



Farklı Akım Koşullarına Sahip Açık Kanal Akımının Sayısal Modellemesi

Oğuz ŞİMŞEK^{1*}

¹ Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Bölümü, Şanlıurfa, Türkiye
 Oğuz ŞİMŞEK ORCID No: 0000-0001-6324-0229

*Sorumlu yazar: oguzsimsek@harran.edu.tr

(Alınış: 22.04.2020, Kabul: 31.05.2020, Online Yayınlanma: 18.06.2020)

Anahtar Kelimeler
 Akışkan hacimleri yöntemi, Sayısal modelleme, Su yüzü profili, Vena kontratta

Öz: Açık kanallar, ihtiyaç duyulan suyun kaynaktan istenilen yere iletilmek için kullanılan hidrolik yapılardır. Suyun aktarılması sırasında meydana gelen kayıpların giderilmesi ve suyun hareketinin doğru analiz edilmesi, açık kanalların verimliliğini arttıracaktır. Bu çalışmada, farklı kapak açıklığı, taban eğimi ve akım durumlarında meydana gelen açık kanal akımının su yüzü profilleri sayısal olarak modellenmiştir. Sayısal modellemede, süreklilik ve momentum eşitlikleri, sonlu hacimler yöntemiyle ANSYS-Fluent programı yardımıyla çözülmüştür. Türbülans viskozitesinin sayısal modellemesinde Reynolds Ortalamalı Navier Stokes (RANS) tabanlı Re-normalization Group k-ε (RNG) türbülans modeli, su hava ara kesitinin belirlenmesinde ise akışkan hacimleri yöntemi kullanılmıştır. Sayısal su yüzü profilleri, literatürde bulunan deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda, sayısal olarak elde edilen su yüzü profillerinin, deneysel profillerle oldukça uyumlu olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, sayısal olarak elde edilen akım çizgileri ve türbülans kinetik enerji dağılımları değerlendirilmiştir. Farklı akım durumunda oluşan vena kontratta noktasının özellikleri belirlenmiştir. Sayısal modellemenin farklı akım özelliklerine sahip açık kanal akımlarının su yüzü profillerini belirlemede başarılı olduğu görülmüştür.

91

Numerical Modelling of Open Channel Flow with Different Flow Conditions

Keywords
 Volume of fluid method, Numerical modelling, Water surface profile, Vena contracta

Abstract: Open channels are hydraulic structures used to transmit the required water from the source to the desired location. Elimination of the losses that occur during the transfer of water and the correct analysis of the movement of the water will increase the efficiency of the open channels. In this study, the water surface profiles of the open channel flow occurring in different gate openings, bottom slopes and flow conditions are numerically modelled. In numerical modelling, continuity and momentum equations are solved by the finite volume method with the help of ANSYS-Fluent program. In the numerical modelling of turbulence viscosity, Re-normalization group k-ε (RNG) turbulence model based on Reynolds Average Navier Stokes (RANS) is used, and fluid volume method is used to determine the water-air intersection. Numerical water surface profiles are compared with the experimental results found in the literature. As a result of comparison, it has been determined that the water surface profiles obtained numerically are quite compatible with the experimental profiles. In addition, the streamlines and turbulent kinetic energy distributions obtained numerically are evaluated. The properties of the vena contract point were determined to different flow cases. Numerical modelling has been found to be successful in determining the water surface profiles of open channel flows with different flow characteristics.

1. GİRİŞ

Hidrolik yapıların mühendislik tasarımlarında, yapıya etkiyen kuvvet, akım alanı, su yüzü profili gibi birçok parametre dikkate alınmaktadır. Bu parametreler yapının kullanım amacına, yapısal özelliklerine ve yapının önem derecelerine göre değişkenlik gösterebilmektedir. Hidrolik yapının yüksekliğini belirlemede dikkate alınan

en önemli parametre, hidrolik yapı ile etkileşimde bulunan akımın serbest su yüzü profilidir. Taşkın yatağına sahip bir açık kanalda taşkın anında meydana gelen taşkın dalgasının yüksekliğinin, taşkın yatağının boyutunun belirlenmesinde rolü tartışılmazdır. Farklı ampirik formüller veya yaklaşımlarla akımın su yüzü profilini belirlemek mümkün ise de taşkın dalgası gibi zamana ve yere bağlı değişkenlik gösteren ve farklı akım koşullarının farklı kesitlerde olduğu karmaşık akım

probleminin su yüzü profilinin belirlenmesi oldukça zor olmaktadır. Geçmişte farklı akım problemlerinin su yüzü profillerinin belirlenmesine yönelik farklı durumların ele alındığı deneysel çalışmalar bulunmaktadır. Baines [1], Baines ve Whitehead [2] tarafından lineer olmayan sıg akım denklemleri ve hidrolik sıçramayı dikkate alan viskoz olmayan teori kullanılarak su yüzü profili hesaplanmıştır. Defina ve Susin [3] ve Defina et al. [4] tarafından yapılan iki ayrı çalışmada ise hidrolik teoride taban sürtünmesinin dikkate alındığı yeni bir yöntem ile su yüzü profili elde edilmiştir. Park et al. [5], yüksek Froude sayısına sahip açık kanal akımının su yüzü profilini farklı kapak açıklığı, kanal eğimi ve debi durumları için deneysel olarak ölçmüşlerdir. Deneysel olarak elde edilen su yüzü profillerini, Baines ve Whitehead [2] ve Defina et al. [4] tarafından önerilen iki farklı teorik yöntemle elde edilen sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda, başlangıçta kritik üstü akım koşullarında bulunan taşkın hareketinin hidrolik açıdan deneysel olarak modellenmesinin başarılı bir şekilde gerçekleştirilebildiği belirtilmiştir. İşcen ve ark. [6], farklı yapılar ile etkileşimde bulunan açık kanal akımlarının su yüzü ve hız profillerini deneysel ve sayısal olarak irdelemişlerdir. Sayısal modellemede akımın özelliklerini belirlemek için sıg akım denklemlerinin çözümünü yaparak elde edilen sonuçları deneysel bulgularla kıyaslamışlardır. Sonuçta, sıg akım denklemlerinin çok karmaşık olmayan üç boyutlu akımların su yüzünü belirlemede başarılı olduğunu ifade edilmiştir.

Fiziksel model çalışmalarının yanında, son yıllarda mühendislik problemlerinin çözümünde bilgisayar kullanımının yaygınlaşmasından dolayı, farklı çözüm programları geliştirilmiş ve kapsamlı analizlerin yapılması bilgisayar yazılımları ile mümkün hale gelmiştir. Bu tür yazılımlar, diğer mühendislik alanlarında olduğu gibi hidrolik mühendisliği alanında da oldukça sık kullanılmaktadır [7,8]. Soydan ve ark. [9], trapez savak üzerinden geçen akımın su yüzü profilini deneysel ve sayısal olarak elde etmişlerdir. Su yüzü profilinin sayısal modellemede akışkan hacimleri yöntemini, akımı idare eden temel denklemlerin çözümünü sonlu hacimler yöntemiyle ANSYS Fluent programı kullanarak k-ε tabanlı türbülans modelleriyle gerçekleştirmişlerdir. Sayısal olarak elde edilen su yüzü profillerinin deneysel profillerle karşılaştırılması sonucunda, Standart k-ε türbülans modelinin kullanılan diğer modellere göre su yüzü profilini belirlemede daha başarılı olduğu belirtilmiştir. Gümüş ve ark. [10], kayar kapak mansabında oluşan batmış hidrolik sıçramayı deneysel ve sayısal modellemişlerdir. Sayısal modellemelerde akımın hareketini idare eden temel denklemleri sonlu hacimler yöntemine dayalı çözüm yapan ANSYS Fluent programı yardımıyla, Standart k-ε (SKE), Relizable k-ε (RKE) ve Re-normalization Group k-ε (RNG) türbülans modellerini kullanarak çözmüşlerdir. Su yüzünün sayısal olarak belirlenmesinde akışkan hacimleri yönteminden yararlanılmıştır. RNG modelinin batık hidrolik sıçramanın geometrisini tahmin etmede diğer modellere kıyasla daha başarılı olduğu bildirilmiştir.

