



BENT KAPAĞI ALTINDAN GEÇEN AKIMIN OLUŞTURDUĞU HİDROLİK SIÇRAMANIN KONUMUNUN DENEYSEL VE NÜMERİK OLARAK BELİRLENMESİ

Ali YILDIZ^{1*}

¹Konya Technical University, Faculty of Engineering and Natural Science, Department of Civil Engineering, 42250, Konya, Türkiye

Özet: Bent kapakları, rezervuardaki su seviyesini kontrol edilmesini ve kapasitenin üzerindeki fazla suyun belli bir debi ile kontrollü bir şekilde mansap tarafına aktarılmasını sağlarlar. Bir bent kapağının altından geçen akım, serbest veya batmış akım durumunda olabilir. Serbest akım durumunda kapak altından sel rejimiyle çıkan akım, nehir rejimine geçişinde, kapak sonrasında bir hidrolik sıçrama meydana getirir. Oluşan hidrolik sıçramanın, etraftaki yapılara ve bulunduğu kanala zarar vermemesi için hidrolik sıçrama konumunun tam olarak bilinmesi gerekmektedir. Bu çalışmada dikdörtgen kesite sahip bir açık kanal sisteminde, hidrolik sıçrama oluşturmak için bent kapağı ve doğrusal savak kullanılmıştır. Oluşan hidrolik sıçramanın konumunun, debi ve kapak açıklığı ile değişimi incelenmiştir. Deneylerde iki farklı kapak açıklığı ($e_1 = 2,5$ cm ve $e_2 = 5$ cm) kullanılmış ve 34 farklı debi değeri için deneyler yapılmıştır. Hidrolik sıçrama konumunun kapak açıklığına bağlı olarak farklı oranlarda, debi ile lineer değişim gösterdiği görülmüştür. Ayrıca fiziksel deney düzeneklerinin, 2-boyutlu nümerik modelleri oluşturulmuş ve deneylerden elde edilen hidrolik sıçrama konumları ve akım derinlikleri, nümerik modeller ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre nümerik model ile fiziksel model, $e=2,5$ cm kapak açıklığı için %92,22 ve $e=5$ cm kapak açıklığı için %95,69 oranında tutarlılık göstermişlerdir.

Anahtar kelimeler: Bent kapakları, Fluent, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, Serbest hidrolik sıçrama

Experimental and Numerical Investigation of the Position of Hydraulic Jump Formed by Flow Passing Under the Sluice Gate

Abstract: Sluice gates control the water level in the reservoir and transfer the excessive water above the reservoir capacity to the downstream side in a controlled manner with a certain discharge. The flow passing under a sluice gate can be in free or submerged flow conditions. In the case of free flow, when the flow regime is changed from subcritical to supercritical, hydraulic jump occurs after the gate. The location of the hydraulic jump must be known to prevent the damage caused by the hydraulic jump to hydraulic structures and the channel. In this study, a sluice gate and a linear weir were used to create a hydraulic jump in the rectangular open channel system. The relation of the position of the hydraulic jump with discharge and gate opening was examined. Two different gate openings ($e_1 = 2.5$ cm and $e_2 = 5$ cm) were used in the experiments and experiments were carried out for 34 different discharge values. It has been observed that the hydraulic jump position changes linearly with the discharge. In addition, 2-dimensional numerical models of the physical experimental setups were created, and the hydraulic jump positions and flow depths obtained from the experiments were compared with the numerical models. According to the results obtained from numerical model and physical model showed a consistency of 92.22% for $e_1 = 2.5$ cm gate opening and 95.69% for $e_2 = 5$ cm gate openings.

Keywords: Computational Fluid Dynamics, Fluent, Free hydraulic jump, Sluice gate.

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Konya Technical University, Faculty of Engineering and Natural Science, Department of Civil Engineering, 42250, Konya, Türkiye

E mail: ayildiz@ktun.edu.tr (A. YILDIZ)

Ali YILDIZ <https://orcid.org/0000-0002-6909-6114>

Gönderi: 02 Nisan 2024

Kabul: 06 Eylül 2024

Yayınlanma: 15 Eylül 2024

Received: April 02, 2024

Accepted: September 06, 2024

Published: September 15, 2024

Cite as: Yıldız A. 2024. Experimental and numerical investigation of the position of hydraulic jump formed by flow passing under the sluice gate. BSJ Eng Sci, 7(5): 987-999.

1. Giriş

Su insan, hayvan ve bitki yaşamı için önemli bir doğal kaynak olduğu için, suyun kullanımına ve yönetilmesine yönelik çalışmalar, insanlığın varoluşuyla birlikte başlamıştır. İnsan hayatı üzerinde büyük önem taşıyan suyun temininde ve kontrolünde barajlar ve hidrolik yapılar kullanılmaktadır. Suyun akışını geciktirerek, yönlendirerek ve önleyerek rezervuarlar ve göller oluşturan, farklı malzeme ve tiplerden oluşan büyük boyutlu engel yapıları baraj olarak adlandırılmaktadır. Barajlar ve su yapıları insanoğlu için çok önemli bir yere

sahip olan suyun temini ve depolanması için kullanılmaktadır.

Baraj rezervuarındaki fazla su, dolusavaklar ile mansap tarafına güvenli ve kontrollü bir şekilde aktarılmalıdır. Enerji üreten barajlarda, en yüksek düşü yüksekliğini elde etmek için rezervuardaki su kotunun maksimum seviyede tutulması gerekmektedir. Seviyenin maksimum kotta tutulması gövde üzerine yerleştirilen bent kapakları ile sağlanabilmektedir. Bent kapakları altlarındaki net açıklığın değişmesi ile suyun dolusavak üzerinden kontrollü salınımı sağlanarak, yoğun yağış



sonrasında ani su baskınlarının mansap tarafına geçmesi engellenir. Serbest akım durumunda, bent kapağının altından sel rejiminde geçen akım, kapaktan sonra hidrolik sıçramaya neden olabilir.

Bent kapakları, açık kanallarda ve nehirlerde debiyi, akım derinliğini kontrol etmek ve su üzerinde yüzen nesnelere yakalamak için yaygın olarak kullanılır (Safranez, 1929). Kapak altından sel rejiminde gelen akım, dolusavak eteğinde ve nehrin mansap tarafında oyulmalara sebep olabilir, bu yüzden akımın nehir yatağına geçmeden enerjisinin kırılması gerekmektedir. Bu enerji kırılımını gerçekleştirmek için, dolusavakların uçlarına enerji kırıcı yapılar inşa edilir (Hager, 1992). Bu enerji kırıcı yapılar, akımın enerjisinin bir kısmının kırması için hidrolik sıçramanın oluşmasını sağlarlar ve suyun nehir rejiminde ($F_r < 1$) mansap yatağına geçmesine izin verirler (Peterka, 1984). Hidrolik sıçrama oluşturmanın temel amacı enerjini kırılımını sağlamaktır. Bazı durumlarda, enerji kırılımını iyileştirmek amacıyla enerji kırıcı havuzların içerisine, bloklar, engeller ve eşikler yerleştirilir (Bradley ve Peterka, 1957). Hidrolik sıçramanın, sıçrama havuzlarının içindeki belirlenmiş bir alanda oluşturulması amaçlanır (Bakhmeteff ve Matzke, 1936). Enerji kırıcı havuzlar dışarısında oluşan kontrolsüz bir hidrolik sıçrama, nehir yatağı gibi hidrolik yapılar için tehlikeli olabilir (Cihan Aydın ve Ulu, 2017). Ayrıca, hidrolik sıçrama, suyun havalandırılması ve kimyasalların suya karıştırılması için de kullanılmaktadır. Hidrolik sıçramanın konumu (L), kırılan enerji miktarı (ΔE), sıçramadan önceki (y_1) ve sonraki (y_2) akım derinlikleri, hidrolik sıçrama hesabındaki en önemli parametrelerdir.

