

Literatürdeki Basamaklı Dolusavak Tasarımlarının Derlenmesi

Erdoğan İKİNCİOĞULLARI¹

¹Bingöl Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bingöl,
ORCID No: 0000-0003-2518-980X, e-mail: erdincikinciogullari@gmail.com

(Alınış: 13.01.2021, Kabul: 02.07.2021, Yayınlanma: 09.07.2021)

Özet

Yüzeysel sular, barajlar sayesinde tekrar tekrar kullanabildiğimiz mükemmel bir enerji kaynağıdır. Baraj rezervuarlarında biriken taşkın suları, savaklar yardımıyla mambadan mansaba aktarılmaktadır. Baraj gövdesinin mambasındaki akımın potansiyel enerjisi boşaltım kanalı üzerinde kinetik enerjiye dönüşerek kaviteasyona (oyulmaya) ve dolusavak mansabında tahribata neden olabilmektedir. Bu sebeple basamaklı dolusavaklar, olası muhtemel tahribatların önüne geçmek ve düşüm havuzunun boyutlarını küçültmek amacıyla kullanılan yapı elemanlarıdır. Bu tip savaklardaki basamaklara çarpan akımın enerjisi büyük oranda sönlendiğinden düşüm havuzu için gerekli olan boyutlar da küçülmektedir. Bu sebepten ötürü, araştırmacılar, basamaklı dolusavakların geliştirilmesi amacıyla farklı tasarımlar oluşturmuştur. Bu çalışmada, basamaklı dolusavakların basamak geometrileri üzerine yapılmış bir kısım çalışmalar derlenerek bu konuda çalışmayı planlayan araştırmacılara küçük bir katkı sunulması amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Basamaklı dolusavak, Basamak tasarımı, Basamaklı savaklarda eşik geometrisi

Review of Stepped Spillway Designs in the Literature

Abstract

Water is an excellent source of energy that we can use over again, thanks to dams. Excess water accumulated in the dam reservoir is transferred from upstream to downstream via spillways. The potential energy of flow at the upstream of the dam transforms into kinetic energy on the chute channel, causing cavitation and destruction. For this reason, stepped spillways are structural elements used to prevent damage and reduce the size of the downstream pool. For this reason, researchers have created different designs for the development of stepped spillways. In this study, it is aimed to review some studies about stepped spillways for the researchers who will work on this subject.

Keywords: Stepped spillway, Design of step, Threshold geometry in stepped weirs

1. GİRİŞ

Baraj mambasında bulunan akımın mevcut bir potansiyel enerjisi vardır. Savaklanma sırasında şüt kanalına giren akım, sahip olduğu potansiyel enerjisinin kinetik enerjiye dönüşmesi ile git gide hızlanarak savak mansabına düşmektedir. Klasik bir söylemle, dolusavak mambasındaki potansiyel enerji, dolusavak mansabında kinetik enerjiye dönüşerek hem şüt kanalı üzerinde hem de mansap havuzunda tahribata sebebiyet vermektedir. Bu nedenle araştırmacılar, akımın şüt kanalı üzerindeki enerjisini düşürecek yöntemler geliştirmeye çalışmışlardır. Basamaklı

dolusavaklar da bu yöntemlerden birisi olup ilk örneğinin MÖ 1300'lü yıllarda inşa edilen Yunanistan'daki Akarnania basamaklı dolusavağı olduğu tahmin edilmektedir [1]. İnşa kolaylığı açısından, günümüzde özellikle silindire sıkıştırılmış beton barajlarda (SSB) ve dolgu barajlarda taşkın dolusavağı olarak kullanılmaktadır. SSB barajlar klasik beton ile inşa edildiğinden bu barajların mansabına basamaklı dolusavakların inşa edilmesi oldukça ekonomik ve pratiktir [2]. Ayrıca, basamaklar üzerindeki akımın içerisindeki çözünmüş hava miktarının artmasıyla hem akarsuyun ekolojisine hem de kavitasyon riskine karşı olumlu bir katkı sağlamaktadır. Ayrıca, basamaklı dolusavaklar, arıtma tesislerinde su içerisindeki oksijen miktarını arttırmak amacı ile de kullanılabilir [3].

Basamaklı dolusavaklar, sahip oldukları geometri sayesinde, üzerinden savaklanan akımın her bir basamağa çarpması nedeniyle akım enerjisini büyük oranda sönmüleyebilmektedir. Sönümlenen enerji miktarı, klasik dolusavaklara oranla, yaklaşık %70-80 civarında daha fazladır [4]. Böylelikle, boşaltım kanalı boyunca sönmümlenen enerji nedeniyle, enerji kırıcı havuzda oluşan hidrolik sıçramanın da boyu kısalmaktadır. Dolayısı ile enerji kırıcı havuzun boyutları, klasik savaklara oranla, küçüldüğünden maliyet açısından da olumlu bir durumdur [2,3,5-8]. Bahsedilen sebeplerden ötürü, basamaklı dolusavaklar, düşüm havuzlarının yeterli uzunlukta tasarlanmadığı arazi şartlarında alternatif bir çözüm sunmaktadır. Buna ek olarak, basamaklı dolusavak boyunca akımın enerjisi azaldığından hızı da azalmakta ve dolayısıyla kavitasyon riski de azalmaktadır [9].

Basamaklı dolusavaklarda, savaklanan akımın debisi arttıkça sıçramalı akım rejimine, debisi azaldıkça nap akımı rejimine geçmektedir. İlk kez Ohtsu ve Yasuda [10] tarafından bu iki akım rejimi arasında bir geçiş rejimi olduğundan bahsedilmiştir. Geçiş akım rejiminde akım henüz nap akım rejimi özelliklerini kaybetmemiş, sıçramalı akım rejimine tamamen geçmemiştir. Bu sebeple akım içerisinde çok fazla titreşim oluştuğundan geçiş akım rejimi tasarımcıların tarafından tavsiye edilmemektedir [11].

