

## Mansap Pürüzlülüğünün Toprak Dolgu Barajın Üstten Aşma ile Yıkılması Durumunda Taşkın Dalgası ve Sediment Yayılımına Etkisinin Deneysel olarak İncelenmesi

Zehra BÜYÜKER<sup>1\*</sup>, Ebru TAŞKAYA<sup>2</sup>, Gökçen BOMBAR<sup>3</sup>, Gökmen TAYFUR<sup>4</sup>

<sup>1,2,3</sup> İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, İzmir, Türkiye

<sup>4</sup> İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir, Türkiye

\*1 zehra.buyuker@ikcu.edu.tr, <sup>2</sup> ebruutsky@gmail.com, <sup>3</sup> gokcen.bombar@ikcu.edu.tr, <sup>4</sup> gokmentayfur@iyte.edu.tr

(Geliş/Received: 20/09/2023;

Kabul/Accepted: 27/03/2024)

**Öz:** Baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın hareketinin belirlenmesi, mansap bölgesindeki mevcut yerleşim yerlerinde yıkılma sonrası meydana gelebilecek risklerin saptanması ve önlenmesi açısından önemli bir konudur. Sel nedeniyle suyun yayılması ve sediment taşınımının analiz edilmesi, taşkın hareketinin belirlenmesi için toprak dolgu barajlarda incelenen faktörler arasındadır. Bu çalışmada, üstten aşma ile yıkılan homojen toprak dolgu barajın mansabında yerleşim bölgesi bulunup bulunmamasının taşkın hareketine etkisi araştırılmıştır. Dikdörtgen kesitli betonarme kanalda medyan dane çapı  $d_{50}=0,441$  mm olan malzemeyle baraj gövdesi oluşturulmuştur. Barajın temelde genişliği 106 cm ve krette genişliği 10 cm ve gövde yüksekliği 30 cm'dir ve 1:1,6 memba ve mansap eğimlerine sahiptir. Her biri 10 cm olan üç kat sedimentin kademeli olarak serilmesi, her katın 1,5 kg ağırlık ile sıkıştırılması, eğimin verilmesi ve kret üzerine bir gedik açılması ile baraj gövdesi hazır hale gelmiştir. Baraj mansabına yerleşim alanını simüle etmesi için 10x10x10 cm'lik 13 adet beton küp yerleştirilmiştir. Baraj membasında su seviyesi kret seviyesine kadar kademeli olarak arttırılmış, açılan gedikten suyun baraj mansabına geçmesi sağlanmıştır. Deneyler yapılırken 2 kamera ile sedimentin yayılımı kayıt altına alınmıştır, 3 farklı noktada su derinlikleri ölçülmüştür. Deneyler sonunda yapılan ölçümler ile sedimentin derinlik profilleri elde edilmiştir. Baraj mansabında yerleşim yeri bulunması durumunda, küplere çarpan taşkın dalgasının hızı azalmış ve cetvele ulaşma süresi artmıştır. Küplerin etkisiyle baraj mansabında ölçülen taşkın dalgası derinlikleri artmıştır. Küplerin memba ve mansap bölgelerinde köprü ayağına benzer olarak oyulmalar ve birikmeler meydana gelmiştir. Bu birikmelere bağlı olarak yayılan sediment kalınlığı pürüzlü deneyde artmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Toprak dolgu baraj yıkılması, sediment taşınımı, üstten aşma, pürüzlülük.

## Experimental Investigation of the Effect of Downstream Roughness on Flood Wave and Sediment Propagation in case of an Earth-Fill Dam Break by Overtopping

**Abstract:** Detection of flood propagation resulting from the failure of the dam is an important topic in terms of detecting and preventing risks that may occur after the dam break in the residential areas at the downstream region. The analysis of flood movement and sediment transport due to flooding is among the factors examined to determine flood movement in earth-fill dams. In this study, the effect of the presence of a residential area at the downstream of the homogeneous earth-fill dam, which was failed by overtopping, on the flood movement was investigated. The dam body was built in a rectangular reinforced concrete channel with a material, which has  $d_{50} = 0.441$  mm median grain diameter. The width of the dam at the foundation is 106 cm, the width at the crest is 10 cm and the body height is 30 cm. and upstream and downstream slopes of 1:1.6. The dam body is ready by laying three layers of sediment, each layer of which is 10 cm, gradually, compacting each layer with a weight of 1.5 kg, giving the slope and opening a breach on the crest. 13 concrete cubes of 10x10x10 cm were placed to simulate the residential area in the downstream of the dam. The water level at the upstream of dam was gradually increased until the crest level and it was ensured that the water passed from the breach to the downstream of the dam. During the experiments, the distribution of the sediment was recorded with 2 cameras, water levels were measured at 3 different points. Depth profiles of the sediment were obtained with the measurements taken at the end of the experiments. In the case of residential area at the downstream of the dam, the speed of the flood wave hitting the cubes decreases and the time to reach the ruler increases. With the effect of the cubes, the flood wave depths measured downstream of the dam body have increased. Scours and accumulations similar to bridge piers have occurred in the upstream and downstream regions of the cubes. Depending on these accumulations, the sediment height spreading to the settlement area has increased.

**Key words:** Earth-fill dam failure, sediment transport, overtopping, roughness.

### 1. Giriş

Çok eski zamanlardan beri su ihtiyacını karşılamak için büyük nehirler üzerine kurulan barajlar, özellikle bol yağış alan bölgelerde selden gelen fazla suyu kontrol altına alarak sel taşkınlarını önlemiş ve suyu bir rezervuarda depolamıştır. Günümüzde ise enerji üretimi, tarımsal sulama, sanayi ve içme suyunun büyükşehir ağlarına

\* Sorumlu yazar: [zehra.buyuker@ikcu.edu.tr](mailto:zehra.buyuker@ikcu.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0001-9987-0951, <sup>2</sup> 0000-0003-1265-600X, <sup>3</sup> 0000-0002-8156-6908, <sup>4</sup> 0000-0001-9712-4031

ulaştırılması, su ürünleri yetiştiriciliği ve atık endüstrisi gibi çeşitli amaçlarla beraber ekolojik yönetime de hizmet eden su yapılarıdır [1]. Mühendislik alanındaki teknolojik gelişmeler, bu önemli yapıların daha büyük boyutta inşaa edilmesine olanak sağlamıştır. Ancak barajların boyutlarının büyümesi ile artan rezervuar hacmi, farklı sebeplerden baraj yıkılması sonucu hızla yayılan taşkın dalgasının etkisiyle baraj mansabında, özellikle yoğun nüfuslu bölgelerde, ciddi can ve mal kayıplarına sebebiyet veren bir tehlike arz etmektedir [2].

ABD’de 1889 yılında South Fork Barajı’nın yıkılması sonucu 2200 kişi hayatını kaybetmiştir. İtalya’da 1963 yılında dünyanın en büyük barajı olan Vajont Barajı’nın yıkılması, 2600 kişinin ölmesine ve çevresindeki köylerin neredeyse tamamen yok olmasına sebep olmuştur [3]. Ayrıca Çin Halk Cumhuriyeti’nde, 8 Ağustos 1975 tarihinde yıllık yağış miktarının bir gün içinde düşmesi sonucu meydana gelen olayda, büyüklü küçüklü 62 adet baraj yıkılmış olup tarihteki en büyük baraj felaketi olarak bilinmektedir. Taşkın esnasında 26.000, sonraki süreçte açlık ve salgın hastalıklar sebebiyle 145.000 kişi hayatını kaybetmiş, 5.960.000 bina yıkılmıştır. 2019 yılında Brezilya’da Feijão demir cevheri madeni yakınındaki 12 milyon metre küp kapasitesi olan barajın yıkılmasıyla barajdaki atık su, baraj tesislerini, yakındaki yerleşimleri çamura gömmüştür. 2023 yılında Libya’nın Derne şehrinde sel ve fırtınanın etkili olması sonucu iki baraj yıkılmış olup Derne kentinin dörtte biri sular altında kalmıştır. Bu felaket, binlerce kişinin ölümüne ve kaybolmasına neden olmuştur.

Verilen felaket örnekleri her ne kadar nadir meydana gelebilecek olsa da baraj güvenliğinin önemini ve yıkılma sonucu oluşan kayıpların ne kadar büyük olduğunu göstermektedir. Bu zararların en aza indirgenmesi için deneysel ve nümerik çalışmalardan elde edilen taşkın yayılımı ve taşkın dalgalarının yerleşim alanlarına ulaşma süresi verileri kullanılarak baraj mansabında taşkına maruz kalacak alanların önceden belirlenmesi ve bölgede yaşayan insanları erken uyararak ve tahliye etmek için acil durum planı hazırlanması ve zarar risk haritalarının oluşturulması büyük önem taşımaktadır [4], [5].

