

## FARKLI BATIKLIK ORANLARINA SAHİP BATIK HİDROLİK SİÇRAMANIN SAYISAL MODELLEMESİ

**Oğuz ŞİMŞEK<sup>1\*</sup>, Mehmet KÖSEN<sup>2</sup>, Veysel GÜMÜŞ<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup>Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa, 63050, Türkiye

Geliş Tarihi/Received Date: 26.08.2021 Kabul Tarihi/Accepted Date: 06.11.2021 DOI: 10.54365/adyumbd.987338

### ÖZET

Hidrolik sıçrama, akımın sahip olduğu enerjinin büyük miktarının sönmüldüğü ve aşırı türbülansın oluştuğu oldukça karmaşık akım problemidir. Bu çalışmada, farklı akım durumlarında kayar kapak mansabında oluşan batmış hidrolik sıçramanın sayısal modellemesi yapılmıştır. ANSYS- Fluent programı kullanılarak akımı idare eden temel denklemlerin sayısal olarak çözümünde, türbülans viskozitesinin hesap edilmesinde Reynolds Ortalamalı Navier Stokes (RANS) tabanlı Reynolds Gerilme Modeli (Reynolds Strees Model-RSM) ve su- hava arakesitinin belirlenmesinde ise Akışkan Hacimleri Yöntemi (Volume of Fluids) kullanılmıştır. Q6 durumunun sayısal modellemesinden elde edilen hız profilleri, deneysel hız profilleriyle karşılaştırılmıştır. Farklı batıklık oranlarına sahip batmış hidrolik sıçramanın sayısal modellemesi sonucunda, meydana gelen hidrolik sıçrama ve geri dönüş bölgesi uzunlukları ve hız alanında meydana gelen değişimler değerlendirilmiştir. Bunun yanında, hidrolik sıçramada meydana gelen sınır tabakası kalınlığı farklı akım durumlarında incelenmiştir. Çalışma sonucunda, sayısal modelleme tekniklerinin, farklı batıklık oranlarında oluşan hidrolik sıçramanın sayısal modellemesinde oldukça başarılı olduğu ve deneysel çalışmalara kıyasla akımla ilgili detaylı bilgi sunma avantajından dolayı su yapılarının tasarımında tercih edilebileceği belirlenmiştir.

*Anahtar Kelimeler:* Batık hidrolik sıçrama, Batıklık oranı, Sayısal modelleme, Reynolds gerilme modeli

## NUMERICAL MODELING OF SUBMERGED HYDRAULIC JUMP WITH DIFFERENT SUBMERGENCE RATES

### ABSTRACT

Hydraulic jump is a highly complex flow problem in which a large amount of the energy is absorbed, and turbulence occurs in the flow. In this study, the numerical modelling of the submerged hydraulic jump occurring in the downstream sluice gate in different flow conditions is performed. The basic equations governing the flow are solved with ANSYS-Fluent program. In numerical solution of the basic equations, Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) based Reynolds Stress Model (RSM) is used to calculate turbulent viscosity and Volume of Fluid (VOF) method is used to determine the flow-air intersection. The velocity profiles obtained from the numerical modeling of the Q6 state were compared with the experimental velocity profiles. As a result of the numerical modeling of the submerged hydraulic jump with different submergence ratios, the lengths of the hydraulic jump and roller zone and the changes in the velocity field were evaluated. Besides, boundary layer development occurring in hydraulic jump has been investigated in different flow conditions. As a result of the study, it has been determined that numerical modeling techniques are quite successful in numerical modeling of hydraulic jump occurring at different submergence rates and can be used safely due to the advantage of providing very detailed information about flow compared to experimental studies.

*Keywords:* Submerged hydraulic jump, Submergence rate, Numerical modelling, Reynolds stress model

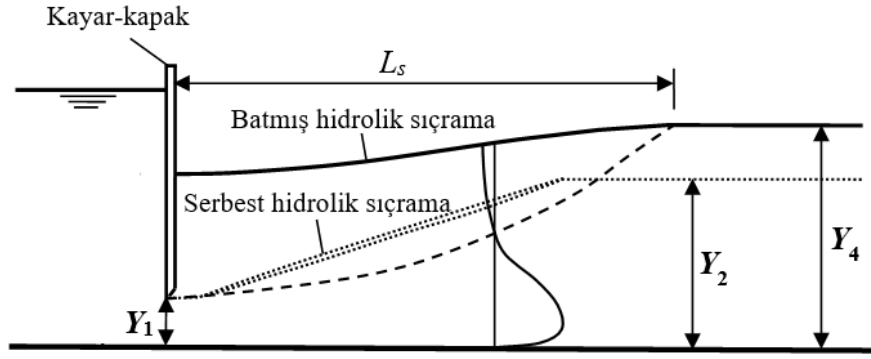
\* e-mail: <sup>1</sup> [oguzsimsek@harran.edu.tr](mailto:oguzsimsek@harran.edu.tr) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6324-0229> (Sorumlu Yazar)

<sup>2</sup> [mhntksn5147@gmail.com](mailto:mhntksn5147@gmail.com) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3076-2746>

<sup>3</sup> [gumus@harran.edu.tr](mailto:gumus@harran.edu.tr) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2321-9526>

## 1. Giriş

Barajlar, su kaynaklarından hidroelektrik enerjisi, sulama ve içme suyu temini gibi çeşitli amaçlar için inşa edilen hidrolik yapılardır. Baraj yapısının elemanlarından olan baraj gövdesi; akarsu yatağı tamamen kapatılarak su akışını engelleyerek akımın baraj rezervuarında depolanmasını sağlamak üzere inşa edilir iken, barajın güvenliğini sağlayan dolusavaklar taşkın anında veya baraj haznesinde depolama kapasitesinden fazla gelen suyun mambadan mansaba aktarılmasında kullanılmaktadır. Dolusavakla, memba bölgesinden mansaba savaklanan su, memba ve mansap arasındaki kot farkından dolayı dolusavak topuk noktasında aşırı hıza sahip olmaktadır. Yüksek hızla mansap bölgesindeki yatağa ulaşan akım, topuk bölgesinde oyulmalara ve aşınmalara neden olarak baraj dolusavak yapısının stabilizesini riske etmektedir. Bu olumsuz durumların yaşanmaması için akımın enerjisinin sönmülmesi (nehir rejimine dönüşmesi) gerekmektedir. En etkili enerji sönmülme yolu, akımın enerji kırıcı tesis içerisinde hidrolik sıçrama sürecinden geçmesini sağlamaktır. Buradan da görüleceği üzere hidrolik sıçramanın oluşması için enerji kırıcı yapıların tasarımı oldukça önemlidir. Dolusavak mansap bölgesinde enerji kırıcı tesislerin yanında, açık kanal akımlarında su seviyesini ve akımı kontrol etmek üzere inşa edilen kayar kapakların mansap su derinliğinin fazla olması durumunda akımın enerjisinin bir miktarını korumak için akım hidrolik sıçrama gerçekleştirmek zorunda kalmaktadır. Hidrolik sıçrama sürecinde akım içerisine fazla miktarda hava karışmakta ve türbülans oluşmaktadır. Hidrolik sıçrama, mansap bölgesindeki akım derinliğine bağlı olarak batık veya serbest hidrolik sıçrama olarak sınıflandırılmaktadır (Şekil 1). Mansap su derinliğinin, hidrolik sıçrama sonrası oluşan eşlenik derinlikten büyük olması durumunda, sıçrama kapak veya dolusavak şüt kanalına ulaşmakta ve enerji sönmülme miktarının, sıçrama ve geri dönüş bölgesi uzunluğunun serbest hidrolik sıçramaya kıyasla daha az olduğu batık hidrolik sıçrama oluşmaktadır. Mansap su derinliğinin, hidrolik sıçrama sonrası su derinliğinden ( $Y_2$ ) eşit veya bu derinlikten daha küçük olması durumunda ise serbest hidrolik sıçrama oluşmaktadır. Şekilde bulunan,  $Y_1$  kapak açıklığı (hidrolik sıçrama öncesi akım derinliğini),  $Y_2$  serbest sıçrama halinde mansap derinliğini ve  $Y_4$  batmış sıçramanın mansap derinliğini ifade etmektedir.



