

Ani Bir Düşüdeki B-tipi Hidrolik Sıçramanın Sayısal Modellenmesi

Oğuz ŞİMŞEK¹
N. Göksu SOYDAN²
Veysel GÜMÜŞ³
M. Sami AKÖZ⁴
M. Salih KIRKGÖZ⁵

ÖZ

Ani bir düşü sonrasında oluşan B-tipi hidrolik sıçramanın özellikleri, farklı akım koşulları için deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Sonlu Hacimler Yöntemine dayalı ANSYS-Fluent paket programı kullanılarak, akımı idare eden denklemler Standart $k-\epsilon$, Shear Stress Transport ve Reynolds Stress türbülans modelleri ile sayısal olarak çözülmüştür. Su yüzü profilinin hesabında Akışkan Hacimleri Yöntemi kullanılmıştır. Hesaplama ağı yoğunluğunun sayısal bulgular üzerindeki hata nispetini belirlemek amacıyla Ağ Yakınsama İndeksi yaklaşımı kullanılmıştır. Sayısal hesaplamalardan elde edilen su yüzü ve hız profilleri, deneysel ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Ölçülen ve hesaplanan su yüzü ve hız profillerindeki ortalama karesel hata ve ortalama mutlak görelî hata ölçütlerine göre, Reynolds Stress modelinin, B-tipi hidrolik sıçrama profilinin ve hız alanının belirlenmesinde, burada kullanılan diğer iki modelden daha başarılı olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: B-tipi hidrolik sıçrama, hız alanı, sayısal model, su yüzü profili, türbülans kapatma modeli.

ABSTRACT

Numerical Modeling of B-Type Hydraulic Jump at an Abrupt Drop

The properties of a B-type hydraulic jump at an abrupt drop are analyzed experimentally and numerically for different flow cases. Using the Standard $k-\epsilon$, Shear Stress Transport and Reynolds Stress turbulence closure models, the governing equations are solved numerically using ANSYS-Fluent program package which is based on the Finite Volume Method. The Volume of Fluid (VOF) method is used to determine the free surface profile.

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 21.08.2014 günü ulaşmıştır.
- 31 Aralık 2015 gününe kadar tartışmaya açıktır.

- 1 Çukurova Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana - oguzsimsek@cu.edu.tr
- 2 Çukurova Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana - soydang@cu.edu.tr
- 3 Harran Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa - vgumus@cu.edu.tr
- 4 Çukurova Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana - msa@cu.edu.tr
- 5 Çukurova Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana - skirkgoz@cu.edu.tr

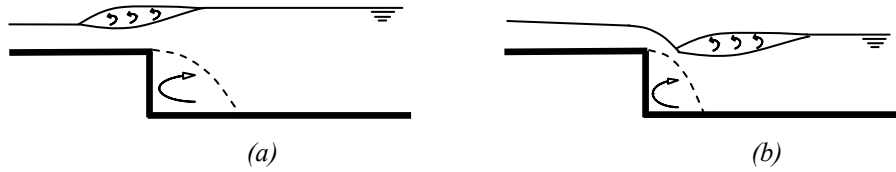
Grid independence study is carried out using a Grid Convergence Index (GCI) analysis. The numerical results for the free surface and velocity profiles of flow from the present turbulence models are compared with experimental data. Mean square errors and mean absolute relative errors of measured and predicted free surface profiles and velocity fields indicate that Reynolds Stress Model is a more successful turbulence closure model than the other two for the determination of surface profile and velocity field of the B-type hydraulic jump.

Keywords: B-type hydraulic jump, velocity field, free surface profile, numerical model, turbulence closure model.

1. GİRİŞ

Kritik-üstü açık kanal akımlarının sahip olduğu aşırı enerjinin kırılmasında en etkili yöntem, akımın hidrolik sıçrama sürecinden geçirilerek kritik-altı akıma, diğer bir deyişle nehir rejimi akımına dönüştürülmesidir. Hidrolik sıçrama, sel rejiminden nehir rejimine geçişte ortaya çıkan yüzey süreksizliği olup, su derinliğindeki ani yükselme sırasında akımda oluşan kuvvetli çalkantılar nedeniyle önemli ölçüde enerji kaybının yaşandığı bir doğa olayıdır. Kuyruk suyu derinliğinin hidrolik sıçrama için gerekli değerden daha fazla olduğu durumlarda, sıçrama membaya doğru kayarak, enerji kırılması etkinliğinin azaldığı batmış hidrolik sıçramanın meydana gelmesi olasılığını artırır. Batmış hidrolik sıçramayı önlemenin etkili yolu ise kanalda ani bir düşü meydana getirmektir.

Geçmişte yapılan fiziksel model deneylerindeki çalışmalarda, ani düşülerde görülen hidrolik sıçramanın; gelen akımın Froude sayısına, düşü yüksekliğine ve kuyruk suyu seviyesine bağlı olarak Şekil 1’de verilen, A- ve B-tipi biçiminde tanımlanan iki şekilde oluştuğu gözlemlenmiştir [1, 2]. Şekilde görüldüğü gibi, A tipi hidrolik sıçrama düşü üzerinde meydana gelmesine karşın, kuyruk suyu seviyesinin düşürülmesiyle, hidrolik sıçrama mansaba doğru yani eşik önüne kayarak B tipini oluşturmaktadır.



Şekil 1. Ani düşüde sıçrama türleri: (a) A-tipi sıçrama, (b) B-tipi sıçrama

Ani düşü sonrası oluşan sıçrama karakteristiklerinin belirlenmesine yönelik birçok deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir [3, 4, 5]. Bu çalışmalarda genellikle, farklı koşullarda meydana gelen sıçramanın türleri, geometrik özellikleri ve sıçrama bölgesindeki hız dağılımları ile bunları etkileyen parametreler irdelenmiştir. Bu tür laboratuvar modellerinde, ölçek etkilerinden kaynaklanan hataların sonuçlara yansdığı da bilinen bir gerçektir.

Diğer taraftan, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinde (HAD) son yıllarda kaydedilen gelişmeler, çeşitli yapı türleri ile etkileşim halindeki akımların sayısal analizinde önemli

kolaylıklar sağlamıştır. Sayısal çözümlerin hızlı bir biçimde tekrarlanabiliyor olması, farklı akım ve yapı koşulları altında akım özelliklerinin teorik olarak incelenmesine imkân sağlamaktadır. Yani, sayısal model deneylerinin, fiziksel model çalışmalarına karşı giderek üstünlük sağladığı görülmektedir. Bu bağlamda, hidrolik sıçrama kapsamındaki deneysel çalışmaları tamamlayıcı nitelikte birçok sayısal model çalışması mevcuttur [6, 7, 8, 9, 10]. Sayısal model çalışmaları, genellikle, hidrolik sıçrama ile ilgili olarak sayısal hesaplamalardan elde edilen geometrik, dinamik ve kinematik karakteristiklerin deneysel bulgularla doğrulanmasını esas almaktadır.

Akışkan hareketiyle ilgili problemlerin analizinde kullanılan sayısal modelleme tekniklerinin güvenilirliğini test etmek bakımından, bu kapsamdaki uygulamaların çoğaltılmasına ve çeşitlendirilmesine ihtiyaç vardır. Bu çalışmada, ani düşü sonrasında meydana gelen B-tipi hidrolik sıçramanın özellikleri, iki farklı akım koşulunda, deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Akımı idare eden denklemler, Standart $k-\epsilon$, Shear Stress Transport ve Reynolds Stress türbülans modelleri kullanılarak Sonlu Hacimler yöntemine dayalı ANSYS-Fluent programı ile sayısal olarak çözülmüştür. Su yüzü profilinin belirlenmesinde Akışkan Hacimleri Yöntemi kullanılmıştır. Sayısal hesaplardan elde edilen su yüzü profilleri, hız alanları ve B tipi hidrolik sıçramanın uzunluğu deneysel ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Sıçrama bölgesindeki akımın topolojisi ile ilgili akım çizgileri, hız vektörleri, türbülans kinetik enerjisinin sıçrama bölgesindeki dağılımları ve enerjinin kanal boyunca değişimi sunulmuştur.

2. DENEYLER

Deneyler, uzunluğu 1,7 m, genişliği ve yüksekliği 0,2 m olan, tabanı ve yan yüzeyleri camdan yapılmış, hidrolik bakımdan cilalı bir açık kanal modelinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 2 a). Açık kanal modeli, kapalı çevrim olarak çalışan bir sistem olup, debi ölçümleri kanalın sonundaki 35x35x60 cm boyutlarındaki bir debi ölçme tankı yardımıyla yapılmıştır. Deneylerde su yüzü değişimleri limnometre, hız alanı ise tek boyutlu Lazer Doppler Anemometresi (LDA) (Dantec® LDA 62N04) kullanılarak ölçülmüştür. Hız ölçümleri kanal orta kesitinde gerçekleştirilmiştir. LDA, belirli bir ortama gönderilen lazer ışığındaki saçılma yardımıyla odaklanılan noktadaki akım hız bileşenini kısa zaman aralıklarında ve belirlenmiş bir süre zarfında ölçmektedir. Lazer ışınının doppler frekansındaki değişimini tespit ederek hız ölçümünü gerçekleştiren LDA sisteminde, foto detektör tarafından toplanan ölçüm bilgileri, akım işlemcisi tarafından anlık olarak BSA-Flow yazılımına gönderilmektedir. Noktasal hız değerleri, belli bir süre boyunca ve belirli zaman aralıkları ile ölçülen anlık hız değerlerinin ortalamasının alınması ile elde edilmektedir. Anlık hız değerlerini içeren zaman serisinden, akımın bazı türbülans karakteristikleri de belirlenebilmektedir. Kullanılan LDA anlık hız ölçümlerini %95 güven aralığında ± 1 hassasiyette gerçekleştirmektedir.

Deneyler, Şekil 2 a ve 2 b'de görüldüğü gibi düşü yüksekliği $h_d=0,097$ m olan bir laboratuvar modelinde yapılmıştır. Kuyruk suyu derinliğini ayarlamak için kanal sonunda yüksekliği $h_k=0,06$ m olan bir kapak kullanılmıştır.

