

## Harmonik Plan Görünümüne Sahip Dairesel Savakların Nümerik Modellenmesi

Ali Yıldız<sup>\*1</sup>, Ali İhsan Martı<sup>2</sup>, Mustafa Göğüş<sup>3</sup>

<sup>\*1</sup> Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Konya Teknik Üniversitesi, Konya, TÜRKİYE

<sup>2</sup> Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Konya Teknik Üniversitesi, Konya, TÜRKİYE

<sup>3</sup> Mühendislik Fakültesi, Çankaya Üniversitesi, Ankara, TÜRKİYE

(Alınış / Received: 08.03.2024, Kabul / Accepted: 23.04.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 26.04.2024)

**Anahtar Kelimeler**  
Dairesel Savaklar,  
Labirent Savaklar,  
Nümerik Modelleme

### ÖZ

Kullanımda olan barajların ve rezervuarların güvenli kabul edilebilmeleri için revize edilmeleri gerekmektedir. Mevcut rezervuarlar için taşkın kontrolü güvenlik standartları açısından çok önemliken, aynı zamanda maksimum su seviyelerinin sınırlı olduğu bir ortamda rezervuar kapasitesini artırmanın en etkili yolu, barajın üstüne labirent savaklar inşa etmektir. Labirent savaklarda, iki nap akımının çarpışması nap girişimine neden olur ve bu da savak performansını azaltır. Bu çalışmada, labirent savakların verimliliğini arttırmak amacıyla nap girişiminin oluşmasını engellemek, akım kapasitesini arttırmak ve akımın savak duvarlarına daha dik açı ile gelmesini sağlayan yarım daire savakların harmonik planda yerleştirilmesiyle elde edilen labirent savakların nümerik modellenmesi yapılmıştır. Harmonik olarak yerleştirilen dairesel savakların nümerik modellenmesinde üç farklı savak yüksekliği (P=0.2, 0.3 ve 0.4 m) ve N=2,3 ve 4 olmak üzere üç farklı döngü sayısı kullanılmıştır. Deneyle ve nümerik modelden elde edilen debi ve savak yükleri karşılaştırılmış ve nümerik modeller deneyle ile %97 oranında tutarlı sonuçlar vermişlerdir.

## Numerical Modeling of Circular Weirs with Harmonic Plan View

**Keywords**  
Circular Weirs,  
Labyrinth Weirs,  
Numerical Modeling

### ABSTRACT

Dams and reservoirs in use need to be revised to be considered safe. If the flood control is very important for existing reservoirs in terms of safety standards, the most effective way to increase reservoir capacity in a situation where maximum water levels are limited is to build labyrinth weirs on top of the dam. In labyrinth weirs, the collision of two nappe flows causes nappe interference, which reduces weir discharge performance. In this study, numerical modeling of labyrinth weirs obtained by placing semicircular weirs in a harmonic plan, which prevents the formation of nappe interference, increases the flow capacity and ensures that the flow reaches the weir walls at a steeper angle, was made in order to increase the efficiency of the labyrinth weirs. In the numerical modeling of harmonically placed circular weirs, three different weir heights (P = 0.2, 0.3 and 0.4 m) and three different cycle numbers, N = 2, 3 and 4, were used. The discharge values and total heads obtained from the experiments and the numerical model were compared and numerical models give %97 consistent results with experiments.

Sorumlu Yazar / Corresponding Author: ayildiz@ktun.edu.tr

Cilt / Volume: 1

Sayı / Issue: 1

Atıf Formatı / Cite as: Yıldız, A., Martı, A. İ., Göğüş, M., "Harmonik Plan Görünümüne Sahip Dairesel Savakların Nümerik Modellenmesi", Hendese, Cilt 1, Sayı 1, Sayfa 28-35, 2024.

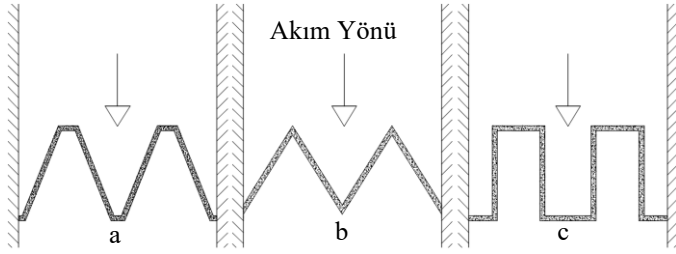
Doi: 10.5281/zenodo.11068955

## 1. GİRİŞ

Barajlar, nehirler üzerinde rezervuar oluşturmak, nehrin akımını önlemek, geciktirmek veya yönlendirmek amacıyla ve enerji, içme suyu, sulama ve ulaşım gibi farklı alanlardaki su ihtiyacının karşılanmasına yönelik inşa edilen bariyer yapılarıdır. Gövde, dip savak, dolusavak, rezervuar, su alma yapısı, çökeltim havuzu ve enerji kırıcı yapıları bir barajın temel bileşenleridir [1]. Barajların kurulacağı akarsuların belirli sürelerle bağlı olarak elde edilen akım verileri, tasarım aşamasında kullanılan en temel parametrelerden biridir. Gelişen hidroloji ve meteoroloji bilimiyle birlikte, daha uzun süreli hidrolojik kayıtların elde edilmesi, kullanılmakta olan baraj ve rezervuarların güvenliği açısından yenilenmelerinin gerekliliğini ortaya koymuştur. Ayrıca baraj haznelinde birikin sedimentlerde, haznelerin depolama kapasitesini azaltmaktadır. Eğer kanal veya rezervuar üzerine yerleştirilen savakların net kret uzunluğu yeterli değilse, doğrusal savaklar taşkın sırasında gelen fazla suyu güvenli bir şekilde akıtmak için yetersiz kalabilir [2]. Mevcut dolusavaklar, taşkın debisini rezervuardan mansaba, zamanında ve güvenli bir şekilde aktaramazsa, baraj gövdesi taşkın esnasında zarar görebilir ve bu yıkımlara yol açabilir [3]. Dolusavakların barajın işletilme amaçları ve stabilizasyonu açısından önemli işlevleri vardır ve baraj maliyetinin önemli bir bölümünü oluştururlar. Dolusavaklar, aşırı yağışlar sonrasında rezervuara gelen taşkın suyunu kontrollü ve güvenli bir şekilde mansap tarafına aktaran yapılardır [4]. Dolusavakların türü ve konumu güvenilir bir şekilde planlanmalı, tasarlanmalı, inşa edilmeli ve işletilmelidir. Barajlardaki hasarların %22'si dolusavak kapasitelerinin yetersiz olması veya yıkılması nedeniyle meydana gelmektedir [5]. Baraj yıkılmalarının ve taşkınların önlenmesi, baraj yapısının daha güvenli olması için baraj yapısının üzerinde bazı revizyonların yapılması gerekmektedir. Ayrıca artmakta olan su talebini karşılamak amacıyla, rezervuarda daha fazla su depolamak, hidroelektrik santraller için elektrik üreten türbinlere ilave su yükü sağlamak ve barajlardaki taşkın kontrol kapasitesinin artırılması amacıyla birçok barajın savak yüksekliğinin artırılması gerekmektedir. Taşkın debisinin mansap tarafına güvenli bir şekilde aktarılması için savağın net kret uzunluğunun aynı genişlikte artırılması gerekmektedir. Mevcut rezervuarlar için taşkın kontrolünün hayati önem taşıdığı ve depolayabileceği maksimum su seviyesinin dizayn edilenden az olduğu durumlarda, rezervuar kapasitesini arttırmanın en etkili yollarından biri, baraj gövdesi üzerine labirent savaklarının yapılmasıdır. Akım labirent savakların üzerinden geçtiği için, labirent savaklar üstten alışı savak kategorisinde değerlendirilmektedir. Mevcut baraj gövdeleri üzerine labirent savaklar yapılarak rezervuarların kret yüksekliği ve depolama hacmi artırılmaktadır. Labirent savaklar, doğrusal savaklar ile karşılaştırıldığında aynı kanal genişliği ile daha uzun bir tepe uzunluğu ( $L_{net}$ ) sağlar. Labirent savaklar belirli bir toplam düşü için deşarj kapasitesini arttırır, dolayısıyla mevcut barajların revizyonu için iyi bir alternatifirler [6]. Labirent savaklar geometrilerinden dolayı debi-deşarj kapasitesini attırdığı için, baraj gövdesinde doğrusal savaklara göre daha az yer gerektirir. Labirent savaklar aynı zamanda iyi enerji dağıtıcılar ve havalandırma yapılarıdır.