Şekil 1. Batmış ve serbest hidrolik sıçramanın geometrisi

Hidrolik sıçrama karmaşık akım yapısına sahip olmasından dolayı birçok araştırmaya konu olmuş ve yapılan çalışmalarda hidrolik sıçrama sürecinde meydana gelen enerji kayıpları, hidrolik sıçrama uzunluğu ve türbülans karakteristikleri, deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır [1-6]. Bunun yanında, son yıllarda elektronik cihazlarda ve bilgisayar yazılımlarında meydana gelen gelişmelerle beraber birçok alanda sayısal modelleme tekniklerinin kullanımı yaygınlaşmıştır. Hidrolik alanında da basit ve karmaşık akım problemlerinin çözümünde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yöntemlerine dayalı sayısal modelleme programlarının kullanımı artmıştır. Ma ve ark. [7] farklı akım durumunda oluşan batık hidrolik sıçramanın türbülans özelliklerini, Standart k- $\epsilon$  (SKE) modeli aracılığıyla sayısal olarak incelenmiştir. Su hava ara yüzünün belirlenmesinde VOF yöntemi kullanılmıştır. Sayısal modellemelerden, 3.2 ile 8.2 arasında değişen Froude sayılarında ve 0.24 ile 0.85 arasında değişen

batıklık oranlarına sahip akımlar için serbest yüzü profilleri, hidrodinamik basınçlar, ortalama hızlar, türbülans şiddeti, kayma gerilmeleri, maksimum yatay hızlar ve kanal yatağı boyunca sürtünme katsayıları elde edilmiştir. Sayısal modelleme sonuçları mevcut deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Sayısal modellemenin batık hidrolik sıçramanın hem makroskopik yapısı hem de türbülanslı yapısı hakkında yeterince güvenilir bilgi sağladığı tespit edilmiştir. Javan ve Eghbalzadeh [8], hidrolik sıçramanın hareketini Reynolds Ortalamalı Navier Stokes (RANS) denklemlerini zamana bağlı sayısal olarak çözmüşlerdir. Türbülans viskozitesinin sayısal modellemesinde SKE modeli, serbest yüzeyin modellenmesi için ise Lagrangian hareketli ızgara yöntemi kullanılmıştır. Geliştirilen modelde kinematik serbest yüzey sınır koşulu, momentum ve süreklilik denklemleri ile eş zamanlı olarak çözümlenerek, çözümün bir parçası olarak hız ve basınç alanlarıyla birlikte su yüksekliği elde edilebilmiştir. Froude sayısının 3.2 ile 8.2 arasında değiştiği ve batıklık oranının 0.24 ile 0.85 arasında değiştiği akım durumları için sayısal modelleme gerçekleştirilmiştir. Sayısal model sonuçlarının deneysel ölçümlerle yapılan karşılaştırmalarından, sayısal modelin çeşitli istasyonlarda hız alanını, serbest yüzeyin değişimini, maksimum hızı, Reynolds kayma gerilmelerini ve normal gerilmeleri oldukça makul doğrulukla modellenebileceği belirlenmiştir. Ahmed ve ark. [9], aralıklı üçgen şerit oluklu yatağın batık hidrolik sıçramanın özellikleri üzerindeki etkisini deneysel olarak araştırılmışlardır. Hem düz hem de pürüzlü yatak durumunda, Froude sayısının 1.68 ile 9.29 arasında değiştiği farklı akım koşullarında çok sayıda ölçüm yapılmışlardır. Çalışma sonucunda, üçgen oluklu şeritle kontrol altına alınan hidrolik sıçramanın sıralı derinliğinin ve sıçrama uzunluğunun sırasıyla %15.14 ve %21.03 ortalama değerlerinde azaldığını, buna karşın sıçrama veriminin, klasik bir sıçramaya kıyasla optimum aralıklı pürüzlülükte %50.31 arttığı doğrulanmıştır. Ayrıca, sıçrama özelliklerini tahmin etmek için boyutsuz ilişkiler çıkarılmış ve elde edilen sonuçların literatürde mevcut çalışmalarla [10-17] uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Shekari ve ark. [18], batık hidrolik sıçramanın akış alanını deneysel ve sayısal olarak üç boyutlu incelemişlerdir. Sayısal modellemelerde akımı idare eden temel denklemlerin çözümünde türbülans modeli olarak Standart k-ε (SKE), Re-Normalization Group k-ε (RNG), Relazible k-ε (RKE) ve Reynolds-Gerilme Modeli (RSM), su hava ara kesitinin belirlenmesinde ise Akışkan Hacimleri Yöntemi (Volume of Fluids-VOF) kullanılmıştır. Sayısal ve deneysel model sonuçlarının karşılaştırılmasından batık hidrolik sıçramanın akım özelliklerinin ve serbest su yüzünün uyumlu olduğu belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, su yüzünün belirlenmesinde RNG modeli en başarılı olurken, tam gelişmiş bir bölgenin kanal yatağının yakınında RSM modeli kullanılan diğer türbülans modellerine göre deneysel hız profilleriyle daha uyumlu olduğu belirtilmiştir. Gümüş ve ark. [19], kayar kapak mansabında oluşan batık hidrolik sıçramanın su yüzü profilini farklı akım durumlarında deneysel ve sayısal modellemişlerdir. Sayısal modellemede temel denklemlerin çözümünde SKE, RNG ve RKE modellerini, su yüzünün belirlenmesinde ise VOF yöntemini kullanmışlardır. Deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılmasından, RNG modelinin akım ve batmış hidrolik sıçramanın özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan diğer modellere kıyasla daha başarılı olduğu belirtilmiştir. Gümüş ve ark. [20], iki farklı debi durumunda kayar kapak mansabında batmış hidrolik sıçramanın özelliklerini ve hız alanını deneysel ve beş farklı türbülans modeli kullanılarak sayısal modellemişlerdir. Sayısal modellemelerde hesaplama ağının sonuçlar üzerindeki etkisini belirlemek için ağ yakınsama indeksi yöntemini, su yüzünün belirlenmesinde ise akışkan hacimleri yöntemi kullanılmıştır. Deneysel ve sayısal olarak elde edilen hız alanının karşılaştırılmasından, RSM modelinin kullanılan diğer türbülans modellerine kıyasla daha başarılı olduğu belirlenmiştir.

Bu çalışmada, Gümüş ve ark. [20], tarafından iki farklı batıklık oranına sahip akım durumları için laboratuvar ortamında gerçekleştirilen fiziksel ve sayısal modelin 4 farklı batıklık oranlarında iki boyutlu sayısal modellemesi yapılmıştır. Akımı idare eden süreklilik ve momentum denklemleri, ANSYS- Fluent paket programı yardımıyla sayısal olarak çözülmüştür. Su yüzü profilinin sayısal olarak belirlenmesinde Akışkan Hacimleri Yöntemi ve türbülans viskozitesinin sayısal modellenmesinde ise Gümüş ve ark. [20] tarafından farklı türbülans modelleri kullanılarak elde edilen sayısal model sonuçlarının deneysel verilerle daha uyumlu tahminde bulunduğu belirlenen RSM modeli kullanılmıştır. Farklı batıklık oranlarında RSM modeli kullanılarak sayısal olarak elde edilen hız profilleri, dinamik basınç, batık sıçrama özellikleri, Reynolds gerilmelerinin ve türbülans kinetik enerjisinin desenleri değerlendirilmiştir.

## 2. Deneysel Çalışma

Deneyler, Gümüş ve ark. [20] tarafından Çukurova Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Hidrolik Laboratuvarında yapılmıştır (Şekil 2). Deneylerin gerçekleştirildiği kanalın uzunluğu 2.4 m, genişliği ve derinliği 0.20 m ve dikdörtgen prizması şeklindedir. Açık kanalın tabanı ve yan yüzeyleri camdan imal edilmiş ve hidrolik açıdan cilalı olarak tanımlanmaktadır. Laboratuvar kanalında su kapalı çevrim sistem ile aktarılmakta sürekli olarak sisteme yeniden su takviyesi gerekmemektedir. Gümüş ve ark. [20] tarafından laboratuvar ortamında kapak açıklığının 4 cm olduğu durumlarda kayar kapak mansabında oluşan batmış hidrolik sıçramayı deneysel ve sayısal olarak modellemiştir.



Şekil 2. Deneysel düzeneği [20]

Hidrolik sıçramanın karakteristik özelliklerinden,

$$\text{Batma faktörü: } S = \frac{Y_4 - Y_2}{Y_2}$$

$$\text{Serbest sıçramanın ikinci derinliği: } Y_2 = \frac{1}{2} Y_1 (\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1)$$

$$\text{Ampirik elde edilmiş batık hidrolik sıçramanın uzunluğu: } L_s = Y_2(4.9S + 6.1)$$

ifadesi ile verilmiştir [21].

