

## Experimental and Numerical Modeling of Open Channel Flow in Various Cross-Section

 Veysel GÜMÜŞ<sup>1</sup>, Oğuz ŞİMŞEK<sup>2,\*</sup>, Şemsettin BAL<sup>3</sup>
<sup>1,2,3</sup> Harran University Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, ORCID:0000-0003-2321-9526, 63000, Haliliye/ŞANLIURFA

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article

Received: 17/07/2019

Revision 04/10/2019

Accepted: 09/11/2019

#### Highlights

- Numerical modeling of the narrowing open channel flow
- Determine of the successful turbulence model in the 3D modeling

#### Keywords

 Open Channel Flows  
 Acoustic Doppler  
 Velocimeter  
 Various Cross-Section  
 Computational Fluid  
 Dynamics  
 Velocity Field

In this study, the open channel flow, interacts with the trapezoidal structure which forms constitutes the narrowing and expansion in the open channel is investigated experimentally and numerically. In experimental studies, velocity field and free surface profile are measured with acoustic doppler velocimeter (ADV) and limnimeter, respectively. Standard  $k-\epsilon$ , Renormalization Group  $k-\epsilon$ , Realizable  $k-\epsilon$ , Standard  $k-\omega$ , Shear Stress Transport, Reynolds Stress Model, Detached Eddy Simulation and Large Eddy Simulation models are used to determine the velocity field and free surface profile.

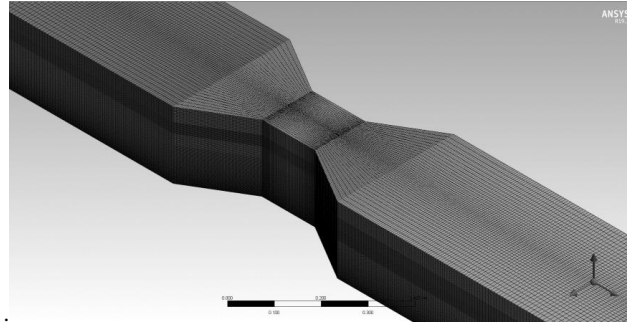


Figure A. Three-dimensional computational grid

**Purpose:** Fluid–structure interaction problems and multiphysics problems in general are often too complex to solve analytically and so they have to be analyzed by means of experiments or numerical simulation. In this study, the flow that interacts with the trapezoidal head structure, which constitutes the narrowing and expansion section in the open channel, has been investigated experimentally and numerically.

**Theory and Methods:** In experimental studies, the velocity field and flow profiles are measured using Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) and limnimeter, respectively. In numerical modeling, different turbulence closure models have been tested for their success in estimating the velocity field and free surface profile. In the evaluation of the model performance to predict experimental results, Mean Square Error (MSE) and Mean Absolute Relative Error (MARE) parameters are used. Grid Convergence Index (GCI) method is used to determine the mesh density and the Volume of Fluids (VOF) method is used to determine the free surface profile.

**Results:** As a result of the study, it is determined that DES model is more successful than used other models in determining velocity field and flow profile according to MSE and MARE.

**Conclusion:** The size of the region where the negative velocity value formed after the contraction zone of the horizontal velocity component ( $u$ ) value decreases as it moves from the bottom of the channel towards the surface. It was observed that the density of the numerical velocity vectors increased as it progressed from the bottom of the channel towards the free surface. In addition, it is seen from the results obtained that numerical calculation methods can be used successfully in solving such flow problems.



## Değişken Enkesitli Açık Kanal Akımının Deneysel ve Sayısal Modellemesi

Veysel GÜMÜŞ<sup>1</sup>, Oğuz ŞİMŞEK<sup>2</sup>, Şemsettin BAL<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 63000, Haliliye/ŞANLIURFA

### Öz

Bu çalışmada, açık kanal içerisinde daralma ve genişleme kesiti oluşturan trapez başlıklı yapı ile etkileşimde bulunan akım, deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda, hız alanı Akustik Doppler Hız Ölçer (Acoustic Doppler Velocimeter-ADV) ve su yüzü profili ise limnometre yardımıyla ölçülmüştür. Sayısal modellemelerde farklı türbülans kapatma modelleri kullanılarak, bu modellerin akım alanını ve su yüzü profilini tahmin etmedeki başarısı test edilmiştir. Kullanılan modellerin deneysel sonuçları tahmin etme performansları, Ortalama Karesel Hata (OKH) ve Ortalama Mutlak Göreceli Hata (OMGH) parametrelerine göre değerlendirilmiştir. Sayısal model sonuçları üzerinde etkisinin olduğu bilinen hesaplama ağının analizinde Ağ Yakınsama İndeksi (Grid Convergence Index-GCI) yöntemi, serbest su yüzünün belirlenmesinde ise Akışkan Hacimleri Yöntemi (Volume of Fluids-VOF) kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, akım hız alanı ve serbest su yüzü profilinin belirlenmesinde elde edilen OKH ve OMGH değerlerine göre, DES modelinin kullanılan diğer modellere kıyasla daha başarılı sonuç verdiği belirlenmiştir.

### Experimental and Numerical Modeling of Open Channel Flow in Various Cross-Section

#### Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi*  
*Başvuru: 17/07/2019*  
*Düzeltilme: 04/10/2019*  
*Kabul: 09/11/2019*

#### Anahtar Kelimeler

*Açık Kanal Akımları*  
*Akustik Doppler Hız Ölçer*  
*Değişken Enkesit*  
*Hesaplamalı Akışkanlar*  
*Dinamiği*  
*Hız Alanı*

#### Keywords

*Open Channel Flows*  
*Acoustic Doppler*  
*Velocimeter*  
*Various Cross-Section*  
*Computational Fluid*  
*Dynamics*  
*Velocity Field*

#### Abstract

In this study, the flow that interacts with the trapezoidal head structure, which constitutes the narrowing and expansion section in the open channel, has been investigated experimentally and numerically. In experimental studies, the velocity field and flow profiles are measured using Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) and limnimeter, respectively. In numerical modeling, different turbulence closure models have been tested for their success in estimating the velocity field and free surface profile. In the evaluation of the model performance to predict experimental results, Mean Square Error (MSE) and Mean Absolute Relative Error (MARE) parameters are used. Grid Convergence Index (GCI) method is used to determine the mesh density and the Volume of Fluids (VOF) method is used to determine the free surface profile. As a result of the study, it is determined that DES model is more successful than used other models in determining velocity field and flow profile according to MSE and MARE.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Akarsu veya açık kanal akımlarının yapı ile etkileşimleri karmaşık bir akım problemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Yapı akım etkileşiminin söz konusu olduğu akımlarda yapının akım alanında meydana getirdiği daralma veya genişleme durumları akım alanı, akım karakteristikleri ve akım profili gibi parametrelerde değişikliğe neden olur. Ayrıca, doğal akarsu veya yapay kanallar içerisine çeşitli amaçlar için inşa edilmek zorunda kalınan yapıların etrafındaki akım alanında meydana gelen değişimler, doğal akarsu rejimini değiştirmenin yanı sıra yatak malzemesinin de topolojisini değiştirir. Bu değişimlerden dolayı olumsuzlukların yaşanmaması için, akım alanına yapılmak zorunda olan yapıların geometrik özelliklerinin yanı sıra hidrolik özelliklerinin de bilinmesi gerekmektedir. Ulaşımında kullanılan köprülerin statik ve dinamik projelendirilmesinde hata bulunmamasına rağmen ülkemizde yaşanan köprü yıkılmalarının ya da göçmelerinin en büyük nedeni, yapıya etki eden akımın hidrolik özelliklerinin ve yapı üzerindeki etkilerinin göz ardı edilmesi veya doğru analiz edilmemesinden kaynaklandığı görülmektedir.

