earthen Embankment Breaching, Journal of Hydraulic Engineering, Cilt. 137, s. 1549-1564. DOI:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000498.
- [10] Cao, Z., Pender, G., Wallis, S., Carling, P. 2004. Computational Dam-Break Hydraulics over Erodible Sediment Bed, Journal of Hydraulic Engineering, Cilt. 130, s. 689-703.
- [11] Wu, W., Wang S.S. 2007. One-Dimensional Modeling of Dam-Break Flow over Movable Beds, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE.
- [12] Güney, M.S., Tayfur, G., Bombar, G., Elçi, Ş. 2014. Distorted Physical Model to Study Sudden Partial Dam Break Flows in an Urban Area, Journal of Hydraulic Engineering, Cilt. 140.
- [13] Elçi, Ş., Tayfur, G., Haltas, İ., Kocaman, B. 2017. Baraj Yıkılması Sonrası İki Boyutlu Taşkın Yayılımının Yerleşim Bölgeleri İçin Modellenmesi, Teknik Dergi, Cilt. 28(3), s. 7955-7975.
- [14] Kocaman, S., Güzel, H. 2011. Baraj Yıkılması Taşkın Dalgası Yayılımının 3-Boyutlu Deneysel ve Nümerik Karşılaştırılması, Engineering Sciences, Cilt. 6(1), s. 406-414.
- [15] Kocaman, S. 2002. Baraj Yıkılması Analizi ve Uygulaması. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana.
- [16] Arıkş T. 2020. Baraj Yıkılması Sonucu Oluşan Taşkın Dalgalarının Deneysel ve Nümerik Metodlar ile Araştırılması. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir.
- [17] Dumlu, E. 2022. Experimental and Numerical Investigation of the Evolution of Piping and Resulting Breach in Earth-fill Dams. İzmir Institute of Technology, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Master's Thesis, İzmir.
- [18] Okeke, A. C., Wang, F., Sonoyama, T., Mitani, Y. 2012. Laboratory Experiments on Landslide Dam Failure Due to Piping: an Evaluation of 2011 Typhoon-Induced Landslide and Landslide Dam in Western Japan. Environmental Science and Engineering, s. 525-545.
- [19] Taşkaya, E. 2023. Experimental Investigation of Propagation of Sediment Due to Earth-fill Dam Break. İzmir Katip Çelebi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Master's Thesis, İzmir.
- [20] Taşkaya, E., Bombar, G., Tayfur G. 2022. Experimental Investigation of Sediment Movement as a Result of Homogeneous Earth-Fill Dam Overtopping Break over a Simplified Urban Area, Journal of Hydrology, Cilt. 617 (B).
- [21] Oğuzhan Güven, S. 2022. Baraj Yıkılması Durumunda Bitki Örtüsünden Kaynaklı Pürüzlülüğün Taşkın Dalgası Yayılımı Üzerine Etkisinin Deneysel ve Sayısal Olarak Araştırılarak Sonuçların Akıllı Kent Acil Eylem Planında Kullanılabilirliğinin Değerlendirilmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir.

- [22] Wahl, T.L. 1996. Prediction of Embankment Dam Breach Parameters: Literature Review and Needs Assessment. USBR, Dam Safety Report DSO-98-004
- [23] Demirpençe, H. 1995. Toprak Dolgu Barajların Yıkılması ve Oluşan Taşkın Dinamik Öteleme Metodu ile İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.