Bu çalışmada, sayısal modellemesi yapılan akım durumlarına ait akım ve hidrolik sıçrama karakteristikleri Çizelge 1’de verilmiştir. Burada,  $Q$  akım debisini,  $Y_1$  kayar kapak açıklığını,  $V$  kapak altı kesitinde elde edilen akım hızını,  $Fr_1$  kapak altında elde edilen Froude sayısını,  $Y_2$  teorik olarak elde edilen serbest hidrolik sıçrama eşlenik derinliğini,  $Y_4$  ise sayısal modellemelerden elde edilen batmış hidrolik sıçrama mansap derinliğini temsil etmektedir. Çizelgede verilen değerlerden, akım debisinin artmasıyla  $V$ ,  $Y_2$ ,  $Y_4$  ve  $L_s$  değerleri artarken, batıklık oranının ise azaldığı görülmektedir. Batık hidrolik sıçrama mansap su derinliğinin ( $Y_4$ ), serbest hidrolik sıçrama eşlenik derinliğinden ( $Y_2$ )’den büyük

olduğu görülmektedir. Bu akım şartları altında batık hidrolik sıçramanın meydana geldiği anlaşılmaktadır.

**Çizelge 1.** Sayısal modellemesi akım ve hidrolik sıçrama özellikleri.

Durum	Q (lt/s)	Y <sub>1</sub> (m)	V (m/s)	Fr <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub> (m)	Y <sub>4</sub> (m)	L <sub>s</sub> (m)	S
1	4	0.04	0.500	0.798	0.029	0.111	0.577	2.761
2	5	0.04	0.625	0.998	0.040	0.112	0.595	1.801
3	6	0.04	0.750	1.197	0.051	0.124	0.668	1.450
4	7	0.04	0.875	1.397	0.062	0.129	0.706	1.097

### 3. Sayısal Modelleme

Bu çalışmada, içerisinde batık hidrolik sıçrama oluşan açık kanal akımı; zamana ve yere göre bağlı, iki-boyutlu, sıkışmayan, türbülanslı ve serbest yüzeyli akım özelliklerine sahiptir. Bu akım türünün hareketini yöneten temel denklemler süreklilik ve momentum denklemleri olup aşağıda Denklem 1, 2 ve 3'te sırasıyla verilmiştir.

Kütlenin korunumu:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

Momentumun korunumu denkleminin  $x$  doğrultusundaki bileşeni:

$$\rho \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) = \rho X - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \quad (2)$$

Momentumun korunumu denkleminin  $y$  doğrultusundaki bileşeni:

$$\rho \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) = \rho Y - \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} \quad (3)$$

Yukarıdaki denklemlerde bulunan  $\bar{u}$  ve  $\bar{v}$  sırasıyla  $x$  ve  $y$  doğrultusundaki zamansal ortalama hız bileşenini,  $X$  ve  $Y$  sırasıyla  $x$  ve  $y$  doğrultusunda birim kütleyle gelen kütleli kuvvet bileşenini,  $\bar{p}$  zamansal ortalama basıncı,  $\mu$  dinamik viskoziteyi,  $\rho$  akışkan yoğunluğunu ve  $\tau_{xx}$ ,  $\tau_{xy}$  ve  $\tau_{yy}$  türbülans (Reynolds) gerilmelerini ifade etmektedir.

Yukarıdaki denklemlerde bulunan bilinmeyenler incelendiğinde sayılarının altı olduğu, buna karşılık çözümde kullanılacak denklem adetinin üç olduğu görülmektedir. Bu haliyle bilinmeyenlerin bu denklemler yardımıyla çözümü mümkün olmamaktadır. Bu noktada sayısal modellemelerde denklem takımının çözülerek bilinmeyenler belirlenmesi için momentum denkleminde bulunan Reynolds gerilmelerinin çözümünün, türbülans modelleri kullanılarak yapılması gerekmektedir. Doğrusal bünye denklemleri kullanılarak, türbülans kayma gerilmeleri, sıkışmayan akımlar için Boussinesq'in türbülans viskozitesi yaklaşımına göre aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$\tau_{xx} = -\overline{\rho u'v'} = \mu_t \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) - \frac{2}{3} \rho k \quad (4)$$

$$\tau_{xy} = -\overline{\rho u'v'} = \mu_t \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) \quad (5)$$

$$\tau_{yy} = -\overline{\rho v'v'} = \mu_t \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) - \frac{2}{3} \rho k \quad (6)$$

$u'$  yatay doğrultudaki türbülans hız sapıncını ve  $v'$  düşey doğrultudaki türbülans hız sapıncını,  $\mu_t$  türbülans viskozitesini ve  $k$  ( $= \overline{u'u'}/2$ ) türbülans kinetik enerjisini temsil etmektedir.

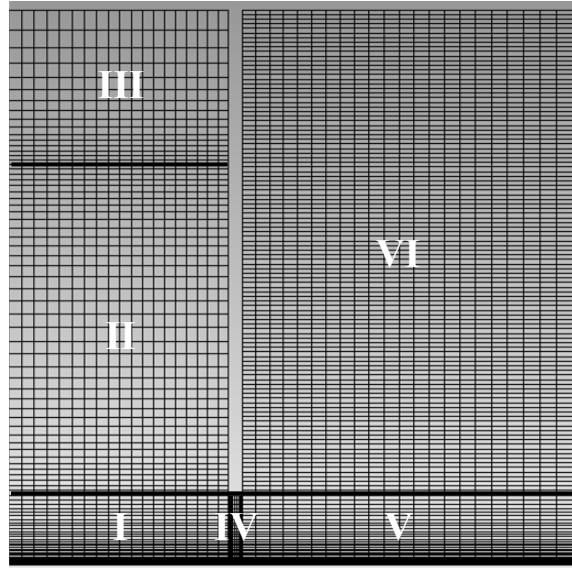
Farklı araştırmacılar tarafından geliştirilen türbülans viskozitesinin hesaplanmasında, akımın farklı özelliklerini kullanan türbülans modelleri önerilmiştir [22]. Bu modellerde, türbülans viskozitesinin tanımlanmasında türbülans kinetik enerjisi ( $k$ ), türbülans kinetik enerji kayıp miktarının ( $\epsilon$ ), türbülans kinetik enerjinin özgül kayıp oranı ( $\omega$ ) gibi parametrelerin kullanıldığı, bazı türbülans modellerinin ise Reynolds gerilmelerini doğrudan hesap ettiği görülmektedir. Reynolds gerilmelerini doğrudan hesaplama özelliğine sahip olan RSM modelinin bu özelliğinden dolayı ikinci mertebeli türbülans modeli olarak adlandırılmaktadır. Ayrıca, bu modeli geliştirenler tarafından akımda ayrılmaların bulunduğu, ikincil akımların mevcut olduğu ve akım çizgilerinin eğrisel bir yapıya sahip olduğu akım türlerinde diğer türbülans modellerine kıyasla üstünlüklere sahip olduğu belirtilmiştir [23-25]. Yapılan literatür araştırmasından, RSM türbülans modelinin batık hidrolik sıçramanın bulunduğu açık kanal akımlarının ve dolusavak üzerinden geçen akımın sayısal modellemesinde başarılı olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçtan, RSM modeli bu çalışmada batık hidrolik sıçramanın sayısal modellemesinde kullanılmıştır.

Yapılan sayısal modellemelerden, akımda sürekliliğinin 20 sn.'lik hesaplama süresinde sağlandığı belirlenmiş olup, bu süreden sonra 10 sn.'lik çözümler yapılarak akım karakteristiklerinin ortalaması alınmıştır. Böylelikle, toplamda 30 sn.'lik sayısal modelleme süresi belirlenmiştir. İterasyon adımının büyüklüğü kullanılan paket program tarafından Courant sayısı,  $C_n \leq 2$  olacak şekilde belirlenmiştir. Hesaplama adımlarında hesaplama hassasiyeti 0.00001 olarak belirlenmiştir. Değerin bu kadar yakınsamaması durumunda ise her bir iterasyon adımında program tarafından maksimum 10 iterasyon yapılmıştır.