Hidrolik yapıların projelendirilme aşamasında, yapının ve akımının statik, dinamik ve hidrolik açıdan projelendirilmesi için laboratuvarlarda deneysel model çalışmalarının yanı sıra, bilgisayar ortamında sayısal model çalışmaları da yapılmaktadır. Ayrıca, yapı ile etkileşimde bulunan akımların hidrolik özelliklerinin teorik olarak belirlenebilmesi için çeşitli ampirik formüller de geliştirilmiştir. Araştırmacılar tarafından yapı akım etkileşimi gibi karmaşık akım problemlerinin sayısal olarak çözümünde kullanılan bazı paket programlar geliştirilmiştir. Sayısal model çalışmaları fiziksel model çalışmalarına kıyasla, daha az zaman ve maliyet gerektirmesi, insan gücüne daha az ihtiyaç duyması ve akım ile ilgili daha fazla bilgiyi daha pratik olarak elde etme imkânı verdiği için büyük avantajlara sahiptir. Bunun yanı sıra, sayısal modeller farklı akım ve/veya yapı koşulları altında tekrar edilmesi gereken analizler içinde oldukça elverişli ve pratiktir. Bu avantajlarından dolayı fiziksel model çalışmalarına kıyasla sayısal model çalışmaları araştırmacılar ve uygulayıcılar tarafından oldukça sık tercih edilmektedir. Ho ve ark. [1], dolusavak üzerinden geçen akımın özelliklerini teorik olarak incelemek amacıyla iki ve üç boyutlu sayısal model çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Sayısal modelin doğrulanması bağlamında hesaplama bulgularını, Warragamba, Hume ve Buffalo Barajlarının dolusavaklarında akım profilleri ile ilgili yaptıkları ölçümlerle karşılaştırmışlar ve karşılaştırma sonucunda sayısal model ve deneysel ölçümlerin uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Daneshkhan ve Vosoughifar [2], çalışmalarında Fluent yazılımı içerisinde bulunan farklı türbülans modellerini kullanarak ogee profilli dolusavak üzerinden geçen akımı sayısal olarak analiz etmişlerdir. Gauss-Seidel yakınsama kriterini esas alarak sayısal çözümlerde zaman adımını 0.01 s olarak belirlemişlerdir. RNG türbülans modeli kullanılarak yapılan sayısal analiz bulguları ile deney bulguları arasındaki göreceli hata yüzdesini 9,687 olarak hesaplamışlardır. Ayrıca, diğer bir sayısal analiz yazılımı olan Flow 3D ile elde edilen bulguların, Fluent sonuçlarıyla ve deneysel bulgularla uyumlu olduğu görülmüştür. Soydan ve ark. [3], tabandan belirli bir mesafe yukarıya yerleştirilmiş silindirik savak ile etkileşimde bulunan açık kanal akımını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Akımı idare eden denklemleri iki boyutlu olarak RNG, SST ve RSM türbülans kapatma modellerini kullanarak çözmüşler ve sayısal modellemelerde su yüzü profilini belirlemek için VOF yöntemini kullanmışlardır. Lazer Doppler Anemometresi (LDA) kullanarak elde ettikleri deneysel hız profillerini sayısal model sonuçları ile karşılaştırmalarından, RNG türbülans modeli kullanılarak elde edilen sonuçların kullanılan diğer iki modele kıyasla deneysel verilerle daha uyumlu olduğu rapor edilmiştir. Soydan ve ark. [4], köprü ayağı etrafındaki üç boyutlu akımın hız alanını LDA ile ölçmüşler ve aynı akım şartları için temel denklemleri ANSYS-Fluent ile sayısal olarak çözmüşlerdir. Sayısal modellemelerde, SKE, RNG ve RKE türbülans modellerini ve serbest su yüzü profillerini belirlemede ise VOF yöntemini kullanmışlardır. Sayısal modellemelerde kullanılacak ağ yapısının sayısal sonuçlara olan etkisini incelemek için GCI yönteminden yararlanmışlardır. Çalışma sonucunda, sayısal olarak elde edilen hız alanı ve su yüzü profillerini deneysel ölçümlerle karşılaştırmışlar ve RKE modelinin köprü ayağı etrafındaki akım alanını belirlemede diğer modellere göre daha başarılı olduğunu tespit etmişlerdir. Özmen-Çağatay ve Kocaman [5], mansap bölgesinde ani daralma bulunan kuru kanal üzerinde baraj yıkılması durumunu deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Dikdörtgen, yatay, pürüzsüz ve prizmatik açık kanalda oluşan baraj yıkılması akımının ölçümlerini dijital fotoğraflama tekniği deneysel olarak belirlemişlerdir. RANS tabanlı çözüm yapan k- $\epsilon$  türbülans modelini kullanarak gerçekleştirdikleri sayısal modelleme sonuçları ile deneysel verileri karşılaştırmışlar ve bu karşılaştırma neticesinde, sonuçların birbiriyle uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Huang ve ark. [6], 90o birleştirme açısına sahip açık kanal akımının farklı debi durumları için deneysel ve sayısal modellemesi yapmıştır. Farklı akım koşulları altında elde edilen deneysel veriler üç boyutlu sayısal model sonuçlarını doğrulamak için kullanılmıştır. Deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılmasından, bu tür akım problemlerinde sayısal modelleme sonuçlarının deneysel ölçümler ile oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Daha sonraki çalışmalarda farklı bağlantı tipinin veya açısının değişmesi durumunda da sayısal modelin güvenle kullanılabileceği ifade edilmiştir. Bell ve ark. [7], bir baraj yıkılmasından sonra oluşan akımın düz ve kavisli kanallarda düzensiz akışlar için geçici rezervuar derinliklerinde elde edilen deneysel veriler elde etmişlerdir. Su seviyesi değişimi, mansap kanalındaki beş istasyonda ve rezervuardaki altı yerde, dalga cephelerinin plan görüntüleri mansap kanalındaki üç istasyonda kaydedilmiştir. Dalgaların video görüntüleri gölgeleme yoğunluklarına göre elektronik olarak dijital bilgilere çevrilmiştir. Ölçümler, memba rezervuar derinliğini, kanal derinliğini ve kanal pürüzlülüğünü değiştirerek çok çeşitli başlangıç koşulları için gerçekleştirilmiştir. Aköz ve ark. [8], tabana farklı kısmi oranlarda gömülmüş silindir üzerinden geçen akımı farklı Reynold sayıları için sayısal olarak modellemişlerdir. Sayısal çözümlemelerde SKE, RNG, RKE, SST, Modifiye k- $\omega$  (MKW), LES ve DES türbülans kapatma modellerini iki ve üç boyutlu modelleme kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, SST türbülans kapatma modelinin akım alanının belirlemede daha iyi

sonuçlar verdiğini ve silindir üzerine gelen kuvvetlerin belirlenmesinde DES modelinin Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemlerini çözen modellere göre daha başarılı olduğunu ifade etmişlerdir. Yukarıda özetlenen çalışmalar dikkate alındığında değişik türdeki yapı akım etkileşimi problemlerinin sayısal modellenmesinde farklı türbülans modellerinin daha başarılı olduğu görülmektedir [9-13].

Bu çalışmada, açık kanal içerisinde daralma ve genişleme kesiti oluşturan trapez başlıklı yapı ile etkileşimde bulunan açık kanal akımı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda, akım alanı akustik doppler hız ölçer (ADV) ve akım profili limnometre yardımıyla ölçülmüştür. Standart  $k-\epsilon$  (SKE), Renormalization Group  $k-\epsilon$  (RNG), Realizable  $k-\epsilon$  (RKE), Standart  $k-\omega$  (SKW), Kayma gerilmesi taşınımı (Shear Stress Transport-SST), Reynolds gerilme modeli (Reynolds Stress Model-RSM) ve Bağımsız Girdap Benzetimi (Detached-Eddy Simulation-DES) ve Büyük Girdap Benzetimi (Large Eddy Simulation-LES) modelleri kullanılarak, akım hız alanı ve su yüzü profili belirlenmiştir.

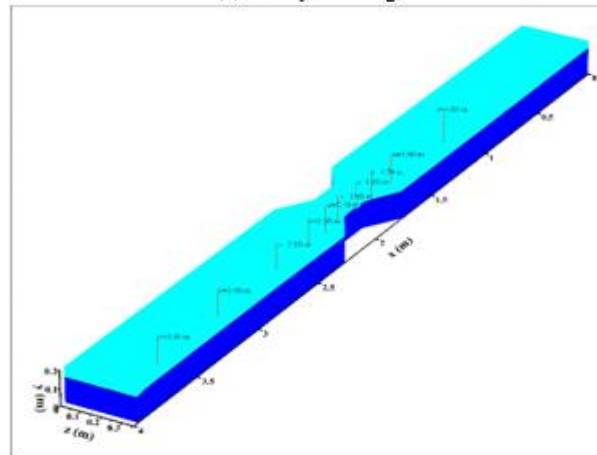
## 2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

### 2.1. Deneyler (Experiments)

Deneyler, Harran Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarında Şekil 1-a'da verilen açık kanal modelinin orta kısmında bir daralma yapısı oluşturularak yapılmıştır. Açık kanal modelinin, tabanı ve yan duvarları camdan imal edilmiştir. Dikdörtgen kesitli kanalın boyutları  $4.00 \times 0.35 \times 0.35$  m'dir. Suyun sirkülasyonu bir santrifüj pompa ile boyutları  $1.20 \times 0.70 \times 0.50$  m olan iki yer haznesinden, pompanın güç ayarı Schneider marka hız kontrol cihazı ile yapılmaktadır. Debi miktarı ise Altıgen marka cihaz ile  $\pm\%0.6$   $m^3$ /saat hassasiyette elektronik debi ölçüm cihazı üzerinden okunmaktadır. Trapez kesitli daralma yapısının taban uzunluğu 0.49 m, kret genişliği 0.16 m, kret yüksekliği 0.10 m'dir. Daralma ve genişleme kesiti oluşturan bu yapı kanal başlangıcından 1.70 m mesafeye yerleştirilmiştir.



(a) Deney düzeneği



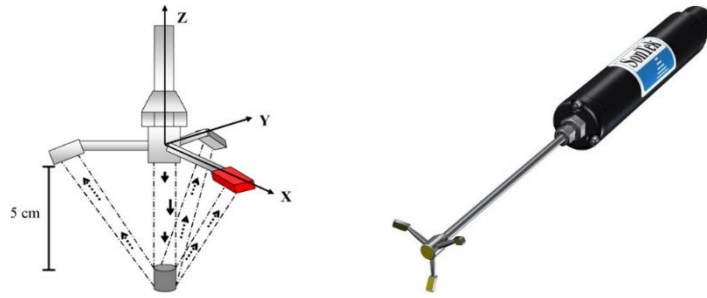
(b) Ölçüm noktaları

**Şekil 1.** Deney düzeneği ve ölçüm noktaları

Kanal üzerine yerleştirilmiş modelin akım karakteristikleri Şekil 2'te ADV cihazı ile yapılmıştır. Bu cihaz kanal üzerinde oluşturulan ray sistemi ile yatay ekseninde manuel olarak hareket etmekte, düşey ekseninde ise

hassas ölçüm alınabilmesi için bir elektronik sistem ile kontrol edilmektedir. Akımda pompa kapasitesinin en büyük olduğu debi için Şekil 1-b'de gösterilen  $x=1.00, 1.50, 1.70, 1.80, 1.95, 2.10, 2.20, 2.50, 3.00$  ve  $3.50$  m kesitlerinde hız ölçümleri alınmıştır. Ölçüm aletinin özelliğinden dolayı su yüzünün  $0.05$  m aşağısında ölçüm yapılabilmektedir.

Bu çalışma kapsamında yapılan deneylerde giriş debisi  $Q=10.3$  l/s, memba bölgesinde elde edilmiş akım özelliklerine göre  $Fr$  ( $Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}}$ ) = 0.148 ve  $Re$  ( $Re = \frac{4Vh}{\nu}$ ) = 116 000 olarak hesap edilmiştir. Burada,  $V$  kesit ortalama hızı,  $g$  yerçekimi ivmesi,  $h$  su derinliği ve  $\nu$  kinematik viskozitedir.