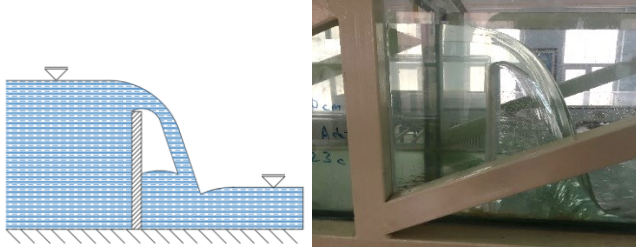
Labirent dolusavak, düz plan görünümünde katlanmış doğrusal bir savaktır. Gentilini [7] ilk defa plan görünümünde katlanmış üçgen labirent savak fikrini geliştirmiştir. Labirent savaklarla ilgili ilk kapsamlı çalışma Taylor [8] tarafından yapılmıştır. Taylor [8] ve Lux [9], labirent savaklar için bir döngünün uzunluğunun ( $w$ ), savak yüksekliğine ( $P$ ) oranı  $w/P$ 'nin, 2'den büyük olması gerektiğini belirtmişlerdir. Hay ve Taylor [10], labirent savakların tasarımında ve debinin hesaplanmasında kullanılacak parametrelerin belirlenmesi amacıyla 24 farklı şekil ve geometrideki labirent savak üzerinde testler gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmalara göre, döngü sayısı ( $N$ ) arttıkça savak katsayısının ( $C_d$ ) azaldığını göstermektedir. Lux'a [9] göre aynı kanal genişliğinde ( $W$ ) döngü sayısındaki ( $N$ ) artış, savak katsayısını ( $C_d$ ) azaltmaktadır. Tullis ve ark. [11], labirent savakların, geometrilerinden dolayı sahip olduğu avantajların ortadan kalkmaması için, savak üzerinden geçebilecek maksimum savak yükü için,  $H_T/P$  oranının 0,9'dan küçük ve  $w/P$  oranının 3,0 ile 4,0 arasında olması durumunda elde edileceğini belirtmiştir. Labirent döngü sayısının ( $N$ ) artması, labirentlerin çok küçük düz savaklara dönüşmesi anlamına gelmektedir. Yıldız ve ark. [12], 3 farklı savak yüksekliğinde ( $P=0.2, 0.3$  ve  $0.4$  m) ve 4 farklı döngü sayısında ( $N=2, 3$  ve  $4$ ) üçgen savaklar üzerinde deneyler yapmışlardır. Yıldız ve ark. [13] yine üç farklı savak yüksekliği ve dört farklı döngü sayısındaki dairesel savaklar üzerinde deneyler yapmışlardır ve döngü sayısı ( $N$ ) arttıkça savak katsayısının ( $C_d$ )'nin azaldığını belirtmişlerdir. Bilhan ve Emiroğlu [14], 3 farklı savak yüksekliğinde ( $P=10, P=15$  ve  $P=20$  cm) trapez ve dairesel labirent savaklar ile deneysel çalışmalar yapmışlardır ve elde edilen sonuçları savak katsayısı ( $C_d$ ) bakımından kıyaslamışlardır. Ayrıca Bilhan ve ark. [15] başka bir çalışmalarında nap girişimini önlemek için kret duvarlarının tepesine akım yönünde kırıcılar yerleştirmişlerdir ve elde edilen sonuçlara göre yerleştirilen nap kırıcılar deşarj katsayısını %2 oranında azaltmıştır. Bilhan ve ark. [16] daha önce dairesel savaklar ile yaptıkları laboratuvar çalışmalardan topladıkları verileri Flow-3d ile modelleyerek karşılaştırmışlardır. Sayısal modellerin doğruluğu test edilmiş ve sayısal model ile deneysel veriler %96 tutarlı bulunmuştur. Haghiabi ve ark. [17] üçgen ve trapez şekilli labirent savaklar üzerindeki enerji kırınımını deneysel olarak araştırmışlardır ve labirent savaklar üzerinden geçen akımın rölatif savak yükü,  $H_T/P$  oranı 0.1 ile 1 olduğu aralıkta labirent savaklar ortalama olarak %85 ile %70 arasında enerji kırınımı gerçekleştirmişlerdir. Zare ve ark. [18],  $60^\circ, 70^\circ, 80^\circ$  ve  $90^\circ$  duvar eğimlerine ve çap ( $w$ ) ölçülerine sahip dairesel savaklar üzerinde deneysel çalışmalar yapmışlardır. En yüksek savak katsayısı ( $C_d$ ) değeri,  $60^\circ$  duvar eğimine sahip dairesel labirent savakta elde edilmiştir ve dairesel savak çapının ( $w$ ), savak katsayısı ( $C_d$ ) üzerinde önemli bir etkisi olmamıştır. Khalili ve Honar [19], 3 farklı savak yüksekliğinde ( $P$ ) ve çap değerine sahip dairesel savakları yan savak olarak açık kanal sistemine yerleştirmişler ve Froude Sayısına ( $F_r$ ) bağlı olarak savak katsayılarını ( $C_d$ ) belirlemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre yarım daire şeklindeki yan savaklar, doğrusal savaklara göre daha iyi debi-deşarj performansı göstermiş ve yüksek savak katsayısı ( $C_d$ ) değerleri vermişlerdir. Labirent savaklar birçok geometrik konfigürasyona sahip olabilirler; en çok kullanılan konfigürasyonlar trapez (a), üçgen (b) ve dikdörtgen (c) konfigürasyonlardır. Bu 3 geometri

arasında üçgen ve trapez labirent savaklar en verimli deşarj performansını sağlamaktadır (Şekil 1).