Chanson [12], sıçramalı akım rejimi için başlangıç sınırı için Eşitlik (1)'i önerirken bir başka çalışmasında [13], nap rejiminin üst limiti için Eşitlik 2'yi ve geçiş akım rejimi ile sıçramalı akım rejimi arasındaki sınır için Eşitlik 3'ü önermiştir. Boes ve Hager [7] ise geçiş akım rejimi ile sıçramalı akım rejimi arasındaki sınır için Eşitlik (4)'ü önermişlerdir.

$$\frac{d_c}{h} > 1,057 - 0,465 \left(\frac{h}{l} \right), \quad (1)$$

$$\frac{d_c}{h} = 0,89 - 0,40 \tan(\alpha) \quad (2)$$

$$\frac{y_c}{h} = 1,20 - 0,325 \left(\frac{h}{l} \right) \quad (3)$$

$$\frac{y_c}{h} = 0,91 - 0,14 \tan(\alpha) \quad (4)$$

Burada, d_c =kritik derinlik (m), α = şüt açısı, h = basamak yüksekliği (m) ve l =basamak uzunluğudur (m).

2. KONU İLE ALAKALI ÇALIŞMALARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Basamaklı dolusavakların profesyonel uygulamalarının başlaması ile araştırmacıların bir kısmı tasarım kriterleri oluşturmaya başlamıştır [7,13-15]. Bazı araştırmacılar [16-18], inşa kolaylığı sebebiyle basamak üzerlerine yerleştirdikleri kutu gabyonlar ile basamaklı dolusavak akım

karakteristiklerini incelemişlerdir. Gelişen yazılım teknolojisi ile bir kısım araştırmacılar da [19–27], son yıllarda popüleritesi artan hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemini (HAD) kullanarak basamaklı dolusavaklar üzerindeki akımı sayısal olarak incelemişlerdir.

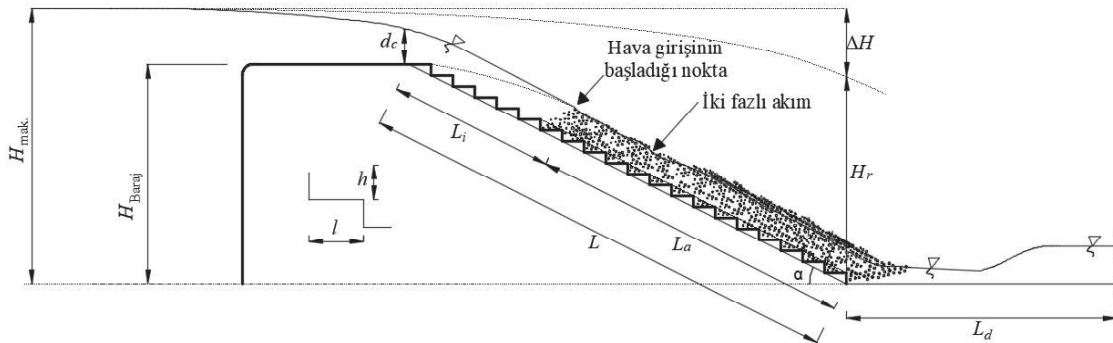
Son yıllarda araştırmacılar, basamaklı dolusavaklarda farklı basamak geometrileri kullanarak savaklanan akımın enerji sönümlenme oranlarını arttırmaya yönelik deneysel ve sayısal çalışmalar yürütmüşlerdir. Bu çalışmada, literatürdeki farklı basamak geometrisi ile alakalı çalışmalar derlenerek bir araya getirilmiş ve bu konuda yapılacak yeni çalışmalar için literatüre küçük bir katkı sağlanması amaçlanmıştır.

Rice ve Kadavy [5], Salado Creek Site barajının 1:20 ölçekte iki boyutlu modelini oluşturarak 10 basamaklı dolusavak üzerindeki akımı, basamaklar nedeniyle sönümlenen enerji miktarını ve tasarlanan düşüm havuzunun performansını incelemişlerdir. Araştırmacılar, model ile prototip arasındaki ölçek ilişkisi için Froude benzerlik şartlarını kullanmışlardır. Birim debisi $14,5-5,81 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ arasında değişen deneysel çalışmada, mansap havuzunun sonuna eşik eklenmesi sonucunda eşiksiz modellere göre daha az çalkantı olduğunu belirtmişlerdir. Bu sebeple düşüm havuzunun mansabına eşik konmaması durumunun, bölgede erozyon riskinin artırması nedeniyle dolusavağın güvenliği açısından endişe verici olduğunu vurgulamışlardır. Araştırmacılar, eklenecek eşiğin dolusavak topuğundan 12,19 m ileriye yerleştirilmesinin uygun olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca, son dönemde yapılan çalışmaların aksine, debinin azalması ile akım derinliği azaldığından basamaklı ve klasik şütlerdeki enerji sönümlenme oranlarının azaldığını belirtmişlerdir. Araştırmacılar sonuç olarak, verilen birim debilerde basamaklı dolusavakların enerji sönümlenme oranlarının klasik şütlere oranla 2,4-2,9 kat daha yüksek olduğunu, basamaklı dolusavaklarda şüt açısının enerji sönümlenme miktarında önemli bir etken olduğunu, basamaklı dolusavak kullanımının mansap havuzu ihtiyacını önemli ölçüde azalttığını belirtmişlerdir.