Şekil 2. Akustik doppler hız ölçer cihazı (ADV)

## 2.2. Temel Denklemler (Governing Equations)

Türbülanslı akımda kütle ve momentumun korunumunu idare eden temel denklemler, yani süreklilik ve Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

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

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

Bu denklemlerde ifade edilen  $u_i$  ortalama hız bileşenlerini,  $p$  ortalama basıncı,  $\mu$  akışkanın dinamik viskozitesini,  $\rho$  akışkanın yoğunluğunu,  $\rho g_i$  yerçekiminin sebep olduğu kütleli kuvveti,  $t$  zamanı,  $\tau_{ij}$  ise türbülans (Reynolds) gerilmelerini ifade etmektedir. Reynolds gerilmeleri Boussinesq yaklaşımına göre aşağıdaki 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 sapıncıları ve  $\mu_t$  türbülans viskozitesi olup  $\delta_{ij}$  Kronecker deltasıdır ( $i=j$  için  $\delta_{ij}=1$ ).

## 2.3. Türbülans Kapatma Modelleri (Turbulence Closure Models)

RANS denklemlerinde üç boyutlu akışta bir basınç, üç hız, altı türbülans kayma gerilmesi bileşeni olmak üzere toplam 10 adet bilinmeyen bulunur. Buna karşılık üç RANS denklemi ve bir süreklilik denklemi olmak üzere sadece dört 4 denklem bulunduğundan denklem sistemi çözülememektedir. Bu sorunun çözülmesi ve denklem sisteminin kapatılabilmesi amacıyla farklı türbülans kapatma modelleri geliştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında Standart k- $\epsilon$  (SKE) [14], Realizeble k-  $\epsilon$  (RKE) [15], Renormatization Group k-  $\epsilon$  (RNG) [16, 17], Standart k- $\omega$  (SKW) [18], Kayma gerilmesi taşınımı (Shear Stress Transport-SST) [19], Reynold Gerilme Modeli (Reynolds Stress Model-RSM) [20], Bağımsız Girdap Benzetimi (Detached-Eddy Simulation-DES) [21] ve Büyük Girdap Benzetimi (Large Eddy Simulation-LES) [22] modelleri kullanılmıştır.

## 2.4. Ağ Yakınsama İndeksi (Grid Convergence Index-GCI)

GCI yöntemi ile sayısal çözümlerin ayrıklaşma duyarlılığını belirlemek amacıyla kullanılmaktadır [23]. GCI yöntemi, farklı ağ yapısına ait sayısal sonuçların karşılaştırılmasını içermektedir. Böylece, hesaplama ağı ile elde edilen sayısal bulguların yakınsaması belirlenmekte ve ağ geometrisine bağlı belirsizliğin tahmini yapılabilmektedir. Bu yöntemin kullanılabilmesi için en az üç farklı yoğunluktaki hesaplama ağı kullanılmaktadır [24]. Buna göre;

$$d_3 < d_2 < d_1, e_{12} = u_1 - u_2, e_{23} = u_2 - u_3, r_{12} = \frac{d_1}{d_2}, r_{23} = \frac{d_2}{d_3} \quad 4$$

$$p = \frac{1}{\ln(r_{23})} \ln \left( \frac{(r_{23}^p - 1)e_{12}}{(r_{12}^p - 1)e_{23}} \right) \quad 5$$

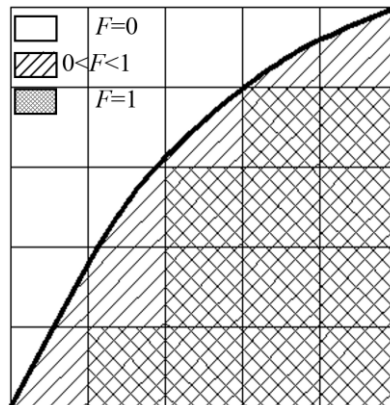
$$E_{23} = \frac{u_3 - u_2}{u_3} \quad 6$$

$$GCI_{23}^{ince} = F_s \frac{|E_{23}|}{r_{23}^p - 1} \quad 7$$

ifadeleri ile verilen değerler belirlenir. Yukarıdaki denklemlerde 1, 2 ve 3 indisleri sırasıyla kaba, orta ve ince ağ hassasiyetli parametreleri,  $u$ , akım hızını  $p$ : doğruluk mertebesi,  $F_s$  güvenlik faktörünü temsil etmektedir. Buna göre  $r_{23}, r_{12} \geq 1.10$  olmalı ve üç veya daha fazla ağ yapısı için güvenlik faktörü  $F_s$ , 1.25 olarak önerilmektedir [23, 25]. İşlem sonucunda hesaplanan  $GCI_{23}^{ince}$  değeri %2'den daha küçük ise ağa bağlı sayısal hesaplama sonuçlarının kabul edilebilir hata sınırlarında olduğu ve hesaplama hassasiyetinin ağ yoğunluğundan bağımsızlaştığı sonucuna varılır.

## 2.5. Akışkan Hacimleri Yöntemi (Volume of Fluid Method-VOF)

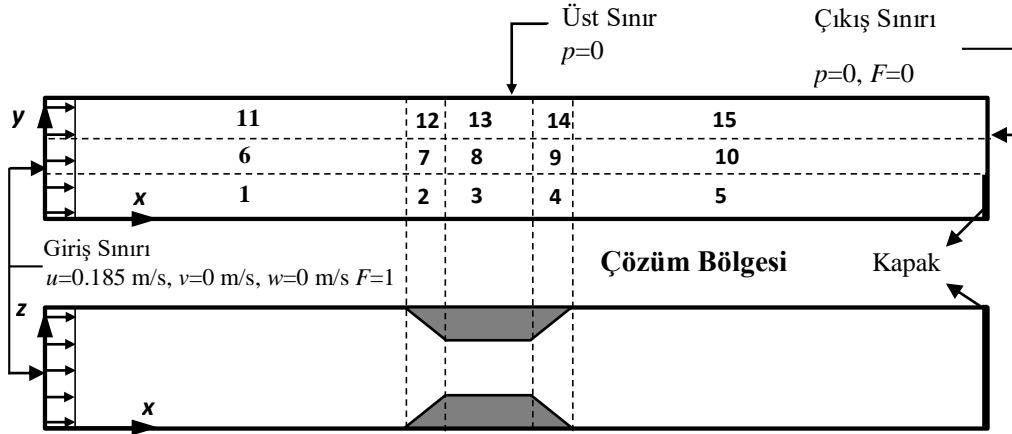
VOF yöntemi, birbirine karışmayan iki veya daha fazla akışkan arasındaki ara yüzeyin şeklinin belirlenebilmesi için çözüm ağına uygulanabilir [26]. Bu çalışma kapsamında su-hava ara kesitinin belirlenebilmesi için kullanılan bu yöntem, hücrelerin boş, kısmen ya da tam su ile dolu olduğunu belirlemede kullanılmaktadır. Buna göre, hacimsel doluluk oranını temsil etmesi için bir akışkan hacmi ( $F$ ) tanımlanır.  $F=1$  için ağ elemanı tam dolu,  $F=0$  için boş (hava ile dolu) ve  $0 < F < 1$  için ağ elemanı kısmen dolu olmaktadır (Şekil 3). VOF yönteminde ara kesitin hesaplanmasında farklı yaklaşımlar bulunmakla beraber, bu çalışmada "Geo-Reconstruct" yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yöntem ile ilgili detaylar Gümüş [26]'te verilmiştir.



Şekil 3. Ağ elemanlarının doluluk oranları

## 2.6. Çözüm Bölgesi ve Sınır Şartları (Solution Domain and Boundary Conditions)

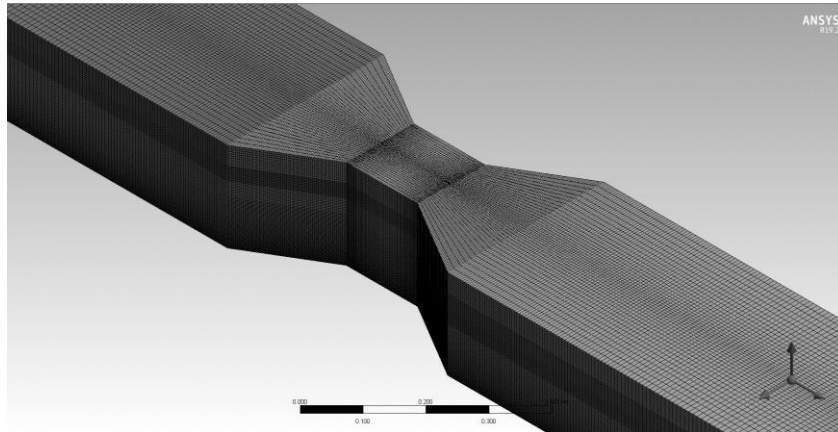
Şekil 4, değişken en kesitli açık kanal akımının sayısal modeli için kullanılan çözüm bölgesi ve sınır şartlarını göstermektedir.  $x$ ,  $y$ ,  $z$  koordinat sisteminin orijini, çözüm bölgesinin sol alt köşesi olarak alınmıştır. Şekilde verilen çözüm bölgesi toplam 15 alt bölgeye ayrılmış ve çözüm bölgesinin üst sınırı ve çıkış bölgesi sınır şartı  $p=0$ , kanal tabanında ve daralma ve genişleme yapısının yüzeylerinde sıfır-hız sınır şartı, yani  $u=0$ ,  $v=0$  olarak tanımlanmıştır. Giriş sınır şartı olarak  $v$  ve  $w$  hızları 0 olarak alınmış olup, yatay hız bileşeni deneysel verilerden hesap edilerek  $u=0.185$  m/s olarak alınmıştır. Zamana bağlı çözüm sürecinde, başlangıç şartı olarak,  $t=0$  anında boş olan çözüm bölgesinin giriş sınırında VOF yöntemi için  $F=1$ , diğer bölgeler ve çözüm bölgesinin çıkış sınırında ise  $F=0$  alınmıştır.