Bu çalışmada, Park et al. [5] tarafından deneysel olarak analiz edilen 37 farklı akım durumu, sayısal olarak modellenmiştir. Sayısal modellemede açık kanal akımı idare eden temel denklemlerin çözümünde sonlu hacimler yöntemi, su hava ara yüzünün belirlenmesinde ise akışkan hacimleri yöntemi kullanılmıştır. Deneysel su yüzü profilleriyle, sayısal olarak elde edilen su yüzü profilleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca, farklı akım durumlarında elde edilen türbülans kinetik enerji, akım çizgileri ve vena kontratta noktasının yeri değerlendirilmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

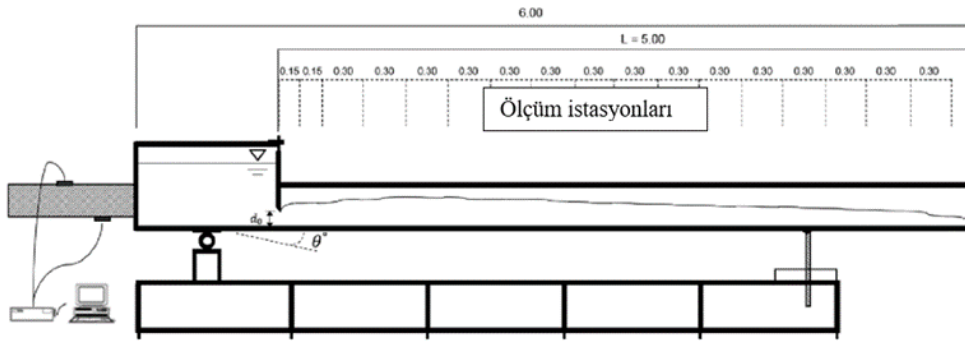
Deneyler, Park et al. [5] tarafından Güney Kore'de bulunan İnje Üniversitesi, Çevre Bilimi ve Mühendisliği, Çevresel Su Kaynakları Laboratuvarında bulunan açık kanal modelinde yapılmıştır (Şekil 1). Açık kanalın uzunluğu, genişliği ve yüksekliği sırasıyla 6,0 m, 0,30 m ve 0,30 m'dir. Açık kanala $\pm 5^\circ$ eğim verilerek farklı özelliklere sahip akım profillerinin oluşması sağlanmaktadır. Park et al. [5], 37 farklı durumda, 18 farklı noktada akım derinliğini ölçerek su yüzü profilini elde etmişlerdir. Deneylerde akım debisi Ulsoflow 309P marka akım ölçer kullanılarak ölçülmüştür. Deneysel çalışmada, kayar kapak açıklığı $d_0=3, 5, 7, 8,5$ ve 10 cm olarak belirlenmiş ve kanal eğimi (θ) $-1^\circ, -2^\circ, 0^\circ, 1^\circ, 2^\circ$ olacak şekilde değiştirilerek farklı akım profillerinin oluşması sağlanmıştır. Birim genişlik debisi (q) $0,052$ m^2/s , $0,083$ m^2/s , $0,094$ m^2/s , $0,095$ m^2/s ve $0,136$ m^2/s olacak şekilde deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Çok farklı değişkenin dikkate alındığı deneysel çalışmada, deney koşullarının adlandırılmasında kapak açıklığı, akım birim genişlik debisi ve taban eğim sıralaması yapılmıştır. Örneğin; d030q052u1 olarak adlandırılan durumda, kapak açıklığı $0,30$ m, akım birim genişlik debisi $0,052$ m^2/s ve kanal taban eğimi ise $+1^\circ$, ele alınan diğer bir deney durumunda ise d085q136d2 kapak açıklığı $0,85$ m, akım birim genişlik debisi $0,136$ m^2/s ve kanal taban eğimi ise -2° 'dir. Kanal tabanı eğiminin sıfır olması durumunda ise deney durumunun adlandırılmasında son simge h olarak kullanılmıştır. Ele alınan 37 farklı durumdan, 16'sında kritik altı, 20'sinde kritik üstü ve sadece 1 tanesinde ise sıçrama oluştuğu belirlenmiştir. Sayısal modelleme sonuçlarının değerlendirilmesinde de akım durumları bu şekilde adlandırılmıştır.

3. SAYISAL MODELLEME

3.1. Temel Denklemler ve Türbülans Modeli

Kayar kapak altından geçen açık kanal akımı, iki boyutlu, sıkışmayan, türbülanslı bir akım türüdür. Bu tür açık kanal akımının hareketini idare eden temel eşitlikler, süreklilik ve momentum denklemleridir. Bu denklemler sırasıyla Eşitlik 1 ve 2'de verilmiştir:

$$\frac{(\partial u_i)}{(\partial x_i)} = 0 \quad (1)$$



Şekil 1. Deney düzeneğinin şematik gösterimi [5]

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = \rho g_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \quad (2)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij}) = 0$$

Bu eşitliklerde ifade edilen, u_i ortalama hız bileşenlerini, p ortalama basıncı, μ akışkanın dinamik viskozitesini, ρ akışkanın yoğunluğunu, ρg_i yerçekiminin sebep olduğu kütlelesel kuvveti, t zamanı, τ_{ij} ise türbülans (Reynolds) gerilmelerini ifade etmektedir. Reynolds gerilmeleri Boussinesq yaklaşımına göre Eşitlik 3'teki gibi ifade edilir:

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k \quad (3)$$

Burada, u'_i ve u'_j türbülans hız sapınçları ve μ_t türbülans viskozitesi olup δ_{ij} Kronecker deltasıdır ($i=j$ için $\delta_{ij}=1$).

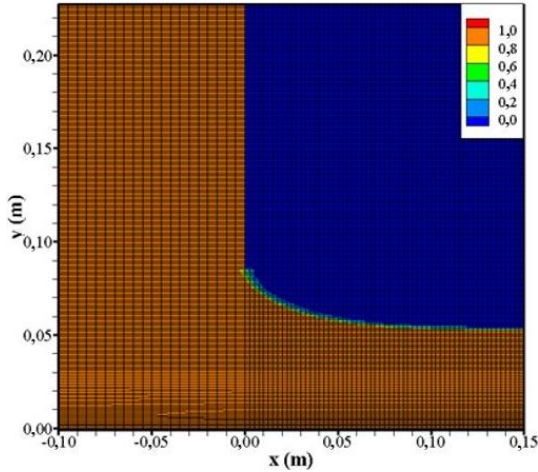
Reynolds Ortalamalı Navier Stokes (RANS) eşitliklerinde üç boyutlu akışta bir basınç, üç hız, altı türbülans kayma gerilmesi bileşeni ile toplam 10 bilinmeyen bulunur. İki boyutlu bir akışta ise bilinmeyen sayısı 6 olmaktadır. İki boyutlu akışta 6 bilinmeyene karşılık, iki x ve y doğrultusundaki RANS eşitliği ve bir süreklilik eşitliği olmak üzere sadece üç eşitlik bulunduğu bilinmeyenlerin çözümü mümkün olmamaktadır. Bu bilinmeyenlerin çözülebilmesi için Eşitlik 3 içinde bulunan türbülans viskozitesinin, μ_t , çözülmesiyle eşitlik sisteminin çözümü mümkün olmaktadır. Türbülans viskozitesinin sayısal olarak çözümünün yapılabilmesi için türbülans kapatma modelleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada, μ_t türbülans viskozitesinin modellenmesi için Yakhot et al. [11] tarafından geliştirilen, RNG k- ϵ türbülans kapatma modeli kullanılmıştır. RNG türbülans kapatma modeli türbülans kinetik enerji (k) ve onun kayıp oranı olan ϵ 'un çözümünü yaparak eşitlik sistemini kapatmaktadır. RNG türbülans kapatma modeli çözdüğü eşitlikler içerisinde şekil değiştirme tensorü ifadesinin ilave edilmesiyle, yüksek kayma oranlarına sahip, ikincil akımların, ayrılma bölgelerinin ve akım çizgisi eğriselliğinin olduğu akımların modellenmesinde başarılı olduğu ifade edilmiştir. Kritik altı, kritik ve kritik üstü akım koşullarını bir arada bulunduran eğrisel geniş başlıklı savak ile etkileşimde bulunan açık kanal akımının sayısal modellenmesinde de kullanılan diğer modellere kıyasla RNG türbülans modeli akımı modellemede daha başarılı olmuştur [12]. Ayrıca, Gümüş ve Şimşek [13],