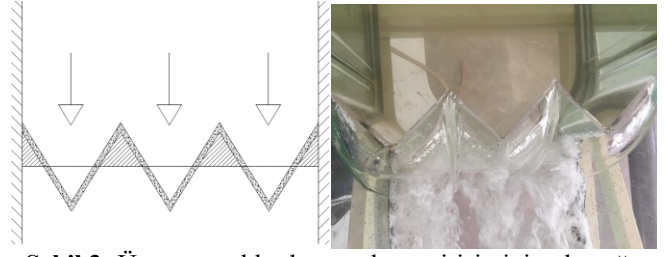
Şekil 1: Farklı plan görünümündeki labirent savaklar (a) trapez (b) üçgen (c) dikdörtgen

Labirent savak üzerinden geçen akım, mansap yüzeyinin havalandırılmasına bağlı olarak doğrusal savaklarda oluşan profile benzer olarak bir nap akımı üretir (Şekil 2). Akımın keskin kenarlı doğrusal bir savak üzerinden geçmesiyle oluşan akım profiline nap akımı denilmektedir. Nap akımında, akım savağın üzerinden dökülürken, su ile savağın mansap yüzeyi arasında hava mevcuttur.



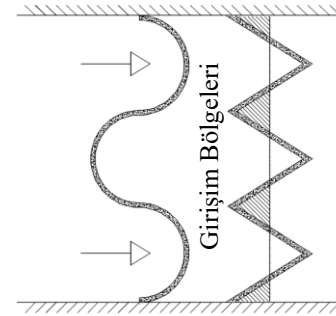
Şekil 2: Bir doğrusal savak üzerinde oluşan nap akımı

Labirent savaklarda toplam savak yükü ( $H_T$ ) arttığında savağın debi-deşarj performansı düşer ve tepeden bakıldığında aynı uzunlukta doğrusal savak gibi davranmaya başlamaktadır. Bunun iki önemli sebebi vardır; yukarı ve aşağı yöndeki akımların etkileşiminden kaynaklanan nap akımlarının girişimidir. Labirent savaklarda iki nap akımının çarpışması, nap akımlarının girişimine neden olur ve nap akımlarının çakışmasının (girişiminin) oluşacağı alan, labirent savağın yan duvar açısı, net kret uzunluğu ve döngü sayısı gibi geometrik özelliklerine bağlı olarak değişmektedir [20]. Nap girişimlerinin meydana geldiği trapez, üçgen ve dikdörtgen plan görünümüne sahip labirent savaklarda, mansaptaki alanın dar olması nedeniyle akımın havalanması zordur ve debi ( $Q$ ) deşarj kapasitesini azaltır. Labirent savaklarda komşu duvarlardan gelen akımların birbirleriyle çakışmasının yanında, aynı zamanda tepe tarafından gelen akımlarda da yan duvarlardan gelen akımlar çakışır (Şekil 3). Nap girişiminin olduğu toplam alan havalandırma durumuna bağlı olarak değişir ve girişim bölgesinin alanı toplam savak yüküne ( $H_T$ ) bağlı olarak doğrusal olarak artmaz [6]. Ek olarak, nap girişimi labirent savakların debi ( $Q$ ) kapasitesinin hesaplanmasında kullanılan etkin savak uzunluğunu ( $L_{net}$ ) azaltmaktadır.



Şekil 3: Üçgen savaklarda nap akımı girişiminin olduğu bölgeler

Yıldız ve ark. [21] tarafından, nap akımlarının girişimi sonucunda, trapez ve üçgen labirent savaklarda debi-deşarj verimini azaltan alanları ortadan kaldırmak ve akışın savak duvarlarına daha dik açı ile ilerlemesini sağlamak amacıyla, yarım daire şeklindeki savaklar harmonik plan görünümünde tasarlanıp test edilmiştir (Şekil 4).



Şekil 4: Harmonik plan görünümündeki dairesel ve üçgen labirent savakların karşılaştırılması

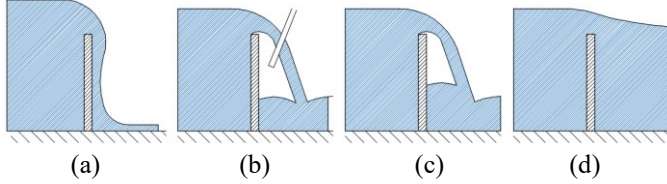
Yıldız ve ark. [21] tarafından harmonik plan görünümündeki dairesel savaklarda akım üçgen kesişme noktasına maruz kalmadığı için, üçgen plan görünümündeki labirent savaklar ile karşılaştırıldığında, aynı debi ( $Q$ ) değeri daha düşük savak yüklerinde ( $H_T$ ) oluşmaktadır. Dairesel labirent savaklardan elde edilen deneysel sonuçlar daha önce yapılan çalışmalarla karşılaştırılarak dairesel savakların performansı ve avantajları değerlendirilmiştir. Dairesel savaklar üzerinde yapılan laboratuvar çalışmalarda üç farklı savak yüksekliği ( $P=0.2, 0.3$  ve  $0.4$  m) ve üç farklı labirent döngü sayısı ( $N=2, 3$  ve  $4$ ) kullanılmış olup toplam 9 deney yapılmıştır. Bu çalışmada, bu deney setlerinin nümerik modelleri oluşturularak toplamda 9 adet konfigürasyonun modeli oluşturulmuştur.

## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1. Labirent Savaklar

Labirent savaklarda debi-toplam savak yükü ilişkisinin doğrusal savaklarla aynı olduğu varsayılırsa debi miktarı teorik olarak hesaplanandan daha az olmaktadır. Bunun nedeni savağın memba tarafındaki akım derinliğinin yaklaşma kanalındaki akım derinliğinden daha az olmasıdır. Labirent savaklarda net kret uzunluğu ( $L_{net}$ ) arttığında, debideki ( $Q$ ) artış oranı doğrusal savaklardaki ile aynı değildir. Yan duvar açısı azaldığında daha fazla nap girişimi artar ve yüksek savak yüklerinde debi-deşarj performansı düşer. Debi-deşarj performansı arttırmak için yan duvar açısı artırıldığında labirent savakların uzunluk avantajı ortadan kalkar. Debi çok yüksek

seviyelere ulaştığında savağın debi-deşarj verimi net kret uzunluğundan ziyade savağın geometrisinden (kesitinden) etkilenir. Bazı durumlarda duvarların alt kısımları yapay olarak havalandırılabilir. Falvey [22] labirent savaklar üzerindeki akımın havalandırılmasını 4 farklı durumda tanımlamıştır. Bu durumlar, Şekil 5'te gösterildiği gibi havalandırılmamış (bağlantılı) akım (a), kısmen havalandırılmış bacalı akım (b), kendinden havalandırılmalı ve nap akım durumu (c) ve batık (boğulma) akımdır (d).