Sayısal modellemelerde türbülans viskozitesinin hesap edilmesinin yanında diğer bir problem ise iki farklı akışkanın arakesitinin net olarak belirlenmesidir. Akışkan Hacimleri Yöntemi, bu problemin çözümünde farklı araştırmacılar tarafından oldukça sık tercih edilmiş ve başarılı olduğu belirlenmiştir [26]. Bu yöntemde, hesaplama ağının doluluk oranını ifade eden bir "F" fonksiyonu tanımlanarak, bu "F" fonksiyonu iki veya daha fazla akışkan türlerinin hesaplama ağının doldurduğu oranda sıfır ile bir arasında değer almaktadır. Eğer iki farklı akışkandan birisi su diğeri hava ise, hesaplama ağının su ile dolu olması durumunda "F" bir değerini, hava ile dolu ise "F" sıfır değerini almaktadır. Bu çalışmada da su hava arakesitinin belirlenmesinde Akışkan hacimleri yöntemi kullanılmıştır.

Sayısal modelleme sonuçları etki eden bir diğer parametre ise hesaplama ağı tasarımıdır. Sayısal model sonuçlarının hesaplama ağından bağımsız olup olmadığının kontrolünde Ağ Yakınsama İndeksi araştırmacılar tarafından oldukça sık kullanılan bir yöntemdir [27-28]. Bu yöntemde, 3 farklı yoğunlukta hesaplama ağı tasarımı gerçekleştirilmektedir. Bu hesaplama ağları arasında, akım ile ilgili parametrelerin hesaplama ağlarındaki değişimi değerlendirilerek, ağ yapısının çözümler üzerindeki etkisinin olup olmadığı belirlenmektedir. Gümüş ve ark. [20] tarafından yapılan değerlendirme sonucunda, kullanılan ağ yapısının sayısal model sonuçları üzerinde etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Bu çalışmada da sayısal modellemelerde Şekil 3'te verilen ve Gümüş ve ark. [20] tarafından kullanılan

hesaplama ağı kullanılmıştır. Hesaplama ağının dikdörtgen elemanlardan oluşturulması için çözüm bölgesi 6 alt bölgeye ayrılmıştır. Çözüm bölgesinin tamamında toplam 26700 adet eleman bulunmaktadır.



Şekil 3. Hesaplama ağı tasarımı ve alt bölgeler [20]

#### 4. Bulgular ve Tartışma

Teorik ve sayısal model sonucunda elde edilen batık hidrolik sıçrama özellikleri Çizelge 2’de verilmiştir. Teorik ve sayısal olarak elde edilen hidrolik sıçrama uzunluklarının arasındaki farkın %10’dan küçük olduğu ve genel olarak birbiriyle uyumlu olduğu belirlenmiştir. Sayısal olarak elde edilen hidrolik sıçrama geri dönüş bölgesi uzunluğunun debi değerinin artmasına paralel olarak azaldığı, hidrolik sıçrama uzunluğunun hem teorik hem de sayısal sonuçlardan arttığı söylenebilir.

Çizelge 2. Teorik ve sayısal olarak elde edilmiş hidrolik sıçrama özellikleri

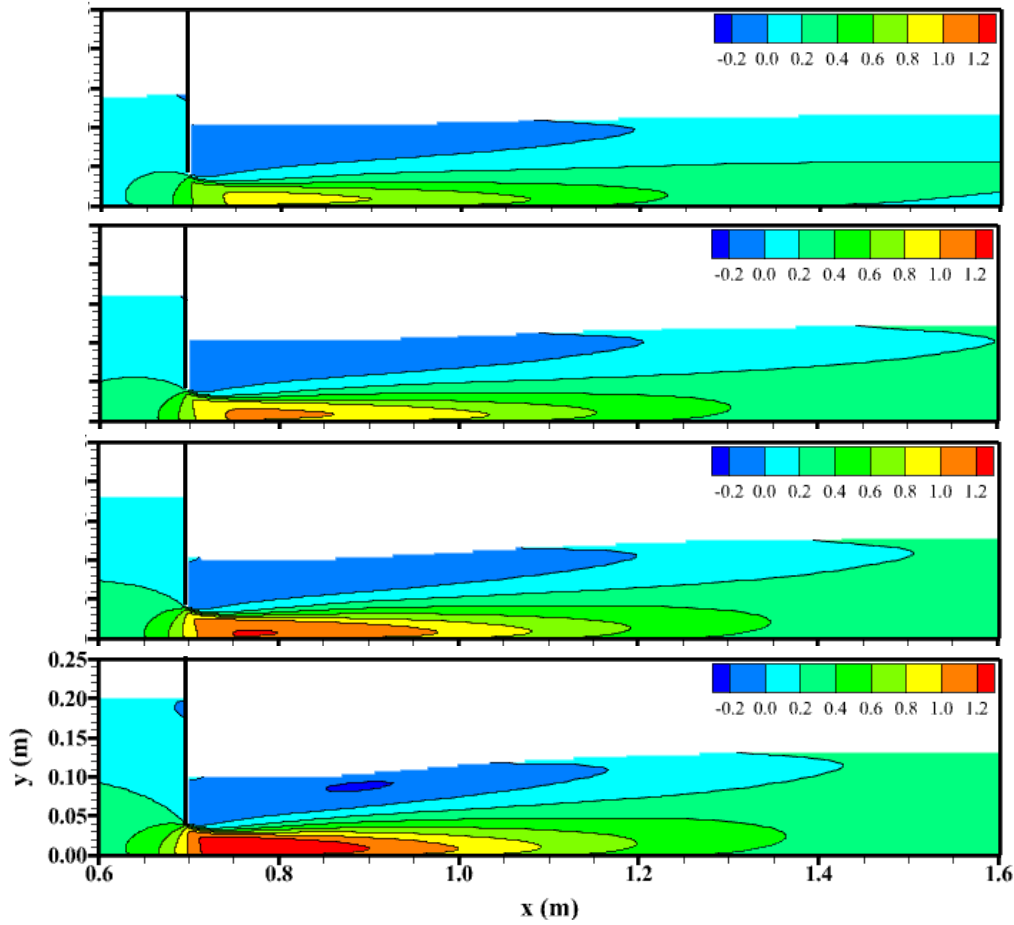
Durum	Y <sub>4</sub> (m)	Teorik		Sayısal	
		L <sub>s</sub> (m)	S	L <sub>s</sub> (m)	L <sub>r</sub> (m)
1 (Q <sub>4</sub> )	0.111	0.577	2.761	0.523	0.500
2 (Q <sub>5</sub> )	0.112	0.595	1.801	0.614	0.495
3 (Q <sub>6</sub> )	0.124	0.668	1.450	0.621	0.490
4 (Q <sub>7</sub> )	0.129	0.706	1.097	0.634	0.455

Şekil 4’te farklı akım durumlarında sayısal modelleme sonucunda elde edilen x doğrultusundaki hız bileşenine (u) ait ortalaması alınmış desenler verilmiştir. Şekil 4’den görüleceği üzere, kapağın memba bölgesinde akım alanı üzerindeki etkisinin bulunduğu, bu bölgede eğri yörüngeli yapıda olduğu görülmektedir. Ayrıca, bu etkilenme bölgesinin büyüklüğü debinin artmasına paralel olarak artmaktadır. Çizelge 2’de belirtilen akım koşullarında, kapağın hemen mansap bölgesinde Durum 1’de maksimum hızın 0.8-1.0 m/s aralığında, Durum 2’de ise 1.0-1.2 m/s aralığında, Durum 3’te ise 1.2 m/s’den daha büyük hızların olduğu şekillerden açıkça söylenebilir. Ayrıca, Durum 4’te 1.2 m/s’den daha büyük hız değerinin olduğu bölgenin Durum 3’ten daha büyük olduğu belirlenmiştir. Tüm akım durumlarında, kapak mansap bölgesinde negatif hızlar oluşmakta ve sadece Durum 4’te kapak memba bölgesinde

debinin artışına bağlı olarak negatif hızların oluştuğu ve kapak mansap bölgesinde diğer durumlara kıyasla bu durumda daha büyük negatif hızların oluştuğu görülmektedir.