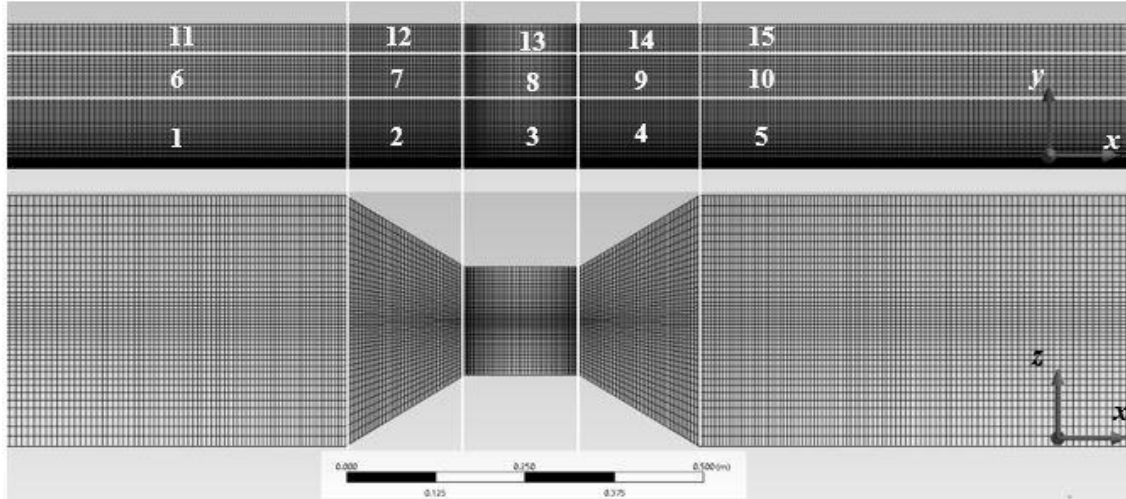
Şekil 4. Sayısal çözüm bölgesi ve sınır şartları

## 2.7. Hesaplama Ağının Belirlenmesi (Determination of Computational Grid)

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği problemlerinde oluşturulacak modelin ağ yapısının nümerik bulgular üzerinde oldukça fazla etkisi bulunmaktadır [9-13]. Bu nedenle hesaplama ağı tasarlanırken belli bir metodoloji kullanılması oldukça önem arz etmektedir. Bu çalışmada çözüm bölgesi, Şekil 5'te üç boyutlu yapısı ve Şekil 6'da verilen  $xy$  ve  $xz$  eksenlerine göre sayısal hesaplama ağında da görüldüğü gibi 15 alt bölgeye ayrılmış ve ağ yapısının sayısal çözüm değerleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Meydana gelecek ayrıklaştırma hatasının tespiti için üç farklı yoğunlukta hesaplama ağı oluşturulmuş ve ağ yapısının her bir alt bölgesindeki eleman sayısı yaklaşık olarak %25 ve %50 oranında artırılarak üç farklı yoğunluktaki hesaplama ağları kullanılmıştır. Tablo 1'de, sayısal hesaplamalarda kullanılan üç farklı yoğunluktaki ağ yapısı için eleman sayıları verilmiştir. Z doğrultusunda 40 parçaya bölünmüştür. Ayrıca katı yüzeylere doğru ağ yapısı sıklaştırılarak ilk hesap ağının viskoz alt tabaka içerisinde kalması sağlanmıştır.



Şekil 5. Üç boyutlu sayısal hesaplama ağı



Şekil 6. xy ve xz eksenlerine göre sayısal hesaplama ağı

Tablo 1. Farklı yoğunluktaki hesaplama ağlarına ait bölgesel eleman sayıları

Bölge	Ağ 1 (Kaba)	Ağ 2 (Orta)	Ağ 3 (İnce)	Bölge	Ağ 1 (Kaba)	Ağ 2 (Orta)	Ağ 3 (İnce)	Bölge	Ağ 1 (Kaba)	Ağ 2 (Orta)	Ağ 3 (İnce)
1	40x110	50x140	60x170	6	12x110	16x140	20x170	11	6x110	8x140	10x170
2	40x40	50x50	60x60	7	12x40	16x50	20x60	12	6x40	8x50	10x60
3	40x40	50x50	60x60	8	12x40	16x50	20x60	13	6x40	8x50	10x60
4	40x40	50x50	60x60	9	12x40	16x50	20x60	14	6x40	8x50	10x60
5	40x110	50x140	60x170	10	12x110	16x140	20x170	15	6x110	8x140	10x170

Ağ yapısının sıklığının yeterliliği yani sayısal çözümün ağ yapısından bağımsız olup olmadığının belirlenebilmesi için GCI yöntemi ile oluşturulan Ağ 1 (Kaba), Ağ 2 (Orta) ve Ağ 3 (İnce) değerlendirilmiştir. GCI yöntemi ile yapılan analizler sonucunda Ağ 3 ile oluşturulan ağ yapısı ile hesaplanan hız değerlerinin Gümüş (2014)'te verilen yakınsama değeri olan %2'den küçük olduğu belirlenmiştir. Böylece çözüm hassasiyetinin ağ yapısından bağımsızlaştığı sonucuna varılmıştır.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

#### 3.1. Deneysel ve Hesaplanan Hız Profilleri (Experimental and Numerical Velocity Profiles)

ADV kullanılarak elde edilen deneysel hız profillerinin, sayısal çözüm sonrası elde edilen hız profilleri ile karşılaştırılmasında performans kriteri olarak sırasıyla Denklem 8 ve 9'da verilen Ortalama Karesel Hata (OKH) ve Ortalama Mutlak Göreceli Hata (OMGH) parametreleri kullanılmıştır.

$$OKH = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (u_d - u_{\square})^2 \quad 8$$

$$OMGH = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left( \frac{|u_d - u_{\square}|}{u_d} \right) \quad 9$$

Burada,  $u_d$  ve  $u_h$  sırasıyla deneysel ve sayısal hız değerini, N ise hız profilindeki nokta sayısını ifade etmektedir.

Tablo 2'de, kanal boyunca farklı kesitlerde, Denklem 10 kullanılarak elde edilen OKH değerleri verilmiştir. Elde edilen en küçük OKH değerleri çizelgelerde koyu renkle yazılmıştır. Bu OKH değerleri kesitteki en başarılı olan türbülans modelini göstermektedir. OKH değerleri üzerindeki rakamlar ise o kesitteki başarı sıralamasını göstermektedir.



Tablo 2'ye göre, DES modeli  $x=1.00, 2.10, 3.00$  ve  $3.50$  m'de hesaplanan hız profillerinde en başarılı sonucu verirken, SKE modeli ise  $x=1.50, 1.70$  ve  $1.95$  m'de en başarılı sonucu vermiştir. SKW  $x=1.80$  m, LES  $x=2.20$  m ve RKE  $x=2.50$  m'de deneysel sonuçlara en yakın sonuçları vermişlerdir. Kanalın tamamı için ele alınan kesitlerin ortalamasına göre değerlendirme yapılacak olursa DES modeli  $14.34 \text{ cm}^2/\text{s}^2$  OKH değeri ile en başarılı model olurken, hiçbir kesitte en başarılı model olmamasına rağmen RNG modeli  $18.83 \text{ cm}^2/\text{s}^2$  OKH değeri ile en başarılı ikinci model olmuştur. Tüm kanal boyunca başarı sıralaması ise DES, RNG, SKE, RKE, LES, SKW, RSM ve SST şeklinde oluşmuştur. Kanalın akım profilinin hızlı değiştiği, daralma ve genişleme bölgesinde OKH değerlerine göre, tüm kanalda olduğu gibi yine DES modeli en başarılı model olurken, tüm kanal boyunca başarılı olmayan RSM modeli en başarılı ikinci model olmuştur. Daralma ve genişleme bölgesinde başarı sıralaması DES, RSM, LES, RNG, RKE, SKW, SKE ve SST şeklinde oluşmuştur.

Tablo 2.'ye göre, daralma bölgesinden etkilenmeyen ve kararlı bir akım olarak değerlendirilebilecek kanal başlangıcında ölçülen hız profilleri,  $x=1.00$  ve  $1.50$  m'de neredeyse tüm modeller başarılı sonuçlar vermiştir. LES modeli dışındaki modellerde  $x=1.00$  m'de  $4 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ 'den,  $x=1.50$  m'de ise  $2 \text{ cm}^2/\text{s}^2$  gibi bir OKH değeri hesaplanırken, daralma kesitinin başlangıcında hızların artmasından dolayı OKH değerlerinde bir artış meydana gelmiş ve  $x=1.70$  m'de  $3 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ ,  $x=1.80$  m'de  $9 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ 'nin altında bir değer hesaplanmıştır. Hız değerlerinin en yüksek olduğu ve en fazla daralmanın olduğu bölge olan  $x=1.95$  m'de yine LES dışındaki tüm modeller ile elde edilen hız profillerinde  $12 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ 'nin altında bir OKH değeri hesaplanmıştır. Bu da LES dışındaki tüm modellerin kanal başlangıcından daralmadan sonra ve tekrar genişleme kesitine kadar benzer sonuçlar verdiği ve deneysel sonuçlar ile uyumlu olduğu görülmüştür. Ancak genişleme kesitinden sonra ( $x=2.10$  m kesitinden itibaren) modellerin performansının azaldığı ve bu bölgeden sonra deneysel sonuçlarla olan uyumun ciddi bir şekilde azaldığı görülmüştür. Genişleme sonrası meydana gelen ayrılma bölgelerinin tahmininde türbülans modeli performanslarının yüksek olmadığı diğer bir ifade ile ayrılma bölgelerini tahmininde türbülans modelleri başarılı olamamıştır. Özellikle girdap etkilerini modellemede başarılı olan RNG modeli bu bölgede diğer modellere nazaran nispeten daha iyi sonuç vermiştir. Suyun yüksekliğini ayarlamak için kanal sonuna yerleştirilen kapağın akım üzerine etkisini modellemede DES ve RNG dışındaki modellerin performansının oldukça düşük olduğu görülmüştür.