Tingsanchali ve Chinnarasri [6], bir kanalda homojen bir baraj gövdesi inşaa ederek deneyler yapmış ve tek boyutlu olarak modellemişlerdir. Güney vd. [7], Ürkmez Barajı’nın üç boyutlu çarpık bir fiziksel modelini inşaa ederek barajın yıkılması sonucu oluşan taşkın dalgasını incelemişlerdir. Model, memba rezervuarı, baraj gövdesi ve mansap bölgesinin topoğrafya ve yapılaşma temsilinden oluşmaktadır. Cao vd. [8], yıkılan barajlardaki hareketli tabanı inceleyerek üstten aşmanın neden olduğu morfolojik yapının gelişimini tahmin etmeyi amaçlamışlardır. Sığ su hidrodinamiğine göre bir model geliştirmişlerdir. Baraj yıkılmasının ardından mansap bölgesinde ağırlıklı olarak taşkın dalgası taban formları elde etmişler ve sediment erozyonuna bağlı olarak oluşan hidrolik sıçramanın zamanla kaybolduğunu gözlemlemişlerdir. Paşa vd. [9], HEC-RAS programında ardışık iki baraj olan Elmalı 1 ve Elmalı 2’den, beton payandalı Elmalı 2 Barajı’nın, Elmalı 2’nin gedik oluşma süresi ve yıkılan payanda sayısı ile Elmalı 1’in rezervuar hacmi parametreleri değiştirilerek 88 adet yıkılma analizi yapmışlar ve taşkın mansap bölgesinde yer alan yüksek yoğunluklu yerleşim alanı ve otoyol üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Elde edilen maksimum su derinliği, maksimum debi gibi veriler üzerinde Elmalı 1’in rezervuar hacminin önemli bir etkisi olmadığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, su baskını ve taşkın tehlike haritaları kullanılarak karşılaştırmalı alan değişim analizi ile potansiyel taşkınlardan etkilenen toplam alan hesaplanmıştır. Najar ve Gül [10], Ürkmez Barajı’nın üstten aşma ve borulanma sebebiyle yıkılma ve taşkın dalgası yayılımını incelemek ve tehlike haritalarını elde etmek için farklı başlangıç koşulları ve gedik oluşma parametreleri altında HEC-RAS iki boyutlu hidrodinamik modelini kullanmışlardır. Ürkmez Barajı’nın gedik parametrelerini tahmin etmek için ise baraj gedik özelliklerini (örneğin, baraj gedik büyüklüğü ve gedik oluşum süresi) tahmin etmeye yönelik beş farklı modelleme yaklaşımı dikkate alınmıştır. Rezervuardaki beş farklı su seviyesi için yapılan analizler sonucunda, Froehlich yaklaşımının baraj gedik parametrelerinin tahmininde en makul yöntem olduğu elde edilmiştir. Ayrıca, duyarlılık analizi, gedik eğimi parametresinin tepeye ulaşma süresi ve maksimum debi üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını göstermiştir. [11] yaptığı çalışmada, taşkın dalgasının hızını ve maksimum değerini belirleyen gedik oluşum mekanizması, oluşum hızı ve son boyutlarını etkileyen önemli parametrelerin baraj gövde malzeme kohezyonu, iç sürtünme, sızma koşulları, sıvı-sediment etkileşimi ve porozite olduğunu göstermiştir. Yılmaz vd. [12], Dalaman Akköprü Barajı’nın üstten aşma ve borulanma senaryoları ile yıkılması durumunda meydana gelecek akış derinliğini, hızını ve mansap bölgesinde bulunan yerleşim yerlerinin tehlike seviyelerini, sığ su ve difüzyon dalga denklemlerini kullanarak HEC-RAS programında modellemişlerdir. Elde edilen sonuçlar hem sığ su hem de difüzyon dalga denklemleri için su altında kalan alanlar benzer olmasına rağmen akış derinliği ve hız değerlerinin önemli ölçüde farklı olduğunu göstermiştir. Ayrıca, çoğu yerleşim yerindeki hasar riskinin yüksek olduğu ortaya koyulmuştur. [13] baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın dalgasının üç boyutlu yayılımını deneysel ve sayısal olarak inceledikleri çalışmada, barajı temsil eden düşey kapağın ani olarak kaldırılması ile baraj yıkılması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma sonucunda, dalga önünden geriye doğru gidildikçe hızın azaldığı ve rezervuardaki akımda çok az hareketlenme olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca dalganın yanal yöndeki hız bileşenlerinin akım doğrultusundaki hız bileşenlerinden daha küçük olduğunu gözlemlemişlerdir. [14] yaptıkları çalışmada, kil çekirdekli kurgusal dolgu barajın rezervuarındaki suyun ani çekilmesi durumunda Fellenuis, Bishop, Janbu, Morgenstern-Price ve Spencer yöntemlerini kullanarak dolgu seviyesini kontrol etmişlerdir.

Rezervuarda ani su çekilmesi başladıktan sonra kısa sürede baraj yüzünün kaymasına karşı güvenlik faktörünün bir miktar azaldığı, ardından artmaya başladığı sonucuna varılmıştır.

Baraj yıkılması sonucu sediment yayılımı üzerine güncel çalışmalardan biri Taşkaya vd.'nin [15] iki farklı gedik derinliği ve genişliğinde; pürüzlü mansap koşulu altında yaptığı deneysel çalışmadır. Deneyler sonucunda gedik derinliğinin artmasıyla sediment taşınımının azaldığı ve barajın mansabındaki sediment kalınlığının arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu konuda yapılan bir diğer çalışma, Taşkaya vd. [16] 60 cm yüksekliğinde, 202 cm genişliğindeki baraj gövdesinin pürüzlü ve pürüzsüz mansap koşulunda olmak üzere üstten aşma senaryosu ile yıkılması durumunu inceledikleri tekrarlı 2 deney için elde ettikleri sonuçlardır. Kanal ekseninde biri baraj gövdesinde ( $x=1,07$  m), biri baraj mansap sınırında ( $x=2,02$  m) ve diğeri baraj mansap bölgesinde ( $x=5,0$  m) olacak şekilde üç farklı noktada, ULS-40D sensörleriyle derinlik değişimleri deneyler boyunca ölçülmüştür. Deneyler sonunda taşınan sedimentin derinlik profilleri yine ULS-40D cihazıyla elde edilmiştir. Elde edilen veriler, iki koşulda da baraj gövdesinin büyük bir kısmının taşkın dalgasının etkisiyle yıkıldığını göstermiştir. Yıkılmanın etkisiyle yerleşim yerini simüle eden tüm küpler çamurlu akıma maruz kalmış olup taşkın dalgasının yüksekliği mansap bölgesine yakın bazı küplerin yüksekliğini aşmıştır. Ayrıca, mansap bölgesinde yerleşim yeri bulunması durumunda sediment kalınlığının arttığı gözlemlenmiştir.

Baraj yıkılmalarının önlenmesi ve azaltılması için araştırılması gereken bir diğer konu barajların yıkılma analizlerinin yapılması olup Zhang vd. [17], literatürde yer alan 593 adet barajın özelliklerini (toprak, beton, taş vb.) ve yıkılma bilgilerini toplayıp karşılaştırdıklarında, yıkılan barajların %65,5'inin toprak dolgu baraj olduğunu ve bu barajların üstten aşma, borulanma, yetersiz temel, doğal afetler, yapıda bulunan kusurlar ve kasıtlı yıkılmalar gibi sebeplerden yıkıldığını görmüşlerdir. Toprak dolgu barajlarda en çok yıkılmaya neden olan faktörün ise %36,4 ile üstten aşma olduğunu kaydetmişlerdir. Üstten aşma ile yıkılma durumunda, yetersiz dolu savak kapasitesi ve taşkınlar nedeniyle baraj rezervuarındaki su, baraj tepe (kret) genişliği boyunca baraj gövdesini aşmakta ve mansap yüzüne ulaşmaktadır. Baraj mansabında başlayan gedik oluşumu baraj memba yüzüne doğru ilerlemektedir. Yıkılma, akımın baraj gövdesini aşındırarak gediği üçgen, trapez ya da dikdörtgen olarak genişletmesi ile daha fazla suyun baraj mansabına geçmesi sonucu meydana gelmektedir [18].