**Çizelge 2.** Teorik ve sayısal olarak elde edilmiş hidrolik sıçrama özellikleri

Durum	Y <sub>4</sub> (m)	Teorik		Sayısal	
		L <sub>s</sub> (m)	S	L <sub>s</sub> (m)	L <sub>r</sub> (m)
1 (Q <sub>4</sub> )	0.111	0.577	2.761	0.523	0.500
2 (Q <sub>5</sub> )	0.112	0.595	1.801	0.614	0.495
3 (Q <sub>6</sub> )	0.124	0.668	1.450	0.621	0.490
4 (Q <sub>7</sub> )	0.129	0.706	1.097	0.634	0.455

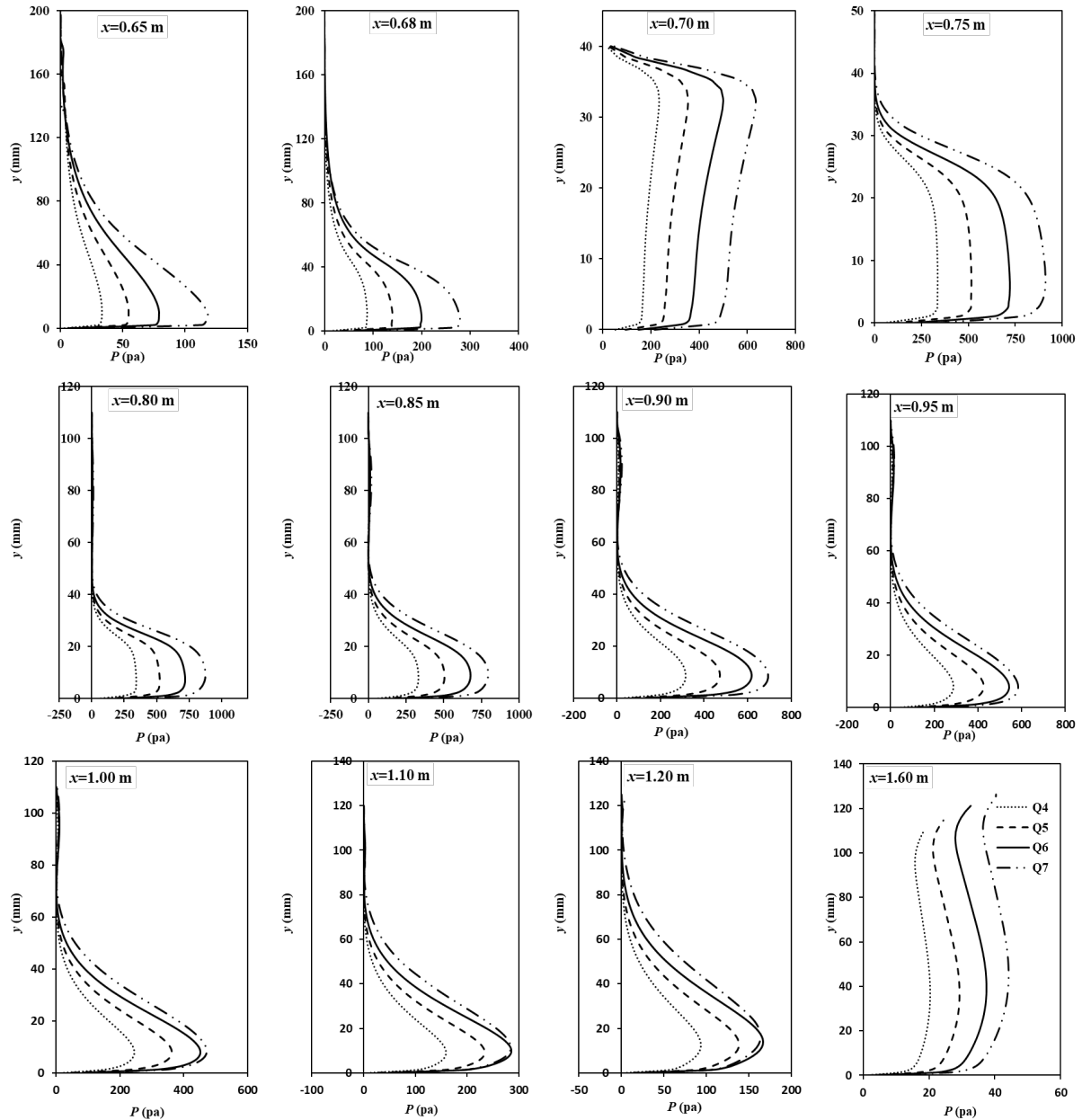


**Şekil 4.** Farklı akım durumlarında x doğrultusundaki ortalama hız bileşeni desenleri

Farklı akım durumlarında RSM modeli kullanılarak farklı kesitlerde sayısal olarak elde edilen dinamik basınç değerlerinin değişimleri Şekil 5'te verilmiştir. Ele alınan kesitlerde en büyük dinamik basınç değerinin debinin artmasıyla arttığı görülmektedir. Kapak memba bölgesinde  $x=0.65$  ve  $0.68$  m kesitlerinde,  $y=4$  cm'de akımın kapak altından geçtiği bölgede dinamik basınç değerinin bu yükseklikten itibaren azalma eğilime sahip olduğu söylenebilir. Ayrıca, bu kesitlerde akım üzerinde kapak etkisinin artmasıyla birlikte kapağa yaklaştıkça oluşan dinamik basınç değeri artarak kapak altı kesitinde ( $x=70$  cm) yaklaşık 4 kat arttığı belirlenmiştir. Kapak altı kesitinde akım derinliğinin



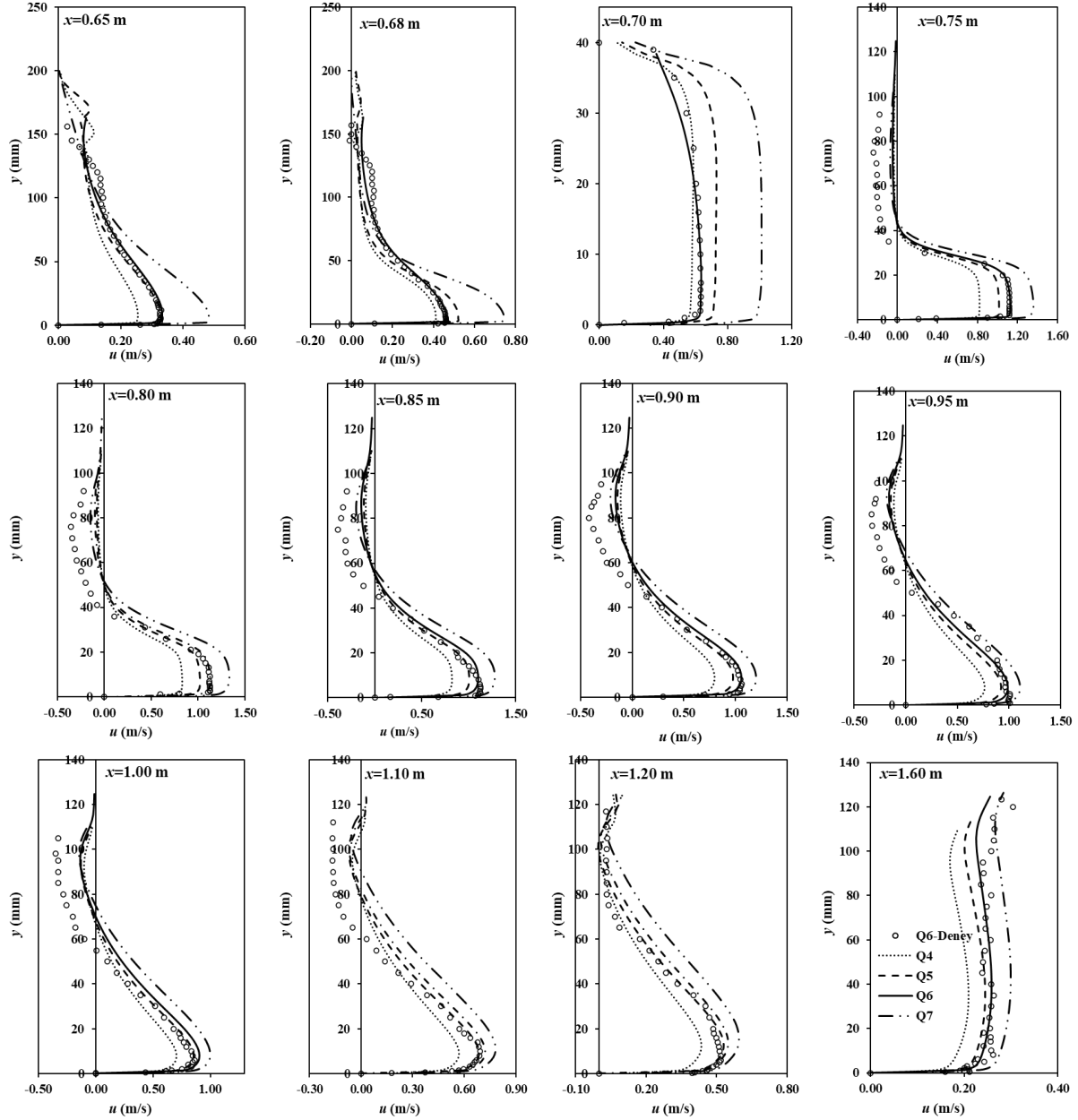
artmasıyla, bu kesitte elde edilen dinamik basınç değerleri artmıştır. Durum 1 ve 4 arasında bu kesitte yaklaşık olarak 4 kat fark söz konusudur. Kapak mansap bölgesinde ( $x=75-95$ cm) elde edilen dinamik basınç değerlerinin, kapak memba bölgesinden daha büyük olduğu söylenebilir.