eğimli açık kanal akımını deneysel ve sayısal olarak modellemişlerdir. Deneysel ve sayısal model sonuçlarının karşılaştırılmasından RNG türbülans modelinin akım alanını ve su yüzü profilini belirlemede başarılı olduğu belirlenmiştir. Farklı bir çalışmada kayar kapak mansabında oluşan batık hidrolik sıçramanın deneysel ve sayısal modellenmesi yapılmıştır. Batık hidrolik sıçramanın geometrik özelliklerinin deneysel ve farklı türbülans modelleri kullanılarak karşılaştırıldığı bu çalışmada RNG türbülans modeli başarılı bulunmuştur [10]. Literatürde bulunan mevcut bu çalışmalar dikkate alındığında, kritik altı, kritik üstü ve hidrolik sıçrama gibi farklı özelliklere sahip akımların ele alındığı 37 farklı deney durumunun sayısal modellenmesinde de RNG türbülans modeli kullanılmıştır.

Sayısal modellemelerde, çözüm alanında akım sürekliliğinin sağlandığı kontrolü yapılarak çözüm süresine karar verilmiştir. Sayısal modellemelerde iterasyon adımı büyüklüğü, Courant sayısı, $Cn \leq 2$ olacak şekilde kullanılan program tarafından otomatik olarak belirlenmiştir. Her bir hesaplama adımında iterasyon sayısı 10 olarak kullanılmıştır.

3.2. Akışkan Hacimleri Yöntemi

Akışkan hacimleri yöntemi, su hava arakesitinin şeklinin ve yerinin belirlenmesinde oldukça sık kullanılan ve oldukça başarılı bir yöntemdir [14]. Bu çalışmada, su hava ara kesitinin hesabında akışkan hacimleri yöntemi (Volume of Fluid, VOF) kullanılmıştır. VOF yöntemi hücrelerin tamamen hava ile dolu, kısmen ya da tam su ile dolu olduğunu belirlemede kullanılmaktadır. Bu yöntemde, hacimsel doluluk oranını temsilen bir akışkan hacmi (F) tanımlanmakta, $F=1$ (kırmızı renk) için ağ elemanı tamamen su dolu, $F=0$ (mavi renk) için ağ elemanı hava ile dolu ve $0 < F < 1$ ise ağ elemanı kısmen su ile dolu (kırmızı ve mavi dışında olan renkler) olmaktadır (Şekil 2). Şekil 2'de, kayar kapak altından geçen açık kanal akımının akışkan hacimleri yöntemiyle elde edilmiş ağ elemanı doluluk oranları verilmiştir. Akışkan hacimleri yöntemi ile serbest su yüzünün hesaplanmasında "Geo-Reconstruct" yaklaşımı kullanılmıştır [15].



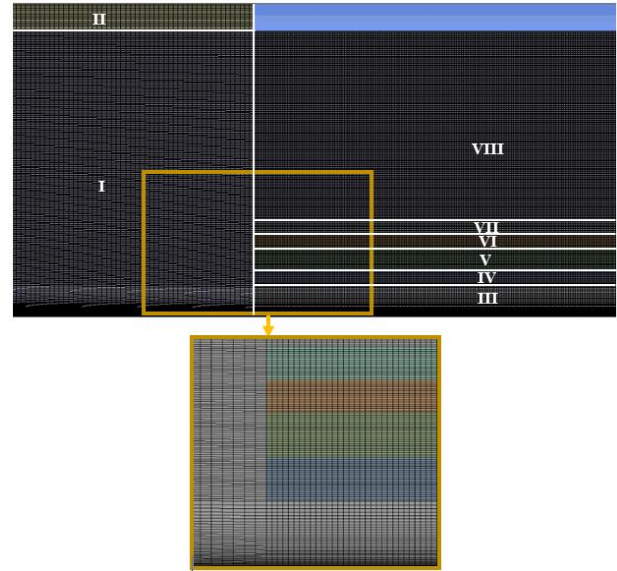
Şekil 2. Ağ elemanı hacimsel doluluk oranı gösterimi

3.3. Sayısal Hesaplama Ağı

Hesaplama ağı tasarımının, sayısal model sonuçları üzerinde etkisinin olduğu nümerik modelleme yapanlar tarafından bilinmektedir. Sayısal model sonuçlarının, hesaplama ağından bağımsızlaşıp bağımsızlaşmadığını belirlemek üzere ağ yakınsama indeksi yöntemi birçok araştırmacı tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır [16,17,18,19,20]. Bu yöntem, en az 3 farklı yoğunluğa sahip hesaplama ağı tasarımı yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu çalışmada da 3 farklı yoğunluğa sahip hesaplama ağı tasarımı yapılmış ve elde edilen ağ yakınsama indeksi değerlerine göre elde edilen sayısal model sonuçları üzerinde hesaplama ağının etkisinin bulunmadığı belirlenmiştir. Sayısal modellemede kullanılan hesaplama ağı Şekil 3'te verilmiştir. Çalışma alanı 8 alt bölgeye ayrılmıştır. 37 farklı durumun değerlendirildiği sayısal modellemede tek bir hesaplama ağı kullanılması için, her kapak açıklığında farklı bir alt bölge tanımlanmıştır. Katı sınıra yakın bölgede sıklaştırma yapılarak viskoz alt tabakanın ve sınır tabakasının gelişiminin daha hassas bir şekilde belirlenmesi amaçlanmıştır. Sayısal modellemede kullanılan hesaplama ağında minimum ortogonal oranı 0,998, maksimum çarpıklık 0,001691 ve maksimum en boy oranı (aspect ratio) ise 3,75 olarak hesap edilmiştir. Bu değerler dikkate alındığında, hesaplama ağı tasarımının oldukça hassas olduğu ve kaliteli hesaplama ağı olarak nitelendirileceği söylenebilir [15]. Hesaplama ağında alt bölgelerde bulunan eleman sayıları Tablo 1'de verilmiştir. Çözüm bölgesi içerisinde toplam 722.000 eleman bulunmaktadır. Özellikle, deneysel bulguların elde edildiği bölgede daha küçük ağ elemanı tasarımı yapılmıştır. Böylelikle deneysel verilerle karşılaştırılacak sonuçların daha hassas olması sağlanmıştır.