Tablo 3'te ise yine kanal orta eksenini boyunca ölçülen ve sayısal olarak elde edilen hız profillerine göre hesaplanan OMGH değerleri verilmiştir. Bu değerlerin OKH değerinden farkı, hata oranını yüzde cinsinden ifade etmesidir. Böylece elde edilen sonuçlar, hız değerlerinin büyüklüğünden bağımsız olabilmektedir. Buna göre, kanal başlangıcında elde edilen hız profillerinde ( $x=1.00$  ve  $1.50$  m) tüm modellerin hata değerinin %8'den düşük olduğu ve en başarılı modelin  $x=1.00$  m'de RSM,  $x=1.50$  m'de ise SKE olduğu görülmüştür. OKH değerlerine göre bu iki kesitte deneylerle en uyumlu model SKE çıkarken, OMGH değerine göre ise RSM çıkmasının nedeni, aralarındaki farkın oldukça düşük olmasıdır. Daralma başlangıç kesitleri olan  $x=1.70$  ve  $1.80$  m kesitlerinde elde edilen OMGH değerine göre, en başarılı model, sırasıyla, SKE ve SKW, akımın akım alanında en fazla hızlandığı nokta olan  $x=1.95$  m kesitinde ise SKW olarak belirlenmiştir. Akımın en hızlı olarak geliştiği, daralmanın en fazla olduğu kesit olan  $x=1.95$  m'de OMGH %3,58 ile en başarılı tahmin yapılan kesit olarak ortaya çıkmıştır. Daralma sonrası genişleme kesitleri olan  $x=2.10$  ve  $2.20$  m'de sırasıyla DES ve LES modelleri, kanalın sonuna doğru olan bölgede ise DES modeli deneysel ölçümlere en yakın sonuçları vermiştir. OKH ve OMGH değerleri beraber incelendiğinde, OKH değerine göre en uyumlu model olarak karşımıza çıkan bazı türbülans modellerinin ( $x=1.00, 1.95$  ve  $2.50$  m) OMGH değerlerine göre en başarılı model olmamıştır. Bunun nedeni, modellerin deneysel sonuçları tahmin etmede başarılı ve aradaki farkın oldukça küçük olması olarak değerlendirilebilir. OMGH değerine göre tüm kanal boyunca ve daralma/genişleme kesitleri boyunca hesaplanan değerlerin ortalamalarına göre DES modeli OKH değerlerine paralel olarak en başarılı model olarak karşımıza çıkmıştır. Model başarı sıralaması ise tüm kanal boyunca DES, RNG, SKE, LES, RKE, RSM, SKW ve SST, daralma ve genişleme bölgesinde ise DES, LES, RSM, RNG, SKW, RKE, SKE ve SST olarak meydana gelmiştir.

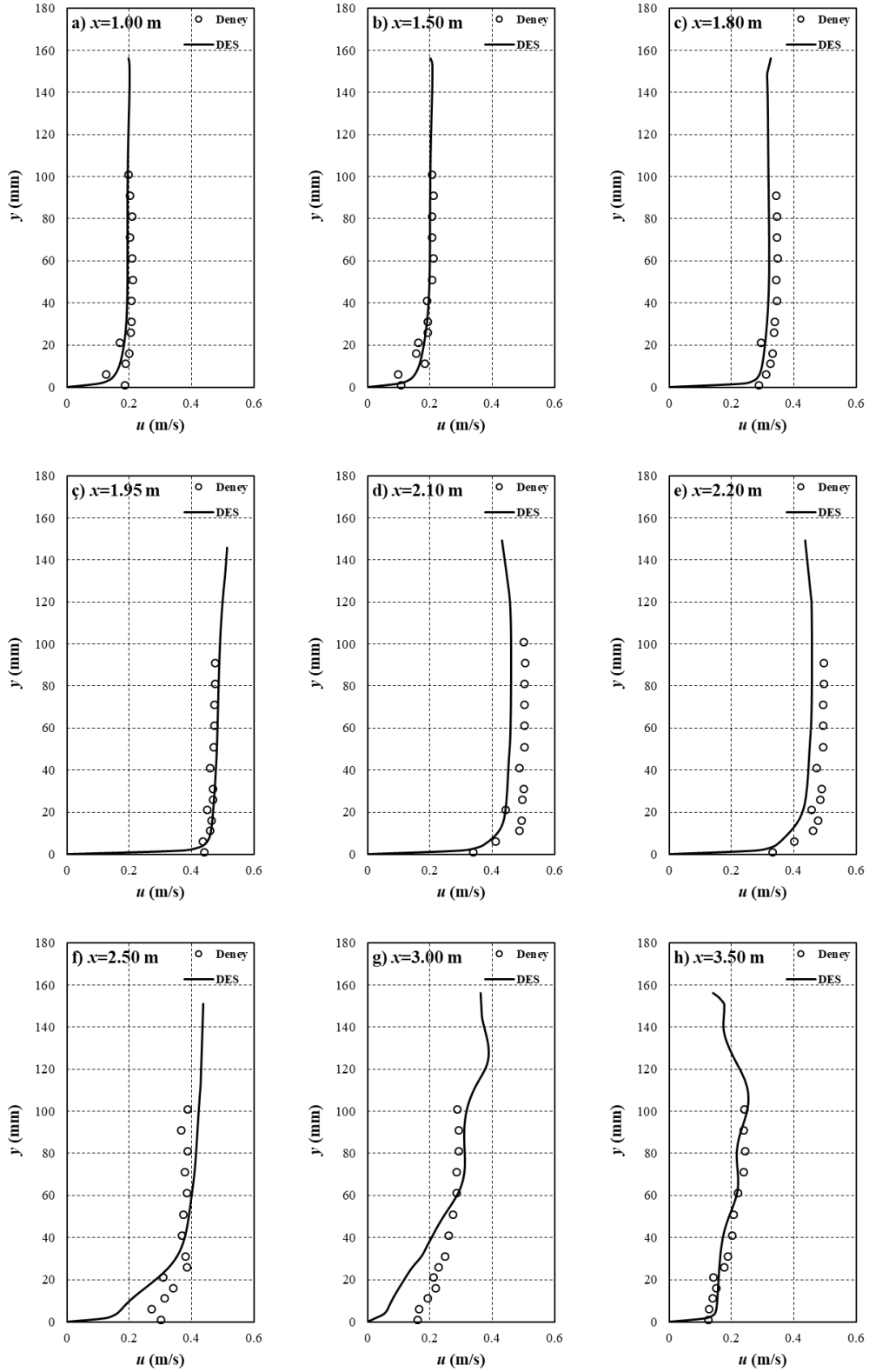
**Tablo 2.** Farklı türbülans modelleri ile hesaplanan OKH değerleri ( $\text{cm}^2/\text{s}^2$ )

$x$ (m)	OKH ( $\text{cm}^2/\text{s}^2$ )							
	SKE	RKE	RNG	SKW	SST	RSM	DES	LES
<b>1.00</b>	38.5 <sup>(3)</sup>	40.4 <sup>(7)</sup>	38.6 <sup>(4)</sup>	37.9 <sup>(2)</sup>	39.0 <sup>(6)</sup>	38.8 <sup>(5)</sup>	<b>36.4<sup>(1)</sup></b>	68.5 <sup>(8)</sup>
<b>1.50</b>	<b>10.9<sup>(1)</sup></b>	11.9 <sup>(4)</sup>	11.1 <sup>(2)</sup>	14.0 <sup>(5)</sup>	15.8 <sup>(6)</sup>	11.7 <sup>(3)</sup>	18.2 <sup>(7)</sup>	31.9 <sup>(8)</sup>
<b>1.70</b>	<b>20.8<sup>(1)</sup></b>	22.0 <sup>(3)</sup>	21.8 <sup>(2)</sup>	22.3 <sup>(4)</sup>	23.8 <sup>(6)</sup>	23.0 <sup>(5)</sup>	24.4 <sup>(7)</sup>	38.8 <sup>(8)</sup>
<b>1.80</b>	76.4 <sup>(2)</sup>	78.2 <sup>(3)</sup>	83.6 <sup>(6)</sup>	<b>71.9<sup>(1)</sup></b>	83.2 <sup>(5)</sup>	85.0 <sup>(7)</sup>	82.4 <sup>(4)</sup>	129.8 <sup>(8)</sup>
<b>1.95</b>	<b>93.2<sup>(1)</sup></b>	102.1 <sup>(4)</sup>	98.7 <sup>(3)</sup>	96.7 <sup>(2)</sup>	117.1 <sup>(7)</sup>	110.3 <sup>(6)</sup>	104.4 <sup>(5)</sup>	154.3 <sup>(8)</sup>
<b>2.10</b>	349.2 <sup>(8)</sup>	319.2 <sup>(6)</sup>	297.3 <sup>(4)</sup>	311.6 <sup>(5)</sup>	290.5 <sup>(3)</sup>	216.8 <sup>(2)</sup>	<b>209.5<sup>(1)</sup></b>	325.0 <sup>(7)</sup>
<b>2.20</b>	537.9 <sup>(7)</sup>	442.4 <sup>(5)</sup>	352.4 <sup>(4)</sup>	461.8 <sup>(6)</sup>	972.4 <sup>(8)</sup>	267.4 <sup>(3)</sup>	209.5 <sup>(2)</sup>	<b>124.2<sup>(1)</sup></b>
<b>2.50</b>	138.7 <sup>(2)</sup>	<b>131.4<sup>(1)</sup></b>	289.1 <sup>(3)</sup>	382.7 <sup>(6)</sup>	4340.1 <sup>(8)</sup>	945.6 <sup>(7)</sup>	319.3 <sup>(4)</sup>	364.4 <sup>(5)</sup>
<b>3.00</b>	1195.4 <sup>(3)</sup>	1580.4 <sup>(4)</sup>	587.7 <sup>(2)</sup>	2167.6 <sup>(6)</sup>	2309.1 <sup>(7)</sup>	2475.7 <sup>(8)</sup>	<b>396.9<sup>(1)</sup></b>	1831.1 <sup>(5)</sup>
<b>3.50</b>	355.9 <sup>(5)</sup>	438.6 <sup>(6)</sup>	102.2 <sup>(2)</sup>	1066.5 <sup>(8)</sup>	283.5 <sup>(4)</sup>	467.3 <sup>(7)</sup>	<b>32.8<sup>(1)</sup></b>	204.4 <sup>(3)</sup>
<b>Tüm Kanal</b>	281.69	316.66	188.25	463.3	847.45	464.16	<b>143.38<sup>(1)</sup></b>	327.24
<b>Daralma/Genişleme</b>	215.5 <sup>(7)</sup>	192.8 <sup>(5)</sup>	170.8 <sup>(4)</sup>	192.9 <sup>(6)</sup>	297.4 <sup>(8)</sup>	140.5 <sup>(2)</sup>	<b>126.1<sup>(1)</sup></b>	154.4 <sup>(3)</sup>