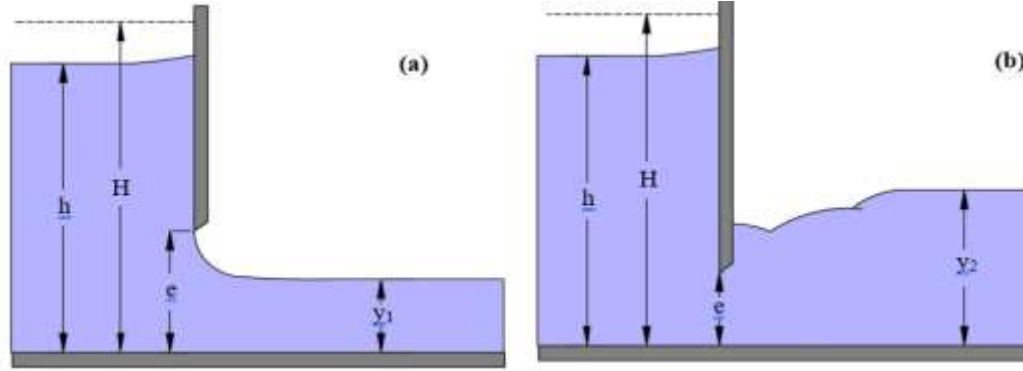
Hidrolik sıçrama ile ilgili ilk çalışmalarda araştırmacılar, hidrolik sıçramanın davranışını momentum denklemleriyle açıklanmaya çalışmışlardır (Bidone, 1819; Bélanger, 1828). Levy ve ark. (1927) yaptığı hidrolik sıçrama deneylerinde, hidrolik sıçrama esnasında oluşan enerji kaybını (ΔE) ve hidrolik sıçrama esnasında kimyasalların suya karışmasını incelemiştir. Rouse ve ark. (1959) hidrolik sıçramanın davranışını açıklamak için sıçrama esnasında oluşan ortalama hızları ve türbülansları deneysel ve teorik olarak incelemiştir. Silvester (1964) yatay dikdörtgen, üçgen, parabolik, dairesel ve yamuk kanallarda farklı Froude sayıları (F_r) için eşlenik derinlik, enerji kaybı oranı ($\% \Delta E$) ve sıçrama uzunluğu (L) için yarı ampirik analitik çözümler bulmuşlardır. Rajaratnam ve Subramanya (1968) pürüzsüz ve dikdörtgen kesitli açık kanallarda oluşturulan hidrolik sıçramalar için genelleştirilmiş bir su yüzeyi profili çıkarmışlardır. Hager ve Wanoschek (1987) üçgen kesitli kanaldaki hidrolik sıçramanın yüzey profilleri ve hız dağılımlarını belirlemiş ve sonuçlar dikdörtgen kesitli açık kanaldaki hidrolik sıçramalarla karşılaştırmışlardır. Araz ve Hanif (1991) düşük yatak eğimine sahip dikdörtgen bir kanalda oluşan hidrolik sıçramanın iki boyutlu sayısal modelini oluşturmak için Boussesq denklemlerini kullanmışlardır. Ead ve ark. (2002) farklı taban pürüzlülük değerlerine sahip açık

kanal üzerinde hidrolik sıçramaları deneysel olarak 4'ten 10'a kadar olan Froude sayıları (F_r) için incelemiştir. Habibzadeh ve ark. (2011) dikdörtgen bent kapakları altından geçen, batmış ve serbest akım durumlarında oluşan enerji kaybını (ΔE) hesaplamak için, teorik yöntemler kullanarak debi katsayısı (C_d) formülü çıkarmışlardır. Literatürde yapılan deneysel çalışmalar kullanılarak formülün doğruluğu test edilmiş ve debi katsayısından (C_d) elde edilen sonuçların deneysel veriler ile tutarlı sonuçlar verdiği görülmüştür. Bent kapaklarında oluşan enerji kaybı (ΔE) temel olarak kapağın geometrisinden etkilenmektedir. Cassan ve Belaud (2012) bent kapağı altından geçen akım üzerinde deneysel ve nümerik çalışmalar yapmışlardır. ANSYS-Fluent programı kullanılarak yapılan nümerik modeller 2 boyutlu olarak oluşturulmuş ve elde edilen analiz sonuçlarına göre k- ϵ RNG (Renormalization group) ve RMS (Reynolds Stress Model) türbülans modellerinin, standart k- ϵ ve k- ω türbülans modellerine göre daha iyi sonuç vermişlerdir. Gumus ve ark. (2016) dikdörtgen bir açık kanal üzerinde bent kapağı altından geçen akımın oluşturduğu batmış hidrolik sıçramayı deneysel ve nümerik olarak incelemiştir. Nümerik modelde 5 farklı türbülans modeli kullanılmış ve optimum doğrulukta sonuç elde etmek için farklı büyüklükteki meshler ile analizler yapılmıştır. Aydın ve Ulu (2017) bent kapaklarının mansap tarafına yerleştirilen dikdörtgen ve yarım daire şeklindeki taban engellerinin, batmış akım durumunda hıza olan etkilerini, nümerik ve deneysel olarak incelemiştir. Karami ve ark. (2020) bent kapağı altına yerleştirilen eşik şeklinin, yüksekliğinin ve konumunun, debi katsayısına (C_d) olan etkisini sayısal olarak araştırmışlardır. Kullanılan nümerik modeli doğrulamak için Aköz ve ark. (2009) tarafından yapılan deneyleri kullanmışlardır. Retsinis ve Papanicolaou (2020) 2,44 ile 5,38 arasında değişen Froude sayıları (F_r) için dikdörtgen kesitli bir açık kanalda oluşturulan hidrolik sıçramanın konumunu ve su yüzeyi profillerini, deneysel ve nümerik olarak modelleyip, sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Daneshfaraz ve ark. (2021) serbest akım durumu için bent kapaklarını açık kanal sistemine dik eksenle 10, 20 ve 30 derece açı yapacak şekilde yerleştirerek, mansap tarafındaki oluşacak akımı FLOW-3D programını kullanarak nümerik olarak modellemiştir. Elde edilen hata oranlarına göre, RNG türbülans modeli, k- ϵ , k- ω ve LES (Large Eddy Simulation) türbülans modellerinden daha iyi sonuç vermiştir. Lazzarin ve ark. (2023) barajlardaki kapak yıkılmalarının da sebepleri arasında bulunan geniş kapak açıklıkları (e) için deneysel ve nümerik çalışmalar yapmışlardır. Baraj yıkılmasını simüle etmek için, belirli bir kapak açıklığında (e) suyun, kapağın altından ani bir şekilde serbest bırakılmasıyla oluşan davranış süreye bağlı olarak incelenmişlerdir.

Bu çalışmada kapak altından geçen bir akımın oluşturduğu hidrolik sıçramanın debiye ve kapak açıklığına bağlı olarak değişen konumu incelenmiştir. 2 farklı kapak açıklığı ($e_1=2,5$ cm ve $e_2=5$ cm) ve toplamda

34 farklı debi değeri ile deneyler yapılmıştır. Değişen kapak açıklığının, hidrolik sıçramanın konumuna etkisini daha belirgin gözlemleyebilmek için, kapak açıklığı 2 kat olarak arttırılmıştır. Her kapak açıklığı (e) için, artan debi (Q) değerine bağlı olarak hidrolik sıçramanın mansaptaki konumu belirlenmiştir. Bütün debi (Q)

değerleri için, nümerik modeller oluşturulmuş ve memba su seviyesi (H), sıçramadan önceki su derinliği (y₁) ve hidrolik sıçramanın konumu (L) bakımından nümerik ve fiziksel modellerin sonuçları birbirleriyle karşılaştırılarak tartışılmıştır.



Şekil 1. Bent kapağının altında geçen serbest (a) ve batmış (b) akım durumları.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Bent kapakları ve hidrolik sıçrama

Kontrollü dolu savaklar genellikle bir bent kapağı vasıtasıyla kontrol edilirler. Bent kapaklarına, karşıdan bakıldığında, dikdörtgen kesitinde bir taban açıklığı sağlarlar. Bent kapakları, haznedeki suyun maksimum seviyede tutar ve gerektiği zaman haznedeki suyu mansap tarafına tahliye ederler. Ayrıca bent kapağı, yüzen cisimlerin, buzun, sürüntü maddelerinin tutulması ve taşkın debisinin mansap tarafına geçmesini engellemek amacıyla da kullanılırlar. Bent kapaklarının altındaki açıklığa (e) ve memba tarafındaki su seviyesine bağlı olarak, altından geçen debi miktarı değişmektedir. Bir bent kapağının altından geçen akım iki durumda olabilir. Bunlar;

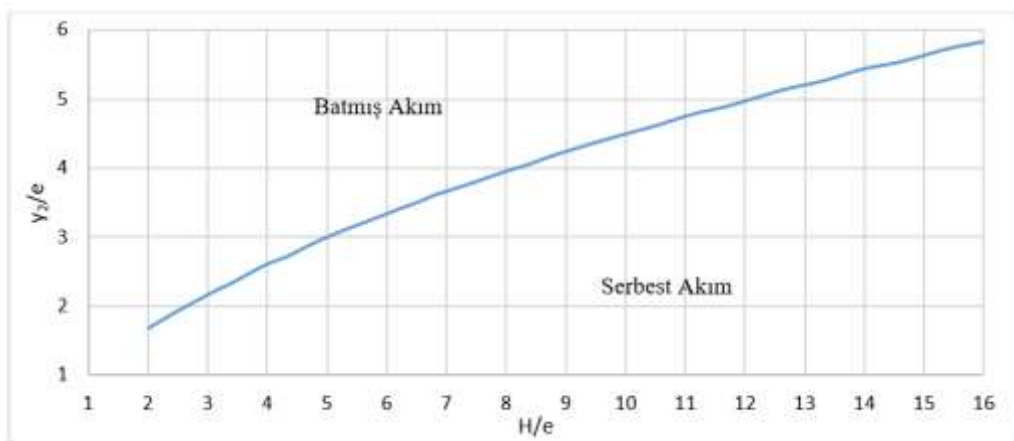
1-Serbest akım durumu: Kapağın altından geçen akım, sel rejiminde ve atmosfere açıktır (Şekil 1(a)). Akımın derinliği (y₁) kapak açıklığından (e) daha küçüktür. Mansap tarafındaki akım, nehir rejimindeyse, kapaktan uzakta hidrolik sıçrama meydana gelebilir ve enerji kırımını (ΔE, yük kaybı) gerçekleştirir.