**Şekil 5:** Doğrusal savak üzerinden geçen farklı akım durumları (a) Yapışık (havalanmamış), (b) Yarı havalanmış, (c) Nap (havalanmış), (d) Batmış

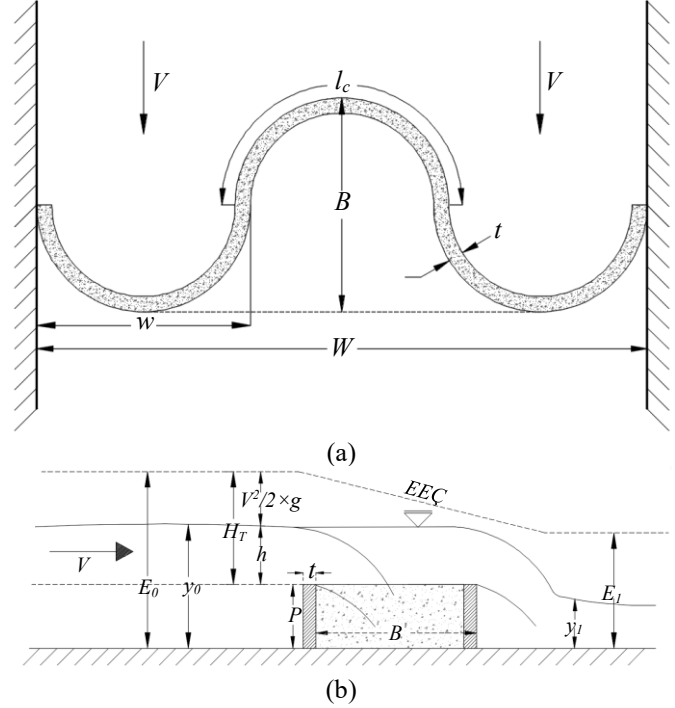
Labirent savakların üzerinden geçen akım 3 boyutlu olup, savakların üzerinden geçerken akım kritik akım durumundadır ve matematiksel ifadeler akımı tam olarak tanımlayamamaktadır. Labirent savakların geometrisi dikkate alındığında akımda ani daralma ve genişlemeler meydana gelir [3]. Labirent savaklar ile ilgili matematiksel denklemler türetilirken, enerji, momentum ve süreklilik denklemlerinin yanı sıra türbülanslı akış çizgileri, yüzey gerilimi, nap akımları altındaki negatif basıncın etkisi ve savak şekli gibi faktörler göz önünde bulundurulmalıdır. Akım ani bir daralmayla karşılaştığında su yüzeyinde ani bir düşüş veya ani bir genişlemeyle karşılaştığında ise su yüzeyinde bir yükselme olur. Bu iki koşulun birleşimi yaklaşma kanalındaki akımın su yüzeyi kotunda bir yükselmeye sebep olur. Bu nedenle araştırmacılar, labirent savaklar üzerindeki akımı hesaplamak için deneysel verilerden elde edilen ampirik formülleri kullanmışlardır.

Harmonik plan görünümünde yerleştirilen dairesel savakların tasarımında dikkate alınan ana parametreler; dolusavak (kanal) genişliği ( $W$ ), savak yüksekliği ( $P$ ), bir döngünün uzunluğu ( $l_c$ ), labirent döngü sayısı ( $N$ ), düz görünümde bir döngünün uzunluğu veya iki döngü arasındaki mesafe veya çap ( $w$ ), labirent savağın akım yönündeki uzunluğu ( $B$ ), yaklaşma hızı ( $V$ ), toplam düşü ( $H_T$ ) ve daha az etkili olan değişken; duvar kalınlığı ( $t$ ), Şekil 6'da gösterilmektedir.

Labirent savaklardaki akımı etkileyen parametrelerin, doğrusal savaklardaki akımı etkileyen parametrelerle aynı olduğu varsayılmaktadır. Bu varsayım üzerinden Tullis ve ark. [11] keskin kenarlı savak formülünü labirent savaklara uyarlayarak Denklem (1) elde etmişlerdir. Bu denklemde [23]  $H_T$ 'nin toplam yük olduğu ve  $H_T=h+V^2/2 \times g$  olduğu varsayılmaktadır.

$$Q = \frac{2}{3} \times C_d \times L_{net} \times \sqrt{2 \times g} \times H_T^{1.5} \quad (1)$$

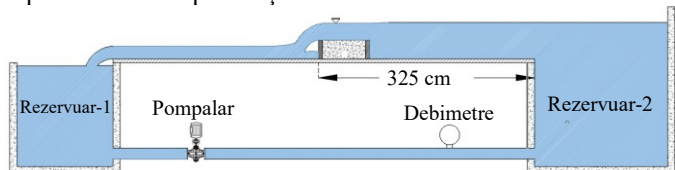
Burada, ( $Q$ ) debi,  $C_d$  savak katsayısı,  $L_{net}$  net kret uzunluğu,  $g$  yerçekimi ve  $H_T$  (piyezometrik yük ( $h$ ) + hız yükü ( $V^2/2g$ )) savak üzerindeki toplam yüküdür.



**Şekil 6:** Dairesel savak üzerinden geçen akımı etkileyen parametreler (a) Üstten (b) Yandan

## 2.2. Labirent Savakların Deneysel Modellenmesi

Harmonik plan görünümünde yerleştirilen dairesel labirent savakların deneysel olarak hidrolik özelliklerinin belirlenmesi için kullanılan açık kanal düzeneği, 0.6 metre genişliğinde, 0.5 metre yüksekliğinde ve 6.5 metre uzunluğundadır. Deneyleri gerçekleştirilecek olan dairesel labirent savaklar, konum olarak açık kanalın başlangıcından 325 cm uzağa yerleştirilmişlerdir. (Şekil 7). Bu lokasyonun seçilmesindeki amaç rezervuar-2'den gelen sudaki dalgalanmaları en aza indirmektir. Deneylerin yürütüldüğü açık kanal sisteminin yüzeyi 12 mm kalınlığında camdan imal edilmiştir ve pürüzsüz bir yüzeye sahiptir. Açık kanal sisteminde akım iki adet rezervuar yardımıyla sağlanmaktadır. Pompalar rezervuar-1'den suyu aldıktan sonra rezervuar-2'ye gönderirler. Rezervuar-2'ye gelen su daha sonra kanala geçerek akımı oluşturmaktadır. Açık kanal sisteminden ve savaklar üzerinden geçen debi değeri ( $Q$ ), pompalardan sonra boruların arasına yerleştirilen 0,01 L/s hassasiyetli ultrasonik debimetre ile ölçülmektedir. Açık kanala yerleştirilen labirent savaklar üzerinden geçen toplam yük ( $H_T$ ) değerleri, piyezometrik yük ( $h$ ) ve hız yükü ( $V^2/2 \times g$ ) toplamından hesaplanmıştır.