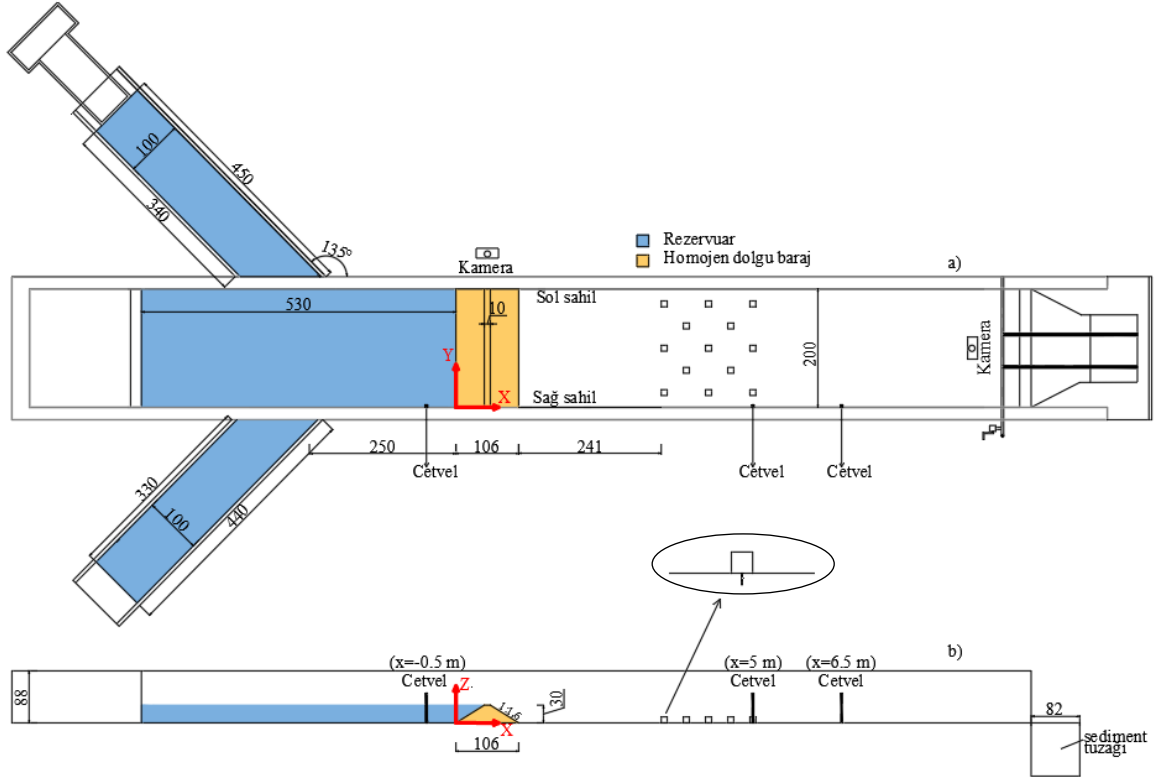
En fazla yıkılmaya maruz kalan toprak dolgu barajlarda taşkın hareketinin belirlenebilmesi için incelenmesi gereken faktörler sel sularının yayılması ve baraj gövdesinden mansap bölgesine taşınan sediment olmasına rağmen daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde, yapılan modellemeler ile taşkın dalgalarının hidrodinamik yapısının belirlenmesi üzerine yoğunlaşıldığı, baraj yıkılması sonucu taşınan dolgu malzemesinin hareketi ve yayılımı üzerine bir boşluk olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada yapılan deneylerde mansap bölgesinde küplerin olduğu durum pürüzlü, olmadığı durum ise pürüzsüz durum olarak tanımlanmıştır. Baraj mansabının pürüzlü ve pürüzsüz olma durumundaki sediment yayılımı ve su derinliğindeki farklılıklarının belirlenmesi amacıyla Taşkaya vd. [19] 30 cm yüksekliğindeki pürüzsüz mansaba sahip homojen toprak dolgu barajın üstten aşma senaryosu ile yıkılması sonucu elde edilen veriler ile aynı deney şartları altında baraj mansabında yerleşim yeri olması (pürüzlü mansap koşulu) durumunda oluşan sonuçlar karşılaştırılmıştır.

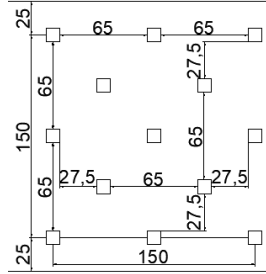
## 2. Deneysel Düzenek

Bu çalışmadaki deneyler, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi hidrolik laboratuvarında bulunan genişliği 2 m, uzunluğu 18 m ve derinliği 0,88 m olan dikdörtgen kesitli betonarme açık kanalda gerçekleştirilmiştir. Deneysel düzenek kanal ve ana kanala 45° açıyla bağlı 4,5 (sağ kol) ve 4,4 m (sol kol) uzunluğunda, 1 m genişliğinde ve 0,88 m derinliğinde yan kollardan oluşmaktadır. Boyutları Şekil 1'de verilen 200 cm genişliğe, 10 cm kret genişliğine, 30 cm yüksekliğe, 1:1,6 memba ve mansap eğimlerine sahip homojen dolgu barajlar, ek rezervuar haznesi amacına hizmet eden iki yan kolun birleşiminden 3 m sonra inşa edilmiştir. Baraj rezervuarı Şekil 1'de mavi renkle gösterilmiş olup bodrum katta bulunan depodaki su bir pompa yardımıyla üst kata iletilmiş ve rezervuar hacmi doldurulmuştur. Deneysel çalışmada herhangi bir kuyruk suyu mevcut olmadığından mansap koşulları kuru durumdadır. Deneylerin yapıldığı kanal tabanının betonarme olmasına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü mevcuttur.

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen pürüzsüz olarak adlandırılan deneyde baraj mansabı boş bırakılmış [19], pürüzlü deneyde ise, yerleşimi simüle etmek amacıyla barajın mansap bölgesine 13 adet 10 cm x 10 cm x 10 cm'lik beton küp bloklar Şekil 2'deki gibi şaşırtmalı olarak yerleştirilmiştir. Şekil 1 detayında gösterildiği gibi küpler, vida yardımıyla zemine rijit olarak sabitlenmiştir.



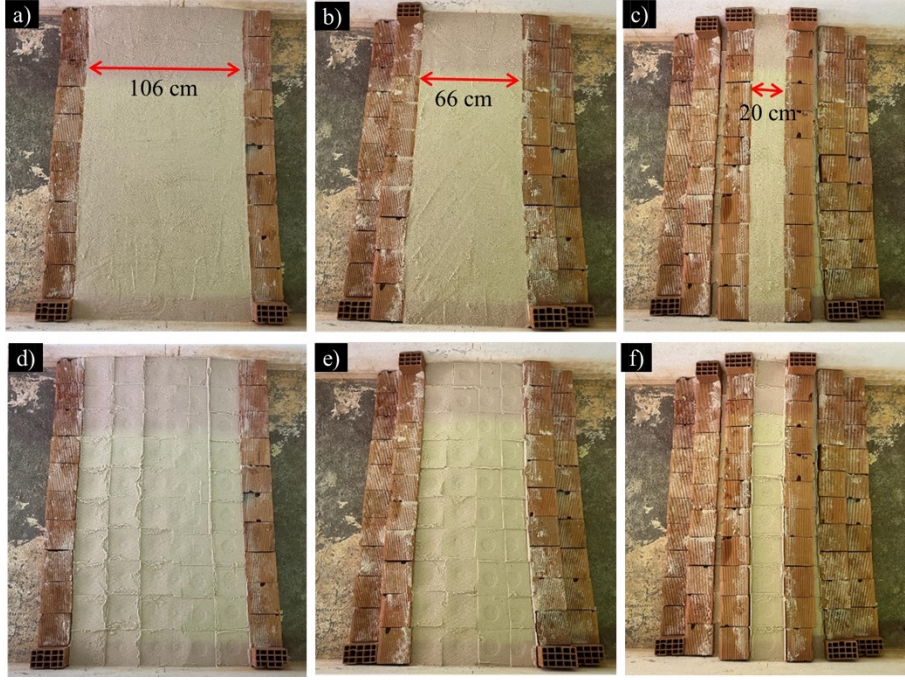
Şekil 1. Deneysel düzeneğin a) plan ve b) boyuna kesit görünümü (bütün birimler cm'dir.)



Şekil 2. Küp plan yerleşim detayı

### 3. Deneysel Yöntem

Pürüzlü deney için baraj gövdesi, [19]'da yapılan pürüzsüz deneydeki ile eşit boyutlarda ve aynı yöntem ile oluşturulmuştur. Baraj gövdesi, her bir katı 10 cm yüksekliğe sahip 3 kattan oluşmaktadır. Baraj gövdelerinin inşasında 0,441 mm medyan dane çapına sahip ( $d_{50}=0,441$  mm), yaklaşık 400 kg sediment kullanılmıştır. Şekil 3.a'da gösterildiği gibi barajın ilk katmanının memba ve mansap sınırlarını oluşturmak amacıyla birer sıra tuğla dizilmiş ve içi sediment ile doldurulmuştur. Standart sıkıştırma miktarını sağlayabilmek amacıyla ilk kat sedimenti yerleştirilip su terazisi ile düzlüğü kontrol edildikten sonra ve 1,5 kg ağırlık 20 cm yükseklikten 20 cm x 20 cm'lik levha üzerine 10 kez düşürülmüştür (Şekil 3.d). İkinci kat ve üçüncü kat için aynı işlemler tekrarlanmıştır. Baraj gövdesinin inşa aşamaları, sedimentin serildikten sonraki görüntüsü Şekil 3.a, Şekil 3.b ve Şekil 3.c'de, sıkıştırıldıktan sonraki durumu ise Şekil 3.d, Şekil 3.e, Şekil 3.f'de sunulmuştur [19].



Şekil 3. Baraj gövdesinin oluşturulması için sedimentin yerleştirilmesi a) 1. kat, b) 2. kat, c) 3. kat, sıkıştırılmış katmanlar d) 1.kat, e) 2. kat, f) 3. kat

Baraj gövdesi, 3. katın sıkıştırılması sonucu, yükseklik 30 cm'e ulaştığında, kademeli olarak inşa edilen baraj gövdesine 1:1,6 olan memba ve mansap eğiminin verilmesi ve 5 cm derinliğe sahip gediğin açılmasıyla hazır hale gelmiştir. (Şekil 4).



Şekil 4. Baraj gövdesi

Deneyden önce baraj rezervuarı doldurulurken baraj gövdesinin zarar görmemesi için plastik örtü serilmiştir ve su seviyesi gedik seviyesine ulaşana kadar baraj gövdesi bu örtüyle korunmuştur (Şekil 5). Rezervuardaki su seviyesi eşik seviyesine geldikten sonra örtü mansaba doğru yavaşça kaydırılarak çekilmiş ve deney düzeneğinden uzaklaştırılmıştır.