Ani Bir Düşüdeki B-tipi Hidrolik Sıçramanın Sayısal Modellenmesi

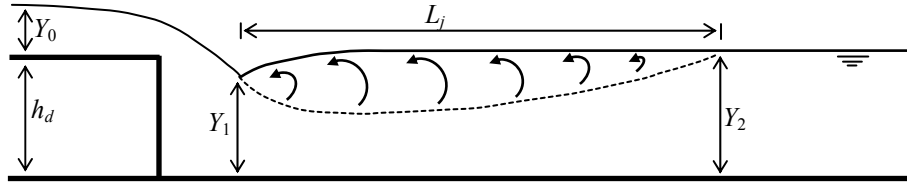


Şekil 2a. Deney düzeneği



Şekil 2b. Ani düşü sonrası B-tipi hidrolik sıçrama

B tipi hidrolik sıçramanın şematik gösterimi ve akım ile ilgili bazı boyutlar Şekil 3'te görülmektedir. Farklı iki deney koşulundaki akımlara ait karakteristik büyüklükler Tablo 1'de verilmiştir. Tabloda verilen, Q akımın debisini, Y_0 çözüm bölgesi giriş sınırındaki su derinliğini, Y_1 ve Y_2 sıçrama bölgesinin başında ve sonundaki akım derinliklerini, L_j sıçrama uzunluğunu, $Fr_0 (=V_0/(gY_0)^{1/2})$ Froude sayısını ve $Re_0 (=4V_0R_0/\nu)$ ise Reynolds sayısını temsil etmektedir (V_0 ve R_0 çözüm bölgesi giriş kesitindeki ortalama hız ve hidrolik yarıçap, g yerçekimi ivmesi ve ν suyun kinematik viskozitesidir).



Şekil 3. B tipi hidrolik sıçramanın şematik gösterimi ve bazı boyutlar

Tablo 1. Farklı akım koşullarına ait değerler

	Q (l/s)	Y_0 (cm)	Y_1 (cm)	Y_2 (cm)	L_j (cm)	V_0 (m/s)	Fr_0	Re_0
Durum 1	3,05	2,30	7,70	8,50	38,50	0,663	1,40	45.500
Durum 2	6,05	4,00	9,80	12,10	48,50	0,756	1,21	75.800

3. TEMEL DENKLEMLER VE SAYISAL ÇÖZÜM

3.1. Temel Denklemler

Bu çalışmaya konu olan ani düşü sonrası hidrolik sıçramayı içeren akım alanı; düzenli, iki-boyutlu, sıkışmayan, türbülanslı ve serbest yüzeyli bir akım niteliğinde olup akımı idare eden temel denklemler aşağıda verilmiştir.

Kütlenin korunumu:

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

x doğrultusunda momentumun korunumu:

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

y doğrultusunda momentumun korunumu:

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

Bu denklemlerde yer alan \bar{u} ve \bar{v} , sırasıyla x ve y doğrultusundaki zamansal ortalama hız bileşenlerini, X ve Y birim kütleye gelen kütleli kuvvet bileşenlerini, \bar{p} zamansal ortalama basıncı, μ dinamik viskoziteyi, ρ akışkan yoğunluğunu ve τ_{xx} , τ_{xy} ve τ_{yy} türbülans (Reynolds) gerilmelerini ifade etmektedir.

Yukarıda verilen 3 adet temel denklem, iki hız bileşeni, basınç ve üç bağımsız Reynolds gerilmesi olmak üzere 6 adet bilinmeyen içermektedir. Sayısal hesaplama sürecinde denklem sistemini çözebilmek için zamansal-ortalama Denklem (2) ve Denklem (3)'te yer alan türbülans gerilmelerinin, türbülans kapatma modelleri yardımıyla tanımlanması gerekmektedir. Boussinesq'in türbülans viskozitesi yaklaşımına göre, türbülans kayma gerilmeleri doğrusal bünye denklemleri ile, sıkışmayan akımlar için, aşağıdaki gibi verilmiştir:

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

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

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

u' ve v' yatay ve düşey doğrultulardaki türbülans hız sapınçlarını, μ_t türbülans viskozitesini ve k ($= \overline{u_i'u_i'}/2$) türbülans kinetik enerjisini temsil etmektedir.

3.2. Kullanılan Türbülans Modelleri

Denklem (4-6)'da görülen μ_t türbülans viskozitesinin hesaplanmasında bir çok türbülans modeli geliştirilmiştir. Bu çalışmada, μ_t 'nin hesabında, farklı özellikleri kapsayıcı olmak üzere, Standart k - ε (SKE) [11], Shear Stress Transport k - ω (SST) [12] ve Reynolds Stress Model (RSM) [13] türbülans kapatma modelleri kullanılmıştır:

3.2.1. SKE Türbülans Modeli

Bu model ile türbülans viskozitesi, μ_t , türbülans kinetik enerjisi, k , ve onun kayıp oranına, ε , bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

C_μ boyutsuz model sabitidir. Denklem (7)'deki k ve ε değerlerinin bulunması için iki adet kısmi diferansiyel taşınım denkleminin çözülmesi gerekmektedir:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial(\rho k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (9)$$

Model sabitleri, $C_\mu=0.09$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\varepsilon=1.3$, $C_{1\varepsilon}=1.44$, $C_{2\varepsilon}=1.92$ değerlerini almaktadır [11].

3.2.2. SST Türbülans Modeli

SST modeli, katı sınıra yakın akım bölgelerinde $k-\omega$ [14], uzak bölgelerde ise standart $k-\varepsilon$ türbülans modelinin daha uygun olduğu varsayımından hareketle her iki modelin üstünlüklerini tek modelde birleştiren bir yaklaşımdır. Bu model, bir karışım fonksiyonu yardımı ile modelin katsayılarını, geçerli olduğu varsayılan bölgeler itibarıyla $k-\omega$ ve $k-\varepsilon$ model katsayılarına uyarlayarak, katı sınıra yakın yerlerde (türbülanslı iç bölgede) $k-\omega$ modeli ile uyum sağlarken, katı sınırdan uzaklaştıkça (türbülanslı dış bölgede) yumuşak bir geçişle $k-\varepsilon$ türbülans modeline yaklaşmaktadır [12]. F_1 model katsayıları için karışım fonksiyonu olarak SST modelindeki taşınım denklemleri aşağıdaki gibi verilmiştir:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial(\rho k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega k \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial x_j} = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \frac{\gamma}{\nu_t} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 \\ & + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (11)$$

$\omega (= \varepsilon/k)$ türbülans kinetik enerjisi özgül kayıp oranıdır. Bu modeldeki farklı sabitler, orijinal $k-\omega$ (ϕ_1) ve dönüştürülmüş $k-\varepsilon$ (ϕ_2) model katsayılarının interpolasyonu ile aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\phi = F_1 \phi_1 + (1 - F_1) \phi_2, \quad \text{örneğin: } \sigma_k = F_1 \sigma_{k1} + (1 - F_1) \sigma_{k2} \text{ ve } \sigma_\omega = F_1 \sigma_{\omega 1} + (1 - F_1) \sigma_{\omega 2}$$

$$k-\omega \text{ için } \phi_1 \text{ sabitleri: } \sigma_{k1} = 0.85, \sigma_{\omega 1} = 0.5, \beta_1 = 0.075, \beta^* = 0.09, \gamma_1 = \frac{\beta_1}{\beta^*} - \frac{\sigma_{\omega 1} \kappa^2}{\sqrt{\beta^*}},$$

$$\kappa = 0.41$$

$$k-\varepsilon \text{ için } \phi_2 \text{ sabitleri: } \sigma_{k2} = 1.0, \sigma_{\omega 2} = 0.856, \beta_2 = 0.0828, \beta^* = 0.09, \gamma_2 = \frac{\beta_2}{\beta^*} - \frac{\sigma_{\omega 2} \kappa^2}{\sqrt{\beta^*}}$$

$\kappa = 0.41$ ve ifadeler içerisinde bulunan F_1 fonksiyonu aşağıdaki gibidir:

$$F_1 = \tanh \left\{ \min \left[\text{mak} \left(\frac{\sqrt{k}}{0.09 \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right); \frac{4 \rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right\}^4,$$

$$CD_{k\omega} = \text{mak} \left(2 \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}; 10^{-20} \right)$$

y en yakın duvar uzaklığını göstermektedir.

Türbülans kayma gerilmesindeki taşınım etkisini göz önüne almak üzere türbülans viskozitesi aşağıdaki gibi modifiye edilmiştir [12]. Yapılan bu değişiklik ile $k-\omega$ modelinin, pozitif basınç gradyanına sahip sınır tabakası akımlarının analizinde ve sınır tabakası ayrılma yerinin belirlenmesinde SKE türbülans modeline göre daha başarılı olduğu görülmüştür. Bradshaw hipotezine dayanarak, bir sınır tabakası içindeki kayma gerilmesi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\tau = \rho a_1 k \quad (12)$$

Burada sabit değer $a_1=0.31$ 'dir. Denklem (12)'nin sağlanması için türbülans viskozitesi yeniden tanımlanırsa:

$$\nu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega; \zeta F_2)}, \quad F_2 = \tanh \left[\max \left(2 \frac{\sqrt{k}}{0.09 \omega y}; \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right) \right]$$

Ortalama vortisitenin mutlak değeri, $\zeta = |\partial \bar{u} / \partial y|$ olup, F_2 fonksiyonu sınır tabakası akımı için 1, serbest türbülanslı kayma tabakaları için 0 değerini almaktadır.

3.2.3. RSM Türbülans Modeli

RSM türbülans modelinde, Reynolds gerilme tansörünün tüm bileşenleri ve türbülans enerji kayıp oranı için ayrı ayrı taşınım denklemleri kullanılmaktadır. Buna göre hesaplanan türbülans gerilmesi bileşenleri Denklem (2) ve (3)'de doğrudan kullanılmaktadır. Gerilmelerin doğrultuya bağlı farklılaşmasının göz önüne alınabildiği ve doğrusal ve doğrusal-olmayan türbülans viskozitesi modellerine göre daha ileri bir modelleme tekniği olduğu varsayımı ile bu tür yöntemler *ikinci-mertebe kapatma modelleri* olarak da anılmaktadır. RSM türbülans modeli, eğri yörüngeli akımlarda, akışkan parçacıklarının şekil değiştirme hızındaki ani değişimlerin yer aldığı akımlarda ve ikincil akım etkilerinin de göz önüne alınması gereken durumlarda, diğer doğrusal ve doğrusal-olmayan türbülans modellerine göre üstünlüklere sahiptir. RSM türbülans modelinde kullanılan türbülans gerilmeleri için taşınım denklemleri ($R_{ij} = -\tau_{ij} / \rho = \overline{u'_i u'_j}$) yazılarak momentum denkleminde aşağıdaki gibi elde edilir [13].

$$\begin{aligned} \frac{dR_{ij}}{dt} = \frac{\partial R_{ij}}{\partial t} + \underbrace{\bar{u}_k \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_k}}_{C_{ij}} = - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\overline{u'_i u'_j u'_k} + \frac{1}{\rho} (\overline{p' u'_i} \delta_{jk} + \overline{p' u'_j} \delta_{ki}) \right]}_{D'_{ij}} + \underbrace{\nu \frac{\partial^2 \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k \partial x_k}}_{D''_{ij}} \\ - \underbrace{\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_k} - \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k}}_{P_{ij}} + \underbrace{\frac{p'}{\rho} \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right)}_{\Pi_{ij}} - \underbrace{2\nu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k}}_{\varepsilon_{ij}} \end{aligned} \quad (13)$$

Denklem (13)'de bulunan terimler, R_{ij} 'nin: C_{ij} konveksiyon ile taşınımını, D_{ij}^I türbülans difüzyonu ile taşınımını, D_{ij}^V viskoz difüzyon ile taşınımını, P_{ij} zamansal üretim oranını, Π_{ij} türbülans basınç-şekil değiştirme hızı etkileşimi ile taşınımını ve ε_{ij} ise zamansal kayıp oranını temsil etmektedir.