**Tablo 3.** Farklı türbülans modelleri ile hesaplanan OMGH değerleri (%)

$x$ (m)	OMGH (%)							
	SKE	RKE	RNG	SKW	SST	RSM	DES	LES
<b>1.00</b>	6.57 <sup>(3)</sup>	6.77 <sup>(4)</sup>	6.55 <sup>(2)</sup>	6.55 <sup>(2)</sup>	6.86 <sup>(5)</sup>	<b>6.26<sup>(1)</sup></b>	7.11 <sup>(6)</sup>	8.00 <sup>(7)</sup>
<b>1.50</b>	<b>4.81<sup>(1)</sup></b>	5.11 <sup>(4)</sup>	4.88 <sup>(2)</sup>	5.66 <sup>(5)</sup>	6.14 <sup>(6)</sup>	4.94 <sup>(3)</sup>	6.26 <sup>(7)</sup>	7.91 <sup>(8)</sup>
<b>1.70</b>	<b>4.69<sup>(1)</sup></b>	4.87 <sup>(3)</sup>	4.86 <sup>(2)</sup>	4.94 <sup>(4)</sup>	5.28 <sup>(6)</sup>	5.07 <sup>(5)</sup>	5.46 <sup>(7)</sup>	6.15 <sup>(8)</sup>
<b>1.80</b>	7.38 <sup>(2)</sup>	7.43 <sup>(3)</sup>	7.77 <sup>(5)</sup>	<b>7.04<sup>(1)</sup></b>	7.74 <sup>(4)</sup>	7.85 <sup>(7)</sup>	7.79 <sup>(6)</sup>	9.16 <sup>(8)</sup>
<b>1.95</b>	3.83 <sup>(2)</sup>	4.13 <sup>(3)</sup>	4.20 <sup>(4)</sup>	<b>3.58<sup>(1)</sup></b>	4.75 <sup>(6)</sup>	4.65 <sup>(5)</sup>	4.75 <sup>(6)</sup>	6.26 <sup>(7)</sup>
<b>2.10</b>	11.88 <sup>(8)</sup>	11.25 <sup>(7)</sup>	10.87 <sup>(5)</sup>	10.95 <sup>(6)</sup>	10.38 <sup>(4)</sup>	9.04 <sup>(2)</sup>	<b>8.95<sup>(1)</sup></b>	10.03 <sup>(3)</sup>
<b>2.20</b>	15.36 <sup>(7)</sup>	13.82 <sup>(5)</sup>	12.30 <sup>(4)</sup>	13.89 <sup>(6)</sup>	17.29 <sup>(8)</sup>	10.57 <sup>(3)</sup>	9.39 <sup>(2)</sup>	<b>5.54<sup>(1)</sup></b>
<b>2.50</b>	<b>7.39<sup>(1)</sup></b>	8.12 <sup>(2)</sup>	11.17 <sup>(3)</sup>	12.86 <sup>(5)</sup>	48.23 <sup>(8)</sup>	23.20 <sup>(7)</sup>	12.73 <sup>(4)</sup>	14.60 <sup>(6)</sup>
<b>3.00</b>	42.59 <sup>(3)</sup>	49.21 <sup>(5)</sup>	28.45 <sup>(2)</sup>	56.44 <sup>(6)</sup>	59.32 <sup>(7)</sup>	61.84 <sup>(8)</sup>	<b>22.85<sup>(1)</sup></b>	48.14 <sup>(4)</sup>
<b>3.50</b>	29.31 <sup>(5)</sup>	33.09 <sup>(7)</sup>	14.99 <sup>(2)</sup>	52.97 <sup>(8)</sup>	21.99 <sup>(4)</sup>	32.43 <sup>(6)</sup>	<b>8.23<sup>(1)</sup></b>	19.28 <sup>(3)</sup>
<b>Tüm Kanal</b>	15.24 <sup>(3)</sup>	16.07 <sup>(5)</sup>	12.95 <sup>(2)</sup>	18.64 <sup>(7)</sup>	19.74 <sup>(8)</sup>	17.91 <sup>(6)</sup>	<b>11.84<sup>(1)</sup></b>	15.41 <sup>(4)</sup>
<b>Daralma/Genişleme</b>	8.63 <sup>(7)</sup>	8.30 <sup>(6)</sup>	8.00 <sup>(4)</sup>	8.08 <sup>(5)</sup>	9.09 <sup>(8)</sup>	7.44 <sup>(3)</sup>	<b>7.27<sup>(1)</sup></b>	7.43 <sup>(2)</sup>

Kanal boyunca farklı kesitlerde deneysel ve DES modeli ile sayısal olarak elde edilen  $u$  hızlarının derinlikle değişimleri Şekil 7’de verilmiştir. DES modeli ile  $x=1.00, 1.50, 1.80, 1.95, 2.10, 2.20$  ve  $3.50$  m kesitlerinde elde edilen hız profilleri deneyler ile uyumlu olduğu şekillerden açıkça görülmektedir.  $x=2.50$  ve  $3.00$  m kesitlerinde katı yüzeye yakın bölgede sınır tabakası gelişimi bölgesinde iyi tahminde bulunmamasına rağmen türbülanslı dış bölgede katı sınıra yakın bölgeye göre daha başarılı olmuştur.

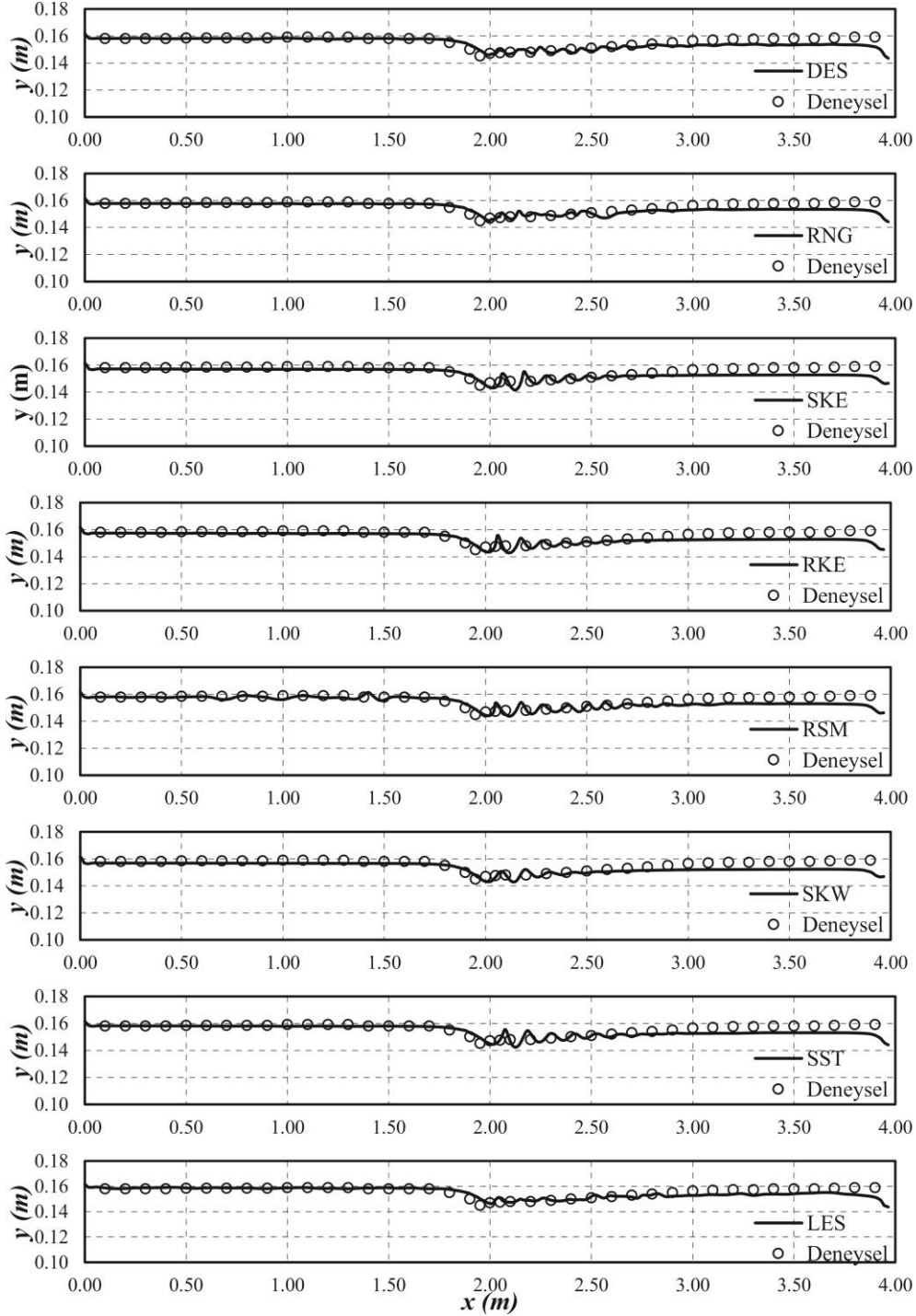


Şekil 7. Kanal boyunca farklı kesitlerde deneysel ve DES modeliyle hesaplanan hız profilleri

### 3.2. Deneysel ve Hesaplanan Su Yüzü Profilleri (Experimental and Numerical Free Surface Profiles)

Kullanılan tüm türbülans kapatma modeller için VOF yöntemi kullanılarak elde edilen su yüzü profilleri ve deneysel olarak ölçülen su yüzü profilleri Şekil 8’de, bu değerler ile hesaplanan OKH ve OMGH değerleri ise Tablo 4’te verilmiştir. Buna göre, daralma bölgesine kadar olan kısımda, hız profillerinde olduğu gibi

su yüzü profillerinde de benzer bir şekilde neredeyse tüm modeller su yüzünü belirlemede başarılı olmuştur. Su yüzünü belirlemede, kanal boyunca, DES modeli, daralma/genişleme bölgesinde ise RNG modeli diğer modellere nazaran daha başarılı sonuçlar vermiştir. Su yüzünü belirlemede başarı sıralaması tüm kanal beraber değerlendirildiğinde OKH değerlerine göre, DES, RNG, LES, RKE, SST, SKE, RSM ve SKW şeklinde, daralma/genişleme bölgesindeki başarı sıralaması ise RNG, DES, SKW, LES, RSM, RKE, SKE ve SST şeklinde meydana gelmiştir.