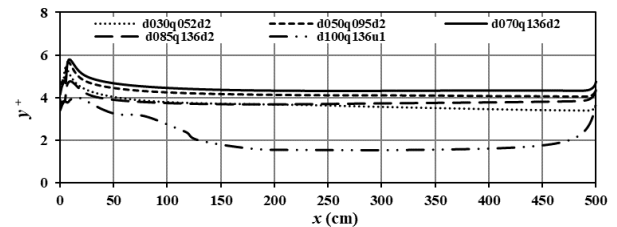
Tablo 1. Alt bölgelerde bulunan ağ eleman sayıları

Alt Bölge	Eleman sayısı	Alt Bölge	Eleman sayısı
I	200x310	V	2000x20
II	200x200	VI	2000x15
III	2000x40	VII	2000x15
IV	2000x20	VIII	2000x200



Şekil 3. Hesaplama ağı

Farklı kapak açıklıklarında akım hızlarının en büyük olduğu debi ve kanal eğimi durumunda elde edilen $y^+ (=u_*y/v)$ değerinin kanal boyunca değişimi Şekil 4'te verilmiştir. Burada, $u_* (=(\tau_o/\rho)^{1/2})$ kayma hızı, y kanal tabanına en yakın ağ elemanının yüksekliği ve ν kinematik viskozitedir. Kapak açıklığının 7 cm, akım birim genişlik debisinin $0,136 \text{ m}^2/\text{s}$ ve kanal eğiminin d2 olduğu durumda en büyük y^+ değerinin 6 civarında elde edildiği görülmektedir. Aynı kanal eğimi ve debi durumunda, kapak açıklığının azalmasıyla y^+ değeri azalmaktadır. En küçük y^+ değerinin, ters eğime ve en büyük kapak açıklığına sahip d100q136u1 durumunda olduğu söylenebilir. Ele alınan tüm durumlarda, y^+ değerinin 10 değerinden küçük olması, sayısal modellemelerde kullanılan hesaplama ağının kanal tabanına yakın ilk elemanın viskoz alt tabaka içerisinde yer aldığını göstermektedir [21]. RNG türbülans modeli kullanılarak gerçekleştirilen sayısal modellemelerde duvar yakının modellenmesinde duvar fonksiyonu olarak Enhanced duvar fonksiyonu kullanılmıştır. Bu model iki katmanlı bir model olup, duvara (kanal tabanına veya yan yüzeylere) yakın hesaplama ağının yüksekliğinin, viskoz alt tabakanın kalınlığından daha az olduğu zaman kullanılması önerilmektedir [15,22].

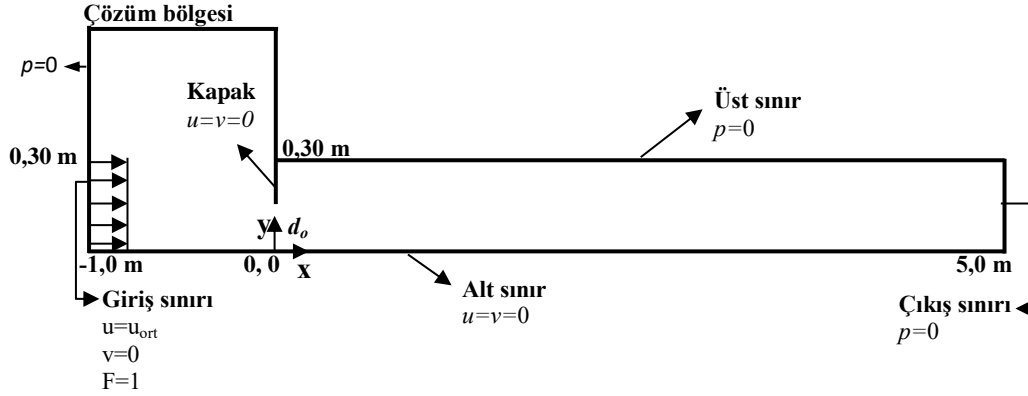
Şekil 4. Farklı kapak açıklıklarında hesaplanan y^+ değerinin kanal boyunca değişimi

3.4 Çözüm Bölgesi, Başlangıç ve Sınır Şartları

Sayısal modellemede kullanılan çözüm bölgesi, sınır ve başlangıç şartları Şekil 5'te verilmiştir. Üst, çıkış sınırları ve giriş sınırının üzerinde kalan kısımda $p=0$ sınır şartı, kanal tabanının temsil eden alt sınırdaki ve kayar kayak $u=v=0$ sınır şartı, giriş sınırında ise deneysel

verilerden elde edilen akım ortalama hız değeri yatay hız bileşeni olarak kullanılmıştır. Ayrıca, giriş sınırında başlangıç sınır şartı olarak akışkan hacimleri yöntemi için, akımın bu sınırdan girdiğini ifade etmek üzere $F=1$ olarak tanımlanmıştır. Bunun yanında giriş sınırında başlangıç sınır şartı olarak hidrolik çap ve türbülans şiddeti değerleri sırasıyla 0,4 ve %1 olarak belirlenmiştir. Başlangıçta, çözüm bölgesinin tamamı boş, yani $F=0$ olarak çözümler gerçekleştirilmiştir. Farklı

kapak açıklığı ve giriş durumu için, kayar kapağın kanal tabanından olan yüksekliği ve akım hızı değiştirilmiştir. Ayrıca sayısal modellemelerde farklı eğimlerde çözüm bölgesinin tamamen döndürülmesi suretiyle sağlanmıştır. Kayar kapağın kanal tabanı ile kesişim noktası, koordinat sisteminin orijini olarak tanımlanmış ve deneysel verilerle aynı koordinat takımı kullanılması sağlanmıştır.



Şekil 5. Sayısal çözüm bölgesi, sınır ve başlangıç şartları

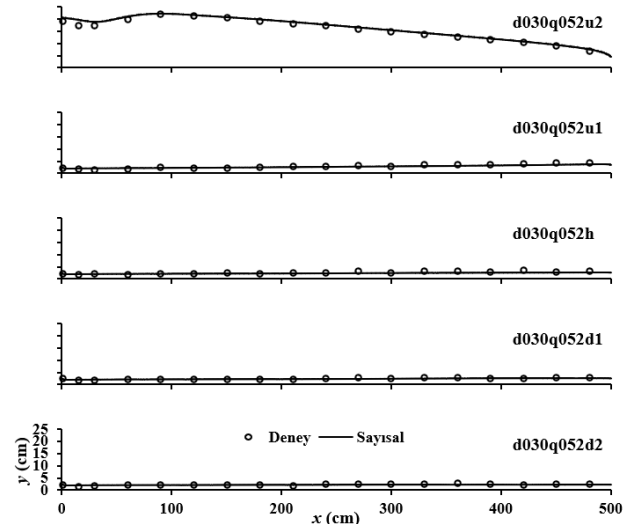
4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

4.1. Su Yüzü Profilleri

Su yüzü profillerinden elde edilen akım derinlikleri, taşkın dalgalarından korunmak üzere inşa edilecek yapıların yüksekliğini belirlemek üzere kullanılan önemli parametredir. Taşkın dalgalarının yatağını terk ederek, çevresinde bulunan yerleşim yerleri ve alanlara zarar vermesinin önlenmesi, can ve mal kaybının meydana gelmesinin önlenmesi açısından oldukça önemlidir. Park et al. [5] tarafından 37 farklı durum için elde edilen deneysel su yüzü profillerinin sayısal modellemesi yapılmıştır. Deneysel ve sayısal olarak elde edilen su yüzü profilleri karşılaştırılmıştır. Şekil 6'da kapak açıklığının 3 cm, akım birim genişlik debisinin $0,052 \text{ m}^2/\text{s}$ ve farklı kanal eğimlerinde Park et al. [5] tarafından deneysel olarak elde edilen su yüzü profillerinin sayısal su yüzü profilleriyle karşılaştırılması verilmiştir. Elde edilen grafikler incelendiğinde, kanal eğiminin $+2^\circ$ (u_2) olduğu durumda kayar kapağın hemen mansabında, $x=0-50$ cm olduğu bölgede su yüzü profilleri arasında az da olsa bir uyumsuzluk söz konusu olmuştur. Kritik üstü akım koşullarının oluştuğu $+1^\circ$ (u_1), 0° (h), -1° (d_1) ve -2° (d_2) kanal eğimlerinde elde edilen su yüzü profillerinin oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Ters kanal eğiminin söz konusu olduğu u_1 eğiminde, kanal membasından mansaba doğru ilerledikçe akım derinliğinin deneysel ve sayısal su yüzü profillerinde arttığı görülmektedir. Kanal eğiminin arttığı durumlarda (h , d_1 ve d_2) kanal membasından mansabına doğru ilerledikçe akım derinliği azalmaktadır.