Baraj rezervuarındaki suyun gediği aşır baraj mansabına ulaştığı an deney başlangıcı ( $t=0$  s) olarak kabul edilmiştir. Deneyler, biri baraj gövdesini diğeri baraj mansabını göreceğ şekilde yerleştirilen 2 adet kamera (baraj gövdesini gören video çözünürlüğü 1080 piksel 30 fps olan GoPro Hero5, baraj mansabını gören video çözünürlüğü 720 piksel 30 fps olan bood aksiyon kamerası) ile kayıt altına alınmıştır. Ayrıca biri barajın membasında ( $x=-0,5$  m), diğeri ikisi barajın mansap bölgesinde ( $x=5$  m ve  $x=6,5$  m) yer alan ve kanalın sol duvarına



yapıştırılan 3 cetvelden zamana bağlı su derinlikleri telefonlar ile deney boyunca videoya alınmıştır. Bu videolardan 5 sn aralıklarla değerler okunarak su derinlikleri elde edilmiştir.

Deney sonunda, limnometre ile x ve y ekseninde 10 cm aralıklarla alınan ölçümler kullanılarak sediment yükseklik profilleri elde edilmiştir.



Şekil 5. Pürüzlü deneyde baraj gövdesinin son hali

#### 4. Deneysel Bulgular

Bu çalışma kapsamında, toprak dolgu barajların mansap bölgesinde yer alan yerleşim birimlerinin (13 adet küp) sediment taşınımı ve taşkın dalgası yayılımına etkisini belirleyebilmek için biri Taşkaya vd. [19]'un yapmış olduğu, diğeri bu çalışma kapsamında pürüzlü mansap koşulunda yapılan iki deneyden elde edilen veriler, baraj mansabına küplerin yerleştirildiği pürüzlü, yerleşim birimi olmayan pürüzsüz olarak tanımlanan deney olmak üzere, bu bölümde ele alınmıştır.

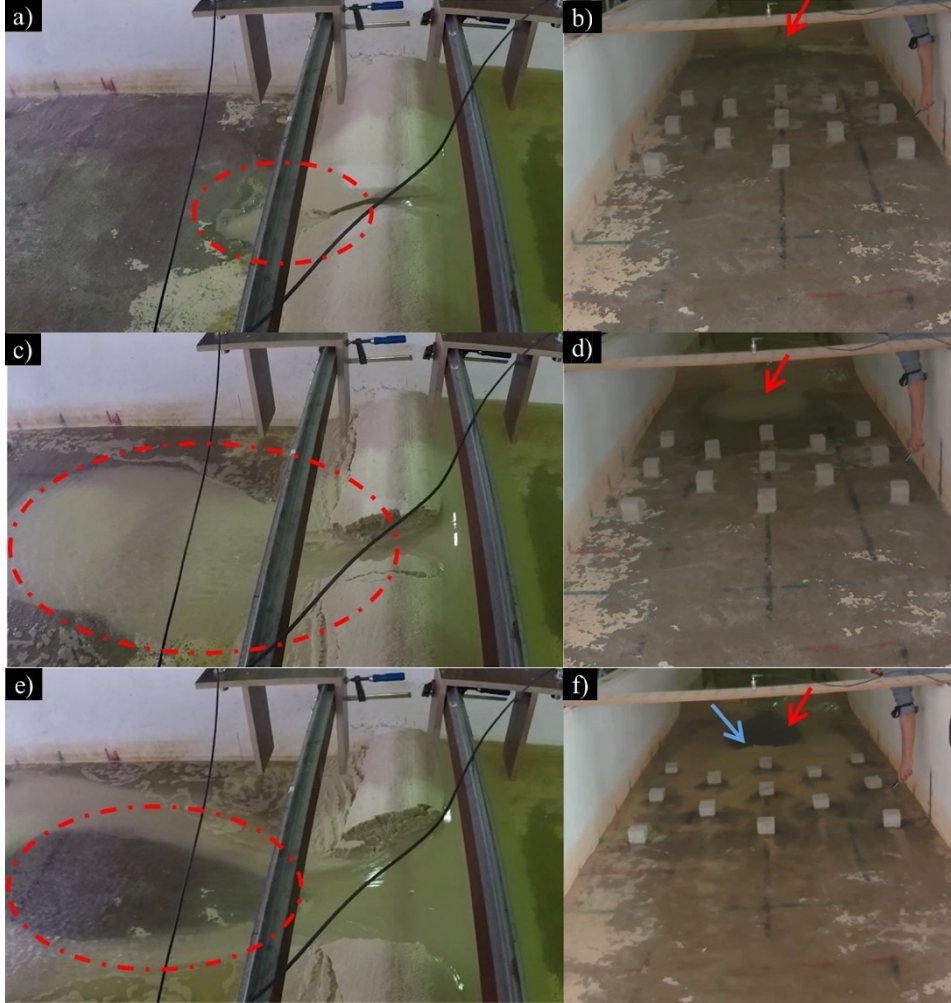
##### 4.1 Pürüzlü deney bulguları

Deney başlatılmadan önce baraj rezervuarı, su seviyesi gediğin mansap kısmına ulaşana kadar pompa yardımıyla kademeli olarak doldurulmuştur. Su seviyesinin maksimum değeri olan 25,3 cm'e gelmesi ile baraj membasındaki su hacmi 6,49 m<sup>3</sup>'e ulaşmıştır. Suyun gediği aşmasıyla (sarı ok ile gösterilen), t=0 s, pompa kapatılmış ve deney başlatılmıştır (Şekil 6).



Şekil 6. Pürüzlü deney başlangıcı (t=0 s)

Şekil 7, sol taraftaki fotoğraflar baraj gövdesi, sağdakiler mansap kamerasından sırasıyla pürüzlü deney başladıktan 20, 50, 80 saniye sonra alınan görüntüleri göstermektedir. t=0 s anından itibaren, baraj gövdesinden su ile birlikte sediment taşınımı meydana gelmiştir (Şekil 7.a, Şekil 7.b) ve sediment yayılma bölgesinin uzunluğu ve genişliği zamanla artmıştır (Şekil 7.c, Şekil 7.d). Taşkın dalgasının etkisiyle yayılan sedimentte meydana gelen oyulmanın gelişmesi baraj mansabından yaklaşık 2 m uzaklıkta hidrolik sıçramaya neden olmuştur (Şekil 7.e, Şekil 7.f).



**Şekil 7.** Pürüzlü deneyde baraj gövdesi ve mansaptaki kameralardan kaydedilen görüntüler a)-b) 20. saniye, c)-d) 50. saniye, e)-f) 80. Saniye

Şekil 7’de sedimentin biriktiği ve oyulduğu bölgeler a, c, e görsellerinde kırmızı elipsle; b, d, f görsellerinde ise kırmızı okla gösterilmiştir. Mavi ok ise hidrolik sıçramanın olduğu bölgeyi işaret etmektedir.

80. ve 116. saniyeler arasında şiddetini arttıran hidrolik sıçrama, 116. saniyede maksimum seviyeye ulaşmıştır (Şekil 8).



**Şekil 8.** Pürüzlü deneyde maksimum hidrolik sıçrama

Deney başlangıcından 550 saniye sonra rezervuardaki su seviyesinin sabitlenmesiyle sediment yayılımı nihai durumuna ulaşmıştır (Şekil 9). Sediment x ekseninde 4,5 m uzunluğunda yayılım göstermiştir. Kanalın 5. metresindeki küplerin sonundaki sediment yayılımına bakıldığında, bu bölgede yayılan sedimentin kalınlığının çok az ve yayılımın kısmi olduğu görülmektedir. Bu sebeple sediment yayılım uzunluğu 4,2 m olarak kabul edilmiştir.

Taşkaya vd. [16]'nın çalışmasına benzer olarak, baraj mansap önünde, kanal ortasındaki blok tamamen, diğerleri ise kısmen su altında kalmıştır.

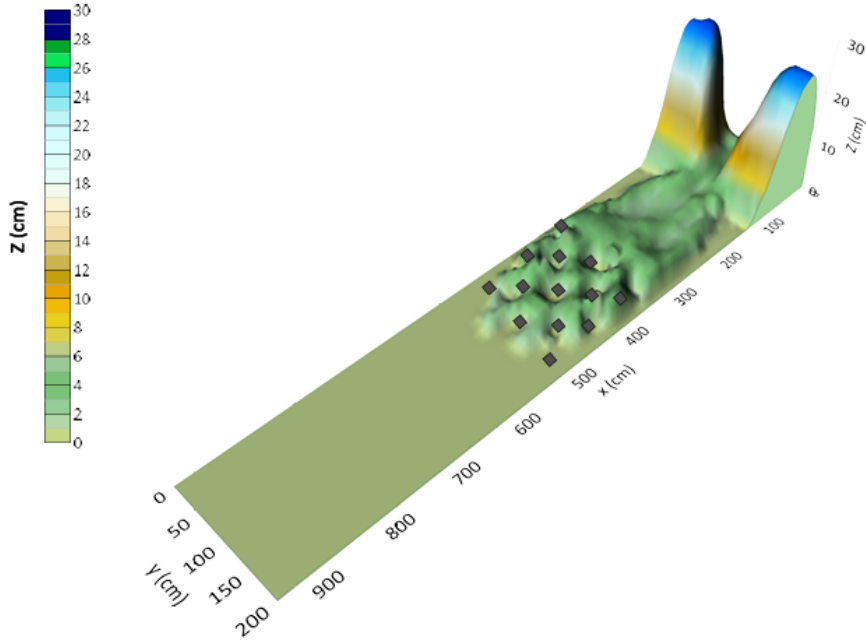


Şekil 9. Pürüzlü deneyde kanalın deney sonundaki görünümü

Taşkın dalgasının, çarptığı küplerin etrafında sediment birikmesini engellemesine bağlı olarak bazı küplerin etrafında sediment kalınlığı sıfır olarak ölçülmüştür. Taşkın dalgasının etkisiyle köprü ayağı etrafındaki oyulmalara benzer olarak kanal ortasındaki, orta eksen sağ ve solundaki küplerin etrafında sedimentin oyulduğu görülmüştür. Ayrıca yayılan sediment üzerindeki su kanallarına bakıldığında kanal ortasında taşkın dalgasının küplerin memba yüzüne çarparak sarı oklar ile gösterildiği şekilde hareket ettiği görülmüştür. Orta eksenin sol ve sağdaki ilk küplerin kanal duvarına bakan yüzlerinde taşkın dalgasının yeşil oklar ile gösterildiği gibi yaklaşık olarak x eksenine 45 derece açıya sahip olduğu görülmektedir.