2-Batmış akım durumu: Akımın neden olduğu hidrolik sıçrama, bent kapağının bitişiğinde oluşur. Akımın derinliği (y₂) kapak açıklığından (e) daha fazladır ve kapağın altından geçen akım atmosfere açık değildir (Şekil 1(b)). Hidrolik sıçrama oluşmaz fakat yüksek türbülanslar ve geri akış etkilerinden dolayı yük kaybı meydana gelir. Bent kapağındaki serbest ve batmış akım durumları Şekil 1'de gösterilmiştir. Kapak arkasındaki toplam memba su yükü (H), piyezometrik derinlik (h) ve hız yükünü ($V^2/2 \times g$) toplamına eşittir. ($H=h+ V^2/2 \times g$) Bent kapağının altından geçen akımın debisi aşağıdaki eşitlik (1) ile belirlenir. Kapak altından geçen debi:

$$Q = C_d * e * b * \sqrt{2 * g * y_1} \quad (1)$$

Burada;

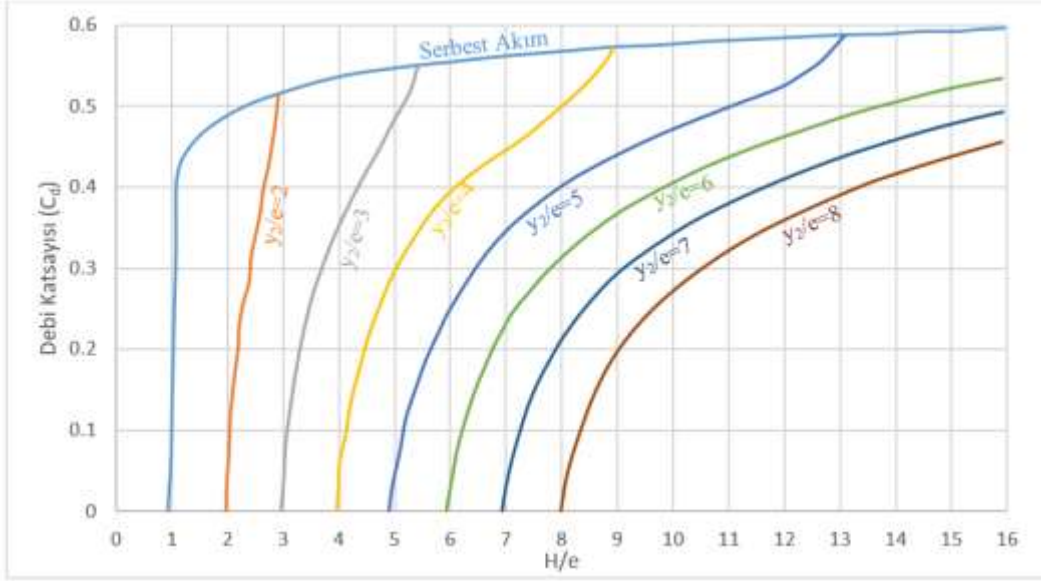
- Q : Debi (m³/sn)
- C_d : Debi katsayısı
- e : Kapak altındaki açıklık (m)
- b : Kapak genişliği (m)
- y₁ : Mansap su yüksekliği (batmış akım için y₂) (m)



Şekil 2. Kapak altından geçen akımın batmış veya serbest akımda olma durumlarının H/e ve y₂/e oranlarına bağlı olarak belirlenmesi (Rajaratnam ve Subramanya, 1968).

Bir kapak altından geçen akımın, serbest veya batmış olma durumu memba ve mansap su seviyelerine bağlı olarak Şekil 2' den belirlenebilmektedir. H/e ve y_2/e oranlarına bağlı olarak elde edilen değerler, eğrinin üstünde ve altında kalmasına bağlı olarak akımın batmış veya serbest akım durumunda olacağı belirlenir. Serbest akım durumunda debi katsayısı (C_d), memba su seviyesi (H) ve kapak açıklığına (e) bağlı iken batmış

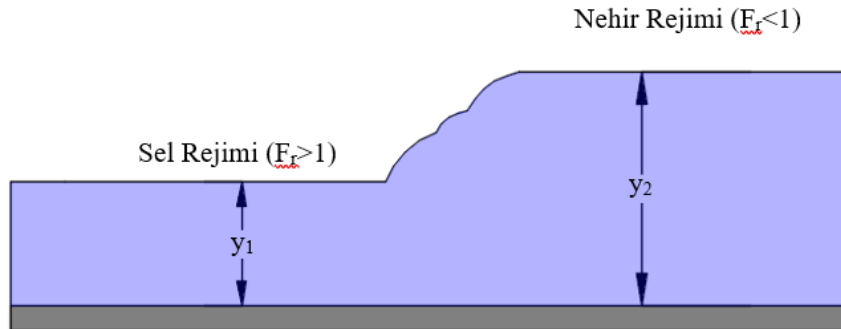
akım durumunda ise debi katsayısı (C_d) mansap su seviyesi (y_2) ve kapak açıklığına (e) bağlıdır. Ayrıca serbest akım durumunda debi katsayısı (C_d) değerleri tek bir eğri üzerinden okunurken, batmış akım durumunda batmışlık derecesine bağlı olarak debi katsayısı (C_d) farklı eğrilerden okunur. Debi katsayısının (C_d), H/e ve y_2/e oranına bağlı olarak değişimi Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Bent kapağı altından geçen batmış ve serbest akım durumlarına göre H/e ve y_2/e oranlarına bağlı olarak debi katsayısının (C_d) belirlenmesi (Swamee, 1992).

Açık kanaldaki bir akımın derinliği kısa bir mesafede önemli bir ölçüde değişiyorsa buna hızlı değişen akım (HDA) ve uzun bir mesafede daha yavaş bir değişim gösteriyorsa yavaş değişen akım (YDA) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Hidrolik sıçrama hızlı değişen akım olarak (HDA) sınıflandırılır ve akımın sel rejiminden ($Fr \geq 1$), nehir rejimine ($Fr \leq 1$) geçerken türbülansa girmesiyle meydana gelir (Şekil 4). Açık kanallarda akımın rejimi Froude sayısının büyüklüğüne bağlı olarak belirlenmektedir. Froude sayısı atalet kuvvetlerinin, yer çekimi kuvvetlerine oranından hesaplanmaktadır ve $F_r =$

$V/\sqrt{g * y}$ şeklinde formülize edilmektedir. Burada, V hızı, g yerçekimi ivmesini ve y hidrolik derinliği ifade etmektedir. Atalet kuvvetleri, yer çekimi kuvvetlerinden büyük olduğu durumda $Fr > 1$ olmaktadır ve bu sel rejimi olarak adlandırılır. Atalet kuvvetlerinin, yer çekimi kuvvetlerinden küçük olduğu durumda ise $Fr < 1$ olmaktadır ve nehir rejimi olarak adlandırılmaktadır. Hidrolik sıçrama, akımın durumuna bağlı olarak, batmış ve serbest olmak üzere iki şekilde gerçekleşir (Kubrak ve ark., 2020).



Şekil 4. Hidrolik sıçramanın genel şeması.

Hidrolik sıçrama açık kanallarda kontrolsüz olarak meydana geldiğinde büyük tehlike oluşturur çünkü, sıçrama esnasında büyük kuvvetler oluşur ve akımın derinliği bir anda artış gösterir. Kontrollü bir hidrolik

sıçrama suyun havalanması ve enerji kırılımı (yük kaybı) açısından faydalıdır. Batmış hidrolik sıçramalarda, akımın sel ve nehir kısımlarının tam olarak belirlenememesinin yanında kırılacak enerji miktarı da

serbest sıçramada kullanılan formüllerle hesaplanamamaktadır. Batmış hidrolik sıçramaların hesapları genellikle deneysel ve nümerik çalışmalarla yapılmaktadır. Dolusavaklardan gelen yüksek enerjili akım nehir yatağında erozyona neden olabilir. Güçlü türbülanslar akarsu yatağının malzemesine zarar verip aşınmalara sebep olabilir. Dolusavaktan sel rejiminde gelen akımın kontrollü bir hidrolik sıçramaya maruz bırakılması, akımın enerjisini azaltacak ve suyun taşınması daha kolay ve güvenli olacaktır. Hidrolik sıçramadan önceki (y_1) ve sonraki akım derinliği (y_2) ve oluşan enerji kaybı (ΔE) eşitlik 2 ve 3 ile hesaplanmaktadır.

$$y_2 = \frac{y_1}{2} * (\sqrt{1 + 8 * Fr_1^2} - 1) \quad (2)$$

$$\Delta E = \frac{(y_1 + y_2)^3}{4 * y_1 * y_2} \quad (3)$$

Burada; y_1 hidrolik sıçramadan önceki akım derinliği, y_2 hidrolik sıçramadan sonraki akım derinliği, Fr_1 sel rejimindeki Froude sayısı ve ΔH hidrolik sıçramada kaybolan enerji miktarıdır.