Boes ve Hager [7], 0,50 m genişliğinde, 5,70 m uzunluğunda ve üç farklı şüt açısı ($30-40-50^\circ$) için bir dizi deney çalışmaları yürütmüşlerdir. Araştırmacılar, 30° şüt açısı için üç (23,1, 46,2 ve 92,4 mm), 40° şüt açısı için iki (31,1 ve 93,3 mm) ve 50° şüt açısı için ise 26,1 mm yüksekliğinde tek çeşit basamak yüksekliği kullanmışlardır (Şekil 1). Araştırmacılar, üniform olmayan akım durumunda enerji sönümlenme oranı için aşağıdaki eşitlikleri (Eşitlik 5 ve 6) kullanmayı önermişlerdir.

$$\frac{H_r}{H_{max}} = \exp \left[\left(-0.045 \left(\frac{h \cdot \cos \alpha}{D_{h,w}} \right)^{0.1} (\sin \alpha)^{-0.8} \frac{H_{baraj}}{d_c} \right) \right] \quad H_{baraj}/d_c < 15 - 20 \quad \text{ için} \quad (5)$$

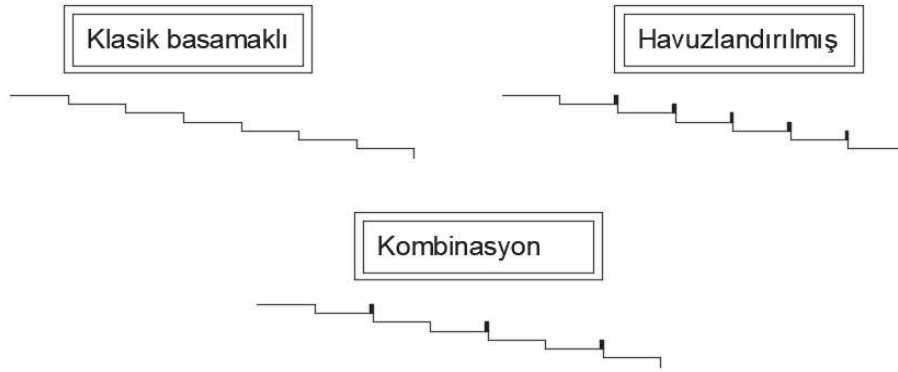
$$H_{max} = H_{baraj} + 1.5d_c \quad (6)$$



Şekil 1. Basamaklı dolusavak kesiti üzerindeki notasyonlar [7]

Burada; H_r =şütün mansap ucunda kalan enerjiyi (m), $H_{mak.}$ =maksimum enerjiyi, h =basamak yüksekliğini, l =basamak genişliğini, α =şüt açısını, $D_{h,w}$ = hidrolik çapı, H_{baraj} =tabandan dolusavak kretine olan mesafeyi, d_c =kritik akım yüksekliğini, L_r =havalanmayan bölge (kara bölge) uzunluğunu, L = şüt kanalının uzunluğunu ve L_a = havalanmış bölge uzunluğunu ifade etmektedir.

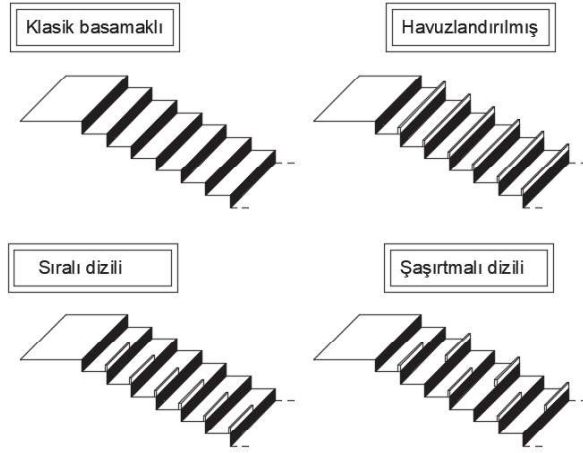
Felder vd. [28], klasik ve havuzlandırılmış basamaklı dolusavakların yanı sıra, iki tip savağın kombinasyonu ile oluşturulan üç farklı savak tipi kullanarak basamaklı dolusavaklar üzerindeki akımın havalanma miktarını ve enerji sönümlenme miktarlarını incelemiştir. Araştırmacılar, kanal genişliği 0,50 m, basamak yüksekliği 0,05 m, basamak genişliği 0,319 m ve kanal açısı 8.9° olan deney setini 21 adet basamak kullanarak PVC malzemesinden üretmişlerdir (Şekil 2). Debi değerlerinin $0,002-0,117 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ arasında değiştiği deneysel çalışmalarda, en yüksek enerji sönümlenme oranına klasik ve havuzlandırılmış basamaklı savakların kombinasyonu ulaşılmıştır. En düşük enerji sönümlenme oranını ise klasik basamaklı dolusavaklarda gözlemlemişlerdir. Araştırmacılar, kombine edilmiş basamaklı savaklarda en yüksek enerji sönümlenme oranı elde edilmesine rağmen, savak üzerindeki akış dengesizlikleri ve kararlı olmayan akış süreçlerinin gözlemlenmesi sebebiyle bu savak geometrisinin, yapının güvenli bir şekilde çalışması için uygun şartları sağlayamayacağını vurgulamışlardır.



Şekil 2. Felder vd. [28] çalışmalarında kullandıkları modeller

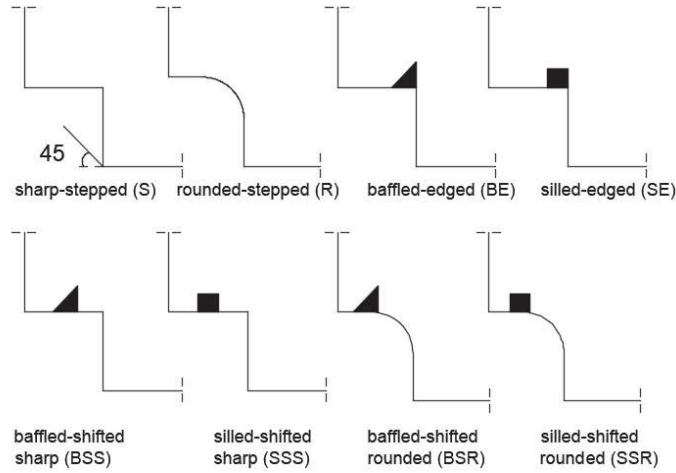
Felder vd. [29], dört farklı basamaklı dolusavak modelinin enerji sönümleme ve havalandırma oranlarını deneysel olarak incelemişlerdir (Şekil 3). Araştırmacılar deneylerini kanal genişliği 0,52 m, basamak yüksekliği 0,10 m, basamak genişliği 0,20 m olan $26,6^\circ$ açılı boşaltım kanalında $0,002-0,155 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ arasında değişen debi değerleri için gerçekleştirmişlerdir. Havuzlu basamaklı dolusavakların tasarımı için basamak uçlarına 0,031 m kalınlığında, 0,10 m yüksekliğinde eşikler yerleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, havuzlandırılmış basamaklı dolusavakların enerji sönümleme oranının klasik basamaklı dolusavaklara oranla daha düşük çıktığını belirlemişlerdir. Araştırmacılar, havuzlandırılmış basamaklı dolusavaklar ile sıralı ve şaşırtmalı kombine modellerden elde edilen sonuçlarda kanal enine doğru büyük akım farklılıkları gözlemlediklerini belirtmişlerdir. Yapılan tasarımların enerji sönümleme ve akım havalandırması açısından avantajlı bir performans sağlamadığını vurgulamışlardır. Felder vd. [28,29] çalışmaları incelendiğinde, basamak genişliğinin küçülmesi ile basamak uçlarına eklenen eşiklerin sönümlemede çok etkili olmadığı ancak, basamak genişliğinin artırılarak, dolayısı ile, şüt açısının azaltılarak yürütüldüğü deneylerde, eşik kullanılarak tasarlanan basamaklı dolusavakların enerji sönümlemede daha başarılı olduğu görülmektedir. Şüt açısı arttıkça basamak genişliği ile basamak yüksekliği arasındaki fark azaldığından, savaklanan akım, belirli bir debi değerinden sonra eşikleri makro pürüzlülük olarak algıladığından, enerji sönümlemedeki etkisini azaltıyor olabilir. Ancak, şüt kanalının açısı azaldıkça, dolayısı ile