Kanal tabanından suyun çekilmesiyle yayılan sedimentin kalınlığı x ve y ekseninde her 10 cm'de ve küplerin etrafında olacak şekilde limnometre ile ölçülmüştür. Elde edilen verilerle taban batimetrisi çıkarılmıştır (Şekil 10). Barajın orta kısmı mansap bölgesine taşınırken, sağ ve sol tarafları ayakta kalmıştır. Mansap bölgesindeki maksimum sediment kalınlığı 6,7 cm olarak ölçülmüştür.





Şekil 10. Pürüzlü deney sonunda taban batimetrisi

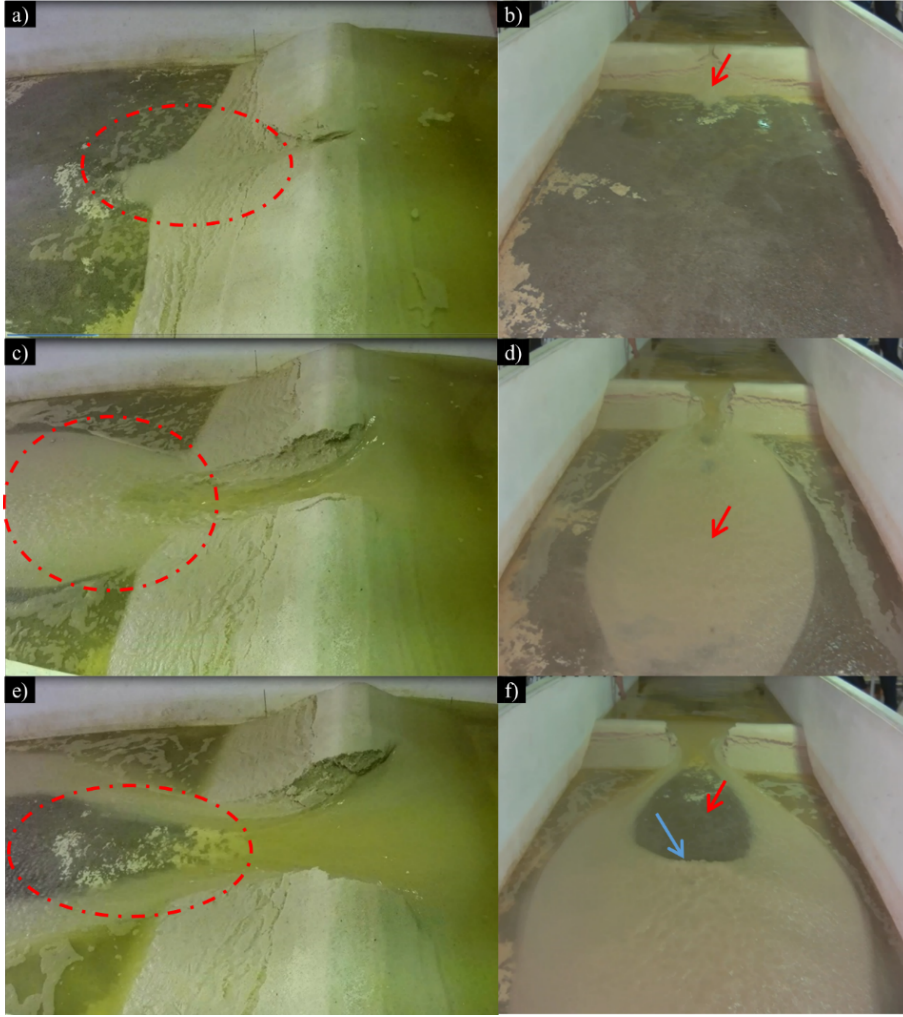
#### 4.2 Pürüzsüz deney bulguları

Deney başlangıcı pürüzlü durum ile aynı şekilde gerçekleştirilmiştir. Baraj membasındaki su seviyesinin maksimum değeri olan 25,7 cm'e gelmesi ile su hacmi 6,59 m<sup>3</sup>'e ulaşmıştır. Suyun gediği aştığı bu an (Şekil 11'de sarı ok ile gösterilmiştir), t=0 s olarak tanımlanmış, bu anda pompa kapatılmış ve deney başlatılmıştır.



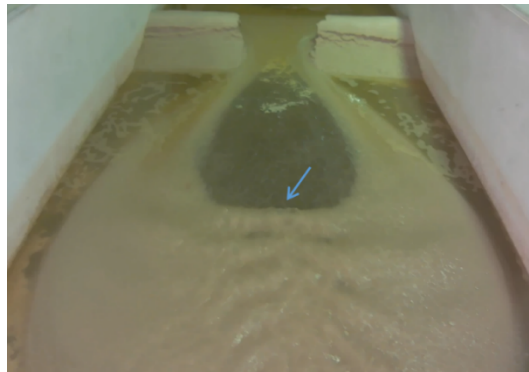
Şekil 11. Pürüzsüz deney başlangıcı (t=0 s)

Barajın ilk yıkılma anına ait görüntüler Şekil 12'de verilmiştir. Bu şekilde sol taraftaki fotoğraflar baraj gövdesi, sağ taraftakiler mansap kamerasından sırasıyla pürüzlü deney başladıktan 20 s, 50 s ve 70 s sonra alınan görüntüleri göstermektedir. Şekil 12.a ve Şekil 12.b'de gösterildiği gibi, t=0 s anından itibaren, gediğin genişlemesiyle baraj gövdesinden su ve sediment taşınımı meydana gelmiş ve ilk 1 dakika içinde yayılan sedimentin uzunluğu ve genişliği artmıştır (Şekil 12.c, Şekil 12.d). Taşkın dalgasının etkisiyle meydana gelen hidrolik sıçrama, yayılan sedimentte oyulmanın gelişmesine neden olmuştur (Şekil 12.e, Şekil 12.f). Şekil 12'de sedimentin biriktiği ve oyulduğu bölgeler a, c ve e görsellerinde kırmızı elipsle; a, d ve f görsellerinde ise kırmızı okla gösterilmiştir. Mavi ok ise hidrolik sıçramanın olduğu bölgeyi işaret etmektedir.



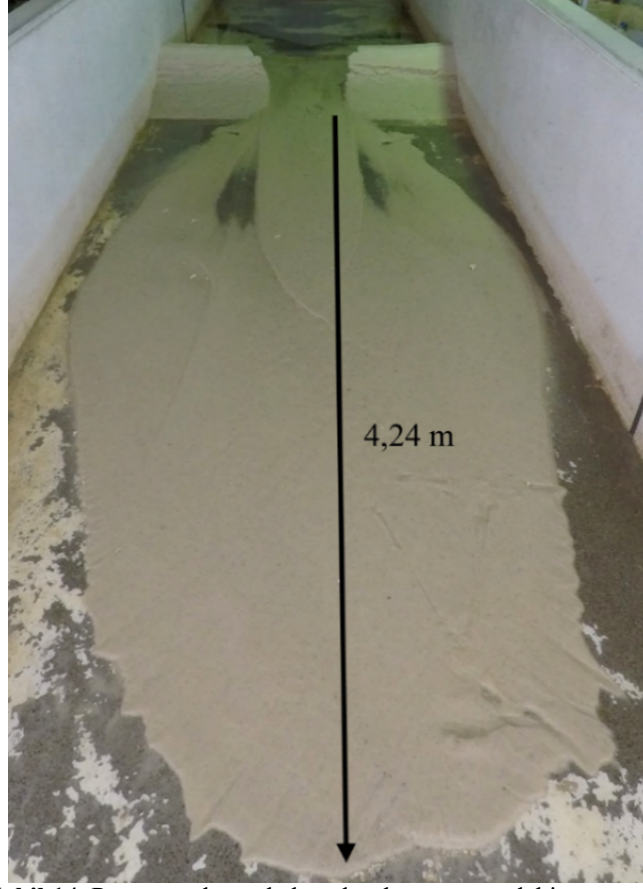
Şekil 12. Pürüzsüz deneyde baraj gövdesi ve mansaptaki kameralarından kaydedilen görüntüler a)-b) 20. saniye, c)-d) 50. saniye, e)-f) 70. saniye

Hidrolik sıçrama 70. ve 90. saniyeler arasında şiddetini arttırmış, 90. saniyede maksimum seviyeye ulaşmıştır (Şekil 13). Yıkılmanın 90. saniyesinden sonra taşkın dalgasının şiddetinin azalmasıyla hidrolik sıçramanın etkisi zamanla azalmış ve oyulmanın olduğu bölgelerde tekrar sediment birikmeye başlamıştır.