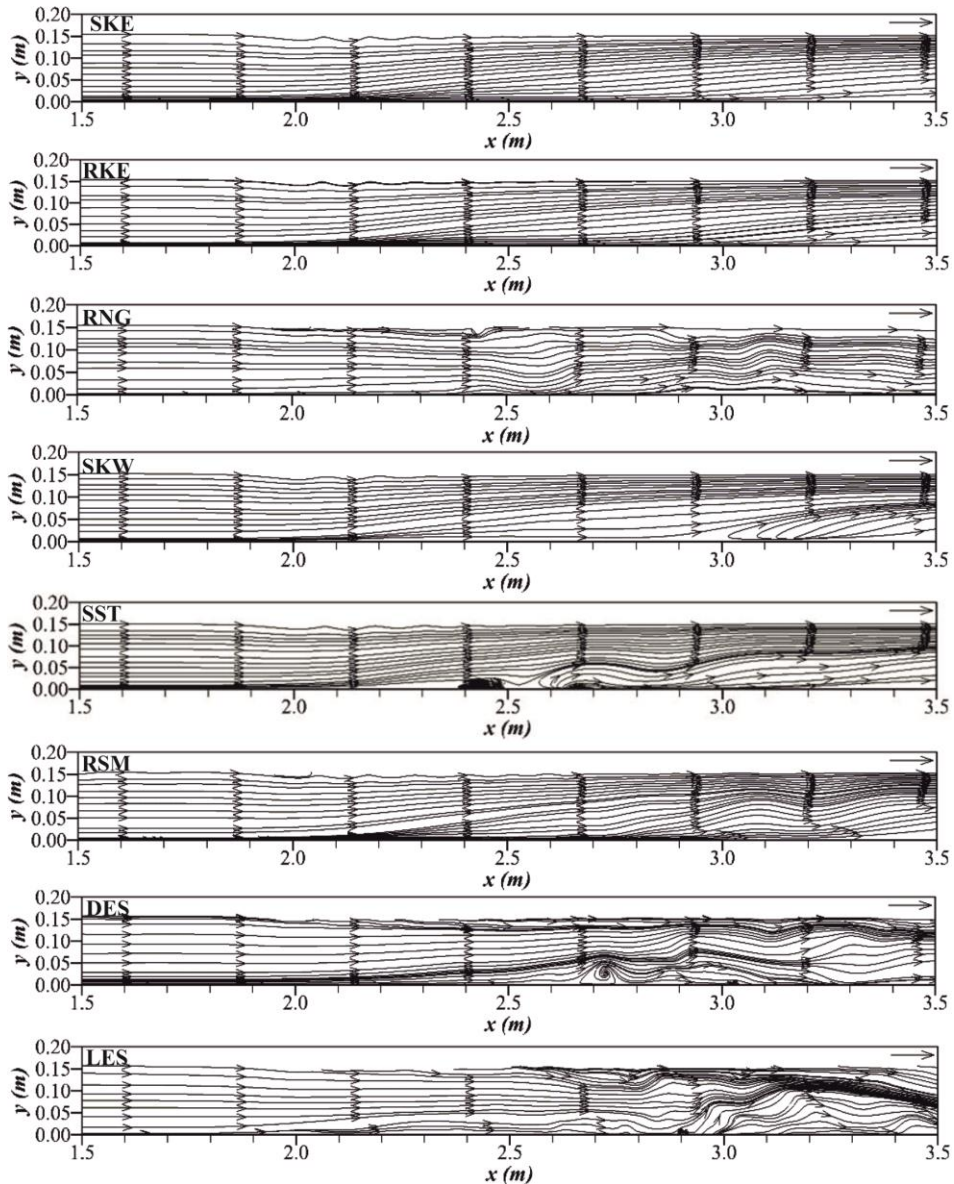
Şekil 8. Deneysel ve hesaplanan su yüzü profilleri

**Tablo 4.** Su yüzü profilleri için hesaplanan OKH ( $m^2$ ) ve OMGH (%) değerleri

Bölge	OKH ( $cm^2/s^2$ )							
	SKE	RKE	RNG	SKW	SST	RSM	DES	LES
Tüm Kanal	0.3894 <sup>(6)</sup>	0.3856 <sup>(4)</sup>	0.3677 <sup>(2)</sup>	0.4010 <sup>(8)</sup>	0.3893 <sup>(5)</sup>	0.3906 <sup>(7)</sup>	<b>0.3668<sup>(1)</sup></b>	0.3764 <sup>(3)</sup>
Daralma/Genişleme	0.0763 <sup>(7)</sup>	0.0701 <sup>(6)</sup>	<b>0.0357<sup>(1)</sup></b>	0.0503 <sup>(3)</sup>	0.0839 <sup>(8)</sup>	0.0666 <sup>(5)</sup>	0.0382 <sup>(2)</sup>	0.0550 <sup>(4)</sup>
Bölge	OMGH (%)							
	Tüm Kanal	2.1372 <sup>(7)</sup>	2.048 <sup>(5)</sup>	1.7985 <sup>(3)</sup>	2.2853 <sup>(8)</sup>	1.9062 <sup>(4)</sup>	2.0219 <sup>(6)</sup>	<b>1.6715<sup>(2)</sup></b>
Daralma/Genişleme	1.4937 <sup>(7)</sup>	1.4331 <sup>(6)</sup>	<b>0.9989<sup>(1)</sup></b>	1.2633 <sup>(4)</sup>	1.5169 <sup>(8)</sup>	1.4328 <sup>(5)</sup>	1.0017 <sup>(2)</sup>	1.1821 <sup>(3)</sup>

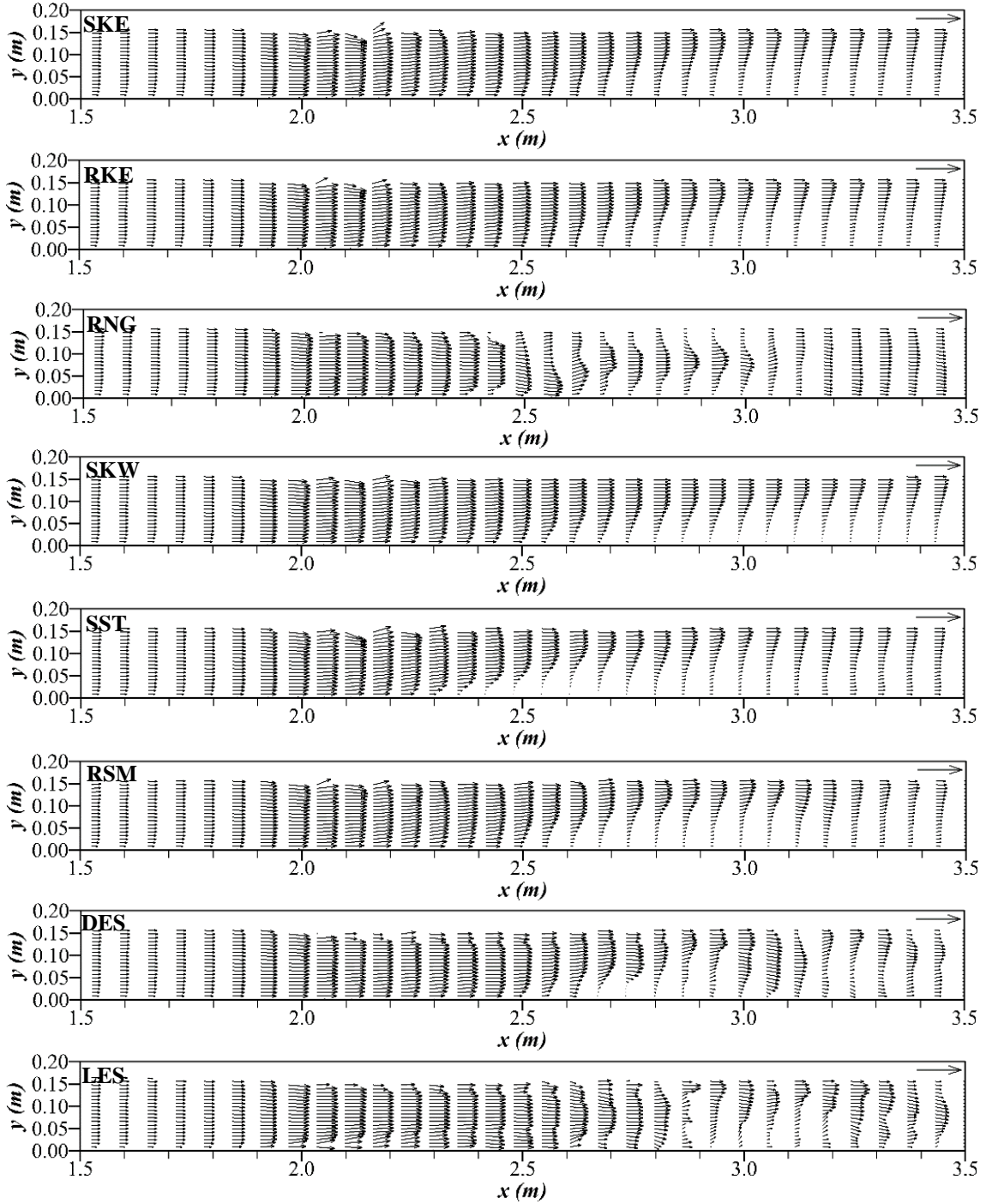
### 3.3. Sayısal Akım Çizgileri (Numerical Streamlines)

Sayısal olarak  $z=0.1755$  m’de hesaplanan akım çizgilerinin topolojisi  $k-\epsilon$  grubu,  $k-\omega$  grubu, RSM, DES ve LES için Şekil 9’da verilmiştir. Buna göre, hız ve su yüzü profillerini tahmin etmede en başarılı model olarak ortaya çıkan DES modelinde  $x=2.70$  m civarında bir ayrılma bölgesi meydana geldiği görülmektedir. SST’de ayrılma bölgesi  $x=2.40$  m’de SKW’da ise  $x=3.00$  m’de meydana gelmektedir. Özellikle daralma sonrası bir ayrılma bölgesine deneysel olarak ölçüm alınan bölgelerde rastlanmamıştır.