basamak genişliği arttıkça, savaklanan akım, basamak üzerinde daha fazla yol kat ettiğinden eşiklere çarparak enerjisini sönmülemiş olabilir.



Şekil 3. Felder vd. [29] çalışmalarında kullandıkları modeller

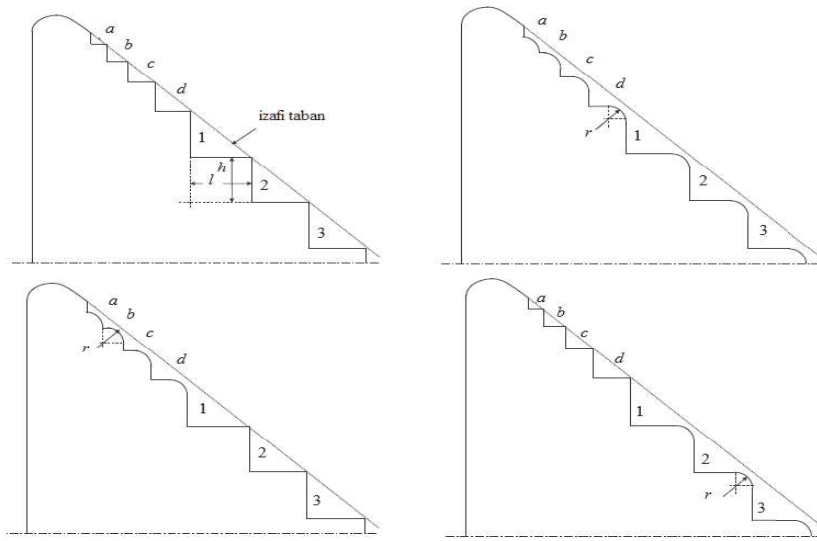
Zare ve Doering [30], basamaklı dolusavaklar üzerine yerleştirdikleri farklı geometrilerdeki eşikler ve engeller ile akım üzerinde havalanmaya başlama noktasını incelemişlerdir. Toplamda 8 farklı model oluşturan araştırmacılar, deneylerini sabit 45° açılı şüt kanalı üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar, geniş Froude sayısı aralığında yürüttükleri deneyler neticesinde havalanmayan bölge uzunluğu en kısa olan dolayısı ile kavitasyon riski en az olan savak modelinin “Silled-shifted rounded” (SSR) (Şekil 4) olduğunu, “baffled-edged” (BE) modeli kullanılarak yürütülen deneylerde ise en uzun havalanmayan bölge uzunluğunu elde ettiklerini vurgulamışlardır. Yan duvar yüksekliğinin en kısa olduğu savak çeşidinin ise “baffled-shifted sharp” (BSS) olduğunu dolayısı ile maliyet açısından bu savak çeşidinin daha uygun olduğunu vurgulamışlardır.



Şekil 4. Zare ve Doering [30] çalışmalarında kullandıkları modeller

Zare ve Doering [31], basamak uçları yuvarlatılmış basamaklı dolusavaklar ile klasik basamaklı dolusavakları; enerji sönmüleme, yan duvar yüksekliği ve havalanmaya başlama noktaları üzerinden kıyaslamışlardır. Araştırmacılar, yuvarlatılmış basamak kullanımının klasik basamaklara nazaran %3 oranında daha fazla enerji sönmülediğini, yan duvar yüksekliğine ihtiyacın %20 daha az olduğunu vurgulamışlardır. Toplamda 26 adet deneyin yürütüldüğü çalışmada kanal genişliği 57 cm, savak yüksekliği 82,26 cm ve basamak yüksekliği ile genişliği 7,50 cm olmakla beraber debi değerleri $0,012281-0,225965 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ arasında değişmektedir

(Şekil 5). Araştırmacılar ayrıca, ilk birkaç basamak ucunun yuvarlatılmasıyla enerji sönümlemede kayda değer bir sonuca erişilmediğini de vurgulamışlardır. Araştırmacıların yürüttüğü ilk çalışmada [30], havalanmayan bölge uzunluğunun tespit edilmesi tasarımcılar için önemli bir kriterdir çünkü şüt üzerindeki havalanmayan bölge (kara bölge) uzunluğu ne kadar az olursa kavitasyon riski de o denli azalmaktadır. Bilindiği üzere, basamaklı dolusavaklar kullanılarak bu risk oldukça azaltılmaktadır. Yapılan çalışmada araştırmacılar, her bir basamak üzerine ekledikleri engellerin kara bölgeye olan etkisini araştırmışlardır. En düşük kara bölge uzunluğuna SSR modelinde, en yüksek kara bölge uzunluğuna ise BE modelinde ulaşmaları, basamak uçlarına eklenen eşiklerdense basamak ortasına eklenen eşiklerin daha etkili olduğunu göstermektedir. Şüt açısı nedeniyle basamak uçlarının farklı geometrilerini akım, makro pürüzlülük olarak algılamış olabilir. Araştırmacılar, ikinci çalışmaları [31] ile yuvarlatılmış basamak uçlarının klasik basamaklara nazaran daha fazla enerji sönümleyebildiğini vurgulamışlardır.