3.3. Su Yüzünün Hesaplanması – Akışkan Hacimleri Yöntemi

Sayısal modellemelerde, sıvı ile havanın ara kesitindeki serbest su yüzünün bulunmasında Akışkan Hacimleri Yöntemi güvenilir bir teknik olarak kullanılmaktadır [15]. Bu yöntem, hesaplama ağında, sıvı ile havanın ara kesitindeki ağ elemanlarının hacimsel doluluk oranını esas almakta ve bir sayısal hesaplama ağına belirli zaman aralıklarında giren sıvının eleman hacimlerini doldurma oranlarının belirlenmesini ve böylece, akımda serbest yüzey profilinin seçilmiş zaman adımlarında hesaplanmasını gerçekleştiren bir sürece dayanmaktadır. Hacimsel doluluk oranını temsilen $F=1$ için ağ elemanı sıvı ile tam dolu, $F=0$ için boş (hava ile dolu), ve $0 < F < 1$ için kısmen dolu olmakta, bu sürecin her bir zaman adımında hesaplama ağı içerisindeki akım yüzeyinin konumu tespit edilebilmektedir.

Akışkan Hacimleri Yöntemi ile serbest su yüzünün hesaplanmasında “Geo-Reconstruct” yaklaşımı kullanılmıştır [16]. Bu yaklaşıma göre, öncelikle, kısmen dolu her bir hücrenin, doluluk oranı ve onun türevleri ile ilgili bilgilere dayanılarak, hava-su doğrusal ara yüzünün hücre ağırlık merkezine göre yeri belirlenir. Bir sonraki adımda, hesaplanmış doğrusal ara yüzün yeri ve eleman yüzeylerinde hesaplanmış normal ve teğetsel hız bilgileri kullanılarak her bir eleman yüzeyinden taşınan akışkan miktarları hesaplanır. Son olarak, bir önceki adımda hesaplanan akışkan miktarları göz önüne alınarak, süreklilik denklemi ile her bir hücrenin hacimsel doluluk oranı hesaplanır.

3.4. Çözüm Bölgesi, Sınır ve Başlangıç Şartları

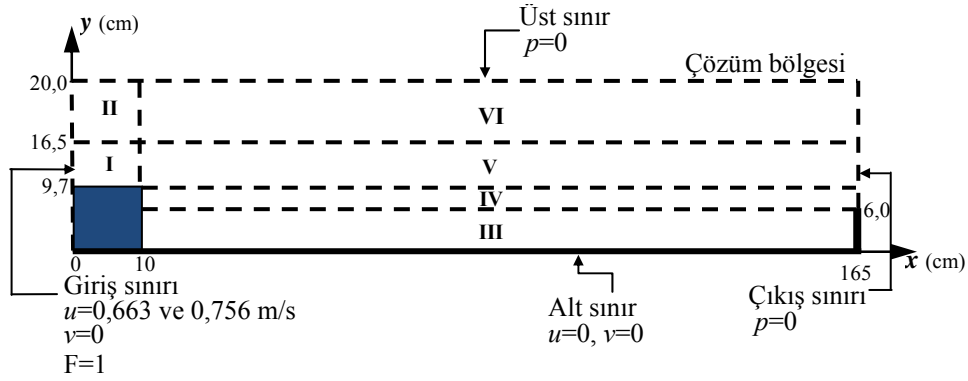
B-tipi hidrolik sıçramanın olduğu açık kanal akımının sayısal modeli için kullanılan çözüm bölgesinin geometrisi ve boyutları Şekil 4'te görülmektedir. Koordinat sisteminin orijini, çözüm bölgesinin sol alt köşesi olarak alınmıştır. Çözüm bölgesinin üst sınırı memba su seviyesinin üstünden, alt sınırı ise kanal tabanından geçmektedir. Alt sınırdaki sıfır-hız duvar sınır şartı, yani $u=v=0$ kabulü yapılmıştır. Çözüm bölgesinin giriş sınırında, yatay hız bileşeni üniform kabul edilmiş ve kesit ortalama hızına eşdeğer olarak $u=0,663$ ve $0,756$ m/s, düşey hız bileşeni ise $v=0$ alınmıştır. Kanal sonundaki serbest dökülme kesiti olan çıkış sınırında ve çözüm bölgesinin üst sınırında basınç şartı olarak $p=0$ değeri kullanılmıştır.

Zamana bağlı çözüm sürecinde, başlangıç şartı olarak çözüm bölgesinin giriş sınırında doluluk oranı $F=1$ alınmıştır.

Zamana bağlı sayısal çözümün stabilitesini sağlamak üzere, hesaplamadaki Δt zaman adımı aşağıda verilen Courant sayısı, $Cn \leq 2$, olacak şekilde belirlenmiştir:

$$Cn = \frac{\Delta t}{\Delta x_{ağ} / v_{su}} \quad (14)$$

$\Delta x_{ağ}$ katı sınır yakınındaki ağ elemanının genişliğini ve v_{su} suyun hızını ifade etmektedir. Courant sayısı, hesaplama ağı içerisinde yer alan en küçük elemanın boyutu dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Buna göre, söz konusu ağ elemanında Courant sayısı maksimum 2 değerine eşit olacak şekilde $\Delta t = 0,001$ s olarak seçilmiştir.

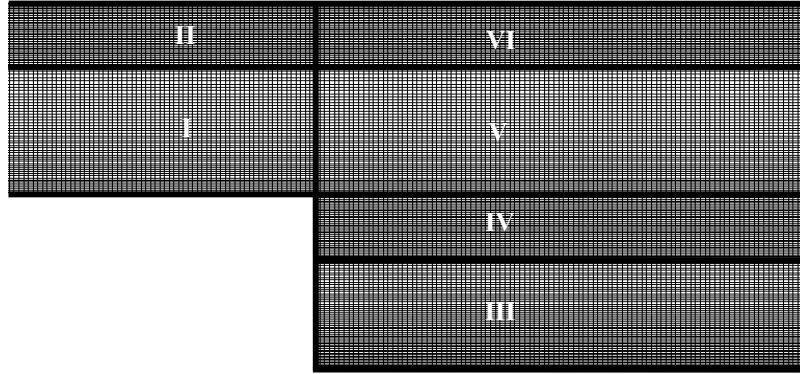


Şekil 4. Çözüm bölgesi, sınır ve başlangıç şartları

4. HESAPLAMA AĞI

4.1. Hesaplama Ağının Tasarımı

Akışkan akımlarının bir yapı ile etkileşiminin söz konusu olduğu akım alanlarının sayısal yöntemlerle hesaplamalarında, hesaplama ağı tasarımının sonuçlar üzerinde etkili olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada hesaplama ağı oluşturulurken, Şekil 4'te verilen sayısal çözüm bölgesi, Şekil 5'te görüldüğü gibi, 6 alt bölgeye ayrılmış, her bir alt bölgede eleman sayısı yaklaşık olarak %50 ve %75 artırılmak suretiyle, lineer dörtgen elemanlardan oluşan 3 farklı yoğunluğa sahip ağ yapısı elde edilmiştir. Tablo 2'de sayısal hesaplamalarda kullanılan üç farklı ağ yoğunluğu için eleman sayıları verilmiştir. Sayısal çözüm alanındaki ağ yapısının yeterli sıklıkta olup olmadığı, bir başka ifadeyle, ağ yapısından bağımsız sayısal çözümler elde etmek amacıyla ele alınan üçlü ağ sisteminde yapılan sıklaştırmanın uygunluğu, *Ağ Yakınsama İndeksi* yöntemiyle test edilmiştir [17]. Sonuçta, Ağ 3 sistemiyle akım hızlarındaki hataların kabul edilebilir (% 2'nin altında) değerlere yakınsadığı görülmüş ve hesaplama hassasiyetinin ağ yoğunluğundan bağımsızlaştığı kanaatine varılmıştır.



Şekil 5. Hesaplama ağı

Tablo 2. Üç farklı yoğunluktaki ağ yapısı için alt bölgelerdeki eleman sayıları

Alt Bölgeler	Ağ 1	Ağ 2	Ağ 3
I	15x25	24x40	30x50
II	10x25	15x40	20x50
III	15x150	24x225	30x300
IV	10x150	15x225	20x300
V	15x150	24x225	30x300
VI	10x150	15x225	20x300

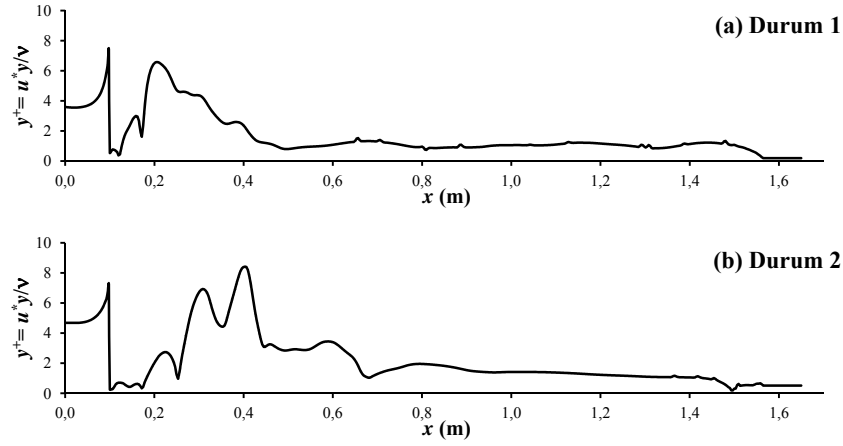
Tablo 3. Üç farklı yoğunluktaki ağlar için duvar yakını eleman yüksekliği

	Duvar yakını eleman yüksekliği (mm)		
	Ağ 1	Ağ 2	Ağ 3
Minimum	0,58	0,33	0,16
Maksimum	0,69	0,40	0,18

Tablo 3’de, sayısal hesaplamalarda kullanılan üç farklı yoğunluğa sahip hesaplama ağının katı sınıra bitişik elemanlarının en küçük ve en büyük yükseklik değerleri verilmiştir.