2.2. Fiziksel Deney Düzenegi

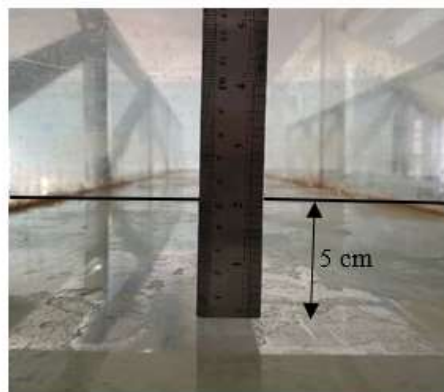
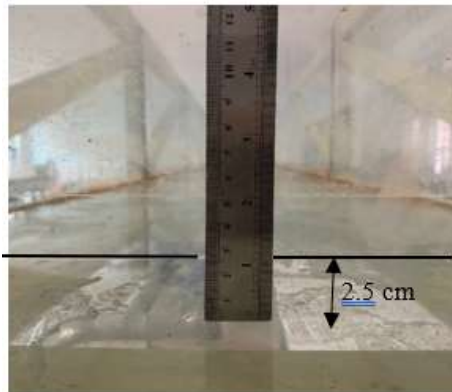
Hidrolik yapıların tasarım aşamasında suyun davranışını gözlemlemek ve karşılaşılabilecek sorunları önceden belirlemek için laboratuvar ortamında ölçekli fiziksel modeller oluşturulur. Bu yüzden bir hidrolik yapıda, gerçekleşmesi beklenen hidrolik sıçramanın laboratuvar ortamında oluşturulacak ölçekli deney düzenekleri ile model testlerinin yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada,

bent kapağı altından geçen bir akımın debiye ve kapak açıklığına bağlı olarak değişen konumunu incelemek için bir açık kanal sistemi üzerinde deneyler yapılmıştır (Şekil 5). Fiziksel deney düzeneklerinin hazırlandığı açık kanal sistemi 6,5 m uzunluğunda, 0,5 m derinliğinde ve 0,6 m genişliğindedir. Açık kanal sisteminin duvarları ve tabanı 1,2 cm kalınlığında lamine edilmiş temperli camdan yapılmıştır. Açık kanal sisteminin taban eğimi %0.007'dir. Açık kanalındaki akım, 1. hazneye su getiren boru sistemine bağlanmış iki adet pompa ile sağlanmaktadır. Pompaların boruya vereceği debi büyüklüğü, pompaların yönetildiği frekans konvertörü yardımıyla ayarlanmaktadır ve 1 ile 45 lt/sn arasında debi değerleri sabit olarak elde edilebilmektedir. Debi değerleri pompalardan gelen boru üzerine yerleştirilen 0.01 lt/s ölçüm hassasiyetine sahip ultrasonik debimetre ile ölçülmektedir. Açık kanal sisteminde suyun akışı, kanalın aralarına yerleştirildiği iki hazne yardımıyla sağlanmaktadır. İki adet paralel bağlanmış pompa, suyu 1. hazneden alarak borular vasıtasıyla 2. hazneye göndermektedir. 2. hazneye ulaşan ve maksimum seviye gelen su, taşarak açık kanal sistemine geçmekte ve kanal sonunda su tekrar 1. hazneye dökülmektedir.

Deneylerde kullanılan bent kapaklarında, $e_1=2,5$ cm ve $e_2=5$ cm olmak üzere 2 farklı net açıklık kullanılmıştır (Şekil 6). Bent kapakları 1 cm kalınlığında pleksiglas malzemeden imal edilmişlerdir. Suyun bent kapaklarının altından geçtiği kenar, düz kret şekline sahiptir ve kalınlığı kapağın kalınlığı olan 1 cm ye eşittir.



Şekil 5. Fiziksel deney düzenegi.



Şekil 6. Deneylerde kullanılan iki farklı kapak açıklığı $e_1=2,5$ cm ve $e_2=5$ cm.

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v_r) + \frac{\rho v_r}{r} = S_m \quad (5)$$

Ataletsel (ivmelenmeyen) bir referans çerçevesinde momentumun korunumu eşitlik 6 ile tanımlanır;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \times (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla \times (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (6)$$

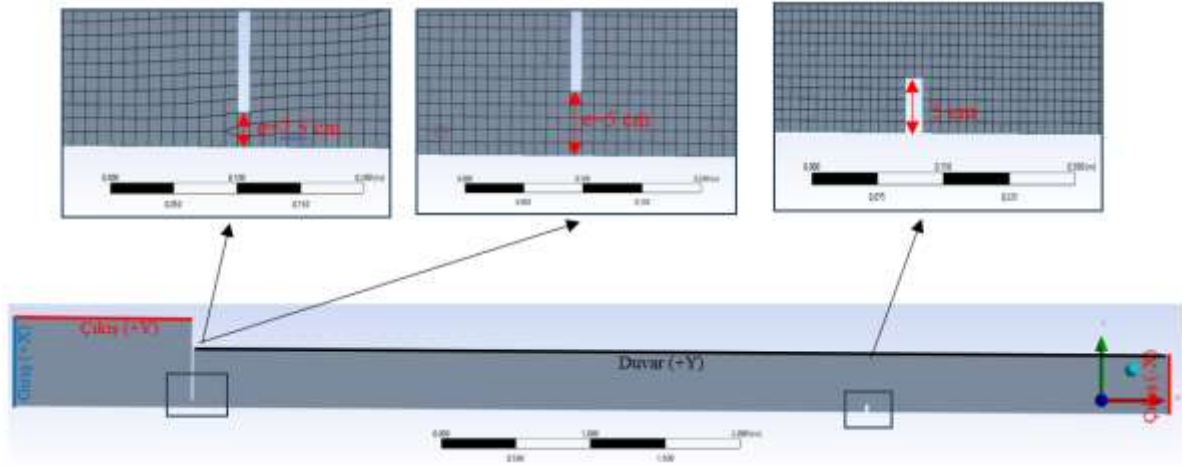
Burada; x eksenel koordinat, r radyal koordinatı, v_x eksenel hızı, v_r radyal hızı, ρ sıvının yoğunluğunu, S_m kütle değişimini, P statik basıncı, $\rho \vec{g}$ yerçekimi kuvveti, \vec{F} dış kuvvet ve $\vec{\tau}$ stres tensörüdür.

Bent kapakları altından geçen akımın ve oluşan hidrolik sıçramanın nümerik modellenmesinde, fiziksel modelin bulunduğu ortam şartları ile aynı özellikteki sınır tabaka koşulları bilgisayar ortamında oluşturulmuştur. Deneyle kullanılan debi (Q) değerlerinin aynısı, nümerik modele girilerek farklı kapak açıklıkları için analizler yürütülmüştür. Her analizin sonunda hidrolik sıçramanın konumu, akış derinlikleri ve su yüzeyi profilleri elde edilmiştir.

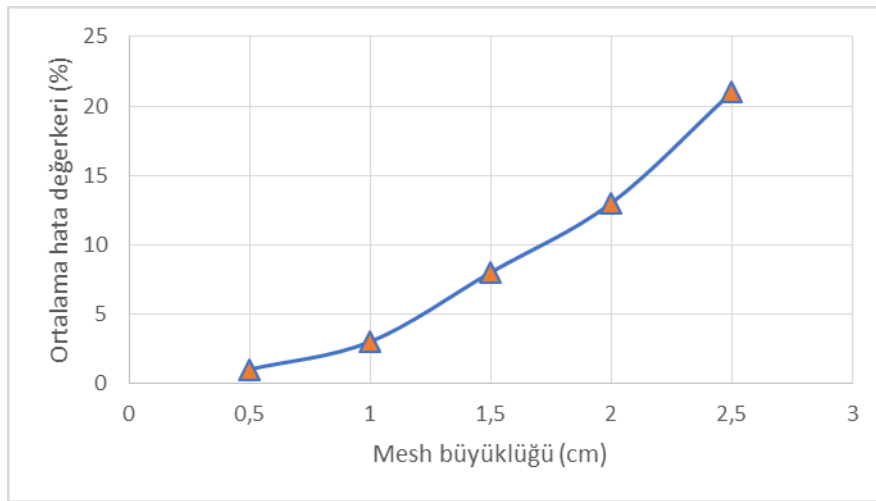
Fiziksel modelin nümerik modelde doğru şekilde temsil edilebilmesi için, akış alanının sınır tabaka koşullarının ve boyutlarının fiziksel deneylere uygun olarak programa girilmesi gerekmektedir. ANSYS-Fluent de akışın hareketinin VOF ve Navier Stokes denklemleri ile çözümü akış alanının içerisinde gerçekleştirilmektedir. Hidrolik sıçramanın olduğu, açık kanal sisteminin ANSYS-Fluent deki nümerik modelleri 2-boyutlu ve fiziksel deney düzeneği ile aynı ölçülerde oluşturulmuştur (Şekil 8). Analizlerde açık kanal akımını temsil etmesi için su ve havanın aynı anda bulunacağı şekilde 2 fazlı bir analiz yapılmıştır. Yapılan literatür çalışmalarına (Cassan ve Belaud, 2012; Daneshfaraz ve ark., 2021) göre k-ε RNG türbülans modeli bent kapaklarının nümerik modellenmesinde başarılı sonuçlar vermektedir. Bu yüzden analizlerde k-ε RNG türbülans modeli kullanılmıştır.