Kapak açıklığının 5 cm olduğu durumda, farklı kanal eğimi ve akım durumunda elde edilen deneysel ve sayısal su yüzü profillerinin karşılaştırılması Şekil 7'de verilmiştir. Kanal eğiminin u_2 ve u_1 olduğu durumda

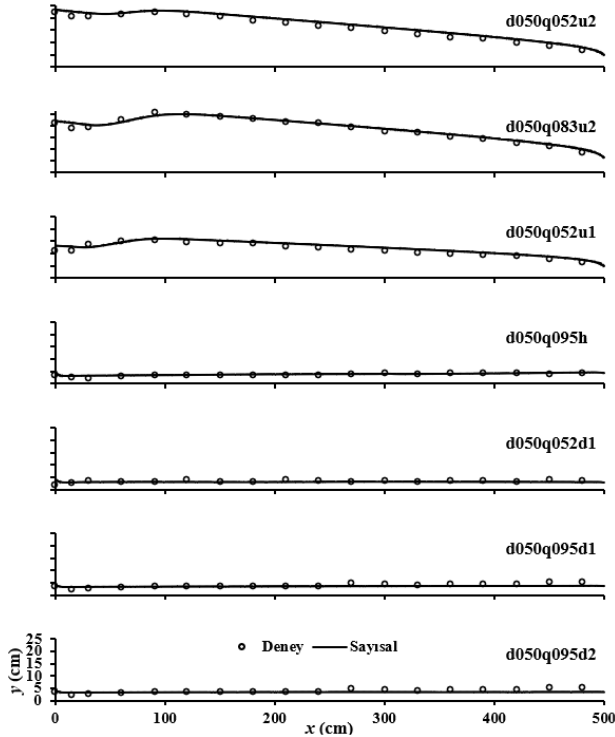
elde edilen su yüzü profillerinden kritik altı akım koşullarının oluştuğu, h , d_1 ve d_2 durumlarında ise tüm akım şartları altında kritik üstü akım koşullarının oluştuğu söylenebilir. Deneysel ve sayısal su yüzü profillerinin karşılaştırılmasından, profillerin birbiriyle oldukça uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Kanal eğiminin u_2 olduğu durumda kapağın hemen mansabında su derinliğinin aynı akım durumunda kanal eğiminin azalmasıyla azaldığı söylenebilir.



Şekil 6. Deneysel ve sayısal su yüzü profillerinin karşılaştırılması ($d_0=3$ cm)

Şekil 8'de kapak açıklığının 7 cm olduğu, farklı kanal eğimi ve akım durumunda meydana gelen deneysel ve sayısal su yüzü profilleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda, profillerin birbiriyle oldukça benzer olduğu görülmektedir. $q=0,094 \text{ m}^2/\text{s}$ ve kanal eğiminin u_1 olduğu durumda elde edilen deneysel ve sayısal profiller arasında sıçrama ön yüzünde çok az farklılık olduğu

söylenbilir. Kanal eğiminin u_2 olduğu bütün akım durumlarında ve u_1 eğiminde $q=0,136 \text{ m}^2/\text{s}$ durumu dışında kritik akım koşulları oluşurken, ele alınan diğer taban eğimi ve akım durumunda (7 farklı durum) kritik üstü akım koşullarının olduğu belirlenmiştir. Aynı debi durumunda ($q=0,136 \text{ m}^2/\text{s}$) kanal eğiminin d_1 'den d_2 'ye geçmesi halinde su derinliğinde azalma bariz bir şekilde görülmektedir.



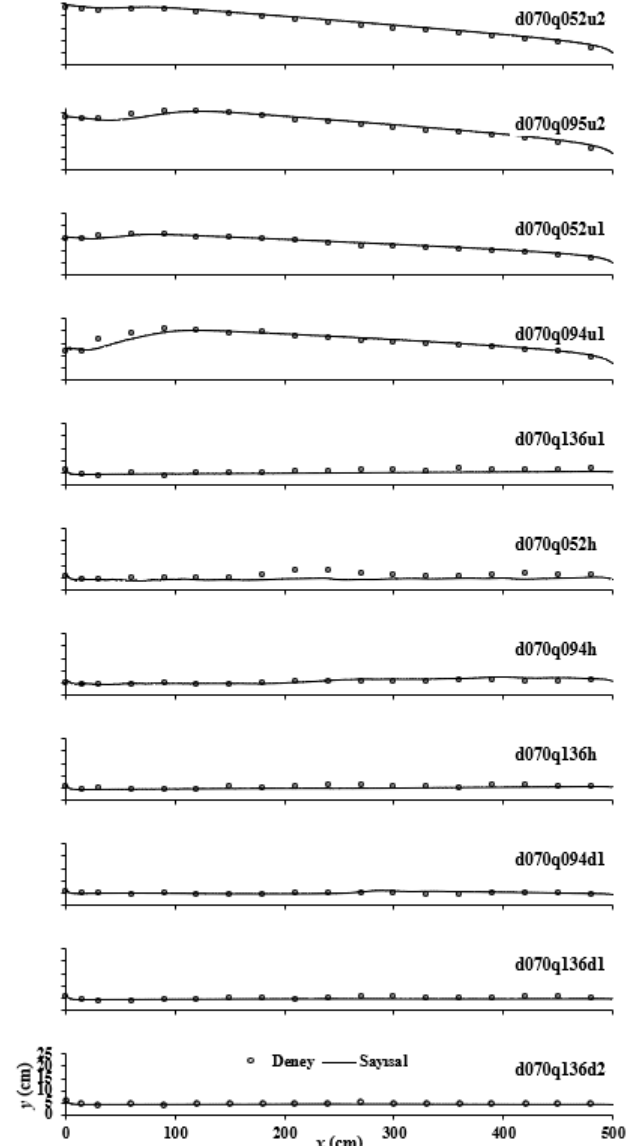
Şekil 7. Deneyel ve sayısal su yüzü profillerinin karşılaştırılması ($d_0=5 \text{ cm}$)

Şekil 9'da, $d_0=8,5 \text{ cm}$ için farklı akım ve kanal eğimi durumunda deneyel ve sayısal olarak elde edilen su yüzü profillerinin karşılaştırılması verilmiştir. Kapak açıklığının 7 cm olduğu duruma benzer olarak $q=0,094 \text{ m}^2/\text{s}$ için kapağın hemen mansabında deneyel ve sayısal su yüzü profilleri arasında çok az farklılığın olduğu görülmektedir. Bunun dışında, ele alınan tüm akım ve eğim durumlarında genel olarak deneyel ve sayısal su yüzü profilleri oldukça uyumlu oldukları söylenebilir. Farklı akım durumlarında deneyel su yüzü profillerinde meydana gelen derinlik artış ve/veya azalış miktarları sayısal modelde başarılı bir şekilde tahmin edilmiştir.