Şekil 5. Farklı akım durumlarında elde edilen dinamik basınç değerleri

Şekil 6'da, Q6 durumunda deneysel ve farklı akım durumlarında RSM modeli kullanılarak sayısal olarak farklı kesitlerde elde edilen yatay hız bileşenin akım derinliği boyunca değişimi verilmiştir. Kapak memba bölgesinde elde edilen hız profillerinden akımın kapak altına geçiş bölgesinde ( $y=4$  cm) büyük hızlara sahip olduğu görülmektedir. Akım kesit alanının daraldığı kapak altı bölgesinde ve kapak mansap bölgesinde ( $x=0.7-1.10$  m) kanal tabanı üzerinde oldukça büyük değerlerinin olduğu ve debinin artmasıyla maksimum hız değerlerinin büyüdüğü söylenebilir. Kapak mansabında batık hidrolik sıçramanın olduğu kesitlerde, akım derinliğinin  $y=4$  cm'den büyük olduğu derinliklerde negatif hız değerleri oluşmaktadır. Debinin artmasıyla, kanal tabanına yakın bölgede oluşan jet akımında görülen farklılığın, negatif hızların olduğu bölgede daha az olduğu belirlenmiştir.

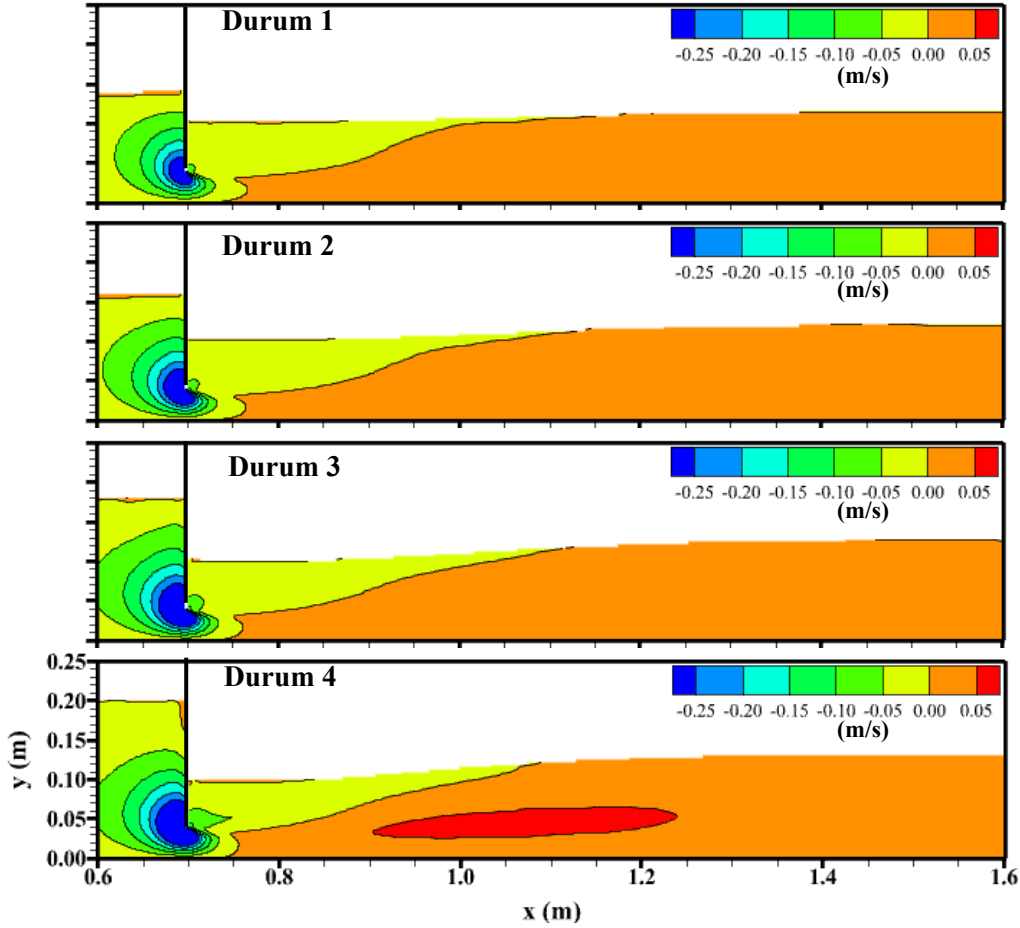
Q6 durumunda, deneysel ve sayısal olarak elde edilen hız profillerinin birbiriyle oldukça uyumlu olduğu söylenebilir. Çizelge 2’de verilen geri dönüş bölgesinin ve hidrolik sıçrama uzunluk değerlerinin hız profilleriyle uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 6. Farklı akım durumlarında elde edilen yatay hız bileşeni (u) profilleri

Şekil 7’de, farklı akım durumlarında sayısal modelleme sonucunda elde edilen y doğrultusundaki hız bileşenine (v) ait ortalama desenler verilmiştir. Kapak memba bölgesinde özellikle kapak uç noktasında negatif hızların büyük değerlere sahip olduğu, membaya ve su yüzüne doğru bu değerlerin azaldığı görülmektedir. Membaya bölgesinde negatif v hızlarının olduğu bölgelerin büyüklüğü debinin artmasına paralel olarak artmaktadır. Kapak alt uç noktasından başlayarak negatif hızların olduğu bölgenin debinin artmasıyla kapak alt bölgesinden kapak mansap bölgesine kaydığı şekillerden

söylenbilir. Ayrıca, y doğrultusunda elde edilen hız bileşenine ait maksimum değer Durum 4'te 0.05 m/s'den daha büyük olduğu belirlenmiştir.

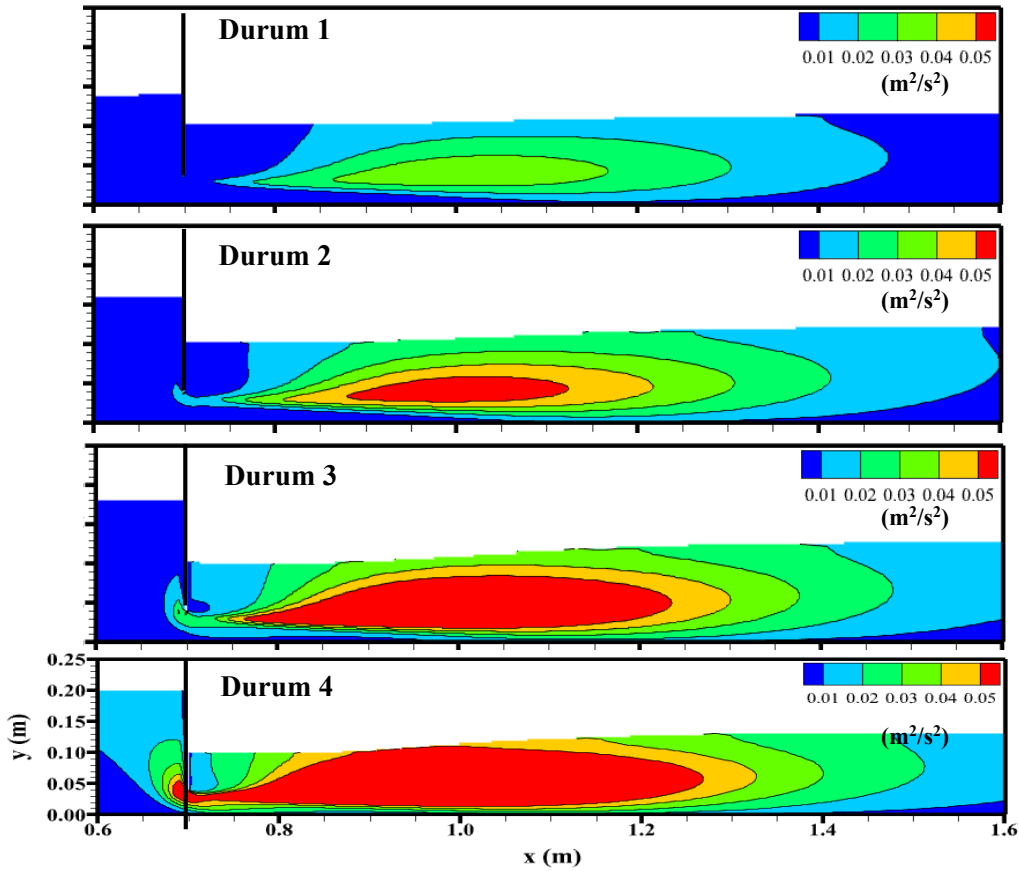


Şekil 7. Farklı akım durumlarında y doğrultusundaki ortalama hız bileşeni desenleri