Akış alanının 4 yüzü bulunması sebebiyle, ana ızgara sisteminin dört farklı (+X, -X, +Y, -Y) sınır tabakası bulunmaktadır. Suyun kanala girdiği ve bent kapaklarının arkasındaki rezervuar görevi gördüğü memba sınır koşulu (-X), "mass flow inlet" debi girişi olarak tanımlanmıştır. Programda analizler iki boyutlu olarak yürütüldüğünde, akış alanının z eksenindeki uzunluğu yani kanalın genişliği 1 m olarak kabul edilmektedir. Girilecek debiler bu 1 m genişliğe göre yeniden hesaplanarak programa girilmesi gerekmektedir. Örneğin deneylerde 0,6 m kanal genişliğinde $Q_{Deney}=31,20$ lt/sn olarak ölçülen bir debi programa, $Q_{Model}=31,20/0,6=52$ lt/sn olarak girilmesi gerekmektedir. Suyun açık kanaldan çıktığı yüzey (+X), "pressure outlet" yani basınç çıkışı olarak tanımlanmıştır. Bu tabakadan hava ve su akış alanını engelsiz bir şekilde terk etmektedir. Kanalın taban yüzeyi "wall" duvar olarak tanımlanmıştır. Akış alanının üst yüzeyi (+Y) tanımlanırken iki farklı sınır tabaka koşulu kullanılmıştır. Bent kapağının arkasında bulunan ve hazne görevi göreceği olan hacmin üstü "pressure outlet" olarak

tanımlanırken, bent kapağından sonraki akış alanının üstü yüzeyi "wall" duvar olarak tanımlanmıştır. İki farklı tabaka kullanılmasının sebebi, su bent kapağının arkasında biriktikçe havanın akış alanını terk edeceği bir yüzey olmazsa sıkışacağıdır bu yüzden hava akış alanından çıkabilmesi için bu bölgenin üst yüzeyi yine basınç çıkışı olarak tanımlanmıştır. Bent kapakları, akış alanında 1 cm'lik boşluk bırakılarak tanımlanmıştır. Bu boşluğun etrafı duvar tanımlanarak bu açıklığın kapak gibi davranması sağlanmıştır. Nümerik analizde mesh şekli kare olarak ve boyutu $\Delta x=\Delta y=1$ cm olarak seçilmiştir. Bu çalışmada optimum mesh boyutu belirlenmeden önce Grid Çözünürlük yöntemi kullanılarak mesh bağımsızlığı çalışması yapılmıştır. Tüm debi (Q) değerleri için nümerik modeller oluşturulmadan önce, bazı debi değerleri için 5 farklı mesh büyüklüğü ($\Delta x=\Delta y=2,5, 2, 1,5, 1$ ve $0,5$ cm) ile analizler yürütülmüş ve sonuçlar deneylerle karşılaştırılarak ortalama hatalar hesaplanmıştır. Mesh boyutuna bağlı olarak elde edilen hata yüzdeleri Şekil 9'da gösterilmiştir. Nümerik model ile deneysel sonuçlar arasındaki hata yüzdesinin ne olması gerektiği tamamen hidrolik problemin fiziği ve önemi ile ilgilidir. Bu çalışmada bent kapaklarının nümerik modellerinden elde edilen sonuçların, deneysel modeller ile %10'luk bir hata payından daha az oranla tutarlı olması istenmektedir. Çünkü deneylerde akım yüksekliklerini ölçmek için kullanılan limnometrenin hassasiyeti $0,1$ cm'dir. Bu nedenle limnometre ile yapılan ölçümlerde %10 hata payı olasılığı bulunmaktadır. Nümerik modelin başarılı olabilmesi için sonuçlarının istenen hata oranlarının altında olması, deneysel verilerle tutarlı olması ve problemin karmaşıklığına bağlı olarak analiz sürelerinin çok uzun olmaması gerekmektedir. 1 cm mesh boyutuna sahip analizin sonuçlandırılması 3 saat sürerken, $0,5$ cm mesh boyutuna sahip modelin çözülmesi 9 saat sürmüştür. Bu nedenle 1 cm mesh boyutunun analizlerde kullanılması uygun görülmüştür (Şekil 9). Bütün analizlerde toplam 33315 mesh sayısı ile yapılmıştır. Bütün debi değerleri için toplam 34 adet nümerik model oluşturulmuştur.



Şekil 8. Nümerik model analizlerinde kullanılan akış alanı ve özellikleri.



Şekil 9. Farklı mesh büyüklükleri için ortalama hataların hesaplanması.

3. Bulgular

Bu çalışmada, bir kapak altından geçen akımın, oluşturduğu hidrolik sıçramanın debiye ve kapak açıklığına bağlı olarak değişen konumu deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Kapağın arkasındaki toplam memba akım derinliği (H), sıçramadan önceki derinlik (y_1) ve sıçramadan sonraki derinlik (y_2) olmak üzere 3 farklı noktada akım derinliği ölçülmüştür. Ayrıca, bu akım derinliklerine karşılık gelen hidrolik sıçrama konumları (L) ve debi (Q) değerleri de belirlenmiştir. Akım derinliği ölçümü yapılan noktalar ve fiziksel deney düzeneğinin genel şeması Şekil 7'de gösterilmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir. Deneyler iki farklı kapak açıklığı ($e_1=2,5$ cm ve $e_2=5$ cm), 34 farklı debi (Q) değeri için tekrarlanmıştır. Çalışmada serbest hidrolik sıçramanın konum değişiminin araştırılması amaçlanmış olsa da, deneylerin başlangıcındaki batmış hidrolik sıçrama içinde veriler toplanmıştır. Hidrolik sıçramanın batmış veya serbest olma durumu Tablo 1'de belirtilmiştir.

Serbest hidrolik sıçramanın oluşmaya başladığı debi, kapak açıklığına bağlı olarak değişmektedir. $e_1=2,5$ cm kapak açıklığında serbest hidrolik sıçrama $Q=14,73$

lt/sn'de başlarken, $e_2=5$ cm kapak açıklığında $Q=29,63$ lt/sn debi değerinde gözlemlenmeye başlamıştır. Kapak altından geçen debi değeri arttıkça veya azaldıkça hidrolik sıçrama kapaktan uzaklaşmakta veya yaklaşmaktadır ve bu mesafe L ile ifade edilmiştir. Bu durum hidrolik sıçramanın içsel atalet kuvvetlerinin ve momentumun dengelenmesinden kaynaklanmaktadır. İki farklı kapak açıklığına ve debi değerine bağlı olarak elde edilen hidrolik sıçrama konumları Şekil 10'da gösterilmiştir.

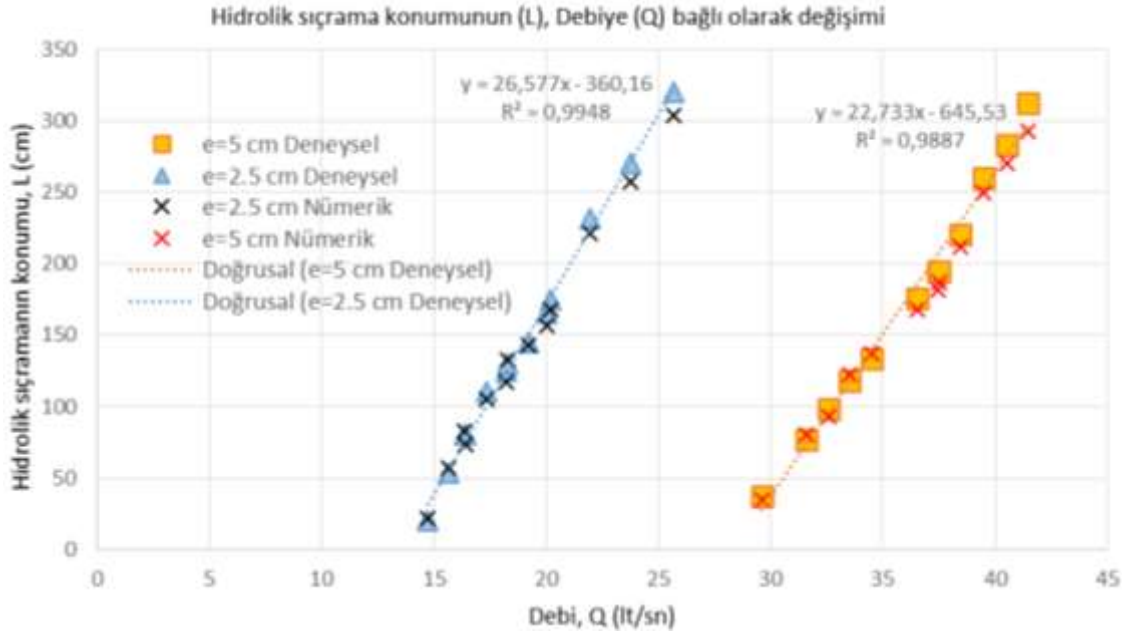
Oluşan serbest hidrolik sıçramanın konumu, kapak açıklığına ve debiye bağlı olarak değişmektedir. Farklı kapak açıklıklarında ve aynı konumdaki serbest hidrolik sıçramaların oluşması için gereken debi değerleri de farklı olmaktadır. Örneğin, $e_1=2,5$ cm kapak açıklığında, $Q=20,20$ lt/sn debi değerinde hidrolik sıçrama $L=175$ cm konumunda oluşurken, $e_2=5$ cm kapak açıklığında, $L=176$ cm konumunda hidrolik sıçramanın oluşması için gereken debi $Q=36,54$ cm lt/sn olmaktadır. Kapak açıklığı arttıkça, su seviyesine bağlı olarak artan statik basınç hidrolik sıçramanın daha ileri bir konumlarda oluşmasını sağlamaktadır. Şekil 10'dan görüleceği üzere hidrolik sıçramanın konum değişimi ile debi miktarı arasında