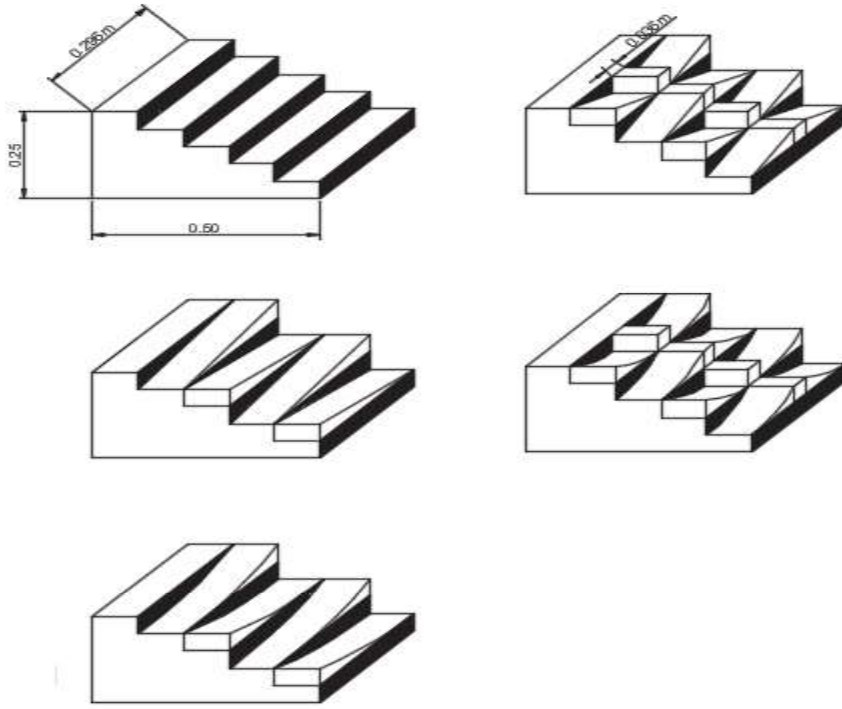


Şekil 5. Zare ve Doering [31] çalışmalarında kullandıkları modeller

Felder ve Chanson [32], basamaklı dolusavakların basamak uçlarına yerleştirdikleri farklı boşluk oranlarındaki 3,10 cm yüksekliğinde ve 1,50 cm genişliğindeki eşiklerin enerji sönümleme miktarlarını karşılaştırmışlardır. Araştırmacılar, 4 farklı model kullanarak yaptıkları deneysel çalışmaları 52 cm genişliğinde bir kanala yerleştirdikleri 10 cm yüksekliğinde ve 20 cm genişliğindeki 10 adet basamak ile yürütmüşlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, boşluklu eşikli basamaklı dolusavakların enerji sönümleme oranları açısından klasik basamaklı savaklara göre dezavantajlı olduğu vurgulanmıştır.

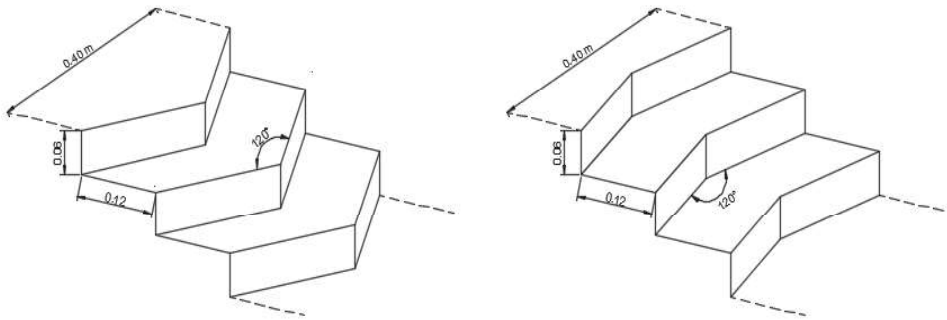
Mero ve Mitchell [33], 5 farklı model oluşturarak basamak şekillerinin enerji sönümleme oranlarına etkisini deneysel olarak incelemiştir. Araştırmacılar, 4,00 m uzunluğunda, 0,296 m genişliğinde ve 0,320 m derliğindeki kanal içerisine yerleştirdikleri basamaklı savakların basamak yüksekliğini 0,05 m ve basamak yüksekliğini 0,10 m olacak şekilde tasarlamıştır (Şekil 6). Debi değerlerinin 0,00213-0,0121 m³.s⁻¹ arasında değiştiği çalışmanın neticesinde reflektör kullanılarak oluşturulan basamaklı savakların enerji sönümleme oranları klasik basamaklı savaklardan oldukça yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte bütün modeller için debi arttıkça enerji sönümleme oranının azaldığı ve ayrıca reflektör kullanılmayan modellerin enerji sönümlemede çok avantajlı olmadığı sonucuna varılmıştır. Araştırmacılar, basamaklar üzerine reflektörler yerleştirerek farklı bir basamak geometrisi oluşturmuşlardır. Reflektörler sayesinde şüt üzerindeki akım içerisine dahil olan hava miktarı arttığından

mansaptaki enerji miktarının azaldığı düşünülmektedir. Enerji sönümlenmesi için faydalı olan bu çalışmanın uygulamada kullanılması işçilik maliyetlerini arttırabilir.