Sayısal hesaplama ağında katı yüzeylere doğru sıklaştırma yapılarak, duvar yakınındaki ağ elemanlarının viskoz alt tabaka içerisinde kalması amaçlanmıştır. Ağ 3 hesaplama ağı kullanılarak Durum 1 ve Durum 2 için RSM türbülans modeli ile ağın tabana bitişik elemanları için hesaplanan $y^+ (=u_*y/\nu)$ değerinin çözüm bölgesi boyunca değişimleri Şekil 6’da görülmektedir. Burada, $u_* (=(\tau_w/\rho)^{1/2})$ kayma hızı, y duvar yakını ağ elemanının tabana

dik boyutu ve ν kinematik viskozitedir. Şekilde görüldüğü gibi, en büyük y^+ değeri, Durum 2'nin sıçrama bölgesinde oluşmakta ve 10 değerini aşmamaktadır. Kırgöz ve Ardıçlıoğlu [18], deneysel bulgulara dayanarak, viskoz alt tabakada $y^+ \leq 10$ olduğu sonucuna varmışlardır. Bu değer viskoz alt tabaka kalınlığı için ölçüt olarak kullanılırsa, bu çalışmadaki çözüm bölgesi hesaplama ağında, her iki akım durumunda da, duvar yakını elemanlarının viskoz alt tabaka içerisinde yer aldığı anlaşılmaktadır.



Şekil 6. Durum 1 ve Durum 2 için Ağ 3 ve RSM ile y^+ değerinin alt sınır boyunca değişimi

SKE ve RSM türbülans modelleri ile yapılan sayısal modellemelerde, katı yüzeye bitişik ilk ağ elemanının viskoz alt tabaka içerisinde kaldığını kabul ederek çözüm yapan, Chen ve Patel [19] tarafından verilen iki-tabakalı çözümü esas alan ve genişletilmiş iki-tabakalı duvar-yakını modellemesi olarak anılan yöntem kullanılmıştır [16]. Tüm çözüm bölgesini kapsayan iki tabaka, türbülanslı dış bölge ve viskozitenin etkisindeki duvar-yakını bölgesidir. Buradaki yaklaşımda, viskoziteden etkilenen duvar-yakını bölgesi, μ_t ile ε özel biçimde formüle edilmek suretiyle, yüksek çözünürlükteki ağ topolojisiyle katı sınıra kadar modellenmektedir. SST türbülans modeli ise duvar yakını modellemesinde herhangi bir özel çözüm yöntemine ihtiyaç duymamaktadır.

5. BULGULAR

5.1. Deneysel ve Hesaplanan Hız Profilleri

Sayısal çözümlerde, *Akışkan Hacimleri* yöntemi ile hesaplanan hız profilleri deneysel ölçümler ile karşılaştırılmıştır. Farklı türbülans modellerinin doğrulanmasındaki niceliksel karşılaştırmalarda Ortalama Karesel Hata (OKH) ve Ortalama Mutlak Görelî Hata (OMGH) ölçüt olarak kullanılmıştır:

$$OKH = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\bar{u}_d - \bar{u}_h)^2 \quad (15)$$

$$OMGH = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left| \frac{\bar{u}_d - \bar{u}_h}{\bar{u}_d} \right| \times 100 \quad (16)$$

Denklem (15) ve (16)'da bulunan; \bar{u}_d ve \bar{u}_h sırasıyla deneysel ve hesaplanan zamansal ortalama hızı, N hız profili üzerinde karşılaştırma için kullanılan nokta sayısını göstermektedir. Tablo 4 ve Tablo 5'de sırasıyla Durum 1 ve Durum 2 için farklı türbülans modelleri kullanılarak elde edilen OKH ve OMGH değerleri verilmiştir. Tabloların son satırlarındaki ortalama değerler incelendiğinde her iki durum için de en küçük OKH ve OMGH değerleri RSM türbülans modeli ile elde edilmiştir. Ayrıca, Durum 1 için SST türbülans modeli başarı sıralamasında ikinci, SKE modeli üçüncü olmuştur. Durum 2'de ise başarı sıralaması RSM, SKE ve SST şeklindedir.

Tablo 4'te, $x=11,5$, $26,5$ ve $56,5$ cm için 100'den büyük OMGH değerleri elde edildiği görülmektedir. Bu kesitlerde, OMGH değerlerinin büyük çıkması, deneysel ve hesaplanan hızların zıt yönlerde (pozitif ve negatif) olmasından kaynaklanmaktadır.

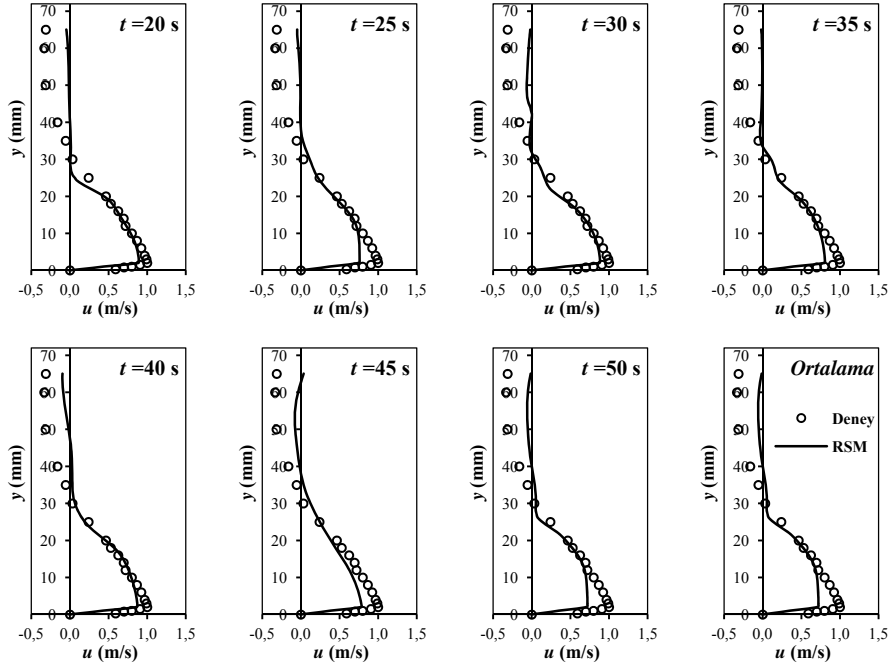
Şekil 7 ve Şekil 8'de, Durum 1 ve Durum 2 için sıçrama bölgesinde yer alan $x=26,5$ cm kesitine ait RSM modelinden hesaplanan, zamansal ortalama hız profilinin yanısıra, farklı zamanlardaki hız profillerinin değişimi verilmiştir. Şekillerden, tabana yakın bölgede oluşan jet akımı, negatif hızların olduğu bölgenin geometrisi ve sıçrama bölgesinin zamana bağlı değişimi açıkça görülmektedir.

Tablo 4. Durum 1 için farklı türbülans modellerine ait OKH (m^2/s^2) ve OMGH (%) değerleri

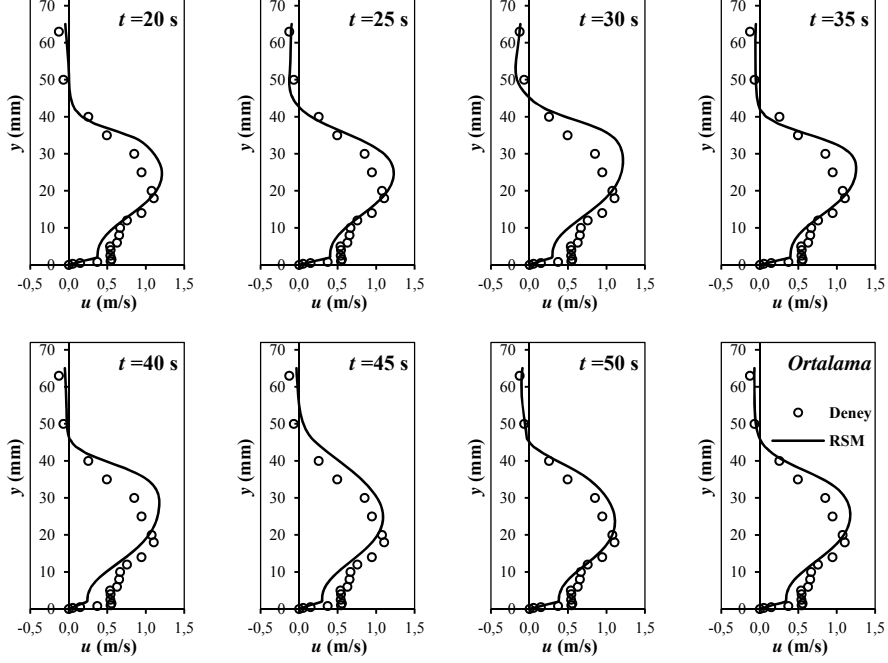
x (cm)	SKE		SST		RSM	
	OKH	OMGH	OKH	OMGH	OKH	OMGH
3,5	0,0005	5,0308	0,0032	8,4793	0,0005	3,9057
10,0	0,0012	5,8829	0,0004	1,8417	0,0008	3,3833
11,5	0,0268	186,9051	0,0312	186,8772	0,0408	144,6969
26,5	0,0412	803,2885	0,0364	574,1338	0,0325	224,5140
41,5	0,0222	132,1875	0,0028	23,3451	0,0085	69,9582
56,5	0,0043	266,0103	0,0081	376,9605	0,0023	199,8173
76,5	0,0001	3,3106	0,0049	37,9398	0,0004	10,9807
106,5	0,0002	11,9135	0,0007	45,2350	0,0001	6,7185
126,5	0,0001	10,3930	0,0005	17,6453	0,0001	7,5848
Ort.	0,0107⁽³⁾	158,3247⁽³⁾	0,0098⁽²⁾	141,3842⁽²⁾	0,0096⁽¹⁾	74,6177⁽¹⁾