lineer bir bağlantı bulunmaktadır. Debi-hidrolik sıçrama konumu eğrileri üzerine lineer regresyon ile doğru belirlendiğinde bu doğruların, her iki kapak açıklığı içinde R² değeri 0,99 olmaktadır. Kapak açıklığı, hidrolik sıçramanın debiye bağlı olarak mansap tarafındaki ilerleme hızını da etkilemektedir. e₁=2,5 cm kapak açıklığında, bu oran ortalama olarak (L_s-L_i)/(Q_s-Q_i)=26,58 olurken, e₂=5 cm kapak açıklığında bu oran (L_s-L_i)/(Q_s-Q_i)= 22,73 olmaktadır. Bu durum artan debi ile birlikte hidrolik sıçramanın e₁=2,5 cm kapak açıklığında %17 daha hızlı ilerlediğini göstermektedir. Nümerik ve deneysel modellerden elde edilen hidrolik sıçrama konumlarının (L) karşılaştırılarak hata oranlarının hesaplanması Şekil 11’de gösterilmiştir. Deneylerden ve nümerik modelden elde edilen hidrolik sıçrama konumları (L), karşılaştırıldığında e₁=2,5 cm kapak açıklığı için %92,22 oranında bir tutarlılık gösterirken, e₂=5 cm kapak açıklığında %95,69 oranında

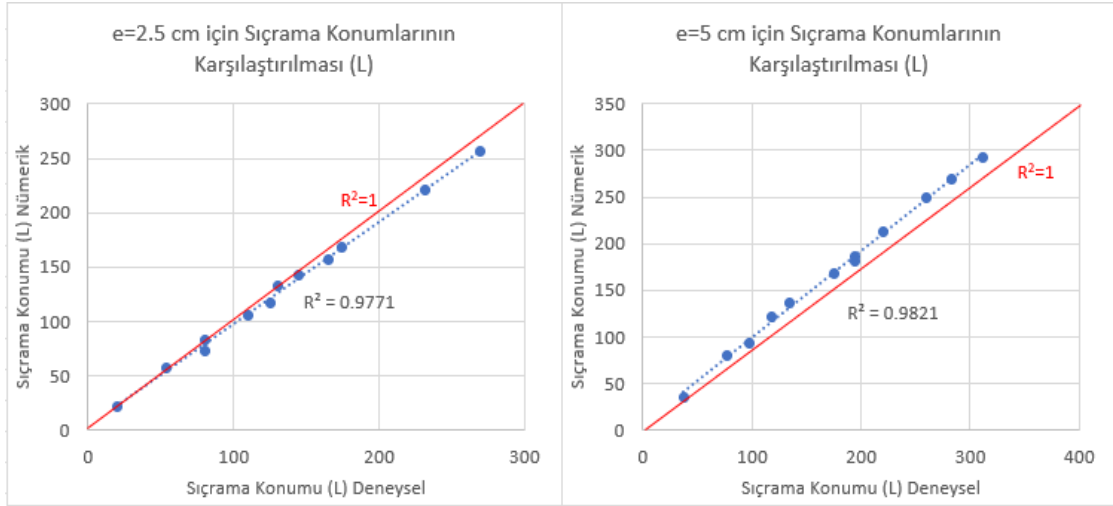
bir tutarlılık elde edilmiştir. e₁=2,5 cm kapak açıklığında en yüksek fark, Q=25,70 lt/sn için 16 cm olarak elde edilmiştir. e₂=5 cm kapak açıklığı için ise en yüksek fark Q=41,47 lt sn debi değeri için 19 cm olarak elde edilmiştir. Nümerik modelde hidrolik sıçramanın konumu daha net bir şekilde belirlenirken, yüksek miktardaki türbülansın dolayı deneylerde bu konumu belirlemek daha zor olmaktadır. Yüksek debilerde oluşan farkın temel sebeplerinden bir tanesi de bu olmaktadır. Nümerik modellerden sonuçlar alınmadan önce sistem stabil oluncaya kadar analizler devam ettirilmiştir. Sistemin stabil hale gelmesi ise, akış alanının “outlet” yüzeyinden çıkan debinin sabit kalmasıyla ve giriş yani “inlet” yüzeyindeki debiye eşit olmasıyla anlaşılmaktadır. Bunun bir örneği olarak, e₂=5 cm ve Q=31,20 lt/sn için yapılan nümerik modelde “outlet” yüzeyinden zamana bağlı olarak çıkan debinin grafiği Şekil 12’de gösterilmiştir.

Tablo 1. e₁=2,5 cm ve e₂=5 cm kapak açıklığında elde edilen deney sonuçları

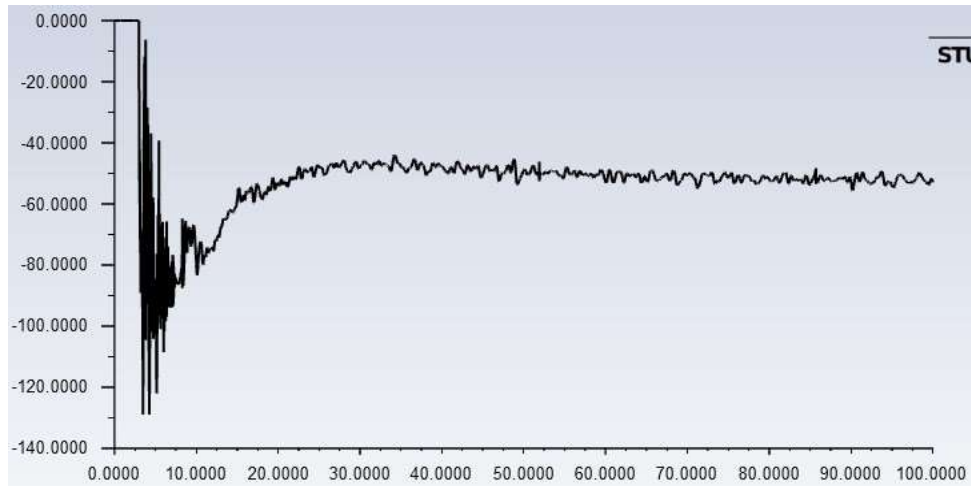
Kapak Açıklığı e ₁ =2,5 cm							Kapak Açıklığı e ₂ =5 cm						
No	Q (lt/sn)	H (cm)	y ₁ (cm)	y ₂ (cm)	Sıçrama Durumu	L (cm)	No	Q (lt/sn)	H (cm)	y ₁ (cm)	y ₂ (cm)	Sıçrama Durumu	L (cm)
1	11,72	10,50	6,42	8,75	Batmış	-	1	17,47	9,55	7,95	10,25	Batmış	-
2	12,63	11,35	7,65	9,00	Batmış	-	2	19,54	10,40	8,35	10,75	Batmış	-
3	13,67	12,15	7,95	9,25	Batmış	-	3	21,55	11,35	8,75	11,20	Batmış	-
4	14,73	13,35	1,60	9,12	Serbest	20	4	23,66	12,35	8,90	11,65	Batmış	-
5	15,65	15,50	1,61	9,20	Serbest	54	5	25,60	13,25	8,95	11,95	Batmış	-
6	16,37	18,45	1,63	9,32	Serbest	80	6	27,58	14,35	7,05	12,35	Batmış	-
7	16,40	17,95	1,65	9,41	Serbest	85	7	29,63	15,55	3,10	12,01	Serbest	37
8	17,34	20,25	1,66	9,48	Serbest	110	8	31,60	17,45	3,12	12,70	Serbest	77
9	18,25	22,35	1,68	9,52	Serbest	130	9	32,58	18,40	3,17	13,02	Serbest	98
10	18,30	21,80	1,69	9,61	Serbest	125	10	33,55	20,45	3,25	13,35	Serbest	118
11	19,20	24,35	1,71	9,85	Serbest	145	11	34,53	21,45	3,42	13,40	Serbest	134
12	20,04	26,30	1,73	9,87	Serbest	175	12	36,54	22,35	3,55	13,85	Serbest	176
13	20,20	26,25	1,74	11,23	Serbest	165	13	37,45	23,05	3,61	14,75	Serbest	195
14	21,93	30,60	1,76	12,05	Serbest	232	14	37,54	23,45	3,66	13,70	Serbest	195
15	23,78	34,75	1,78	12,26	Serbest	270	15	38,45	24,45	3,72	14,02	Serbest	220
16	25,70	38,90	1,80	13,15	Serbest	320	16	39,49	25,35	3,75	14,52	Serbest	260
							17	40,53	26,65	3,81	14,85	Serbest	283
							18	41,47	27,85	3,85	15,10	Serbest	312



Şekil 10. $e_1=2,5$ cm ve $e_2=5$ cm kapak açıklıkları için elde edilen debi (Q) ve hidrolik sıçrama konumlarının (L) karşılaştırılması.