Şekil 6. Mero ve Mitchell [33] çalışmalarında kullandıkları modeller

Bai vd. [34], 5,40 m yüksekliğinde ve 0,40 m genişliğindeki deney seti için ve toplamda 56 adet basamak kullanarak iki farklı model oluşturmuşlardır (Şekil 7). Araştırmacılar, oluşturdukları modellerde ilk 28 basamağı geçiş basamağı olarak tasarlamışlardır. Her bir model için basamak genişliği 12 cm, basamak yüksekliği 6 cm ve birim debi 0,313, 0,425 ve 0,489 $m^2 \cdot s^{-1}$ 'dir. Elde edilen sonuçlara göre oluşturdukları her iki modelin enerji sönümlenme oranının klasik basamaklı savaklardan daha yüksek olduğunu vurgulamışlardır. Araştırmacıların oluşturduğu ilk tasarımda şüt üzerindeki akımın bölünerek savaklandığı, ikinci tasarımda ise bölünmeyle birlikte her iki taraftaki akımın birbirine çarparak enerji sönümlemesini artırdığı düşünülmektedir. Basamak sayısının fazla olması, gerçeği daha çok yansıtırken böyle bir tasarımın uygulanabilmesi için ekstra işçilik maliyetlerinin göz ardı edilmemesi gerektiği düşünülmektedir.



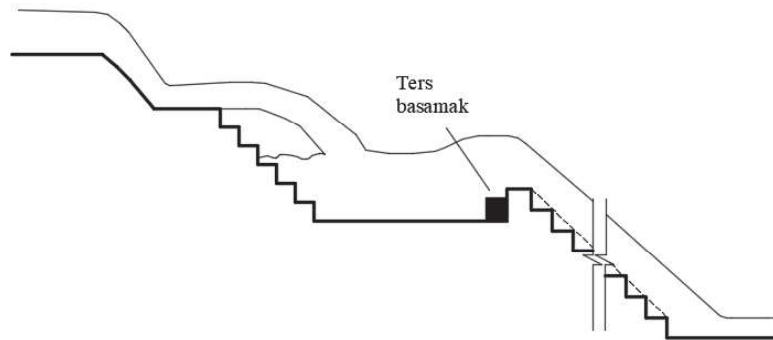
Şekil 7. Bai vd. [34] çalışmalarında kullandıkları modeller

Torabi vd. [35], 0,30 m genişliğinde ve 0,55 m derinliğindeki kanala yerleştirdikleri 2 farklı basamaklı dolusavağın üzerine düzenli ve düzensiz formda enerji kırıcı bloklar yerleştirilerek enerji sönümlenme oranlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, nap akımı rejiminde düzenli ve düzensiz olarak yerleştirilerek pürüzlü hale getirilen basamaklı savakların enerji sönümlenme oranları klasik basamaklı savaklardan yaklaşık %15-20 daha fazla olmakla birlikte düzenli olarak dizilen bloklardan alınan sonuçların dağınık olarak dizilen bloklardan alınan sonuçlardan daha verimli olduğunu vurgulamışlardır.

Zhang ve Chanson [36], 1,00 m genişlikli ve 45° şüt açılı kanala yerleştirdikleri, basamak yüksekliği ve genişliği 10 cm olan, basamaklı savakların basamaklarına yaptıkları pah ile akım üzerindeki hava miktarını ve enerji sönümlenme oranlarını kıyaslamışlardır. Araştırmacılar, toplamda 12 basamaklı savak kullanarak sürdürdükleri deneylerde debi değerini 0,083-0,216 m³.s⁻¹ arasında almışlardır. Elde edilen sonuçlara göre, pah yapılarak oluşturulan modellerde havalanma başlangıç noktasında mansaba doğru bir kaymadan bahsederken enerji sönümlenme oranının daha düşük değerlerde olduğu sonucuna varmışlardır.

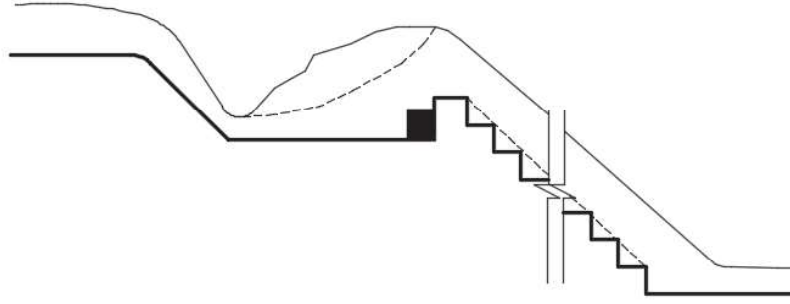
Ashoor ve Riazi [37], basamaklı dolusavaklarda üniform olmayan basamak geometrileri kullanarak basamaklı dolusavakların enerji sönümlenme oranlarını InterFOAM yazılımı ile sayısal olarak modellemişlerdir. Araştırmacılar; konveks, konkav ve karışık yarı üniform şüt kanalları üzerinde yapılan araştırmaların etkisini görebilmek amacıyla bütün modellerde basamak yüksekliği 0,10 m olacak şekilde 12 basamaklı dolusavak modeli kullanmışlardır. Araştırmacıların elde ettikleri sonuçlara göre, basamak uzunluğu arttıkça akım içerisine dahil olan hava miktarının arttığını, konkav model üzerinden savaklanan akım içerisindeki hava miktarının konveks modeldekinden daha fazla, bundan dolayı konkav modeldeki kavitasyon riskinin daha az olduğu, basamak geometrisinin 1V:2.2H oranında tasarlandığı modelin enerji sönümlenmede en etkili model olduğu sonuçlarına varmışlardır. Konkav modelde savaklanan akımın katı cisim üzerinde bulunma süresi daha fazla olduğundan hem akımın bu modeldeki basamakları daha iyi algılamasına hem de basamaklardan ötürü akım içerisine katılan hava miktarında artış olmasına, dolayısı ile daha fazla enerji sönümlenmesine sebep olduğu düşünülmektedir. Konveks modelden savaklanan akımda belirli bir mesafeden sonra şüt kanalının açısı arttığından akımın hızı artarak mansap havuzuna daha yüksek enerji ile çarparak daha fazla enerji sönümlenebilir.