Tablo 5. Durum 2 için farklı türbülans modellerine ait OKH (m^2/s^2) ve OMGH (%) değerleri

x (cm)	SKE		SST		RSM	
	OKH	OMGH	OKH	OMGH	OKH	OMGH
3,5	0,0010	2,6419	0,0067	7,2691	0,0053	5,6239
10,0	0,0189	13,6827	0,0040	4,1543	0,0046	4,5117
11,5	0,0082	84,6303	0,0036	17,4581	0,0083	85,9775
26,5	0,0205	51,5785	0,0102	45,4741	0,0245	61,7329
41,5	0,0075	98,0329	0,0135	70,1092	0,0049	29,8989
56,5	0,0016	24,2748	0,0243	115,2046	0,0029	47,5468
76,5	0,0008	11,6528	0,0179	58,1678	0,0045	33,7496
106,5	0,0014	9,8844	0,0054	23,5227	0,0002	3,5334
126,5	0,0005	7,0508	0,0007	7,8241	0,0001	2,0088
Ort.	0,0067 ⁽²⁾	33,7143 ⁽²⁾	0,0096 ⁽³⁾	38,7982 ⁽³⁾	0,0062 ⁽¹⁾	30,5093 ⁽¹⁾



Şekil 7. Durum 1 için $x=26,5$ cm kesitinde RSM modelinden farklı zamanlardaki zamansal ortalama hız profilleri

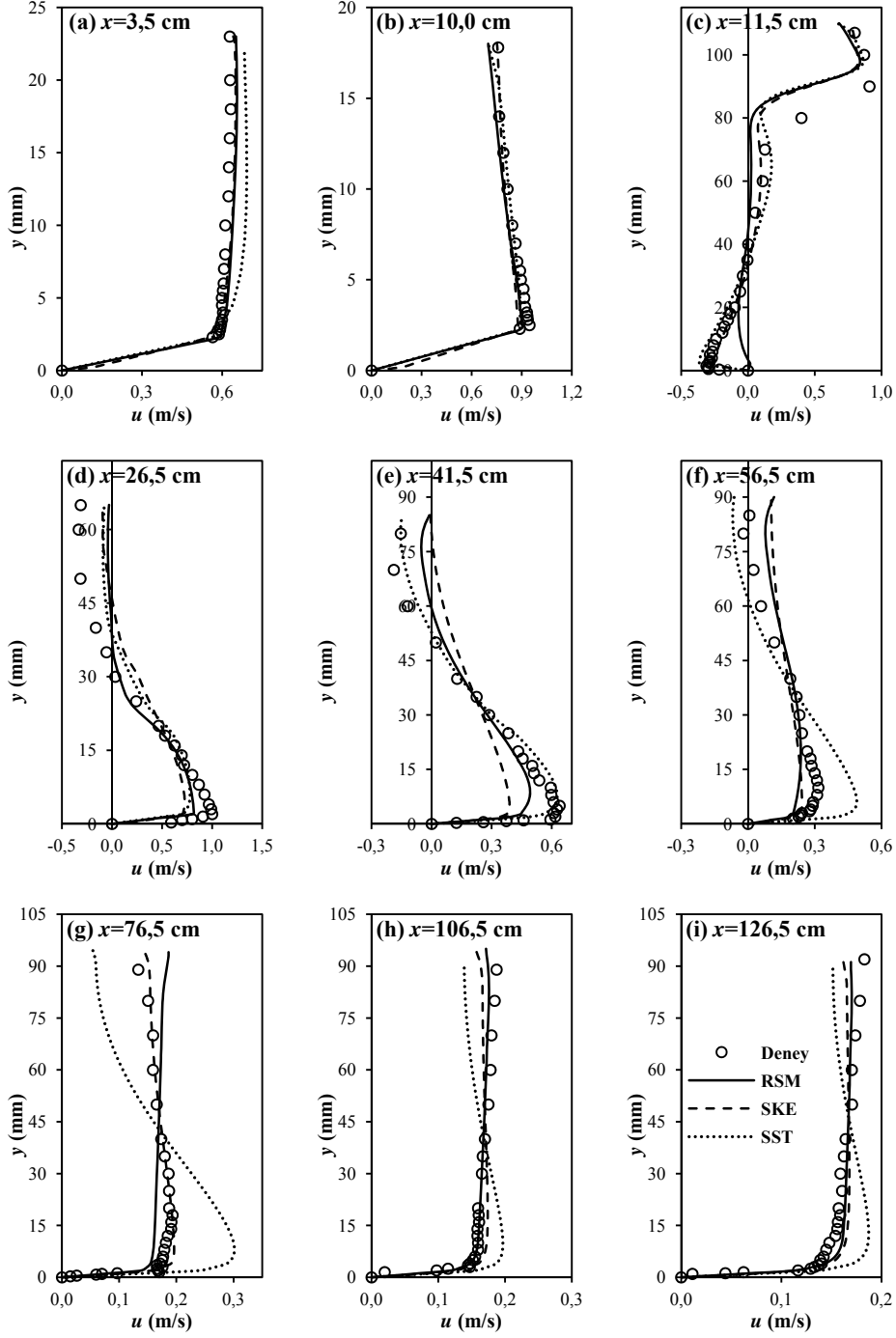


Şekil 8. Durum 2 için $x=26,5$ cm kesitinde RSM modelinden farklı zamanlardaki ve zamansal ortalama hız profilleri

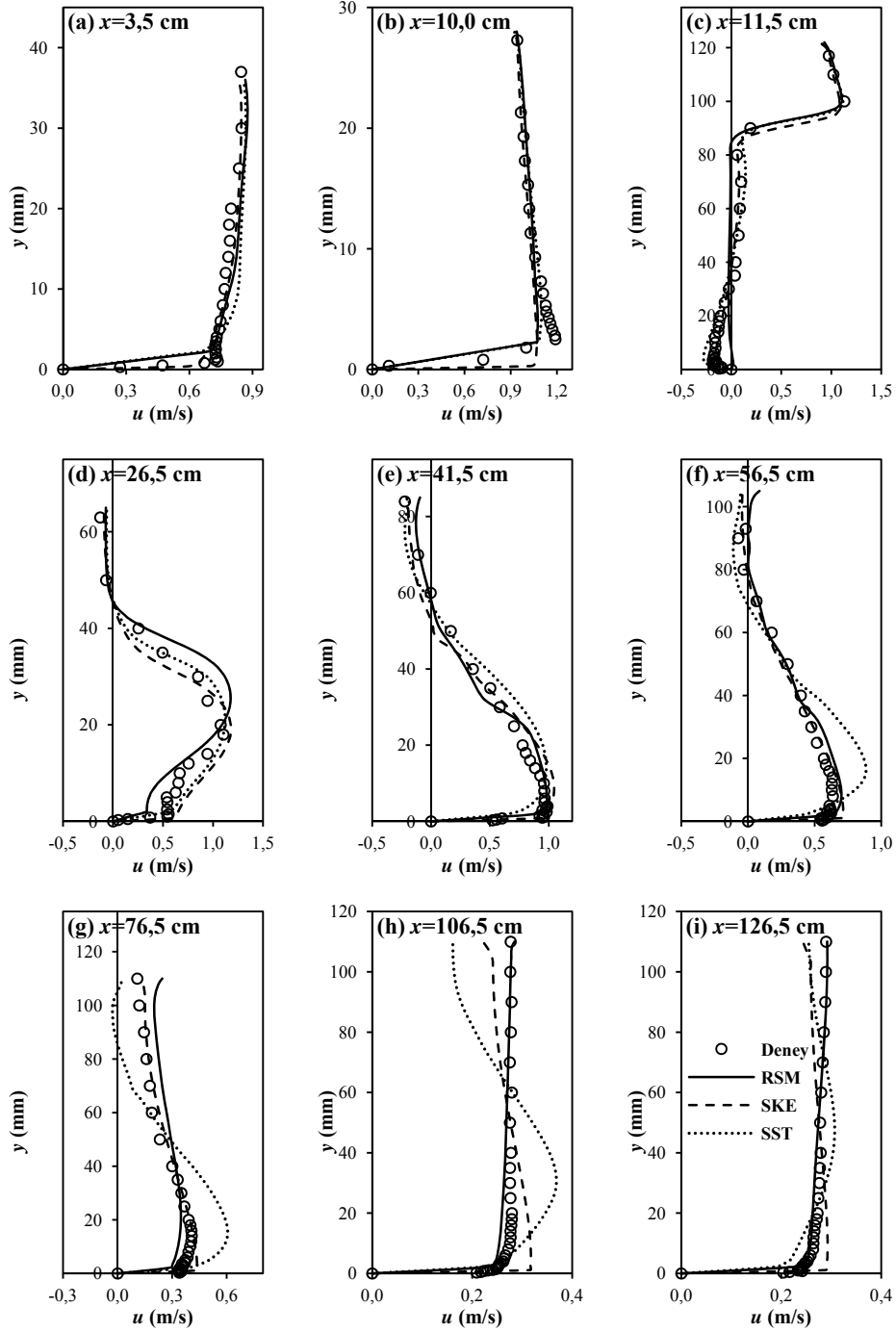
Şekil 9 ve 10'da sırasıyla Durum 1 ve Durum 2 için farklı türbülans modelleri kullanılarak farklı kesitlerde hesaplanan hız profilleri deneysel hız profilleri ile karşılaştırılmıştır. Türbülans modelleri ile elde edilen hız profilleri, Şekil 7 ve 8'de görülen sıçrama uzunluğunun zamana bağlı değişimi göz önünde bulundurularak 7 farklı zamanda alınmış sayısal hesaplama kayıtlarının ortalaması kullanılarak elde edilmiştir. Düşü kesitinde ($x=10$ cm), beklenildiği gibi eğri yörüngeli akıma ait eğrilik yarıçapı ile ters orantılı tipik hız profili görülmektedir. Düşü kesitinin hemen mansabında ($x=11,5$ cm) hız profilinin üst bölgesinde jet akımının etkin olduğu, alt kısmında ise ters akımları da içeren çevri hareketinin varlığı görülmektedir. Hız profillerinin kanal boyunca değişimi incelendiğinde, düşü yakınında üst bölgede etkin olan jet akımının gittikçe hız profilinin alt bölgesine kaydığı ve belirli mesafe sonrasında etkisini yitirerek bir açık kanal akımının hız profiline dönüştüğü görülmektedir.

Şekil 9 ve 10'daki hız profillerinin incelenmesinden, hız alanının tahmininde RSM türbülans modeli genelde diğerlerine göre daha başarılı olmasına karşın bazı kesitlerde örneğin; Durum 1 için $x=11,5$ ve $76,5$ cm kesitlerinde ve Durum 2 için $x=3,5$, $56,5$ ve $76,5$ cm kesitlerinde SKE türbülans modelinin diğerlerine kıyasla daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Benzer şekilde, SST türbülans modeli Durum 1 için $x=10,0$ ve $41,5$ cm kesitlerinde ve Durum 2 için $x=10,0$, $11,5$ ve $26,5$ cm kesitlerinde diğer modellere göre hız profillerini tahmin etmekte üstünlük sağlamıştır.