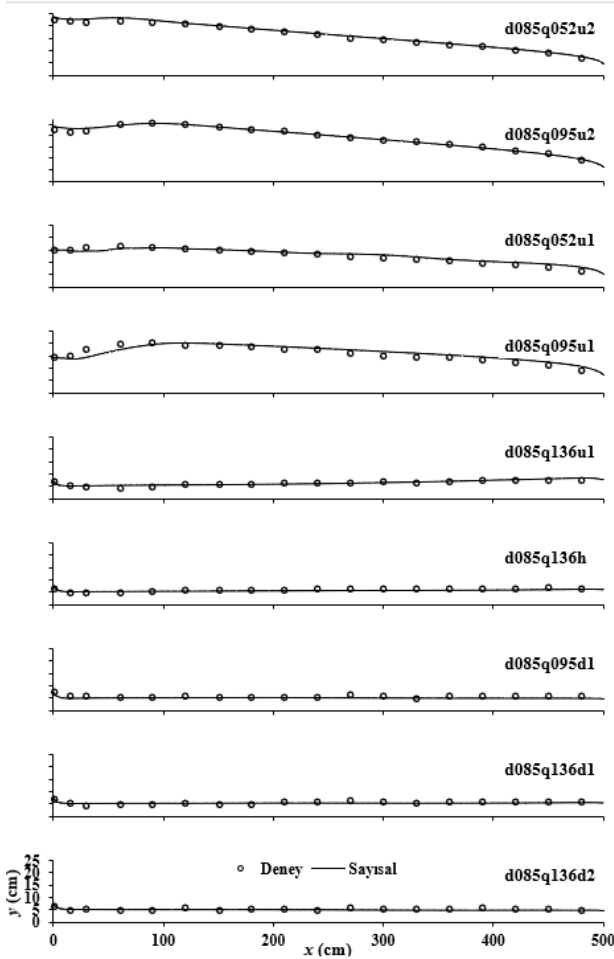
Kapak açıklığının 10 cm olduğu 5 farklı koşulda elde edilen deneyel ve sayısal su yüzü profillerinin karşılaştırılması Şekil 10'da verilmiştir. Deneyel ve sayısal su yüzü profillerinin birbiriyle oldukça uyumlu olduğu verilen şekillerden açıkça görülmektedir. Bu kapak açıklığında ele alınan koşullarda kritik altı akım durumunun olduğu görülmektedir. Kayar kapaktan kanal çıkışına doğru gittikçe deneyel ve sayısal su yüzü profilleri arasındaki uyumun arttığı söylenebilir.

Sonuç olarak, 37 farklı durumda deneyel ve sayısal su yüzü profillerinin karşılaştırılmasından, elde edilen sayısal su yüzü profillerinin deneyel profillerle oldukça uyumlu olduğu belirlenmiştir. Teorisinde belirtildiği

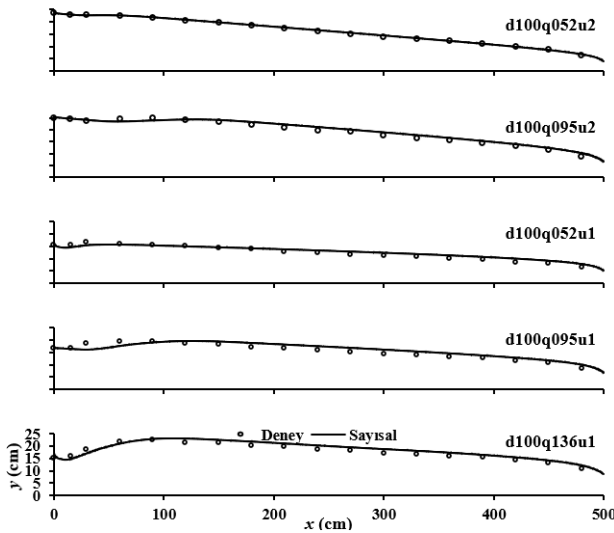
üzere, yüksek hız gradyanlarına sahip, ikincil akımların, akım alanında eğriselliğin ve akımda ayrılmaların söz konusu olduğu akımlarda başarılı olduğu belirtilen RNG türbülans modelinin, hidrolik sıçrama, kritik altı ve üstü gibi farklı akım koşullarının söz konusu olduğu açık kanal akımlarının, su yüzü profilini sayısal olarak belirlemede başarılı olduğu görülmektedir. Ayrıca, Park et al. [5] tarafından 37 farklı açık kanal akımının sınıflandırılmasının, sayısal model sonuçlarıyla uyumlu olduğu belirlenmiştir.



Şekil 8. Deneyel ve sayısal su yüzü profillerinin karşılaştırılması ($d_0=7 \text{ cm}$)



Şekil 9. Deneysel ve sayısal su yüzü profillerinin karşılaştırılması ($d_0=8.5$ cm)



Şekil 10. Deneysel ve sayısal su yüzü profillerinin karşılaştırılması ($d_0=10$ cm)

4.2. Akım Çizgileri Deseni ve Vena Kontratta Özellikleri

Farklı kapak açıklığı, eğim ve debide, kritik altı akımın oluştuğu koşullarda elde edilen akım çizgilerinin desenleri Şekil 11'de verilmiştir. Kritik altı akım koşullarının oluştuğu tüm durumlarda kapak mansabında geri dönüş bölgesinin meydana geldiği görülmektedir. Kapak açıklığının 5 cm olduğu ve akım debisinin aynı

olduğu deney durumunda, kanal eğiminin u_1 'den u_2 'ye değişmesiyle geri dönüş bölgesinin uzunluğu büyümekte ve kalınlığı artmaktadır. Kapak açıklığının 7 cm olduğu durumda ise akım debisinin ve kanal eğiminin ters yönde artmasıyla, geri dönüş bölgesi $d_0=5$ cm duruma benzer bir davranış sergilemektedir. Ayrıca, akım debisinin artmasıyla geri dönüş bölgesinin uzunluğu artmaktadır. $d_0=8,5$ ve 10 cm için, akım debisinin 0,052 olduğu durumda kanal taban eğiminin artmasıyla diğer kapak açıklıklarının aksine geri dönüş bölgesinin uzunluğu azalmaktadır. Akım debisinin artmasıyla her iki kapak açıklığında da geri dönüş bölgesinin uzunluğunun arttığı görülmektedir. Ayrıca, akım çizgilerinin deseninden, kapak altı bölgesinde akım alanında meydana gelen büzülme çok net görülmektedir.