Şekil 11. $e=2,5$ cm ve $e=5$ cm için hidrolik sıçrama konumlarının (L) karşılaştırılarak hata oranlarının hesaplanması.



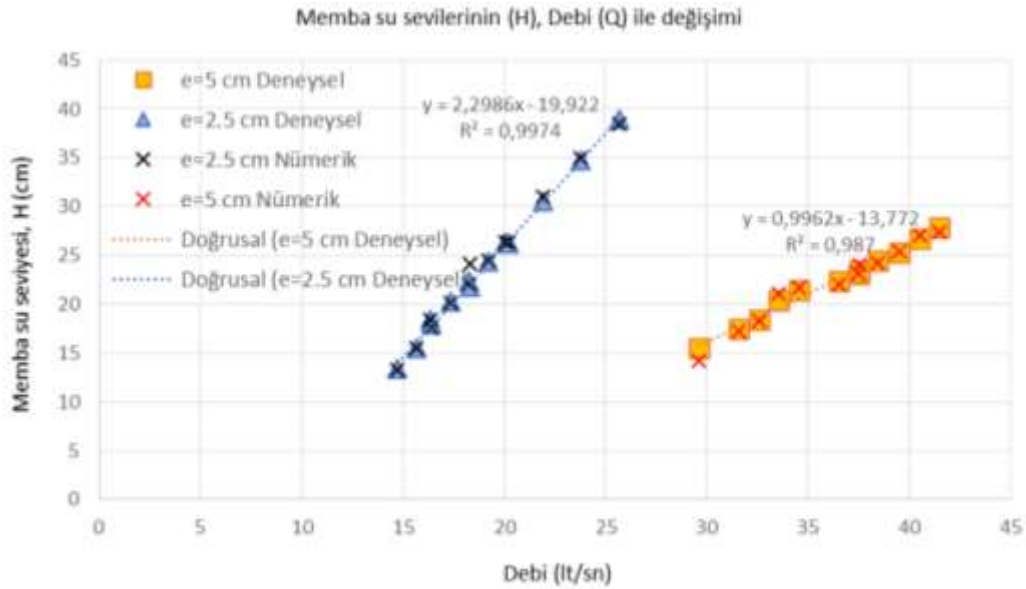
Şekil 12. $e_2=5$ cm ve $Q=31,20$ lt/sn ($Q=52$ lt/sn 2 boyuttaki 1 m genişlik) için yapılan nümerik analizlerde outlet debisinin zamana bağlı değişimi.

Çıkış debisinin sabitlenmesi ve hidrolik sıçramanın sabit yerde kalması için geçen süre analiz süresi 100 sn olarak belirlenmiştir. Programın 100 sn süresindeki bir analizi yapmak kapak açıklığına ve debi miktarına bağlı olarak 5-6 saat sürmektedir.

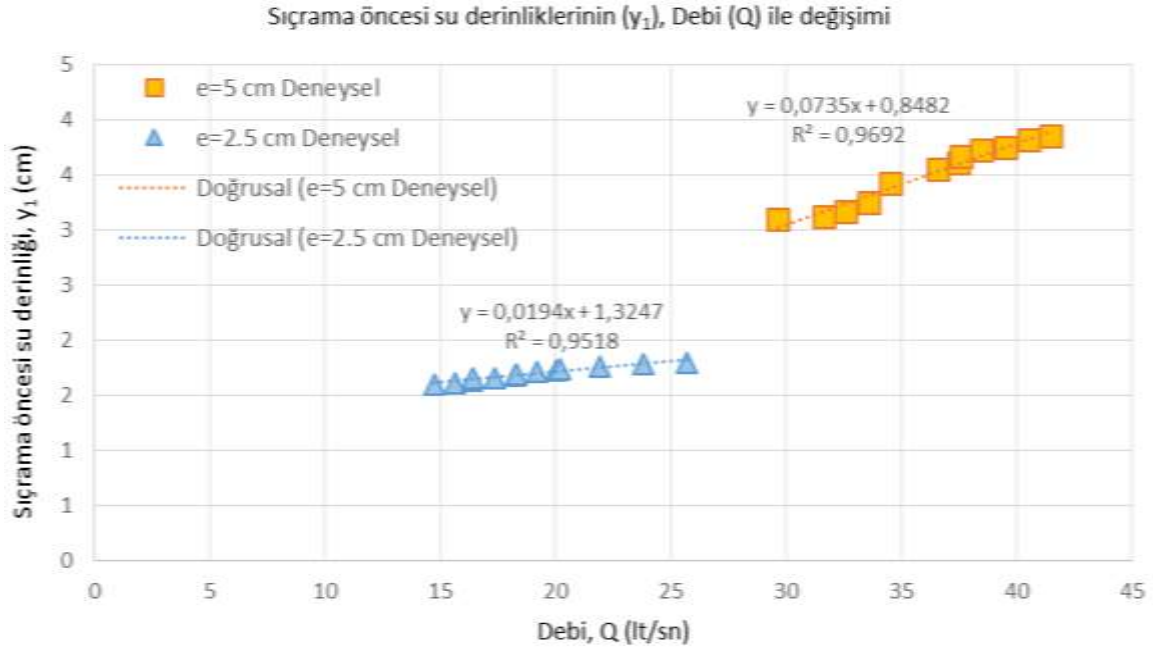
Bent kapağının memba tarafında bulunan ve kapak altından çıkan su için statik basıncı oluşturan, memba su seviyelerinin (H), iki farklı kapak açıklığı için karşılaştırılması Şekil 13'te gösterilmiştir. Nümerik modellerden elde edilen memba su seviyeleri de aynı grafik üzerinde Şekil 13'te verilmiştir. Artan debi (Q) miktarı ile su memba seviyesinin arasında lineer bir bağlantı olduğu görülmektedir. $e_1=2,5$ cm kapak açıklığında memba su seviyesinin(H), debi (Q) ile artış oranı $(H_s-H_i)/(Q_s-Q_i)=2,30$ olurken, $e_2=5$ cm kapak açıklığında bu oran $(H_s-H_i)/(Q_s-Q_i)=0,99$ olmaktadır. Artan debi değeri ile (Q), $e_1=2,5$ cm kapak açıklığında memba su seviyesi (H) artışı, $e_2=5$ cm kapak açıklığından %132 daha fazla olmaktadır. Memba su seviyesi karşılaştırmasında nümerik model ve deneyler %99 oranında tutarlılık göstermiştir. Hidrolik sıçrama öncesindeki su derinliklerinin (y_1) debiye bağlı olarak iki farklı kapak açıklığı için karşılaştırılması Şekil 14'te gösterilmiştir. Hidrolik sıçrama öncesindeki su derinliği kapak açıklığı tarafından sınırlanmaktadır ve bu derinlik

serbest hidrolik sıçramada kesinlikle kapak açıklığında fazla olamamaktadır. $e_2=5$ cm kapak açıklığında artan debi (Q) miktarı ile sıçrama öncesi su derinliği, $e_1=2,5$ cm kapak açıklığına göre 2,84 kat fazla artmaktadır.