Ani Bir Düşüdeki B-tipi Hidrolik Sıçramanın Sayısal Modellenmesi



Şekil 9. Durum 1 için kanalın farklı kesitlerinde deneysel ve hesaplanan hız profilleri



Şekil 10. Durum 2 için kanalın farklı kesitlerinde deneysel ve hesaplanan hız profilleri

5.2. Deneysel ve Hesaplanan Su Yüzü Profilleri

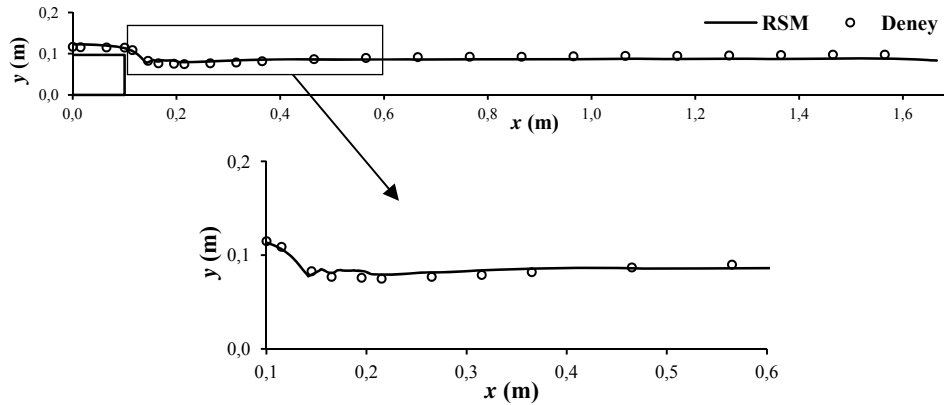
B-tipi hidrolik sıçramanın sayısal hesaplamalarında, akım profilinin belirlenmesi için kullanılan Akışkan Hacimleri yönteminden elde edilen teorik su yüzü profilleri deneysel ölçümlerle karşılaştırılmıştır. SKE, SST ve RSM türbülans modelleri ile hesaplanan su yüzü profilleri bulgularının doğrulanmasında da Denklem (14) ve (15)'de tanımlanan OKH ve OMGH değerleri ölçüt olarak kullanılmıştır,

Tablo 6'da, bu çalışmada kullanılan türbülans modelleriyle hesaplanan su yüzü profilleri için OKH ve OMGH değerleri verilmiştir. Tablodan görüldüğü gibi, tüm çözüm bölgesindeki su yüzü profilinin hesaplanmasında, türbülans modelleri için başarı sıralamasının, hız profillerindeki gibi, Durum 1'de RSM, SST ve SKE şeklinde iken Durum 2'de RSM, SKE ve SST şeklinde olduğu görülmektedir.

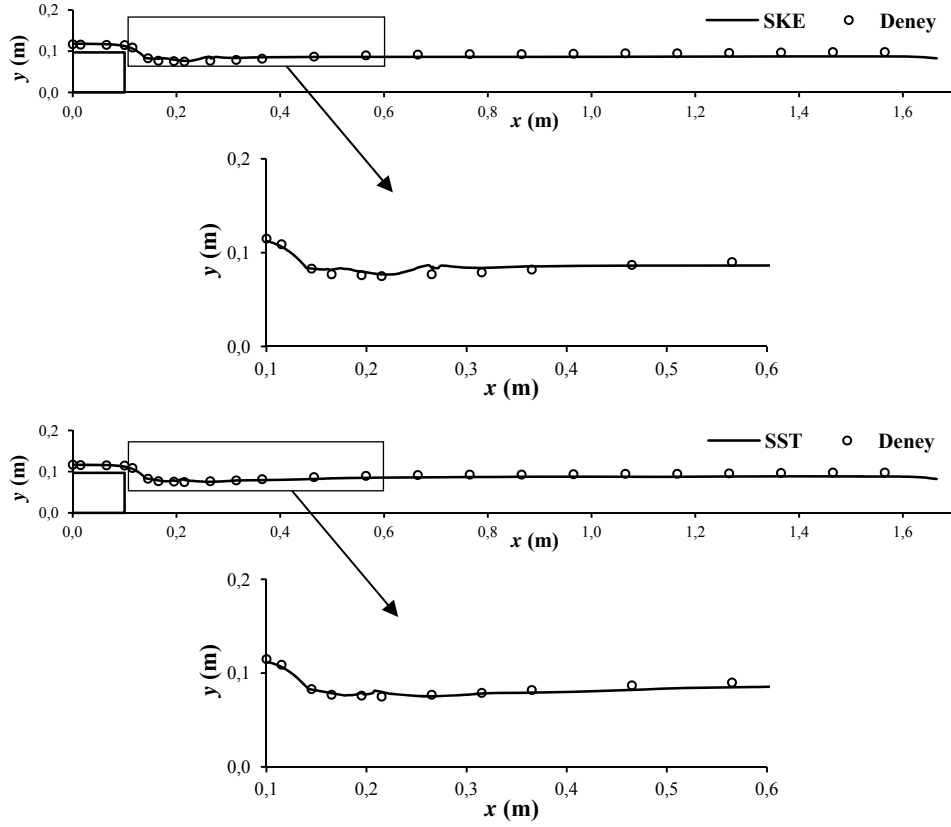
Şekil 11 ve 12'de, türbülans modelleri ile hesaplanan su yüzü profillerinin, sırasıyla Durum 1 ve Durum 2 için deneysel ölçümlerle grafiksel olarak karşılaştırılması sunulmuştur. Şekillerde görüldüğü gibi, akımın en karmaşık alanı olan sıçrama bölgesi, görüntü hassasiyetinin artırılması amacıyla mercek altına alınmıştır. RSM türbülans modelinin deneysel ölçümlere olan yakınlığı, özellikle sıçrama bölgesinde ön plana çıkmaktadır. Şekillerden, sıçrama öncesi ve sıçrama sonrasındaki akım profillerinin tahmininde, SKE ve SST türbülans modellerinin de RSM kadar başarılı olduğu söylenebilir.

Tablo 6. Farklı türbülans modelleri ile su yüzü profili için OKH ve OMGH değerleri

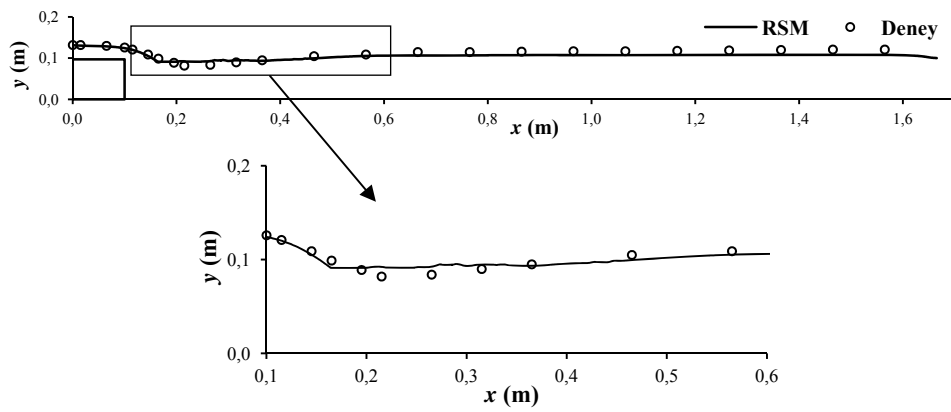
Türbülans Modeli	Tüm Çözüm Bölgesinde ($x=0-1,65$ m arasında)			
	Durum 1		Durum 2	
	OKH (cm^2)	OMGH (%)	OKH (cm^2)	OMGH (%)
SKE	0,4788 ⁽³⁾	5,9553 ⁽³⁾	0,8062 ⁽²⁾	7,0153 ⁽²⁾
SST	0,4641 ⁽²⁾	5,1162 ⁽²⁾	0,9689 ⁽³⁾	7,9593 ⁽³⁾
RSM	0,3847⁽¹⁾	4,7566⁽¹⁾	0,7610⁽¹⁾	6,8050⁽¹⁾



Şekil 11. Durum 1 için deneysel ve sayısal su yüzü profilleri

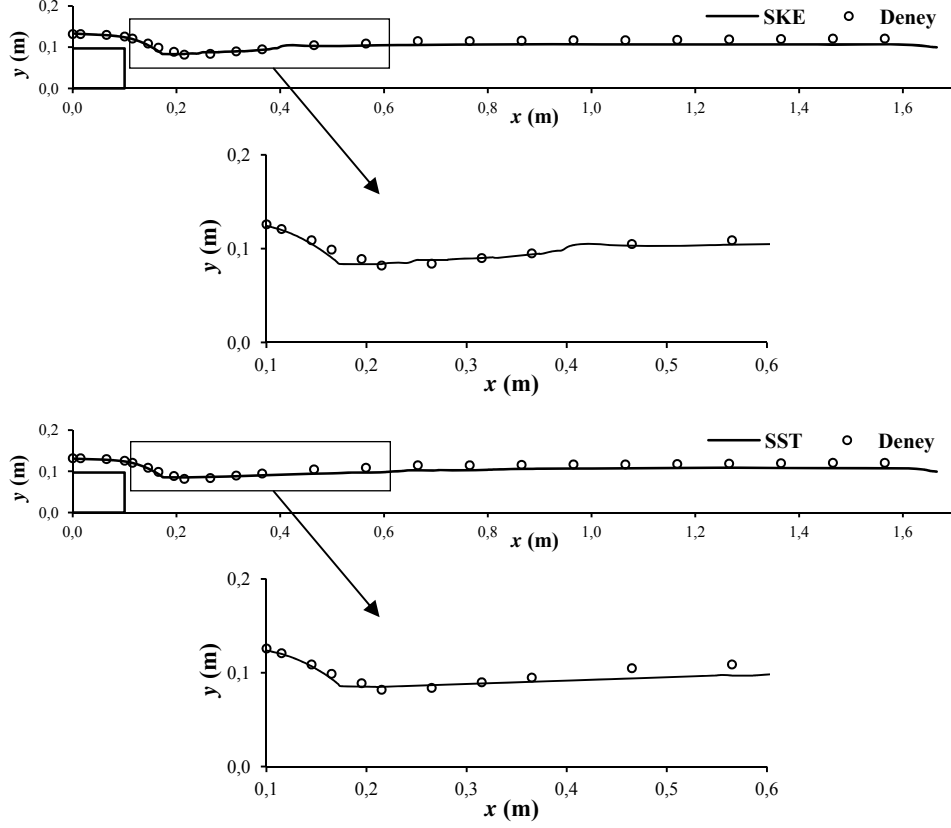


Şekil 11. Durum 1 için deneysel ve sayısal su yüzü profilleri (devam)