Wu vd. [38], basamaklı dolusavak kanalı üzerinde havalandırma alanı oluşturarak akım içerisine daha fazla hava karıştırıp akım enerjisini sönümlenmeyi amaçlamışlardır (Şekil 8). Araştırmacılar, buna ek olarak, eğimli basamak uçlarına ekledikleri eşikler ile 8 farklı geometri tasarlamışlardır. Elde edilen sonuçlara göre, havalandırma alanının kullanıldığı deney setlerinde kullanılan eşikler sayesinde daha fazla enerji sönümlendiğini vurgulamışlardır.



Şekil 8. Wu vd. [38] çalışmalarında kullandıkları modeller

Zhou vd. [39], klasik basamaklı dolusavaklar ardına dinlenme alanı oluşturarak akımın hidrolik sıçrama ile enerjisini kısmen sönümledikten sonra basamaklı dolusavak kanalına geçmesini sağlamışlardır (Şekil 9). Araştırmacılar, yürüttükleri deneysel çalışmalar neticesinde klasik basamaklı dolusavak ile enerji sönümlenme oranlarını kıyaslamışlardır. Elde edilen sonuçlara göre, havalandırma alanı kullanılan basamaklı savaklarda hidrolik sıçrama nedeniyle akım derinliğinin daha kısa sürede uniform derinliğe ulaştığı savunulmuştur. Dolayısıyla, hidrolik sıçramalı basamaklı dolusavaklarda enerji sönümlenme miktarının klasik basamaklı savaklardan daha fazla olduğu belirtilmiştir.



Şekil 9. Zhou vd. [39] çalışmalarında kullandıkları modeller

3. SONUÇ

Çalışma kapsamında, literatürde yoğun bir yere sahip olan ve gün geçtikçe yapılan çalışmaların sayısında artış gözlenen basamaklı dolusavakların tasarımları ile alakalı bir kısım araştırmalar derlenmiştir. Genel manada araştırmacılar şüt açısı, basamak ve eşik geometrisi üzerine araştırmalar yaparak literatüre katkıda bulunmuşlardır. Araştırmacılar, enerji sönümlenmeye ek olarak havalanmayan bölge uzunluğu, kavitasyon gibi etkenleri de göz önünde bulundurmuşlardır. Sonuç olarak; debi ile enerji sönümlenme oranının ters orantılı olduğu, basamak üzerine eklenen farklı geometrideki eşiklerin enerji sönümlenme oranını genellikle arttırdığı, havalanmayan bölge (kara bölge) uzunluğunun kavitasyon üzerinde etkili olduğu, kara bölge uzunluğu ile enerji sönümlenme oranının ters orantılı olduğu yapılan literatür çalışmalarında gözlenmiştir. Ayrıca birçok çalışmada, maliyet açısından oldukça ekonomik olan klasik basamaklı dolusavakların, farklı geometrideki eşik ve model tasarımlarında; ekstra beton, donatı ve işçilik maliyetlerinin de göz önünde bulundurulması gerektiği vurgulanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Chanson, Forum article. Hydraulics of Stepped Spillways: Current Status, *Jl Hyd. Engrg., ASCE*. 126 (2000).
- [2] K.H. Frizell, B.W. Mefford, Designing Spillways to Prevent Cavitation Damage, *Concr. Int.* 13 (1991) 58–64.
- [3] Chanson, Review of studies on stepped channel flows, *Work. Flow Charact. around Hydraul. Struct. River Environ.* (1998) 25.
- [4] R.M. Boes, H. Chanson, J. Matos, I. Ohtsu, Y. Yasuda, M. Takahasi, S.P. Tatewar, R.N. Ingle, P.D. Porey, M.R. Chamani, N. Rajaratnam, Characteristics of Skimming Flow over Stepped Spillways, *J. Hydraul. Eng.* 126 (2000) 860–873. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(2000\)126:11\(860\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2000)126:11(860)).
- [5] C.E. Rice, K.C. Kadavy, Model Study of a Roller Compacted Concrete Stepped Spillway, *J. Hydraul. Eng.* 122 (1996) 292–297. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(1996\)122:6\(292\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(1996)122:6(292)).