**Şekil 7:** Açık kanal sisteminin genel görünüşü

Döngü sayısı (N) ve savak yüksekliği (P), dairesel kesitli labirent savaklar üzerinden geçen akımı etkileyen en önemli iki parametredir. Bu iki temel parametre dikkate alınarak farklı deney konfigürasyonları oluşturulmuştur. Döngü sayısı (N) ve savak yüksekliğinin (P), savağın performansı üzerindeki etkileri, debi (Q) ve toplam savak yükü ( $H_T$ ) ölçülerek araştırılmıştır. Sabit savak yüksekliğine (P), farklı döngü sayılarına (N) sahip savakların kullanılmasının amacı, döngü sayısının deşarj performansına etkisini incelemektir. Aynı döngü sayısında (N) farklı savak yüksekliklerine (P) sahip savakların incelenmesinin amacı, savak yüksekliğinin (P) akım üzerindeki etkisini incelemektir. Farklı konfigürasyondaki savaklarda savak üzerinden, aynı debi (Q) daha düşük bir savak yükünde ( $H_T$ ) geçerse, bu durum savağın daha verimli olduğunu göstermektedir. Laboratuvarında dairesel savaklar üzerinde gerçekleştirilen testlerde P=0.2, 0.3 ve 0.4 m olmak üzere üç farklı savak yüksekliği (P) kullanılmıştır. Harmonik plan görünümündeki savakların deneysel tasarımında kullanılacak yarım daire sayısı N=2, 3 ve 4 olarak belirlenmiştir. Deneyleri gerçekleştirilen harmonik plan görünümündeki dairesel savakların 3 boyutlu görüntüleri Şekil 8’de gösterilmiştir. Dörtten fazla sayıdaki döngü sayıları kullanılmamasının sebebi, labirent savağın içerdiği döngü sayısı arttıkça, sağladığı kret uzunluğu avantajının ortadan kalkması ve labirent savağın doğrusal bir savak gibi davranmasıdır. Dairesel savaklar için kullanılan döngü sayısı (N) arttıkça veya azaldıkça, toplam net kret uzunluğu ( $L_{net}$ ) değişmezken, bir labirent döngüsünün net kret uzunluğu ( $l_c$ ) döngü sayısına bağlı olarak artmaktadır veya azalmaktadır. Labirent savağın toplam kret uzunluğu  $N \times l_c$  ile hesaplanmaktadır ve tüm konfigürasyondaki savaklar için toplam net kret uzunluğu  $L_{net} = 94,24$  cm olmaktadır.



Şekil 8. Deneyleri ve nümerik modelleri oluşturulan harmonik dizilimdeki dairesel labirent savaklar

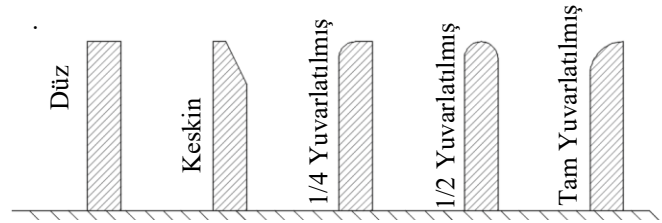
Bu çalışmada gerçekleştirilen 9 adet dairesel kesitli labirent savak deneyleri Çizelge 1’de gösterilmektedir. Plan görünümündeki döngü sayısı, savak yükseklikleri (P), bir labirent döngüsünün net kret uzunluğu ( $L_c$ ) ve bir labirent döngüsünün uzunluğu (w) **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**’de verilmiştir.

Üzerlerinde deneyler yürütülen dairesel labirentler savaklar düz kret şekline sahiptir (Şekil 9). Savakların tepelerinde yuvarlaklık bulunmadığından kretin kalınlığı savağın et kalınlığına eşittir. Savaklar 0.6 cm kalınlığında akrilik levhalardan elde edilmişlerdir. Dairesel savaklar üzerinde yapılan deneylerde nap akımının oluşması amaçlanmıştır ve deneysel veriler nap akımının oluştuğu şartlarda toplanmıştır. Nap akımı altında havalandırmanın bitmesi ve akımın havalandırılmamış (kohezif) akım durumuna geçmesinden

sonra veri elde edilememiştir

Çizelge 1. Dairesel savaklar ile yapılan deneyler

No	Plan Görünümü	Savak Yüksekliği (P)	Döngü Sayısı (N)	Bir döngünün net kret uzunluğu ( $l_c$ )	Bir döngünün plan gör. Uzunluğu (w)
1 4 7		0.2 m	2	47.12 cm	0.3 m
		0.3 m			
		0.4 m			
2 5 8		0.2 m	3	31.41 cm	0.2 m
		0.3 m			
		0.4 m			
3 6 9		0.2 m	4	23.56 cm	0.15 m
		0.3 m			
		0.4 m			



Şekil 9: Farklı kret tepe şekilleri

### 2.3. Dairesel Savakların Nümerik Modellenmesi

Harmonik plan görünümündeki dairesel savaklar ile yapılan deneylerin, nümerik modelleri sonlu hacim metodu tabanlı (VOF) ANSYS'in Fluent modülü kullanılarak oluşturulmuştur. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) teknikleri aynı model üzerinde birden fazla analiz yapılabilmesi, verilerin daha kolay toplanıp paylaşılabilmesi ve deneysel çalışmalara göre ekonomik olması sebebiyle son zamanlarda hidrolik yapıların tasarımında sıklıkla kullanılmaktadır. Sıvı-katı, sıvı-gaz, sıvı-katı-gaz ve gaz-katı etkileşimlerini içeren, birden fazla farklı fazları içeren akışkan problemleri Fluent tarafından çözülebilmektedir. Bu akışkan problemlerinin çözümü için, Eulerian, Volume of Fluid (VOF) ve Discrete Phase Method (DPM) kullanılmaktadır. Enerji, momentum ve kütle korunumu yasalarından elde edilen denklemler akış hareketinin bulunduğu problemin çözümü için kullanılır.

Kütle korunumu denklemi veya süreklilik denklemi Denklem 2 olarak yazılabilir:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (2)$$

2D aksel simetrik geometriler için süreklilik denklemi Denklem 3 ile verilmektedir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v_r) + \frac{\rho v_r}{r} = S_m \quad (3)$$

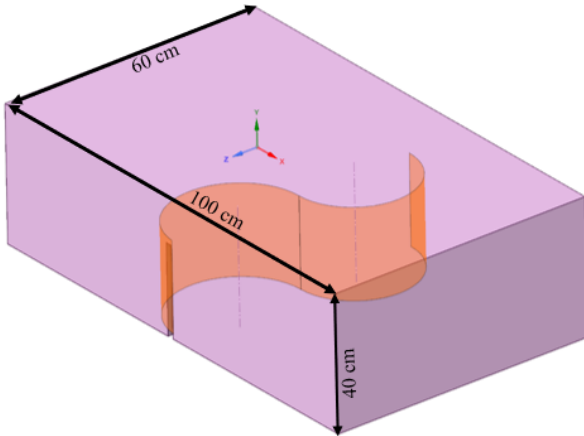
Ataletsel (hızlanmayan) bir referans çerçevesinde momentumun korunumu Denklem 4 ile açıklanmaktadır.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla * (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla * (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (4)$$

Burada x aksel koordinat, r radyal koordinat,  $v_x$  aksel hızdır,  $v_r$  radyal hızdır,  $\rho$  sıvının yoğunluğu, P statik basınç, g yerçekimi,  $\vec{F}$  kuvvettir ve  $\vec{\tau}$  stres tensörüdür.