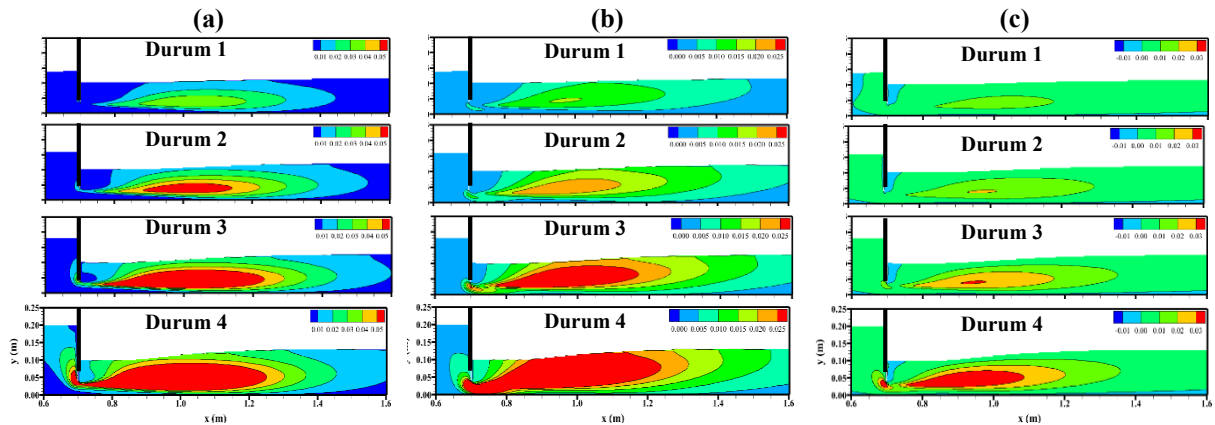
Şekil 8'de, farklı akım durumlarında sayısal modelleme sonucunda elde edilen türbülans kinetik enerji (TKE) desenleri sunulmuştur. Verilen şekillerden, TKE değişimin Durum 1'de sadece kapak mansap bölgesinde olduğu ve maksimum TKE değerinin  $0.04 \text{ m}^2/\text{s}^2$  olduğu görülmektedir. Bu akım durumları dışında ele alınan akım durumlarında maksimum TKE değerinin  $0.05 \text{ m}^2/\text{s}^2$  olduğu, maksimum TKE değerinin oluştuğu bölgenin debinin artmasıyla büyüdüğü ve kapak memba bölgesine kaydığı görülmektedir. Ayrıca, Durum 4'te kapağın hemen membasında hız alanında değişimin diğer akım durumlarına kıyasla daha büyük olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 9'da, Denklem 4, 5 ve 6'da verilen türbülans gerilmelerinin farklı akım durumlarında elde edilen desenleri verilmiştir. Farklı türbülans gerilmelerine ait verilen şekiller incelendiğinde, türbülans gerilmelerine ait şekillerin Şekil 8'de verilen türbülans kinetik enerjisi desenlerine benzer olduğu görülmektedir.  $\rho u' u'$ ,  $\rho v' v'$  ve  $\rho u' v'$  gerilmelerine ait maksimum değer ve bu değer oluştuğu bölgenin, debinin artmasıyla arttığı belirlenmiştir. Bunun yanında  $\rho u' u'$  ve  $\rho v' v'$  değerlerinin negatif olmadığı ve  $\rho u' v'$  değerlerinin ise kapağın hemen mansabında negatif olduğu şekillerden anlaşılmaktadır. Batık hidrolik sıçramanın gerçekleştiği kapak mansap bölgesinde oldukça büyük türbülans gerilmeleri oluşmaktadır. Bu bölgede,  $\rho u' u'$  için maksimum değer  $0.05 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 'ten büyük,  $\rho v' v'$  için maksimum değer  $0.025 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 'ten ve  $\rho u' v'$  için ise maksimum değer  $0.03 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 'ten büyük

olduğu belirlenmiştir. Buradan batmış hidrolik sıçrama bölgesinde akımın hareketinde etkin olan x doğrultusundaki değişimin diğer hız bileşenlerinde meydana gelen değişimden daha büyük olduğu söylenebilir.



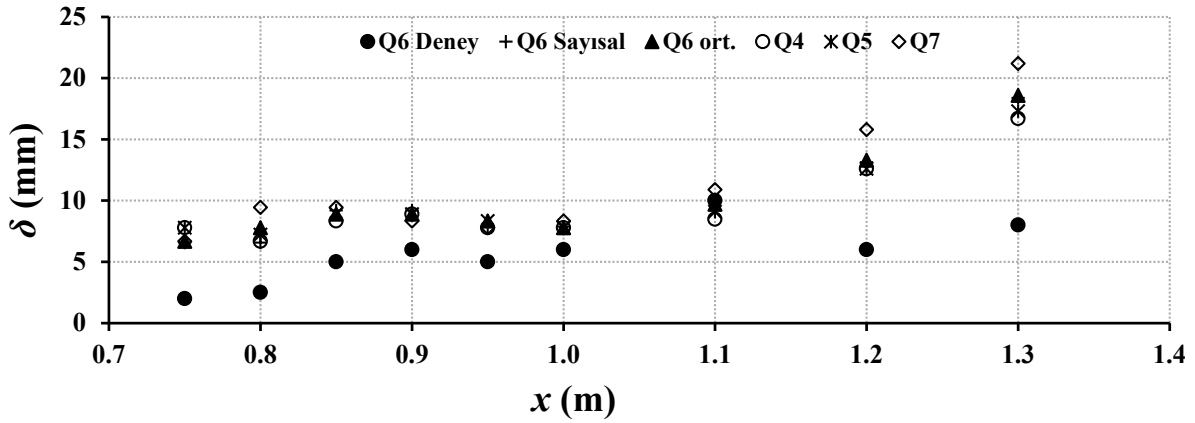
Şekil 8. Farklı akım durumlarında elde edilen türbülans kinetik enerji desenleri



Şekil 9. Farklı akım durumlarında elde edilen a)  $\rho u' u'$ , b)  $\rho v' v'$  ve c)  $\rho u' v'$  gerilmelerinin desenleri

Farklı akım durumlarında batık hidrolik sıçrama bölgesinde deneysel ve sayısal olarak elde edilen sınır tabakası kalınlıklarının değişimi Şekil 10'da verilmiştir. Farklı akım durumlarında elde edilen sınır tabakası kalınlıkları debinin artmasıyla artmıştır. Q7 durumunda en büyük sınır tabakası kalınlığı elde edilmiş ise de Q4, Q5 ve Q6 durumlarında sınır tabakası kalınlıklarının oldukça yakın

olduğu belirlenmiştir. Batmış hidrolik sıçramanın olduğu bölgede ( $x=0.7-1.0$  m) sınır tabakasının kalınlığında sayısal modellemelerde elde edilen sonuçlarda büyük bir artış meydana gelmez iken, Q6 durumunda elde edilen deneysel sınır tabakası kalınlığında sayısal model sonuçlarına kıyasla daha büyük bir değişim meydana gelmektedir. Sınır tabakası kalınlığının  $x=1.1$  m kesitinden itibaren 10 mm'den daha büyük olduğu ve batmış hidrolik sıçramanın sona erdiği kesitlerde 20 mm'ye kadar ulaştığı anlaşılmaktadır. Deneysel olarak elde edilen sınır tabakası kalınlıklarının sayısal model sonuçlarından elde edilen sınır tabakası kalınlıklarından daha küçük olduğu, bu farklılığın nedeninin sayısal modellemelerde kullanılan hesaplama ağının tasarımından ve hız profillerinin deneysel olarak elde edilmesinde kullanılan ölçüm sisteminin hassasiyetinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir.