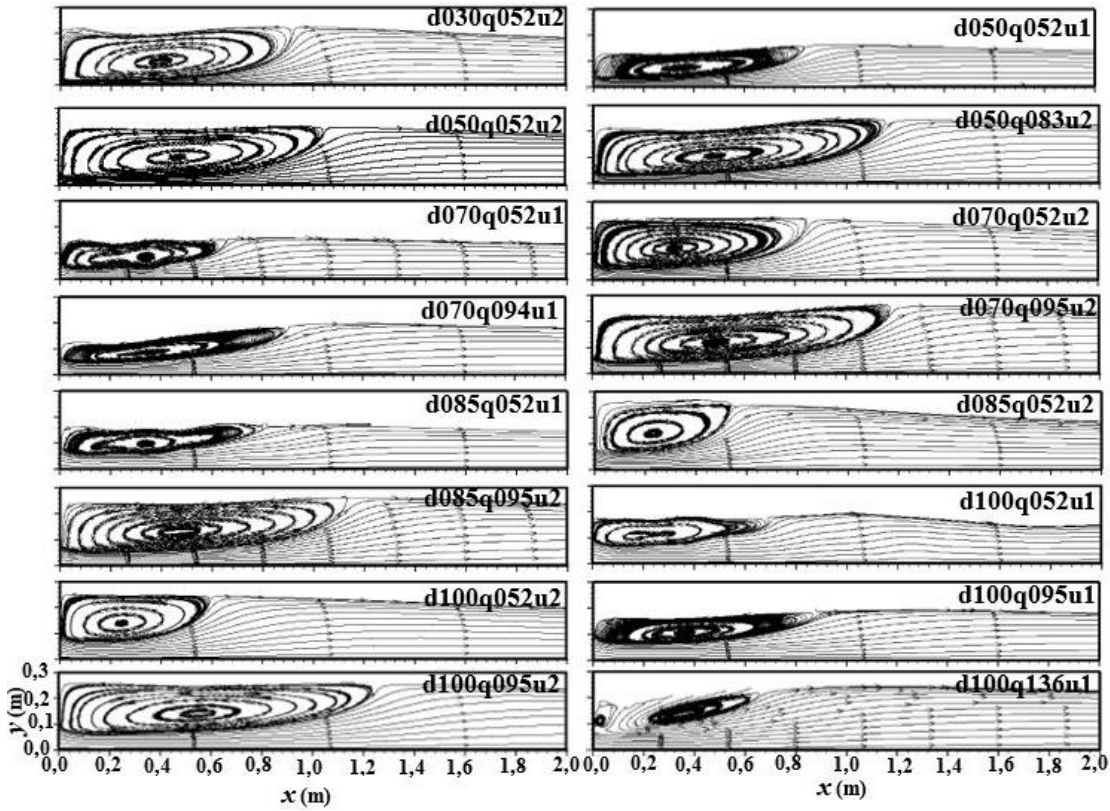
Kayak kapak altından geçen açık kanal akımda, kapak membasında su derinliğinin kapak açıklığından daha büyük olması nedeniyle kapak altına yönelmek zorunda kalmaktadır. Bu durumdan dolayı akım alanında daralma yaşanmaktadır. Kapak memba bölgesinde başlayan akım alanındaki daralma, akım kapak altından geçtikten sonra mansap bölgesinde belirli bir mesafe de devam etmektedir. Akım çizgilerinin birbirine en fazla yaklaştığı, diğer bir ifadeyle akım çapının en az olduğu ve buna bağlı akım hızının en büyük olduğu noktaya vena kontrat denilmektedir. Bu çalışmada, 37 farklı deney durumunda oluşan vena kontratta noktasının x ve y koordinatlarının kapak açıklığı ile boyutsuzlaştırılmış değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Tablodaki değerler incelendiğinde, x/d_0 oranının 1 ile 2 arasında, y/d_0 oranının ise 0,57 ile 0,724 arasında değiştiği görülmektedir. Kayak kapaktan dolayı akım alanında meydana gelen büzülme oranının, en fazla %43 en az ise %27,6 olduğu söylenebilir. En küçük x/d_0 ve en büyük y/d_0 oranının d085q052u2 durumunda, en küçük y/d_0 oranının d085q095d1 durumunda, en büyük x/d_0 oranının ise d070q094h deney durumunda olduğu anlaşılmaktadır. Aynı debi ve kapak açıklığında, kanal taban eğiminin u_2 'den d_2 'ye (negatif eğimden pozitif eğime) değiştiği durumda, y/d_0 oranı azalırken x/d_0 oranı artmaktadır. Bu sonuçtan eğimin artmasıyla akımda eğriselliğin yatayda daha uzun mesafede görüldüğü, düşeyde ise eğriselliğin arttığı söylenebilir. Aynı debi ve kanal eğimi durumunda ($q052u1$), kapak açıklığının artmasıyla y/d_0 oranı artmakta ve x/d_0 oranı ise azalmaktadır. Aynı kapak açıklığı ve kanal taban eğim durumunda debinin artmasıyla, x/d_0 oranı artmakta iken y/d_0 oranı azalmaktadır.

4.3. Türbülans Kinetik Enerji

Şekil 12'de kritik altı akımın oluştuğu 18 farklı durumda elde edilen türbülans kinetik enerjisinin dağılımı verilmiştir. d100q136u1 durumunda maksimum türbülans kinetik enerji değeri kapak arka yüzeyi üzerinde meydana gelmesine karşılık, ele alınan diğer durumlarda farklı kapak mansabında belirli bir uzaklıkta meydana gelmiştir. Kapak açıklığının artmasıyla maksimum türbülans enerjinin oluştuğu noktanın kapak açıklığına oranı azalmaktadır. d085q052u2 durumunda, maksimum türbülans kinetik enerji kapak altı geçiş bölgesi ve su yüzünde oluşurken, ele alınan diğer

durumlarda su derinliğinin orta bölgesinde oluşmuştur. Aynı kapak açıklığında debinin artmasıyla türbülans

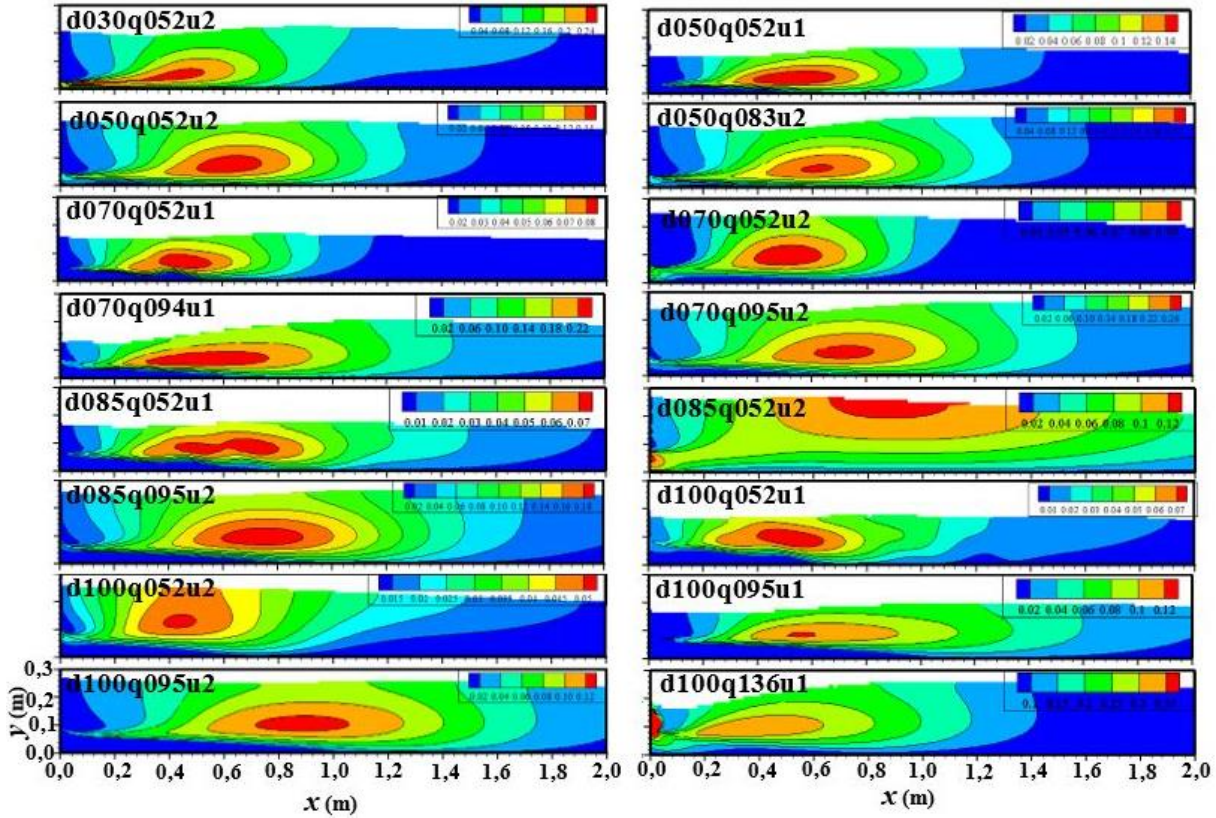
kinetik enerjisinin arttığı söylenebilir.