Laboratuvarında yapılan hidrolik sıçrama deneyleri 3 boyutlu olmasına rağmen nümerik modeller 2 boyutlu olarak oluşturulmuştur. 2 boyutlu nümerik modeller ile analizler yapılırken, programın 2 boyutta kullandığı 1 m kanal genişliği dikkate alınarak debiler belirlenmiştir. Nümerik modeller ile deneysel veriler, hidrolik sıçramanın konumunun (L) belirlenmesi açısından %94 oranında tutarlı sonuçlar vermişlerdir. Ayrıca nümerik model ile fiziksel modelin su yüzeyi profili karşılaştırılmıştır. Görsel karşılaştırılmanın yapılmasındaki amaç, deneylerin ve nümerik modelin su yüzeyi profillerinin ne kadar tutarlı olduğunu belirlemektir. $e_1=2,5$ cm ve $e_2=5$ cm kapak açıklıklarında, $Q=31,60$ lt/sn ve $Q=17,34$ lt/sn debi değerleri için, nümerik model ve deneylerden elde edilen görsellerin karşılaştırılması Şekil 15'de gösterilmiştir. Nümerik model, fiziksel deney düzeneğinde olduğu gibi hidrolik sıçramayı başarılı bir şekilde analiz etmiştir. Nümerik modelde su, kapakların arkasında haznedeymiş gibi davranmakta ve kapak altından sel rejimi ile geçtikten sonra hidrolik sıçramaya sebep olmaktadır.



Şekil 13. $e_1=2,5$ cm ve $e_2=5$ cm kapak açıklıkları için elde edilen debi (Q) ve memba su seviyelerinin (H) karşılaştırılması.



Şekil 14. $e_1=2,5$ cm ve $e_2=5$ cm kapak açıklıkları için elde edilen debi (Q) ve sıçrama öncesi su derinliklerinin (y_1) karşılaştırılması.



Şekil 15. Nümerik modelden elde edilen 2 boyutlu görsellerin, deneyler ile karşılaştırılması.

4. Sonuç

Bu çalışmada açık kanal sisteminde hidrolik sıçrama oluşturmak için bent kapağı ve doğrusal savak kullanılmıştır. Hidrolik sıçramanın ve su seviyelerinin değişken debi değerleri ile davranışı incelenmiştir. Öngörülemeyen ve oluşacağı konum tam olarak bilinmeyen bir hidrolik sıçrama hidrolik yapılar için tehlike arz etmektedir. Hidrolik sıçramanın meydana geleceği yer doğru tahmin edilmeli ve ek önlemler alınmalıdır. Deneylerden de görülebileceği gibi hidrolik sıçramanın konumu, debi, kapak açıklığı ve memba su seviyesi gibi hidrolik koşullara bağlı olarak değişmektedir. Çalışmada $e_1=2,5$ cm ve $e_2=5$ cm olmak üzere iki farklı kapak açıklığı kullanılmış ve kapaklar üzerinde toplamda 34 farklı debi değeri ile deneyler yürütülmüştür. Yapılan deneylerde hidrolik sıçramanın konumunun, debiye bağlı olarak değişimi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, hidrolik sıçrama konumunun ve memba su seviyesinin artan debi değeri ile lineer orantılı olarak değiştiği görülmüştür. Kapak açıklığı arttıkça hidrolik sıçramanın mansap tarafında ilerleme hızı azalmaktadır. Kapak açıklığı azaldıkça ise memba su seviyesi daha hızlı yükselmektedir. Bu çalışmada Fluent gibi nümerik modelleme programlarının, bent kapağı altından geçen akımı ve oluşturduğu hidrolik sıçramayı

simüle etmek için yeterince gelişmiş olduğunu göstermiştir. Ayrıca laboratuvar ortamında yapılan deneyler 3 boyutlu olmasına rağmen oluşturulan 2 boyutlu nümerik modeller, deneysel ile karşılaştırıldığında hidrolik sıçramanın konumu ve memba su seviyesi bakımından yüksek tutarlılık göstermiştir. Bu yapılan 2 boyutlu nümerik modeller zamandan tasarruf sağlayarak başarılı sonuçlar vermişlerdir.

Katkı Oranı Beyanı

Yazarın katkı yüzdeleri aşağıda verilmiştir. Yazar makaleyi incelemiş ve onaylamıştır.

	A.Y.
K	100
T	100
Y	100
VTI	100
VAY	100
KT	100
YZ	100
KI	100
GR	100
PY	100
FA	100

K= kavram, T= tasarım, Y= yönetim, VTI= veri toplama ve/veya işleme, VAY= veri analizi ve/veya yorumlama, KT= kaynak tarama, YZ= Yazım, KI= kritik inceleme, GR= gönderim ve revizyon, PY= proje yönetimi, FA= fon alımı.

Çatışma Beyanı

Yazar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedirler.

Etik Onay Beyanı

Bu araştırmada hayvanlar ve insanlar üzerinde herhangi bir çalışma yapılmadığı için etik kurul onayı alınmamıştır.

Destek ve Teşekkür Beyanı

Bu çalışmada yapılan deneylerin gerçekleştirildiği laboratuvar imkanlarını sağladığı için Konya Teknik Üniversitesine, makaleyle ilgili değerli yorum ve önerileri için hakemlere ve editörlere teşekkür ederim.

Kaynaklar

Akoz MS, Kirkgoz MS, Oner AA. 2009. Experimental and numerical modeling of a sluice gate flow. *J Hydraul Res*, 47(2): 167-176.

Ansyst® Fluent. 2023 Release 23.1, Help System, Chapter 1: Basic Fluid Flow, ANSYS, Inc., pp: 41.

Araz GBM, Hanif CM. 1991. Numerical simulation of hydraulic jump. *J Hydraul Eng*, 117(9): 1195-1211.

Aydın, MC, Ulu AE. 2017. Numerical modelling of sluice gates with different baffle types under submerged flow conditions. *BEU J Sci Technol*, 7(1): 1-6

Bakhmeteff BA, Matzke AE. 1936. The hydraulic jump in terms of dynamic similarity. *T Am Soc Civ Eng*, 10(11): 630-647.

Bélanger JB. 1828. Essai sur la solution numérique de quelques problèmes relatifs au mouvement permanent des eaux

courantes. Chez Carilian-goeury, Paris, Fransa, pp: 62.

Bidone G. 1819. Observation sur le hauteur du ressaut hydraulique en 1818. Royal Academy of Sciences, Turin, İtalya.

Bradley JN, Peterka AJ. 1957. Hydraulic design of stilling basins: hydraulic jumps on a horizontal apron (Basin I). *J Hydr Eng Div-ASCE*, 83(5): 1401-1424.

Cassan, L, Belaud G. 2012. Experimental and numerical investigation of flow under sluice gates. *J Hydraul Eng*, 138: 367-373.

Cihan AM, Ulu AE. 2017. Numerical modelling of sluice gates with different baffle types under submerged flow conditions. *BEU J Sci Technol*, 7(1): 1-6.

Daneshfaraz R, Abbaszadeh H, Gorbanvatan P, Abdi M. 2021. application of sluice gate in different positions and its effect on hydraulic parameters in free-flow conditions. *J Hydraul Struct*, 7(3): 72-87.

Ead SA, Rajaratnam N. 2002. Hydraulic jumps on corrugated beds. *J Hydraul Eng*, 128(7): 656-663.

Gumus V, Simsek O, Soydan NG, Aköz MS, Kirkgoz MS. 2016. Numerical modeling of submerged hydraulic jump from a sluice gate. *J Irrig Drain Eng*, 142(1): 04015037-1-11.

Habibzadeh A, Vatankhah AR, Rajaratnam N. 2011. Role of energy loss on discharge characteristics of sluice gates. *J Hydraul Eng*, 137(9): 1079-1084.

Hager WH. 1992. Energy dissipators and hydraulic jump. Dordrecht. Springer, Water Science and Technology Library, London, UK, pp: 289.

Hager WH, Wanoschek R. 1987. Hydraulic jump in triangular channel. *J Hydraul Res*, 25(5): 549-564.

Karami S, Heidari MM, Rad MHA. 2020. Investigation of free flow under the sluice gate with the sill using Flow-3D Model. *Ijst-T Civ Eng*, 44(1): 317-324.

Kubrak E, Kubrak J, Kiczko A, Kubrak, M. 2020. Flow measurements using a sluice gate; Analysis of applicability. *Water*, 12(3): 819.

Lazzarin T, Viero DP, Defina A, Cozzolino L. 2023. Flow under vertical sluice gates: Flow stability at large gate opening and disambiguation of partial dam-break multiple solutions. *Phys Fluids*, 35 (2): 024114.

Levy AG, Ellms JW, Gore W, Fales AL. 1927. The hydraulic jump as a mixing device. *American Water Works Assoc*, 17:1, 1-26.

Peterka AJ. 1984. Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, pp: 124.

Rajaratnam N, Subramanya K. 1968. Profile of the hydraulic jump, *J Hydr Eng Div-Asce*, 94(3): 663-674.

Retsinis E, Papanicolaou P. 2020. Numerical and experimental study of classical hydraulic jump. *Water*, 12(6): 1766.

Rouse H, Siao TT, Nagaratnam S. 1959. Turbulence characteristics of the hydraulic jump. *T Am Soc Civ Eng* 124(1): 926-950.

Safranez K. 1929. Researches relating to the hydraulic jump, English translation by DP Barnes. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, USA, pp: 63.

Silvester R. 1964. Hydraulic jump in all shapes of horizontal channels, *J Hydr Eng Div-ASCE*, 90(1): 23-55.

Swamee PK. 1992. Sluicgate discharge equations. *J Irrig Drain Eng*, 118(1): 56-60.