Şekil 12. Durum 2 için deneysel ve sayısal su yüzü profilleri

Ani Bir Düşüdeki B-tipi Hidrolik Sıçramanın Sayısal Modellenmesi



Şekil 12. Durum 2 için deneysel ve sayısal su yüzü profilleri (devam)

5.3. Sıçrama Bölgesinin Geometrisi

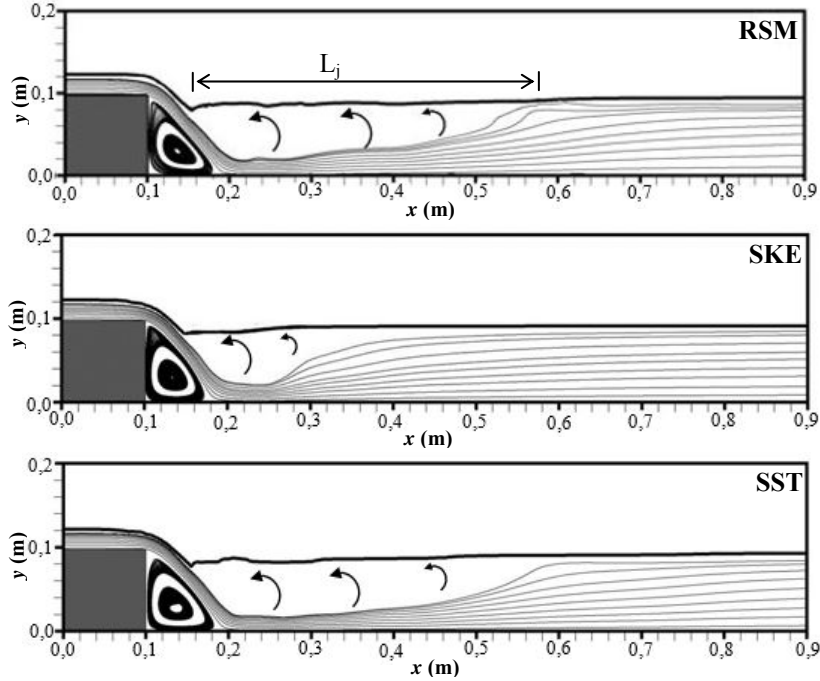
Şekil 13 ve 14’de, SKE, SST ve RSM türbülans modellerinden elde edilen akım çizgilerinin topolojisi görülmektedir. Her üç türbülans modeli ile iki durumda da hesaplanan akım çizgilerinin geometrisi, düşü civarında benzerlikler göstermektedir. Şekillerde görüldüğü gibi, her üç türbülans modeli de düşünün hemen mansabında ve su napının altında oluşması beklenen ters çevri bölgesinin sayısal modellenmesinde başarılı olmuştur. Bununla birlikte, sıçrama bölgesinin uzunluğu göz önüne alındığında, farklılıkların ortaya çıktığı açıkça görülmektedir. Tablo 7’de, Durum 1 ve Durum 2 için ölçülen ve hesaplanan, düşü yüksekliği ile boyutsuzlaştırılmış rölatif sıçrama uzunlukları, L_j/h_d , verilmiştir.

SKE türbülans modeli, eğri yörengeli akımlarda, sınır tabakası ayrılmasının oluştuğu akım koşullarında ve dairesel olmayan kanal içerisinde tam gelişmiş akımlarda başarılı modellemeler yapamamaktadır [20]. SST türbülans modeli, katı sınıra yakın bölgede $k-\omega$ modelini, katı sınırdan uzak bölgelerde $k-\varepsilon$ modelini kullanarak, düşük Reynolds Sayısı bölgelerinde ve sınır tabakasının ayrıldığı akım koşullarında, SKE modeline göre, hız

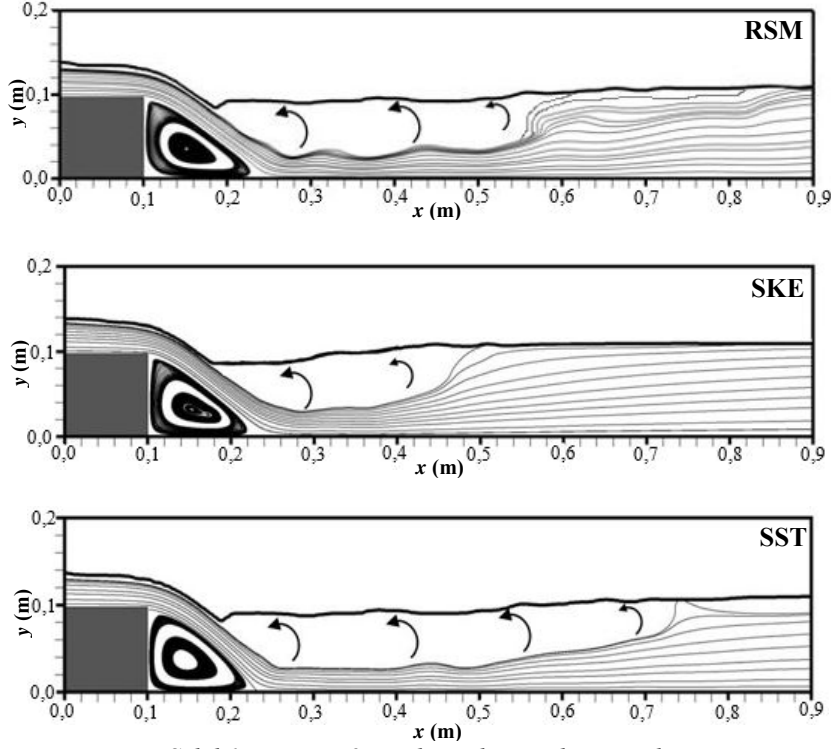
alanını daha iyi tahmin etmek amacıyla geliştirilmiş hibrit bir türbülans modelidir. Buna ilave olarak, eğri yörüngeli akımlarda, jet akımının olduğu koşullarda ve karmaşık akımlarda Reynolds gerilmelerini doğrudan hesaplamasından dolayı RSM modelinin diğer türbülans modellerine göre daha başarılı sonuçlar verdiği rapor edilmiştir [20]. Bu çalışmada ele alınan düşü bölgesinde akım çizgileri eğri yörüngeli olup, ani düşünün mansabında meydana gelen sıçrama bölgesinde, jet akımı ve negatif hızların görüldüğü geri dönüş akımı mevcuttur. Buna göre, sıçrama bölgesinin hidrodinamik karakteri göz önüne alındığında, RSM modeli kullanılan diğer iki modele göre sıçrama bölgesinin uzunluğunu daha iyi tahmin etmiştir. Bu sonuçlar, batmış hidrolik sıçrama ile ilgili yapılmış diğer çalışmalarda elde edilen sonuçlar ile örtüşmektedir [6, 21].

Tablo 7. Deneysel ve sayısal rölatif sıçrama uzunlukları

	Sıçrama Bölgesinin Rölatif Uzunluğu, L_j/h_d			
	Deney	RSM	SKE	SST
Durum 1	3,97	3,97	1,60	4,28
Durum 2	5,00	5,21	2,73	5,62



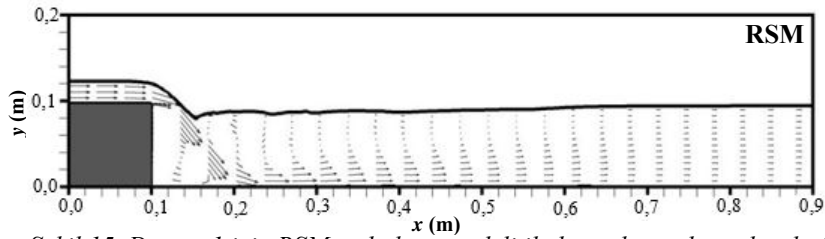
Şekil 13. Durum 1 için hesaplanan akım çizgileri



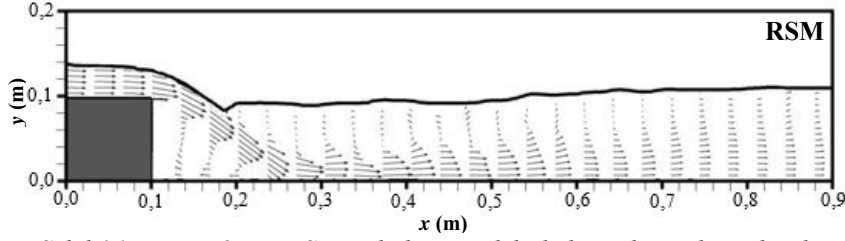
Şekil 14. Durum 2 için hesaplanan akım çizgileri

5.4. Sıçrama Bölgesinde Hesaplanan Hız Alanı ve Türbülans Kinetik Enerjisi

Şekil 15 ve 16'da, sıçrama bölgesi civarında, RSM türbülans modeli ile hesaplanan hız profillerini temsil eden vektörler görülmektedir. Verilen hız vektörlerinden, B-tipi hidrolik sıçrama bölgesindeki iki-boyutlu karmaşık akım yapısının net ve ayrıntılı biçimde izlenmesinin mümkün olduğu görülmektedir. B-tipi hidrolik sıçramanın tipik özelliği olan, düşünün hemen mansabında tabana doğru yönelmiş, yüksek hızlara ve dolayısıyla erozyon gücüne sahip jet akımı, hız vektörlerini içeren profillerden daha net bir biçimde görülebilmektedir. Buradaki hidrolik sıçramanın kontrol edilmesi amacıyla inşa edilecek ani düşünün tasarımında, sıçrama bölgesi karakteristik yapısının bilinmesi, kanal tabanının korunması bakımından önem arz etmektedir.