### Geometri

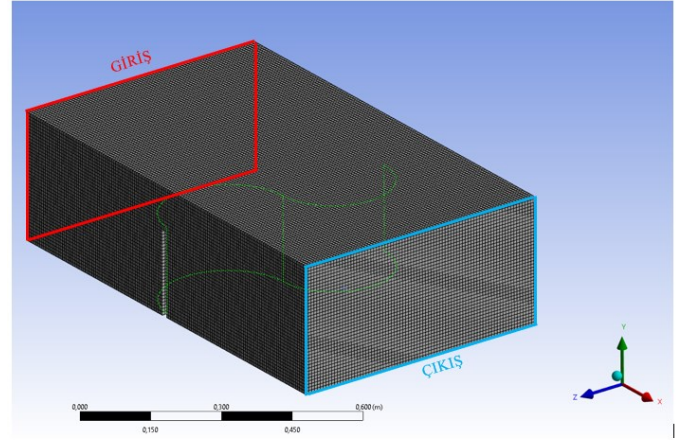
Dairesel savakların nümerik modelleri, fiziksel deneyler ile aynı büyüklükte ve 3 boyutlu olarak oluşturulmuştur. Fluent'te akışkan problemlerinin analizi, katı hacmi geometrisi yerine, akış hacmi geometrisinin içerisinde gerçekleştirilmektedir. Akım hacmi, su ve havanın bulunabileceği suyun ve havanın temas ettiği katı yüzeyleri oluşturan hacim dışarısında kalan bölgedir. Bu nedenle akış hacminin büyüklüğü tüm hidrolik olayları kapsayacak şekilde problemin boyutuna göre belirlenmelidir. Analizde kullanılacak akış hacimleri AutoCAD'de oluşturularak sat (Standart ACIS Text) formatında programa aktarılmıştır. Analizde kullanılan akış hacmi 40 cm yüksekliğinde, 60 cm genişliğinde ve 100 cm uzunluğundadır (Şekil 10). Akım hacminin genişliği kanal genişliğine eşit alınmıştır. Akım hacminin yüksekliği ve uzunluğu, suyun dairesel savaklar üzerinden akışını ve dökülmesinin analiz bölgesi içinde kalacağı şekilde seçilmiştir.



Şekil 10: Nümerik analizlerde kullanılan akış hacmi

### Mesh

Akışkan problemini çözmek için, 3 boyutlu akış hacmi daha küçük hürelere ayrılır. Bu hürelere mesh olarak adlandırılır. Akış hacminin içerdiği hücre (mesh) sayısı arttıkça çözümün doğruluğu artmaktadır. Sayısal modelin akım hacminin geometrisi dikdörtgen prizma olduğundan meshlerin şekli de küp olarak seçilmiş ve Kartezyen mesh sistemi kullanılmıştır (Şekil 11). Kullanılan küp şeklindeki meshlerin, bir kenar boyutu 0,008 m=8 mm olup toplamda 483000 adet mesh ile analiz gerçekleştirilmiştir.,



Şekil 11: Hücrelerin oluşturulması için kullanılan Kartezyen mesh sistemi

### Setup

Akım hacminin “giriş” yüzeyi “mass flow inlet” yani debi girişi, akım hacminin “çıkış” kısmı ise “pressure outlet” yani serbest basınç çıkışı olarak tanımlanmıştır. Renormalization Group (RNG) k-omega modeli, türbülans modeli olarak kullanılmıştır. Dairesel savaklar üzerinde yapılan deneylerde serbest yüzeyli su akışı ve üzerinde açık hava basıncı bulunmaktadır. Bu nedenle akım hacminde hem hava hem de su bulunabilecek şekilde analiz 2 fazlı olarak tasarlanmıştır. İki fazlı akımın sağlanması için VOF (Volume of Fluid) yöntemi olarak “Multiphase” modeli seçilmiştir. Çözümü daha detaylı hale getirmek için “explicit” çözüm yerine “implicit” çözüm kullanılmıştır. Analiz süresini düşürmek için dairesel savakların memba tarafında bir başlangıç su hacmi tanımlanır. Bu sayede savakların arkasındaki rezervuarın su ile doldurulması için harcanan analiz süresi kısaltılmıştır. Hesaplama kullanılan “time step size” savak yüksekliğine (P) ve debiye (Q) bağlı olarak, 0.0015-0.006 sn arasında değişmektedir.

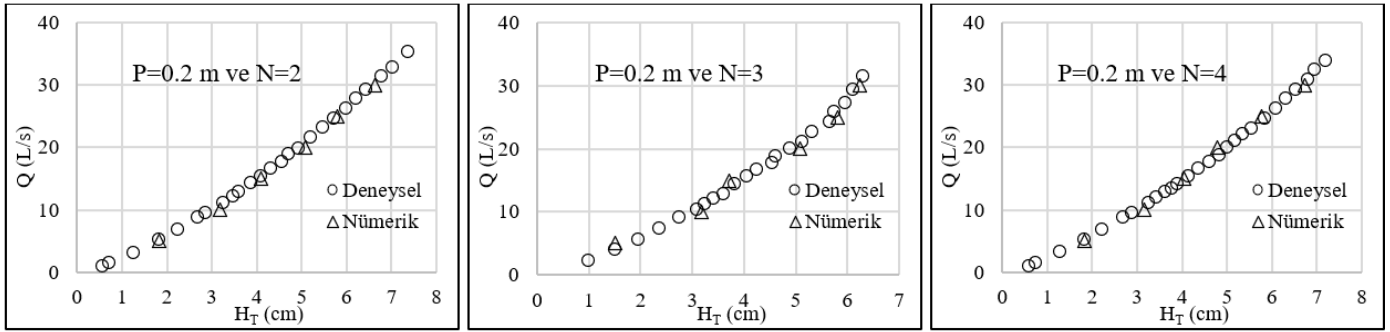
### 3. SONUÇ VE TARTIŞMA

Açık kanal sistemine harmonik olarak yerleştirilen dairesel labirent savakların hidrolik performansını belirlemek amacıyla, 3 farklı savak yüksekliği (P=0.2, 0.3 ve 0.4 m) ve 3 farklı döngü sayısı (N=2, 3 ve 4) için toplamda 9 deney gerçekleştirilmiştir. Harmonik plan görünümündeki dairesel savaklar ile yapılan deneyler, Şekil 5'te gösterilmiştir. Yapılan deneylerde, su savakların üzerinden geçerken oluşan akışta, kendinden havalanmış nap akımının oluşmasına dikkat edilmiştir. Debi (Q) ve karşılık gelen toplam savak yükü ( $H_T$ ) değerleri kendinden havalanmış nap akımı için toplanmıştır. Nap akımının oluşmadığı ve akımın yapışık ve batmış akım olduğu durumlarda veri alınmamıştır. Deneylerde kullanılan dairesel savakların döngü sayısından (N) bağımsız olarak, tüm konfigürasyonlar için toplam kret uzunluğu  $L_{net}=94,24$  cm'dir.