Şekil 10. Farklı akım durumlarda elde edilen sınır tabakası kalınlıkları

## 5. Sonuçlar

Kayar kapak mansabında farklı batıklık oranlarında oluşan batmış hidrolik sıçramanın sayısal modellemesinde sonlu hacimler yöntemine dayalı çözüm yapan ANSYS Fluent paket programı kullanılmıştır. Akışkanın hareketini idare eden süreklilik ve momentum denklemlerinin çözümünde Reynolds Gerilmesi Modeli'nden (Reynolds Stress Model-RSM), su hava arakesitinin belirlenmesinde ise Akışkan Hacimleri Yöntemi'nden (Volume of Fluids Method) yararlanılmıştır. Q6 durumunda deneysel olarak elde edilen hız profilleriyle, RSM kullanılarak elde edilen hız profillerinin, hidrolik sıçrama sonrası derinlik ve sıçrama uzunluklarının oldukça uyumlu olduğu belirlenmiştir. Farklı akım durumlarında sayısal modelleme sonucunda elde edilen bulgulardan, tüm akım durumlarında, kapak mansap bölgesinde negatif hızların olduğu, kayar kapağın memba bölgesinde düşey hız bileşeninin negatif olduğu ve bu bölgenin büyüklüğü debinin artmasına paralel olarak arttığı, türbülans kinetik enerjisinin maksimum değerine batık hidrolik sıçramanın olduğu bölgede olduğu belirlenmiştir. Reynolds gerilmelerine ait maksimum değer turbülans kinetik enerjisinin belirlendiği bölgede olduğu ve bu değer olduğu bölgenin büyüklüğünün debinin artmasıyla arttığı görülmüştür. Farklı batıklık oranlarında deneysel olarak elde edilmesi için özel ölçüm aletleri ve ekipmanları gerektiren akım karakteristiklerinin, sayısal modelleme sonucunda istenilen herhangi bir durumda tekrar edilmesi ve kolayca elde edilmesinden dolayı, sayısal modelleme tekniklerinin tercih edilebileceği belirlenmiştir.

## Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları tarafından yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması olmadığı beyan edilmiştir.

**Kaynaklar**

- [1] De Padova D. Mossa M. Sibilla S. SPH numerical investigation of characteristics of hydraulic jumps. *Environmental Fluid Mechanics* 2018; 18(4): 849-870. Doi.10.1007/s10652-017-9566-4.
- [2] Singh D. Das AK. Computational simulation of radially asymmetric hydraulic jumps and jump–jump interactions. *Computers & Fluids* 2018; 170: 1-12. Doi.10.1016/j.compfluid.2018.04.024.
- [3] Roushangar K. Homayounfar F. Prediction characteristics of free and submerged hydraulic jumps on horizontal and sloping beds using SVM method. *KSCE Journal of Civil Engineering* 2019; 23(11): 4696-4709. Doi.10.1007/s12205-019-1070-6.
- [4] Pourabdollah N. Heidarpour M. Abedi Koupai J. Characteristics of free and submerged hydraulic jumps in different stilling basins. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management* 2020; 173(3): 121-131. Doi.10.1680/jwama.19.00029.
- [5] Roy Biswas T. Dey S. Sen D. Undular hydraulic jumps: critical analysis of 2D RANS-VOF simulations. *Journal of Hydraulic Engineering* 2021; 147(11): 06021017. Doi.10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001939.
- [6] Park M. Kim HS. Choi S. Ryu YU. PIV and BIV Measurements of Roller in Hydraulic Jumps. *Journal of Coastal Research* 2021; 114: 56-60. Doi.10.2112/JCR-SI114-012.1.
- [7] Ma F, Hou Y, Prinos P. Numerical calculation of submerged hydraulic jumps. *J. Hydraul. Res.* 2001; 39: 493-503. Doi.10.1080/00221686.2001.9628274.
- [8] Javan M, Eghbalzadeh A. 2D numerical simulation of submerged hydraulic jumps. *Applied Mathematical Modelling* 2013; 37(10–11):6661-6669. Doi.10.1016/j.apm.2012.12.016.
- [9] Ahmed HMA, El Gendy M, Mirdan AMH, Ali AAM. Haleem FSFA. Effect of corrugated beds on characteristics of submerged hydraulic jump. *Ain Shams Engineering Journal* 2014; 5(4): 1033-1042. Doi.10.1016/j.asej.2014.06.006.
- [10] Smetana J. Experimental Studies on the Free and Submerged Hydraulic Jumps. *L'Energia Elettrica* 1937; 24 (10): 829–835.
- [11] Citrini D. Il Salto di Bidone. *L'Energia Elettrica* 1939; 16 (6): 441–465.
- [12] Silvester R. Hydraulic jump in all shapes of horizontal channels. *J. Hyd. Div. ASCE* 1964; 90(1):23–55. Doi.10.1061/JYCEAJ.0000977.
- [13] Rajaratnam N. Hydraulic jump on rough bed. *Trans Eng Inst Canada* 1968; 11: 1–8.
- [14] Hager WH, Bremen R. Classical hydraulic jump; sequent depths. *J Hydr. Res.* 1989;27(5):565–85. Doi.10.1080/00221688909499111.
- [15] Izadjoo F, Shafai-Bajestan M. Effects of trapezoidal shape corrugated bed on the characteristics of hydraulic jump. In *17th Canadian hydrotechnical conference, Alberta, Canada, August 17–19, 2005.*
- [16] Denli Tokyay N. Effect of channel bed corrugated on hydraulic jumps. In: *Proceedings of the world water and environmental resources congress: impacts of global climate change, EWRI, 2005.* 1-9. Doi.10.1061/40792(173)408.
- [17] Abdelhaleem Fahmy S, Amin AM, Helal YE. Effect of corrugated bed shapes on hydraulic jump and downstream local scour. *The Journal of American Science* 2012; 8(5):1–10.
- [18] Shekari Y. Javan M. Eghbalzadeh A. Effect of turbulence models on the submerged hydraulic jump simulation. *J. Appl. Mech. Tech. Phy.* 2015; 56:454–463. Doi.10.1134/S0021894415030153.
- [19] Gümüş V. Aköz MS. Kirkgöz MS. Kapak mansabında batmış hidrolik sıçramanın deneysel ve sayısal modellenmesi. *Teknik Dergi* 2013; 24: 6379-6397.
- [20] Gumus V. Simsek O. Soydan NG. Akoz MS. Kirkgoz MS. Numerical modeling of submerged hydraulic jump from a sluice gate. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 2016; 142(1): 04015037. Doi.10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000948.
- [21] Rajaratnam N. Hydraulic jumps. *Advances in Hydroscience* 1967; 4: 197-279. Doi.10.1016/B978-1-4831-9935-1.50011-2.
- [22] Wilcox DC. *Turbulence modeling for CFD.* 1993. DCW Indus., California A.B.D. 456p.

- [23] Yakhot V. Orszag SA. Thangam S. Gatski TB. Speziale CG. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *Physics of Fluids* 1992; 7: 1510-1520. Doi.10.1063/1.858424.
- [24] Shih TW. Liou WW. Shabbir A. Yang Z. Zhu J. A new k- $\epsilon$  eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows-model development and validation. *Computers and Fluids* 1995; 24(3): 227-238. Doi.10.1016/0045-7930(94)00032-T.
- [25] Launder BE. Reece GJ. Rodi W. Progress in the Development of a Reynolds-stress turbulent closure. *Journal of Fluid Mechanics* 1975; 68(3): 537-566. Doi.10.1017/S0022112075001814.
- [26] Hirt CW. Nichols BD. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics* 1981; 39: 201-225. Doi.10.1016/0021-9991(81)90145-5.
- [27] Roache PJ. Verification of codes and calculations. *AIAA Journal* 1998; 36(5): 696-702. Doi.10.2514/2.457.
- [28] Çelik İB. Ghia U. Roache PJ. Freitas CJ. Coleman H. Raad PE. Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. *ASME Journal of Fluids Engineering* 2008; 130(1): 1-4. Doi.10.1115/1.2960953.