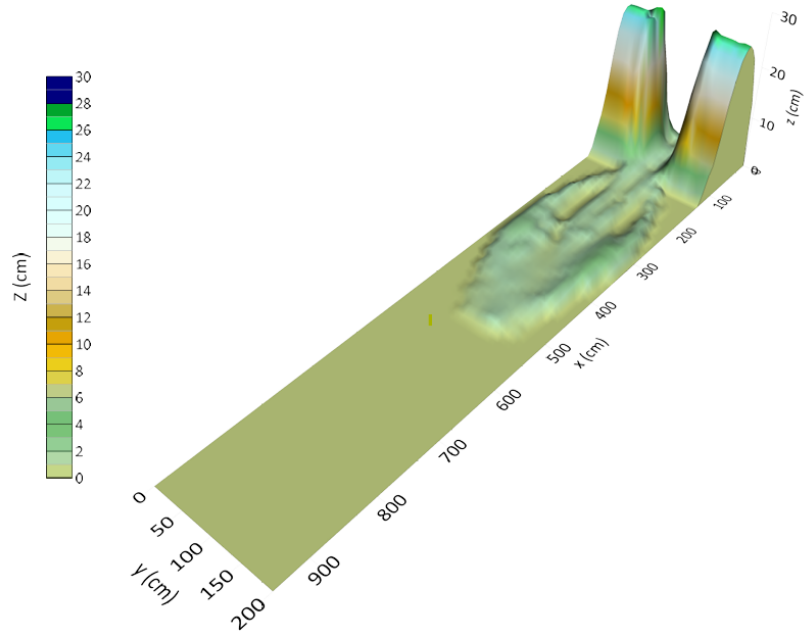
Şekil 13. Pürüzsüz deneyde maksimum hidrolik sıçrama

560 saniye sonunda sediment yayılımı nihai durumuna ulaşmıştır (Şekil 14). Sediment x ekseninde 4,24 m uzunluğunda yayılmıştır [19].



Şekil 14. Pürüzsüz deneyde kanalın deney sonundaki görünümü

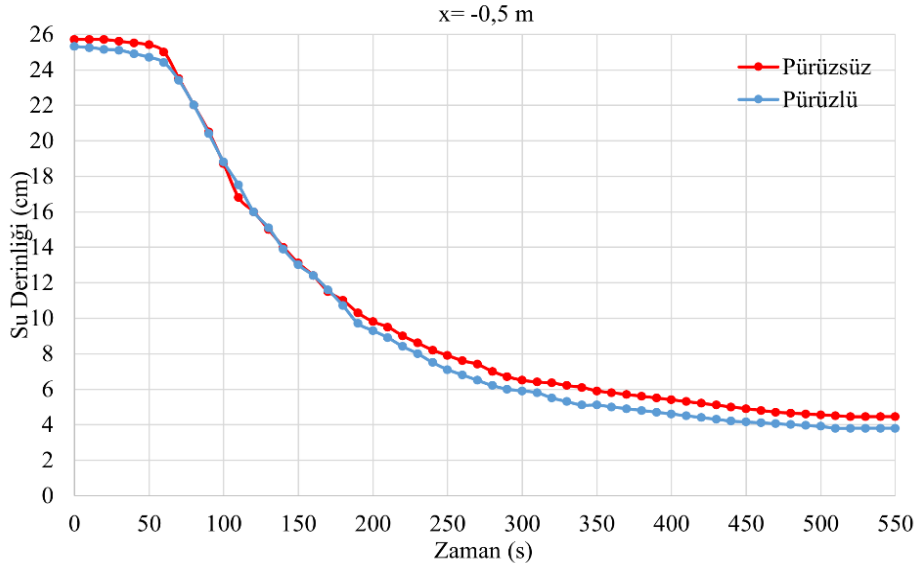
Kanal tabanından suyun çekilmesiyle yayılan sedimentin kalınlığı ölçülmüş ve elde edilen verilerle taban batimetrisi çıkarılmıştır (Şekil 15).



Şekil 15. Pürüzsüz deney sonunda taban batimetrisi

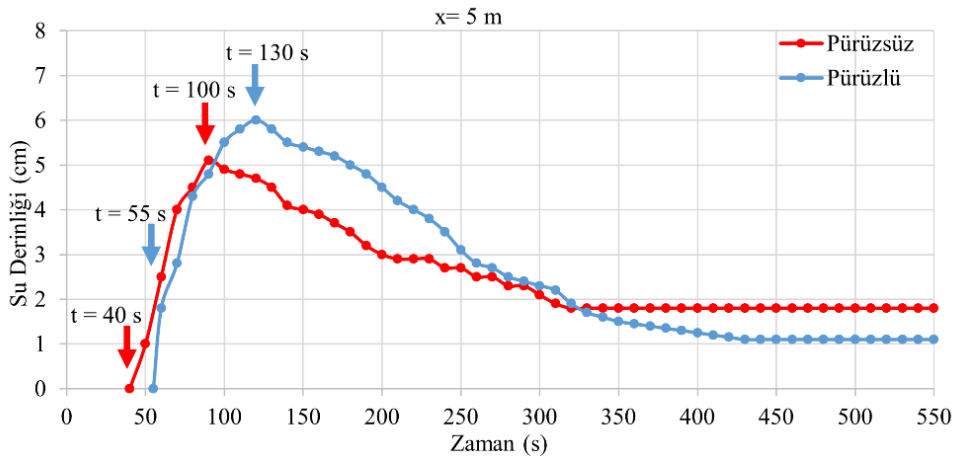
Barajın orta kısmı mansap bölgesine taşınırken, sağ ve sol tarafları ayakta kalmıştır. Mansap bölgesindeki maksimum sediment kalınlığı 4 cm olarak ölçülmüştür. Nihai durum incelendiğinde, baraj gövdesinden baraj mansabına taşınan sedimentin gövdeye yakın bölgede simetrik olarak yayıldığı; ilerideki bölgelerde ise kanal tabanının betonarme olmasına bağlı olarak tabandaki yüzey pürüzlülüğü, kanal tabanındaki düzensizlikler gibi nedenlerden kaynaklı tamamen simetrik olmadığı görülmektedir.

Şekil 16, pürüzlü ve pürüzsüz deneyde, rezervuar içinde  $x = -0,5$  m'de zamana bağlı su seviyesindeki değişimi göstermektedir. Deney süresi pürüzlü deneyde 550 saniye olup deney sonrası  $-0,5$  m'deki su seviyesi 3,8 cm'de sabitlenmiştir. Pürüzsüz deneyde ise deney süresi 560 saniyedir ve deney sonrası  $-0,5$  m'deki su seviyesi 4,4 cm'de sabitlenmiştir. İki deneyde baraj rezervuarındaki su seviyesindeki %1,5 civarı bir farklılık mevcut olup deneysel çalışmalar için kabul edilebilir bir mertebededir. Su seviyelerinin zamanla değişimindeki farklılık ise gedik açıklığının geometrisi ve gedik oluşma mekanizmasının farklı gelişmesiyle açıklanmaktadır.



Şekil 16.  $x = -0,5$  m'de rezervuardaki su seviyesinin zamana bağlı değişimi

Şekil 17, pürüzlü ve pürüzsüz deneyde,  $x = 5$  m'de su seviyesindeki zamana bağlı değişimi göstermektedir. Deney başladıktan sonra pürüzlü ve pürüzsüz deneyde  $x = 5$  m'ye suyun ulaşma süreleri sırasıyla 55 s ve 40 s; maksimum su seviyeleri 6 cm ve 5,1 cm; deney sonu su seviyeleri 1,1 cm ve 1,8 cm olarak elde edilmiştir. Elde edilen verilere göre taşkın dalgası, pürüzlü deneyde  $x = 5$  m'deki cetvele daha geç ulaşmakla beraber daha yüksek seviyelere çıkmıştır. Pürüzsüz deneyde maksimum seviyeye ulaşması daha az zaman almıştır.



Şekil 17.  $x = 5$  m'de su seviyesinin zamana bağlı değişimi

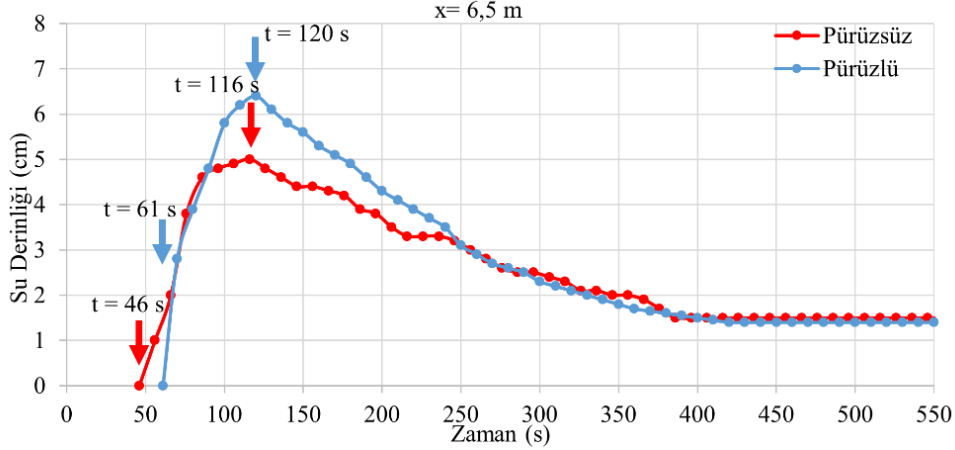
Şekil 18, pürüzlü ve pürüzsüz deneyde, 6,5 m'de bulunan cetvellerdeki zamana bağlı su seviyesindeki değişimi eş zamanlı olarak göstermektedir. Deney başladıktan sonra pürüzlü ve pürüzsüz deneyde cetvellere suyun



ulaşma süreleri sırasıyla 61 sn ve 46 sn; maksimum su seviyeleri 6,4 cm ve 5 cm; deney sonu su seviyeleri 1,4 cm ve 1,5 cm olarak elde edilmiştir.