Şekil 11. Farklı kritik altı akım durumlarında elde edilen akım çizgileri desenleri

Tablo 2. Vena kontratta noktasının özellikleri

d_o (cm)	3		5		7		8,5		10	
Durum	x/d_o	y/d_o	x/d_o	y/d_o	x/d_o	y/d_o	x/d_o	y/d_o	x/d_o	y/d_o
q052u2	1,281	0,659	1,256	0,644	1,121	0,687	0,991	0,724	1,129	0,687
q052u1	1,653	0,623	1,233	0,635	1,221	0,602	1,189	0,655	1,205	0,697
q052h	1,497	0,618			1,411	0,634				
q052d1	1,575	0,645	1,684	0,598						
q052d2	1,789	0,619								
q083u2			1,231	0,652						
q095h			1,640	0,641						
q095d1			1,558	0,616	1,511	0,700	1,664	0,566		
q095d2			1,774	0,609						
q095u2					1,378	0,647	1,259	0,644	1,297	0,656
q094u1					1,401	0,639				
q136u1					1,507	0,631	1,520	0,618	1,660	0,643
q094h					1,962	0,634				
q136h					1,887	0,612	1,806	0,616		
q136d1					1,523	0,626	1,891	0,613		
q136d2					1,906	0,624	1,632	0,620		
q095u1							1,347	0,642	1,233	0,644



Şekil 12. Farklı kritik altı akım durumlarında elde edilen türbülans kinetik enerji desenleri

5. SONUÇLAR

Kayar kapaklar, açık kanal akımlarını kontrol etmek, düzenlemek ve debiyi ölçmek üzere inşa edilen hidrolik yapılardır. Kayar kapağın akım alanına inşa edilmesiyle akım rejiminde büyük değişiklikler meydana gelmektedir. Kayar kapak mansabında, farklı koşullarda meydana gelen hidrolik sıçrama, kritik altı ve üstü koşulların oluştuğu açık kanal akımının sayısal modellenmesi yapılmıştır. Sayısal modellemeye temel eşitliklerin çözümünde sonlu hacimler yöntemine dayalı çözüm yapan ANSYS paket programı, türbülans viskozitesinin çözümünde RNG türbülans kapatma modeli kullanılmıştır. Su hava arakesitinin belirlenmesinde ise akışkan hacimleri yönteminden yararlanılmıştır. Sayısal modelleme sonucunda elde edilen su yüzü profilleri, deneysel profillerle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda, deneysel ve sayısal su yüzü profillerinin birbiriyle oldukça uyumlu olduğu belirlenmiştir. Kritik altı akım koşullarında elde edilen akım çizgileri deseninden, kapak açıklığının ve kanal eğiminin aynı olması durumunda, kayar kapak mansabında oluşan geri dönüş bölgesinin uzunluğunun arttığı görülmüştür. Maksimum türbülans kinetik enerji değeri kapak açıklığının 4 ile 14 katı arasında meydana gelmektedir. Vena kontratta noktasının kapak açıklığının artmasıyla mansapta daha uzak noktalarda oluştuğu görülmekte, akımda meydana gelen eğriselliğin arttığı belirlenmiştir. Ele alınan farklı akım durumlarında, ortalama y/d_o değeri 0,638 ve x/d_o değeri 1,482 olarak hesap edilmiştir.

Çalışmanın sonucunda, fiziksel olarak laboratuvar ortamında yapılan deneylerin, sayısal modellerle de başarılı bir şekilde yapılabileceği, deneysel olarak akım

ile bazı özelliklerin özel ekipmanlar gerektirmesinin aksine sayısal modellemelerin bu verileri kolayca elde edilme imkânı vermesinden dolayı tercih edilmesinin mümkün olduğu belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Baines PG. Topographic effects in stratified flows: Cambridge university press; 1997.
- [2] Baines PG, Whitehead J. On multiple states in single-layer flows. *Physics of fluids*. 2003;15(2):298-307.
- [3] Defina A, Susin FM. Stability of a stationary hydraulic jump in an upward sloping channel. *Physics of Fluids*. 2003;15(12):3883-5.
- [4] Defina A, Susin FM, Viero DP. Bed friction effects on the stability of a stationary hydraulic jump in a rectangular upward sloping channel. *Physics of fluids*. 2008;20(3):036601.
- [5] Park JH, Park YS, Do Kim Y, Chae DS. An experimental study on water surface profiles of high Froude number flows. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2018;22(8):2864-70.
- [6] İşcen BN, Öktem N, Yılmaz B, Aydın İ. Sığ akım denklemlerinin hidrolikte kullanılması üzerine değerlendirmeler. *Teknik Dergi*. 2017;28(1):7747-64.
- [7] Şimşek O, Soydan NG, Gümüş V, Aköz MS, Kırkgöz MS. Ani Bir Düşüdeki B-tipi Hidrolik Sıçramanın Sayısal Modellenmesi. *Teknik Dergi*. 2015;26(4):7215-40.
- [8] Gumus V, Simsek O, Soydan NG, Akoz MS, Kırkgöz MS. Numerical modeling of submerged hydraulic jump from a sluice gate. *Journal of*

- irrigation and drainage engineering. 2016;142(1):04015037.
- [9] Soydan NG, Aköz MS, Şimşek O, Gümüş V. Trapez Kesitli Geniş Başlıklı Savak Akımının ke Tabanlı Türbülans Modelleri ile Sayısal Modellenmesi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi. 2012;27(2):47-58.
- [10] Gümüş V, Aköz MS, Kırkgöz MS. Kapak mansabında batmış hidrolik sıçramanın deneysel ve sayısal modellenmesi. Teknik Dergi. 2013;24(117).
- [11] Yakhot V, Orszag S, Thangam S, Gatski T, Speziale C. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. Physics of Fluids A: Fluid Dynamics. 1992;4(7):1510-20.
- [12] Simsek O, Akoz MS, Soydan NG. Numerical validation of open channel flow over a curvilinear broad-crested weir. Progress in computational fluid dynamics, an international journal. 2016;16(6):364-78.
- [13] Gümüş V, Şimşek O. Eğimli Açık Kanal Akımının Farklı Türbülans Modelleri ile Sayısal Modellemesi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi. 2015;30(2):41-54.
- [14] Hirt CW, Nichols BD. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. Journal of computational physics. 1981;39(1):201-25.
- [15] ANSYS I. ANSYS FLUENT Theory Guide, United States: ANSYS. Inc; 2012.
- [16] Roache PJ. Quantification of uncertainty in computational fluid dynamics. Annual review of fluid Mechanics. 1997;29(1):123-60.
- [17] Roache PJ. Verification and validation in computational science and engineering: Hermosa Albuquerque, NM; 1998.
- [18] Aydin MC. CFD simulation of free-surface flow over triangular labyrinth side weir. Advances in Engineering Software. 2012;45(1):159-66.
- [19] Ali MSM, Doolan CJ, Wheatley V, editors. Grid convergence study for a two-dimensional simulation of flow around a square cylinder at a low Reynolds number. Seventh International Conference on CFD in The Minerals and Process Industries (ed PJ Witt & MP Schwarz); 2009.
- [20] Aköz MS, Şimşek O, Soydan NG. Numerical Modeling of Interaction of Turbulent Flow with a Buried Circular Cylinder on a Plane Surface. Teknik Dergi. 2019;30(6):1-25.
- [21] Kırkgöz MS, Ardiçlioğlu M. Velocity profiles of developing and developed open channel flow. Journal of Hydraulic Engineering. 1997;123(12):1099-105.
- [22] Huang P, Bradshaw P, Coakley T. Skin friction and velocity profile family for compressible turbulentboundary layers. AIAA journal. 1993;31(9):1600-4.