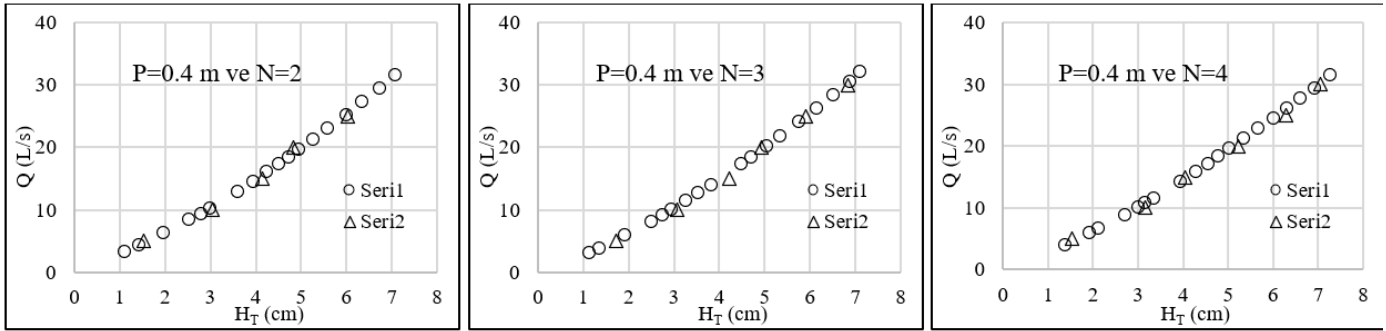
Dairesel savaklar için yapılan her bir deney düzeneği için 9 adet nümerik model oluşturulmuştur. Her bir konfigürasyondaki nümerik modeller  $Q=5-10-15-20-25-30$  L/s olmak üzere altı debi değeri ile nümerik model analizleri yapılmıştır. Bu debi değerleri ile nümerik modeller üzerinde toplamda 56 adet analiz gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırma grafiksel olarak yapılacağından analizlerde kullanılacak debi değerleri, deneylerdeki ile aynı seçilmesi gerekmektedir. Fluent de yürütülen analizler, “giriş” ve “çıkış” sınırlarındaki debi değerleri eşitlenip sistem kararlı hale gelinceye kadar sürdürülmüştür. Toplam analiz süresi debi ( $Q$ ) ve savak yükü ( $H_T$ ) değerlerine bağlı olarak her nümerik model için 6-9 saat arasında değişmektedir. Nümerik modellerden ve laboratuvar

yükündeki artış miktarı azalmaktadır ve debi ( $Q$ )-savak yükü ( $H_T$ ) arasındaki eğri ilişkisi parabolik olmaktadır. Nümerik modellerden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, aynı debi ( $Q$ )-savak yükü ( $H_T$ ) ilişkisi gözlenmektedir. Bütün savak yükleri ve döngü sayıları göz önünde bulundurulduğunda, nümerik modeller ile deneysel verilerin %97 oranında tutarlı sonuç verdiği görülmüştür. Nümerik modelin doğruluğu, kullanılan meshlerin boyutları ile yakından ilişkilidir. Bu çalışmada 8 mm büyüklüğünde, kare şeklinde meshler kullanılmıştır. Daha küçük mesh boyutu %3 lük hata payının düşürülmesi mümkündür.

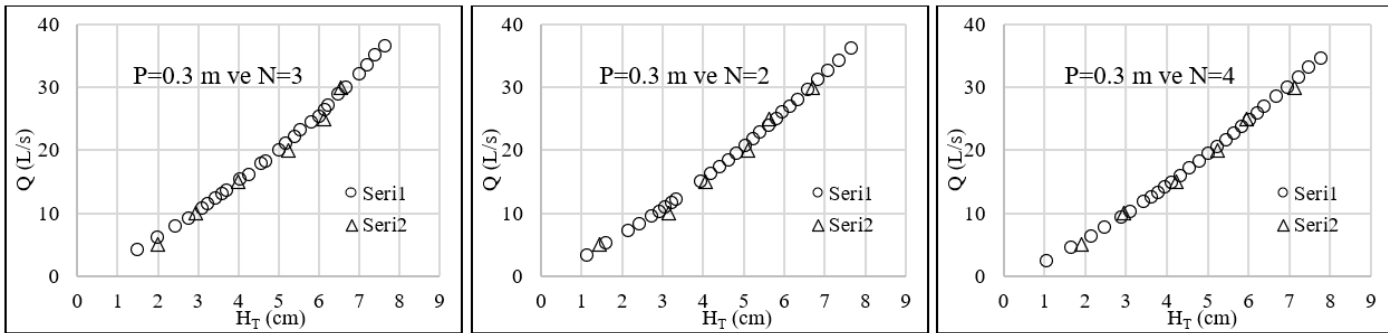
Deneylerden ve sayısal modellerden elde edilen üç boyutlu görüntüler, görsel olarak incelenmiştir. Görsel analizde, su



Şekil 12. P=20 cm için farklı döngü sayılarındaki dairesel savakların deneysel ve nümerik sonuçlarının karşılaştırılması



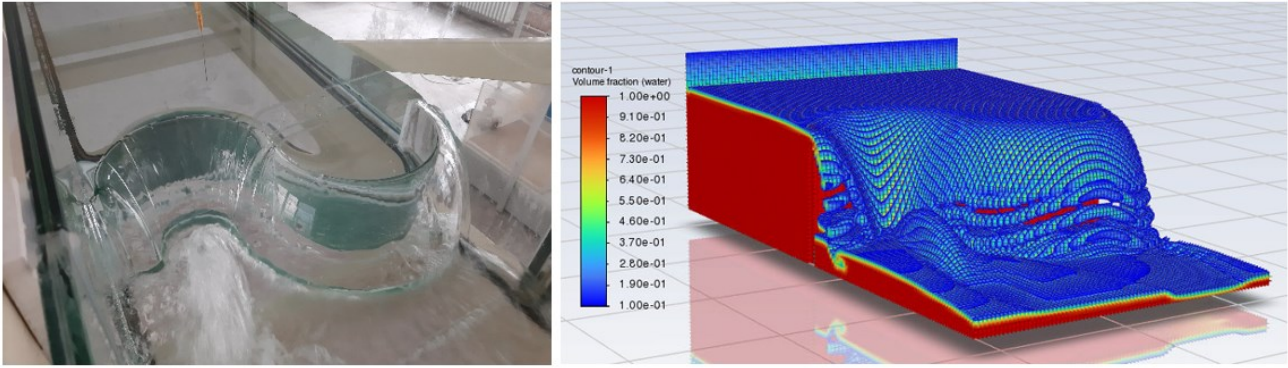
Şekil 13. P=40 cm için farklı döngü sayılarındaki dairesel savakların deneysel ve nümerik sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 14. P=30 cm için farklı döngü sayılarındaki dairesel savakların deneysel ve nümerik sonuçlarının karşılaştırılması