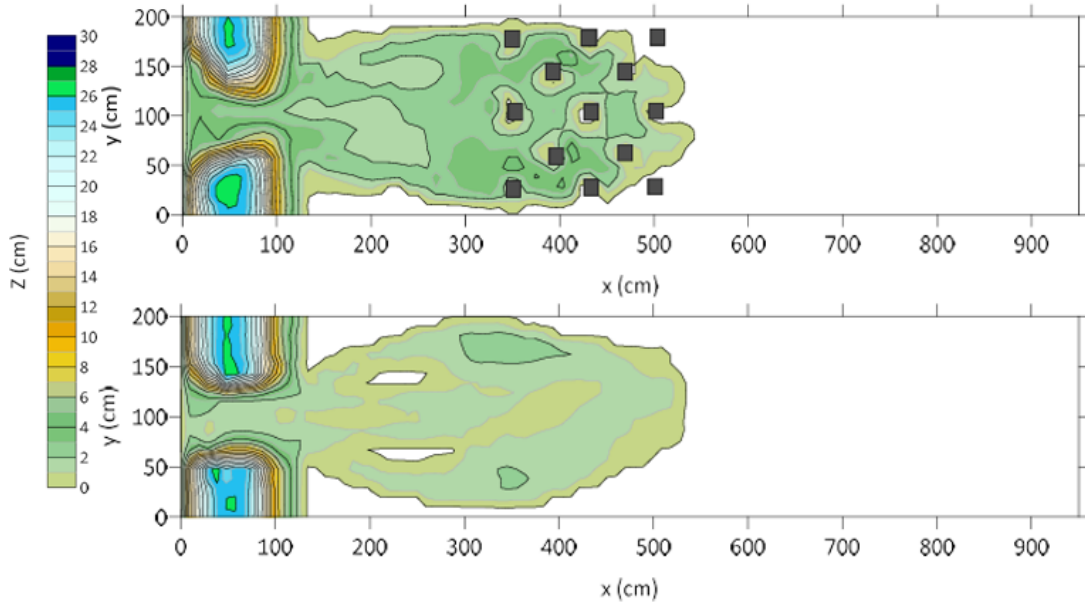
Şekil 18 incelendiğinde, taşkın dalgasının pürüzsüz deneyde  $x=6,5$  m'deki cetvele daha hızlı ilerlediği, ulaştığı maksimum seviyenin ise pürüzlü deneyde daha yüksek olduğu görülmektedir.

Pürüzlü deneyde engellere çarpan akımın hızı azalmış ve bu nedenle cetvele ulaşma anı gecikmiştir.



Şekil 18.  $x=6,5$  m'de su seviyesinin zamana bağlı değişimi

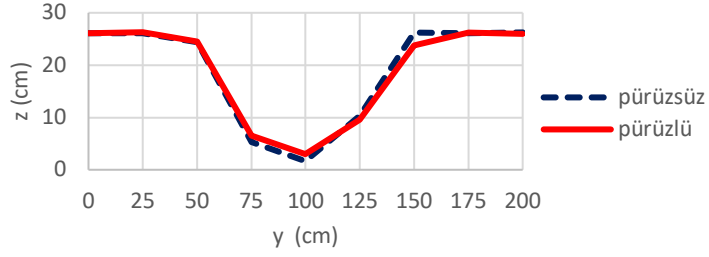
Nihai durumda tabandaki sedimenti gösteren kontür grafikleri Şekil 19'da verilmiştir. [16]'ya benzer olarak barajların sağ ve sol tarafları ayakta kalırken orta kısmı mansap bölgesine taşınmıştır. Barajdan taşınan sedimentin x ve y yönündeki yayılım miktarı göz önüne alınılığında taşkın dalgasının x eksenindeki hızının y eksenine göre daha fazla olduğu açıkça görülmektedir [13]. Pürüzlü deneyde mevcut küplerin taşkın dalgası hızını azalttığı Şekil 17 ve Şekil 18'de cetvellere suyun ulaşma zamanından görülmektedir. Ancak gedik oluşum mekanizması ve gedik son boyutundaki farklılıklar taşkın dalgasının özelliklerini etkilemiş ve bu durum sediment yayılım uzunluğunun baraj mansabında yerleşim olduğu deneyde daha fazla olmasıyla sonuçlanmıştır. Ayrıca, Şekil 9'da kanalın 5. metresindeki küplerin sonundaki sediment yayılımına bakıldığında, bu bölgede yayılan sedimentin kalınlığının çok az ve yayılımın kısmi olduğu görülmektedir.



Şekil 19. Deney sonunda kanal boyunca yayılan sedimentin kontür grafiği a) pürüzlü, b) pürüzsüz koşul

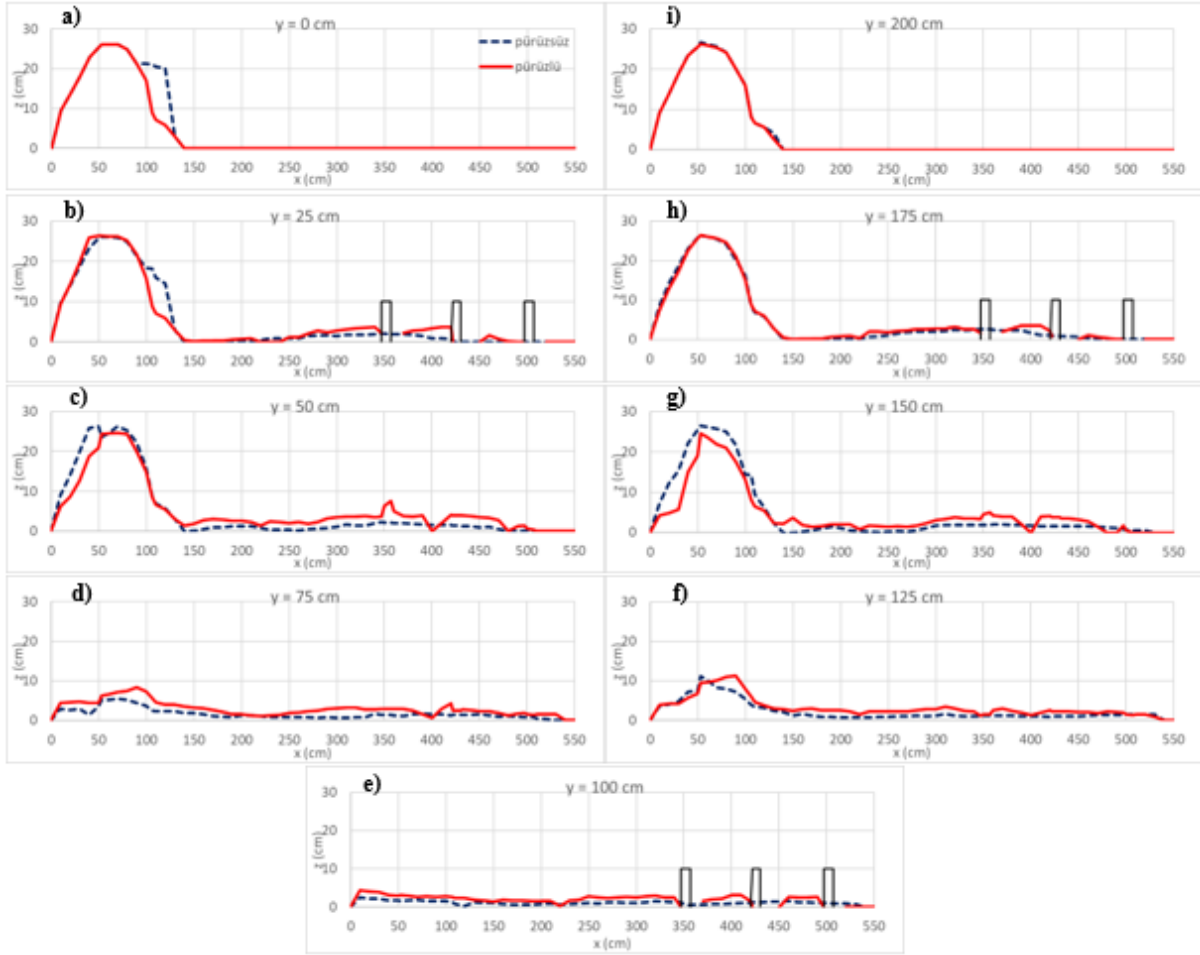
Şekil 20'de kret eksenindeki ( $x=53$  cm) gedik son boyutları gösterilmiştir. İki deneyde gedik açıklığının sağ eğimi üst üste çıkmasına rağmen sol eğim benzer değildir. [11]'de belirtildiği gibi deneyler aynı koşullar altında

yapılsa bile baraj son boyutlarının aynı olmamasını, sızma koşulları ve sıvı sediment etkileşimi parametrelerindeki farklılıklar açıklamaktadır.



Şekil 20. x=53 cm'de baraj en kesiti

Deney sonunda 25 cm'de bir elde edilen, sediment kalınlığını gösteren, boyuna profiller her iki durum için de Şekil 21'de sunulmuştur.