- [6] H. Chanson, L. Toombes, Experimental investigations of air entrainment in transition and skimming flows down a stepped chute, *Can. J. Civ. Eng.* 29 (2002) 145–156. <https://doi.org/10.1139/101-084>.
- [7] R.M. Boes, W.H. Hager, Hydraulic Design of Stepped Spillways, *J. Hydraul. Eng.* 129 (2003) 671–679. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(2003\)129:9\(671\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2003)129:9(671)).
- [8] M. Berkün, *Su Yapıları*, Birsen Yayınevi. (2007).
- [9] Chanson, Stepped spillway flows and air entrainment, *Can. J. Civ. Eng.* 20 (1993) 422–435. <https://doi.org/10.1139/193-057>.
- [10] I. Ohtsu, Y. Yasuda, Transition from supercritical to subcritical flow at an abrupt drop, *J. Hydraul. Res.* 29 (1991) 309–328. <https://doi.org/10.1080/00221689109498436>.
- [11] Chanson, Prediction of the transition nappe/skimming flow on a stepped channel, *J. Hydraul. Res.* 34 (1996) 421–429. <https://doi.org/10.1080/00221689609498490>.
- [12] H. Chanson, State of the art of the hydraulic design of stepped chute spillways, *Hydropower Dams J.* (1994) 33–42.
- [13] Chanson, Hydraulic Design of Stepped Spillways and Downstream Energy Dissipators, *Dam Eng.* (2001) 205–242.
- [14] M.W. Essery, I. T. S., & Horner, *The Hydraulic Design of Stepped Spillways*, Constr. Ind. Res. Inf. Assoc. (1971).
- [15] R.M. Sorensen, Stepped Spillway Hydraulic Model Investigation, *J. Hydraul. Eng.* 111 (1985) 1461–1472. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(1985\)111:12\(1461\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(1985)111:12(1461)).
- [16] L. Peyras, P. Royet, G. Degoutte, Flow and Energy Dissipation over Stepped Gabion Weirs, *J. Hydraul. Eng.* 118 (1992) 707–717. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(1992\)118:5\(707\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(1992)118:5(707)).
- [17] D. Wuthrich, H. Chanson, Aeration performances of a gabion stepped weir with and without capping, *Environ. Fluid Mech.* 15 (2015) 711–730. <https://doi.org/10.1007/s10652-014-9377-9>.
- [18] A.A. Zuhaira, J.M. Horrillo-Caraballo, H. Karunarathna, D.E. Reeve, Investigating skimming flow conditions over stepped spillways using particle image velocimetry, in: *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, Institute of Physics Publishing, 2020: p. 012023. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/888/1/012023>.
- [19] M. Tabbara, J. Chatila, R. Awwad, Computational simulation of flow over stepped spillways, *Comput. Struct.* 83 (2005) 2215–2224. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2005.04.005>.
- [20] H. Shahheydari, J. Nodoshan, R. Barati, M.A. Moghadam, Discharge Coefficient and Energy Dissipation over Stepped Spillway under Skimming Flow Regime, *KSCE J. Civ. Eng.* 19 (2015) 1174–1182. <https://doi.org/10.1007/s12205-013-0749-3>.
- [21] M. Mohammad, R. Tabari, S. Tavakoli, Effects of Stepped Spillway Geometry on Flow Pattern and Energy Dissipation, *Arab J Sci Eng.* 41 (2016) 1215–1224. <https://doi.org/10.1007/s13369-015-1874-8>.
- [22] S. Li, J. Zhang, W. Xu, Numerical investigation of air–water flow properties over steep flat and pooled stepped spillways, *J. Hydraul. Res.* 56 (2018) 1–14. <https://doi.org/10.1080/00221686.2017.1286393>.
- [23] A.A. Hekmatzadeh, S. Papari, S.M. Amiri, Investigation of Energy Dissipation on Various Configurations of Stepped Spillways Considering Several RANS Turbulence Models, *Iran. J. Sci. Technol. - Trans. Civ. Eng.* 42 (2018) 97–109. <https://doi.org/10.1007/s40996-017-0085-9>.
- [24] D.E. Reeve, A.A. Zuhaira, H. Karunarathna, Computational investigation of hydraulic performance variation with geometry in gabion stepped spillways, *Water Sci. Eng.* 12 (2019) 62–72. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2019.04.002>.
- [25] M.O. Arjenaki, · Hamed, R.Z. Sanayei, Numerical investigation of energy dissipation

- rate in stepped spillways with lateral slopes using experimental model development approach, *Model. Earth Syst. Environ.* 6 (2020) 605–616. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00714-z>.
- [26] A. Ghaderi, S. Abbasi, J. Abraham, H.M. Azamathulla, Efficiency of Trapezoidal Labyrinth Shaped stepped spillways, *Flow Meas. Instrum.* 72 (2020) 101711. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2020.101711>.
- [27] S. Li, J. Yang, Q. Li, Numerical Modelling of Air-Water Flows over a Stepped Spillway with Chamfers and Cavity Blockages, *KSCE J. Civ. Eng.* 24 (2020) 99–109. <https://doi.org/10.1007/s12205-020-1115-x>.
- [28] S. Felder, C. Fromm, H. Chanson, The University Of Queensland Report Ch86/12 Air Entrainment And Energy Dissipation On A 8.9° Slope Stepped Spillway With Flat And Pooled Steps School Of Civil Engineering, 2012.
- [29] S. Felder, P. Guenther, H. Chanson, Air-water flow properties and energy dissipation on stepped spillways: a physical study of several pooled stepped configurations. 2012.
- [30] H.K. Zare, J.C. Doering, Inception Point of Air Entrainment and Training Wall Characteristics of Baffles and Sills on Stepped Spillways, *J. Hydraul. Eng.* 138 (2012) 1119–1124. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0000630](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000630).
- [31] H.K. Zare, J.C. Doering, Effect of rounding edges of stepped spillways on the flow characteristics, *Can. J. Civ. Eng.* 39 (2012) 140–153. <https://doi.org/10.1139/L11-121>.
- [32] S. Felder, H. Chanson, Effects of Step Pool Porosity upon Flow Aeration and Energy Dissipation on Pooled Stepped Spillways, *J. Hydraul. Eng.* 140 (2014) 04014002. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0000858](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000858).
- [33] S. Mero, S. Mitchell, Investigation of energy dissipation and flow regime over various forms of stepped spillways, *Water Environ. J.* 31 (2017) 127–137. <https://doi.org/10.1111/wej.12224>.
- [34] Z.L. Bai, Y. Peng, J.M. Zhang, Three-Dimensional Turbulence Simulation of Flow in a V-Shaped Stepped Spillway, *J. Hydraul. Eng.* 143 (2017) 06017011. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0001328](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0001328).
- [35] H. Torabi, A. Parsaie, H. Yonesi, E. Mozafari, Energy Dissipation on Rough Stepped Spillways, *Iran. J. Sci. Technol. - Trans. Civ. Eng.* 42 (2018) 325–330. <https://doi.org/10.1007/s40996-018-0092-5>.
- [36] G. Zhang, H. Chanson, Effects of Step and Cavity Shapes on Aeration and Energy Dissipation Performances of Stepped Chutes, *J. Hydraul. Eng.* 144 (2018) 04018060. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0001505](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0001505).
- [37] A. Ashoor, A. Riazi, Stepped Spillways and Energy Dissipation: A Non-Uniform Step Length Approach, *Appl. Sci.* 9 (2019) 5071. <https://doi.org/10.3390/app9235071>.
- [38] J. Wu, S. Qian, Y. Wang, Y. Zhou, Residual Energy on Ski-Jump-Step and Stepped Spillways with Various Step Configurations, *J. Hydraul. Eng.* 146 (2020) 06020002. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0001710](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0001710).
- [39] Y. Zhou, J. Wu, F. Ma, J. Hu, Uniform flow and energy dissipation of hydraulic-jump-stepped spillways, *Water Sci. Technol. Water Supply.* 20 (2020) 1546–1553. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.056>.