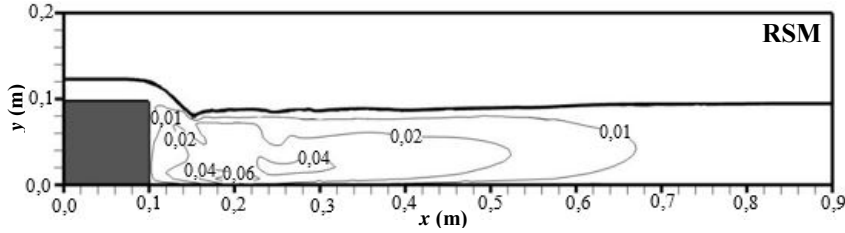


Şekil 15. Durum 1 için RSM türbülans modeli ile hesaplanan hız vektörleri

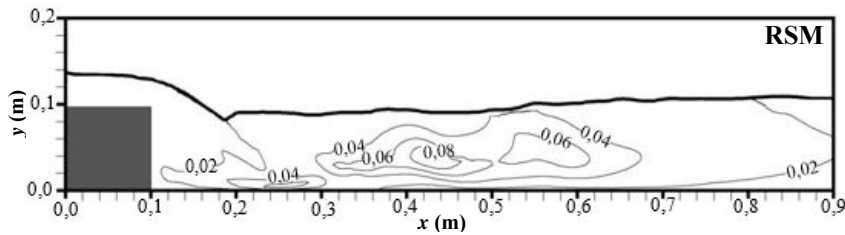


Şekil 16. Durum 2 için RSM türbülans modeli ile hesaplanan hız vektörleri

Şekil 17 ve 18’de, sıçrama bölgesi civarında, RSM türbülans modeli ile hesaplanan türbülans kinetik enerjisi ($k = \overline{u_i' u_i'}/2$) değerleri için eş-düze eğrileri sunulmuştur. Durum 1 ve Durum 2 için türbülans kinetik enerjisinin sayısal pik değerleri sırasıyla 0,06 ve 0,08 m^2/s^2 şeklinde hesaplanmıştır. Şekillerden görüldüğü gibi, türbülans kinetik enerjisinin en fazla yoğunlaşması, jet akımının tabana çarptığı noktanın devamındaki sıçrama sürecine geçiş ile birlikte yaşanmaktadır. Türbülans kinetik enerjisinin pik değeri, mevcut deney koşulları bakımından, düşüden itibaren Durum 1 ve Durum 2 için sırasıyla $x=0,85h_d$ ve $1,46h_d$ kadar mesafede oluşmaktadır.



Şekil 17. Durum 1 için hesaplanan türbülans kinetik enerjisi

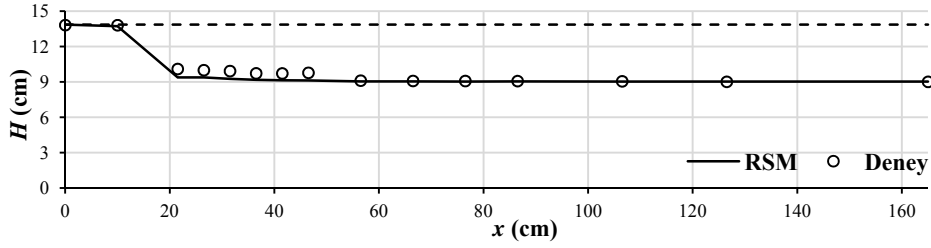


Şekil 18. Durum 2 için hesaplanan türbülans kinetik enerjisi

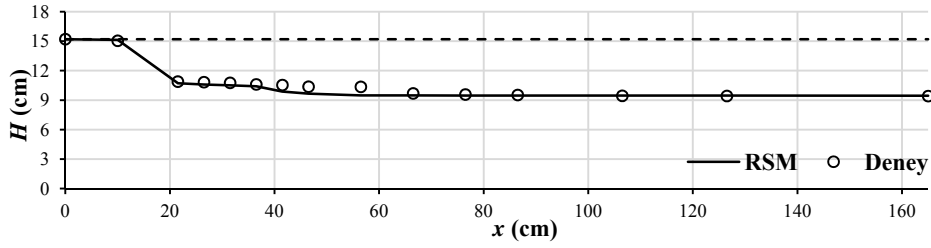
5.5. Akımda Enerji Çizgisi

Şekil 19 ve 20’de sırasıyla Durum 1 ve Durum 2 için çözüm bölgesi boyunca deneysel ve RSM ile hesaplanan enerji çizgilerinin değişimi görülmektedir. Akımın toplam enerji yüksekliği, H , düşüm kanalının tabanı sıfır düzlemi alınarak verilmiştir. Şekillerdeki enerji

çizgilerinin gidişinden görüldüğü gibi, mevcut koşullarda, düşü üzerindeki akım enerjisi, B-tipi sıçramanın sonuna kadar Durum 1 ve Durum 2'de sırasıyla % 30 ve % 35 oranında bir kayıba uğramaktadır. Her iki akım durumunda da düşü noktası ile sıçrama sonu arasındaki akım bölgesinde oluşan enerji kaybının büyük bölümü (yaklaşık % 80 kadarı) sıçrama öncesi kısa bir mesafede, yani düşüm sırasında meydana gelmekte, kalanı (yaklaşık % 20 kadarı) ise hidrolik sıçrama sürecindeki çalkantılardan kaynaklanmaktadır.



Şekil 19. Durum 1 için deneysel ve hesaplanan enerji çizgilerinin değişimi



Şekil 20. Durum 2 için deneysel ve hesaplanan enerji çizgilerinin değişimi

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, ani düşü sonrasında oluşan B-tipi hidrolik sıçramanın bazı karakteristik özellikleri, iki farklı akım durumu için deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Hareketin temel denklemleri, Standart $k-\epsilon$, Shear Stress Transport ve Reynolds Stress türbülans modelleri kullanılarak sonlu hacimler yöntemine dayalı Ansys-Fluent paket programı yardımıyla sayısal olarak çözülmüştür. Kanaldaki su yüzü profili, Akışkan Hacimleri Yöntemi ile hesaplanmıştır. Hesaplama ağı yoğunluğunun bulgular üzerindeki hata nispetini belirlemede Ağ Yakınsama İndeksi yaklaşımı kullanılmıştır. Sayısal hesaplamalardan elde edilen su yüzü profilleri ve hız profilleri deneysel ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Ortalama karesel hata ve ortalama mutlak görelî hata ölçütlerine göre Reynolds Stress Modeli, kullanılan diğer türbülans modellerine göre B-tipi hidrolik sıçramada yüzey profilinin ve hız alanının tahmininde daha başarılı olmuştur. Bu çalışmadaki akım koşullarında, düşü üzerindeki akımın düşüm kanalı tabanına göre olan toplam enerji yüksekliği, düşüm sırasında ve sıçrama sürecinde Durum 1 ve Durum 2 için sırasıyla % 30 ve % 35 oranında bir kayıba uğramaktadır. İncelenen akım problemine ait

sayısal bulguların deneysel doğrulanmasına yönelik olarak yapılan karşılaştırmalardan; Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yöntemlerinin, ani bir düşü sonrasında B-tipi hidrolik sıçrama içeren karmaşık akım davranışının sayısal modellenmesinde başarılı olduğu ve bu tür akım problemlerinin incelenmesinde, laboratuvar deneylerine başvurmadan pratik faydalar sağlayabileceği sonucuna varılmıştır.

Kaynaklar

- [1] Tokyay, N. D., Altan-Sakarya, A. B. ve Eski, E., Numerical simulation of minimum B-jumps at abrupt drops. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 56(9), 1605–1623, 2008.
- [2] Tokyay, N. D. ve Ulubayram, H., Eşiklerde hidrolik sıçrama. *IMO Teknik Dergi*, 1990(1), 9-23, 1990.
- [3] Del Giudice, G., Gisonni, C. ve Rasulo, G., Design of a Scroll Vortex Inlet for Supercritical Approach Flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 136(10), 837–841, 2010.
- [4] Ram, K. V. S. ve Prasad, R., Spatial B-jump at sudden channel enlargements with abrupt drop. *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE*, 124(6), 643–646, 1998.
- [5] Kawagoshi, N. ve Hager, W. H., B-Jump in Sloping Channel, II.. *Journal of Hydraulic Research*, 28(4), 461–480, 1990.
- [6] Gümüş, V., Şimşek, O., Soydan, N. G., Aköz, M. S. ve Kırkgöz, M. S., Tambur Kapak Mansabında Oluşan Batmış Hidrolik Sıçramanın Sayısal Analizi. *International Construction Congress 2012, Isparta*, 2012.
- [7] Gümüş, V., Aköz, M.S., Şimşek, O., Soydan, N. G. ve Kırkgöz, M.S., Experimental and Numerical Modeling of Free Hydraulic Jump Downstream of a Gate. *10th International Congress on Advances in Civil Engineering*, Ankara, 2012.
- [8] Kırkgöz, M. S., Aköz, M. S. ve Öner, A. A., Numerical modeling of flow over a chute spillway. *Journal of Hydraulic Research*, 47(6), 790–797, 2009.
- [9] Öner, A. A., Aköz, M. S., Kırkgöz, M. S. ve Gümüş, V., Experimental Validation of Volume of Fluid Method for a Sluice Gate Flow. *Advances in Mechanical Engineering*, 2012, 10, 2012.
- [10] Oertel, M. ve Bung, D. B., Initial stage of two-dimensional dam-break waves: laboratory versus VOF. *Journal of Hydraulic Research*, 50(1), 89–97, 2012.
- [11] Launder B. E. ve Spalding D., *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*, London. Academic Press, 1972.
- [12] Menter, F. R., 2-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. *AIAA Journal*, 32(8), 1598–1605, 1994.
- [13] Launder, B. E., Reece, G. J. ve Rodi, W., Progress in the development of a Reynolds-stress turbulence closure. *Journal of Fluid Mechanics*, 68(3), 537–566, 1975.

- [14] Wilcox, D.C., Turbulence Modeling for CFD, California. DCW Industries, Inc., 2000.
- [15] Hirt, C. W. ve Nichols, B. D., Volume of Fluid (Vof) Method for the Dynamics of Free Boundaries. Journal of Computational Physics, 39(1), 201–225, 1981.
- [16] Ansys Inc., Release 14.0. www.ansys.com, 2012.
- [17] Roache, P. J., Verification of codes and calculations. AIAA Journal, 36(5), 696 –702, 1998.
- [18] Kırkgöz, M.S. ve Ardıçlıoğlu, M., Velocity profiles of developing and developed open channel flow. Journal of Hydraulic Engineering, 123(12), 1099-1105, 1997.
- [19] Chen, H.C. ve Patel, V.C., Near-wall turbulence models for complex flows including separation. AIAA journal, 26(6), 641-648, 1988.
- [20] Versteeg, H.K. ve Malalasekera, W., An Introduction to Computational Fluid Dynamics: the finite volume method, England. Pearson Education, 2007.
- [21] Gümüş, V., Aköz, M. S., ve Kırkgöz, M. S., Kapak Mansabında Batmış Hidrolik Sıçramanın Deneysel ve Sayısal Modellenmesi. İMO Teknik Dergi ,24 (2), 6379-6397, 2013.