Şekil 21. Boyuna sediment yüksekliği profilleri a) y=0 cm, b) y=25 cm, c) y=50 cm, d) y=75 cm, e) y=100 cm, f) y=125 cm, g) y=150 cm, h) y=175 cm, i) y=200 cm

Taşkaya vd. [16]'nın çalışmasına benzer olarak, mansapta bulunan beton bloklar, bu bölgeye yayılan sediment kalınlığının artmasına sebebiyet vermiştir. Şekil 21'de de görüldüğü üzere deneylerin ikisinde de kret üzerindeki gedğin genişlemesiyle taşkın dalgasıyla barajın orta bölümü taşınmış, sağ ve sol tarafı ayakta kalmıştır.

Pürüzlü ve pürüzsüz deneyde deney başlangıcından, t=0 s, deney sonuna kadar olan sediment yayılma süreciyle ilgili zamanlar, cetvel okumaları ve deney sonundaki geometrik özelliklerin karşılaştırılması Tablo 1'de

verilmiştir. Elde edilen veriler incelendiğinde, pürüzlü deneyde barajın %6,7, pürüzsüz deneyde ise %17,7'lik hacmi taşkın dalgasının etkisiyle mansap bölgesine yayılmıştır.

**Tablo 1.** Deney sonuçlarının karşılaştırılması

Özellik	Pürüzlü Mansap	Pürüzsüz Mansap
Rezervuarda maksimum su seviyesi (cm)	25,3	25,7
Rezervuarda maksimum su hacmi (m <sup>3</sup> )	6,49	6,59
Rezervuarda deney sonu su seviyesi (cm)	3,8	4,4
Suyun 5 m' deki cetvele ulaşması (s)	55	40
Suyun 6 m'deki cetvele ulaşması (s)	61	46
Toplam yıkılma süresi (s)	550	560
Hidrolik sıçramanın başlangıcı (s)	80	70
Maksimum hidrolik sıçramanın oluşması (s)	116	90
5 m' deki maksimum su seviyesi ve zamanı (cm-s)	6,0-120	5,1-90
6 m' deki maksimum su seviyesi ve zamanı (cm-s)	6,4-120	5,0-120
5 m' de deney sonu su seviyesi (cm)	1,1	1,8
6 m' de deney sonu su seviyesi (cm)	1,4	1,5
Barajın başlangıç hacmi (cm <sup>3</sup> )	348000	348000
Barajın son hacmi (0-106 cm) (cm <sup>3</sup> )	286425	286522
Sediment yayılım uzunluğu (cm)	420	424
Sediment yayılım genişliği (cm)	180	190
Sediment yayılım ortalama yüksekliği (cm)	2,4	1,8
Sediment yayılım maksimum yüksekliği (cm)	6,7	4,0

## 5. Sonuçlar

Barajların mansap bölgesinde yer alan mevcut yerleşim birimlerinde baraj yıkılması sonucu oluşabilecek risklerin belirlenmesi ve önlenmesi açısından taşkın hareketlerinin saptanması önemli bir konudur. Bu deneysel çalışmada, baraj mansabına küplerin yerleştirildiği pürüzlü ve engellerin olmadığı pürüzsüz mansaba sahip homojen toprak dolgu barajların yıkılma senaryosu incelenmiştir. Pürüzlü ve pürüzsüz deneyde sırasıyla membadaki su seviyesi maksimum 25,3 cm, 25,7 cm'e ulaşmıştır. Rezervuardaki su hacimlerinin maksimum değerleri ise sırasıyla 6,49 m<sup>3</sup> ve 6,59 m<sup>3</sup>'tür. Bu nedenle pürüzlü ve pürüzsüz deneylerde rezervuar başlangıç koşulları eşdeğer kabul edilmiştir. Su seviyesinin gediği aşmasıyla deney başlamış olup, (t=0 s), pürüzlü deney 550 s, pürüzlü deney ise 560 s sürmüştür. Her iki deneyde de zamanla genişleyen gedik, taşınan sedimentin yayılım hızını arttırmıştır. Membadaki su seviyesi pürüzlü ve pürüzsüz deneyde sırasıyla %84,98 ve %82,88 azalmıştır. Küplerin etkisiyle baraj mansabındaki cetvellerden okunan taşkın dalgası derinlikleri artmıştır. Cetvellerdeki maksimum derinlikler, 5 ve 6,5 m'de sırasıyla memba su seviyesinin pürüzsüz deneyde %19,8 ve %19,5'i iken pürüzlü deneyde küplerin etkisiyle artarak %23,7'sine ve %25,3'üne ulaşmıştır. Baraj mansabında yerleşim yerini simüle eden küplerin olması, taşkın dalgasının hızını azaltmış ve cetvele ulaşma süresi arttırmıştır. Ayrıca, yerleşim bölgesini simüle eden küplerden, baraj mansabına yakın bölgedeki kanal ortasında taşkını ilk karşılayan engel, taşkın dalgası sebebiyle tamamen, diğerleri ise kısmi olarak su altında kalmıştır. Köprü ayağına benzer olarak küplerin memba ve mansap bölgelerinde oyulmalar ve birikmeler meydana gelmiştir. Bu birikmelere bağlı olarak yayılan sediment kalınlığı pürüzlü deneyde artmıştır.

## Teşekkür

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 119M959 numaralı Proje ile desteklenmektedir.

### Kaynaklar

- [1] Urzica A, Pintilie AM, Stoleriu CC, Cîmpianu CI, Hutanu E, Pricop CI, Grozavu A. Using 2D HEC-RAS Modelling and Embankment Dam Break Scenario for Assessing the Flood Control Capacity of a Multi-Reservoir System (NE Romania). *Water* 2020; 13(1): 57.
- [2] Alppay H. Baraj Yıkılması Taşkın Risk Değerlendirmesi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2020.
- [3] Costa JE. Floods From Dam Failures. Open File Report 85-560, US Geological Survey: Denver, CO, USA, 1985; 1-54.
- [4] Palamut Kemaloğlu N, Baduna Koçyiğit M, Akay H. Baraj Yıkılması Taşkın Dalgası Yayılımının 1-Boyutlu Sayısal Simülasyonlarla İncelenmesi: Rahmanlar Barajı Örneği. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part (C) Tasarım ve Teknoloji* 2019; 7(1): 97-111.
- [5] Palamut N. Baraj Yıkılma Analizi ve Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2014.
- [6] Tingsanchai T, Chinnarasri C. Numerical Modelling of Dam Failure Due to Flow Overtopping. *Hydrol. Sci. J.* 2001; 46 (1): 113-130.
- [7] Güney MŞ, Tayfur G, Bombar G, Elçi Ş. Distorted Physical Model to Study Sudden Partial Dam Break Flows in an Urban Area. *J. Hydraul. Eng* 2014; 140 (11).
- [8] Cao Z, Pender G, Wallis S, Carling P. Computational Dam-Break Hydraulics over Erodible Sediment Bed. *J. Hydraul. Eng.* 2004; 130 (7): 689-703.
- [9] Paşa Y, Peker İB, Hacı A, Gülbaz S. Dam Failure Analysis and Flood Disaster Simulation under Various Scenarios. *Water Science & Technology* 2023; 87(5): 1214-1231.
- [10] Najar M, Gül A. Investigating the Influence of Dam-Breach Parameters on Dam-Break Connected Flood Hydrograph. *Teknik Dergi* 2022; 692: 12501-12524.
- [11] Singh VP, Scarlatos PD. Breach Erosion of Earthfill Dams and Flood Routing: BEED Model. Research Report, Army Research Office, Battelle, Research Triangle Park, 1985; North Carolina. 131.
- [12] Yılmaz K, Darama Y, Oruç Y, Melek AB. Assessment of Flood Hazards Due to Overtopping and Piping in Dalaman Akköprü Dam, Employing both Shallow Water Flow and Diffusive Wave Equations. *Natural Hazards* 2023; 117: 979-1003.
- [13] Kocaman S., Güzel H. Baraj Yıkılması Taşkın Dalgası Yayılımının 3-Boyutlu Deneysel ve Nümerik Karşılaştırılması. *Engineering Sciences* 2011; 6(1): 406-414.
- [14] Topçu E, Bağrıaçık B, Erdağ A. Bir Dolgu Barajın Rezervuarındaki Suyun Ani Çekilmesi Sırasındaki Stabilitate Analizi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 2022; 10(1): 50-60.
- [15] Taşkaya E, Büyüker Z, Öztürk B, Bombar G, Tayfur G. Overtopping Failure of a Homogeneous Earth-Fill Dam with Two Different Breach Sizes and Rough Downstream Condition. *River Flow 2022 The 11th International Conference on Fluvial Hydraulics*; 8-9 November 2022; Ottawa-Kanada.
- [16] Taşkaya E, Bombar G, Tayfur G. Experimental Investigation of Sediment Movement as a Result of Homogeneous Earth-Fill Dam Overtopping Break over a Simplified Urban Area. *J. Hydrol.* 2023; 617 (B).
- [17] Zhang LM, Xu Y, Jia JS. Analysis of Earth Dam Failures: A Database Approach. *Georisk* 2009; 3(3): 184-189.
- [18] Kocaman S. Baraj Yıkılması Analizi ve Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2002.
- [19] Taşkaya E, Bombar G, Tayfur G. Experimental Investigation of a Failure of a Homogeneous Earthen Dam by Overtopping. *14th International Congress on Advances in Civil Engineering, ACE*; 6-8 September 2021; İstanbul-Türkiye. 750-756.