çalışmalarından elde edilen veriler toplam debi ( $Q$ ) ve savak yükü ( $H_T$ ) açısından grafiksel olarak karşılaştırılmıştır. Aynı savak yüksekliği ( $P$ ) ve döngü sayısı ( $N$ ) için deneylerden ve sayısal modellerden elde edilen sonuçlar toplam savak yükü ( $H_T$ ) ve debi ( $Q$ ) değerleri karşılaştırılmıştır (Şekil 12, Şekil 13 ve Şekil 14). Deneysel veriler incelendiğinde debi ( $Q$ ) arttıkça, savak yükü lineer olarak artmamaktadır. Debi arttıkça savak

yüzeyi profilleri incelenmiş ve suyun savakların özelliklerine bağlı olarak nasıl döküldüğü ve ardından savakların mansap kısmında oluşan türbülanslar karşılaştırılmıştır. Sayısal modelden üretilen üç boyutlu görüntülerle deneyler arasında yapılan karşılaştırmada, akımın oluşturduğu su yüzeyi profillerinin oldukça benzer oldukları görülmektedir.



**Şekil 15:** Dairesel savak deneylerinden ve nümerik modellerinden elde edilen 3 boyutlu görüntülerin karşılaştırılması.

Su, savakların üzerinden serbest bir şekilde akarken, mansap tarafında akım kendinden havalanmış nap akımı durumundadır (Şekil 15). Her iki modelde de suyun davranışı, savakların arkasında bir rezervuar görevi görmekte ve savakların üzerinden nap girişimi oluşturmadan dökülmektedir. Nümerik modelde, savakların memba tarafında hazne olarak davranan bölgede bir dalgalanma veya şiddetli türbülans gözlemlenmemiştir. Bu durum, uygulanan sınır tabaka koşullarının başarılı bir şekilde işlediğini göstermektedir. Sayısal modelden elde edilen üç boyutlu simülasyonlar ile deney görüntülerinin karşılaştırılması Şekil 15'te gösterilmiştir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma Ali YILDIZ'ın "Dairesel labirent savakların hidrolik özellikleri, deneysel tasarımı ve nümerik modellenmesi" isimli doktora tez çalışmasından üretilmiştir. Yardımlarından dolayı Danışmanım Ali İhsan MARTI ve Yardımcı Danışmanım Mustafa GÖĞÜŞ'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

## KAYNAKLAR

- [1] U.S. Bureau of Reclamation, "Design of small dams", Washington, D.C., 1977.
- [2] Tingey, S.E., "Discharge Coefficients of Oblique Weirs", Yüksek Lisans Tezi, Utah State University, 2011.
- [3] Amanian, N., "Performance and Design of Labyrinth Spillway", Yüksek Lisans Tezi, Utah State University, 1987.
- [4] Reese, A.J., Maynard, S.T., "Design of Spillway Crests", Journal of Hydraulic Engineering, Cilt 1987, Sayı 113, Sayfa 476-90, 1987.
- [5] ICOLD. Dam failures statistical analysis. ICOLD - Central Office; 1995.
- [6] Wormleaton, P.R., Tsang, C.C., "Aeration Performance of Rectangular Planform Labyrinth Weirs", Journal of Environmental Engineering, Cilt 126, Sayı 5, Sayfa 456, 2000.
- [7] Gentilini, B., "Stramazzi con cresta a pianta obli-qua e zigzag", Memorie e Studi Del Regio Politecnico Di Milano, Cilt 48, Sayfa 1-12, 1940.
- [8] Taylor, G., "The performance of labyrinth weirs", Doktora Tezi, University of Nottingham, 1968.
- [9] Lux, F., "Design and application of labyrinth weirs", Design of Hydraulic Structures, 205-2017, Albertson & Kia (eds), Colorado, 1989.
- [10] Hay, N., Taylor, G., "Performance and Design of Labyrinth Weirs", Journal of the Hydraulics Division, Cilt 96, Sayfa 2337-57, 1970.
- [11] Tullis, J.P., Amanian, N., Waldron, D., "Design of Labyrinth Spillways", Journal of Hydraulic Engineering, Cilt 121, Sayı 3, Sayfa 247, 1995.
- [12] Yıldız, A., Marti, A.I., Gogus, M., "Determination of hydraulic characteristics of flow over a triangular sectioned weir by using experimental and numerical modeling", Journal of Computational Applied Mechanics, Cilt 52, Sayı 2, Sayfa 215-232, 2021.
- [13] Yıldız, A., Marti, A.İ., Gögüş, M., "Farklı savak yüksekliğine ve konfigürasyona sahip dairesel labirent savakların deneysel modellenmesi", Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Cilt 13, Sayı 2, Sayfa 373-385, 2023.
- [14] Bilhan, O., Emiroğlu, M.E., "Experimental Studies on Determination of Discharge Capacity of Circular Labyrinth Weirs Located on A Straight Channel", International Journal of Electronics, Mechanical and Mechatronics Engineering, Cilt 6, Sayı 3, Sayfa 1227-39, 2016.
- [15] Bilhan, O., Emiroglu, M.E., Miller, C.J., "Experimental Investigation of Discharge Capacity of Labyrinth Weirs with and without Nappe Breakers", World Journal of Mechanics, Cilt 6, Sayı 7, Sayfa 207-221 2016.
- [16] Bilhan, O., Aydin, M.C., Emiroglu, M.E., Miller, C.J., "Experimental and CFD Analysis of Circular Labyrinth Weirs", Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Cilt 144, Sayı 6, 2018.
- [17] Hagiabi, A.H., Ghaleh, Nou, M.R., Parsaie, A., "The energy dissipation of flow over the labyrinth weirs", Alexandria Engineering Journal, Cilt 61, Sayı 5, Sayfa 3729-3733, 2022.
- [18] Zare, H., Vaghefi, M., Mahmoudi, A., Behrooz, A.M., "Experimental Exploration of Flow Hydraulics and Discharge Coefficient for an Inclined Circular Labyrinth Weir", Water Resources Management, Cilt 37, Sayfa 4521-4536 2023.
- [19] Khalili, M., Honar, T., "Discharge coefficient of semi-circular labyrinth side weir in subcritical flow", Water SA, Cilt 43, Sayı 3, Sayfa 433-441, 2017.
- [20] Crookston, B.M., "Labyrinth Weirs", Doktora Tezi, Utah State University, Utah, 2010.
- [21] Yıldız, A., Marti, A.İ., Gögüş, M., "The hydraulic investigation of harmonic plan weirs", Flow Measurement and Instrumentation, Cilt 95, Sayı 102512, 2024. <https://doi.org/10.1016/J.FLOWMEASINST.2023.102512>.
- [22] Falvey, H.T., "Hydraulic Design of Labyrinth Weirs" 1-160, ASCE, Reston, 2002.
- [23] Crookston, B.M., Tullis, B.P., "Hydraulic Design and Analysis of Labyrinth Weirs. I: Discharge Relationships", Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Cilt 139, Sayı 139, Sayfa 363-370, 2012.