**Şekil 9.** Farklı türbülans modeli ile elde edilen akım çizgileri desenleri ( $z=0.175$  m)

### 3.4. Sayısal Hız Vektörleri (Numerical Velocity Vectors)

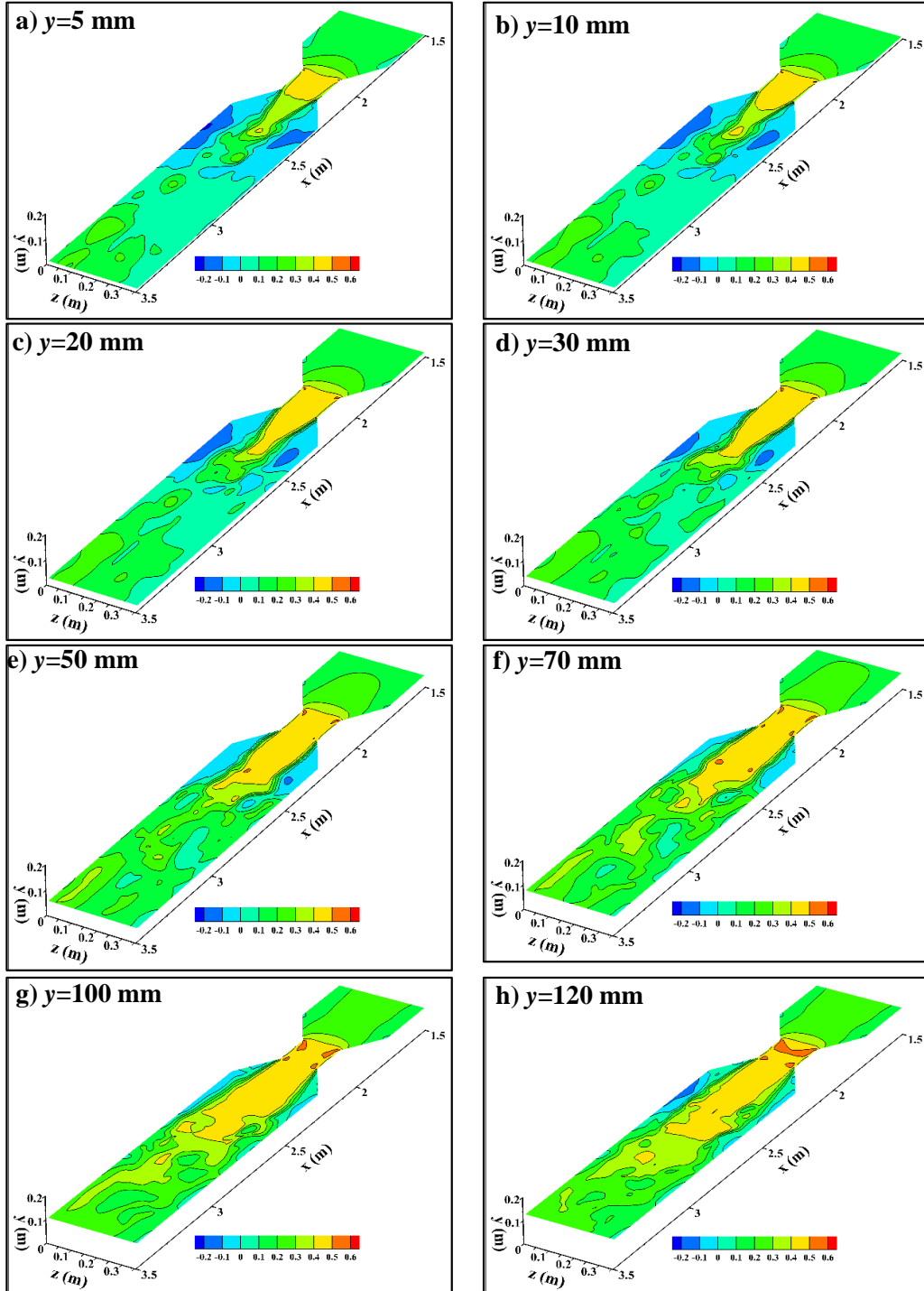
Kanal orta ekseninde ( $z=0.175$  m kesitinde) SKE, RKE, RNG, SKW, SST, RSM, DES ve LES modelleri ile hesaplanan hız vektörlerinin  $x=1.50-3.50$  m aralığındaki deseni Şekil 10'da verilmiştir. Buna göre, daralma bölgesinde, beklendiği gibi, hız vektörlerinin boyutunda bir artış meydana gelmekte, genişleme başladığında ise hızlarda bir azalma meydana gelmektedir. Elde edilen hız vektörleri deseninin Şekil 9'da verilen akım çizgileri deseniyle de uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 10. Farklı türbülans modeli ile elde edilen hız vektörleri desenleri ( $z=0.175$  m)

### 3.5. Yatay Hız Bileşeninin ( $u$ ) Üç Boyutlu Dağılımı (Three Dimensional Distributions of Horizontal Velocity Component)

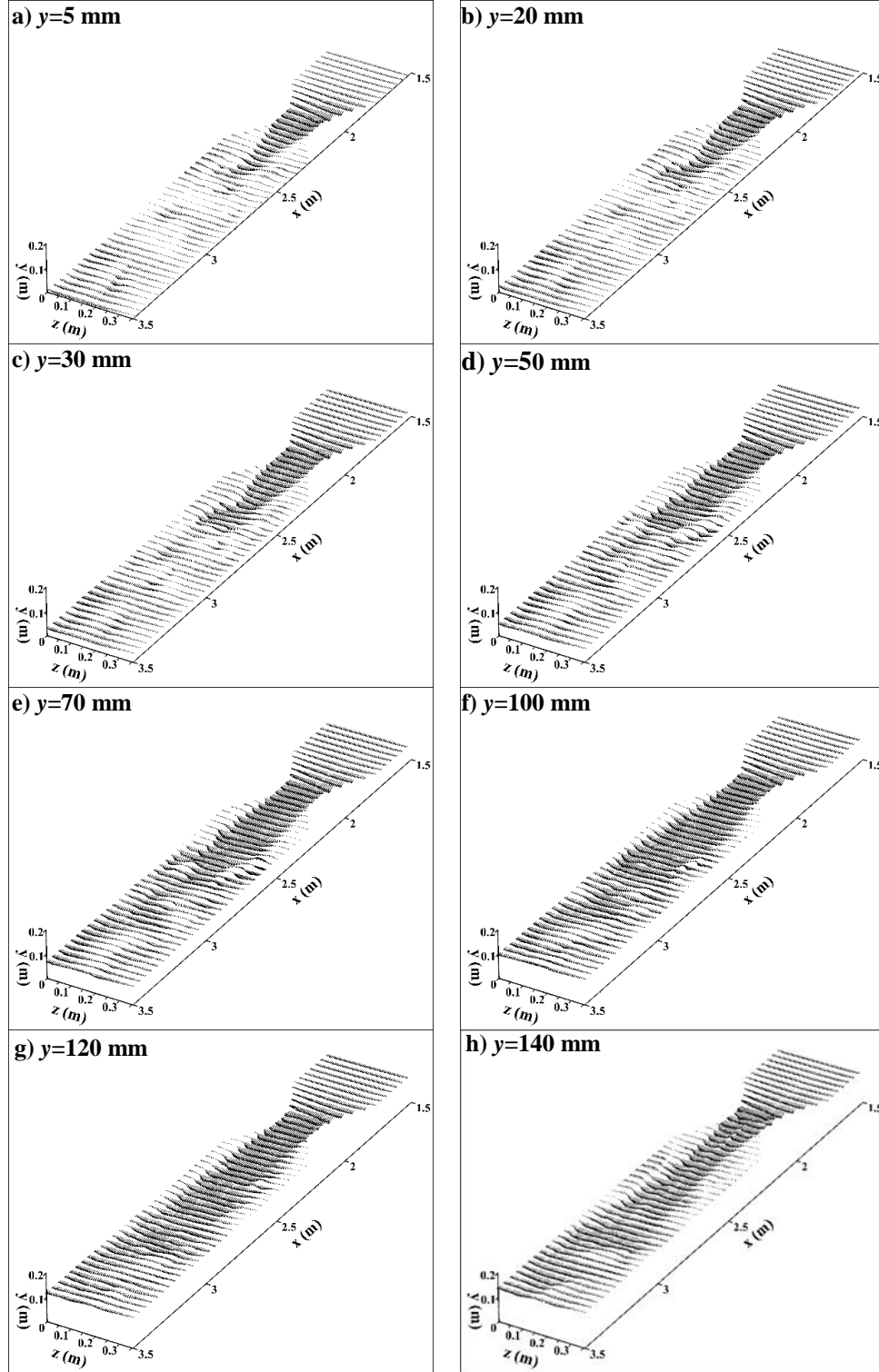
DES modeli kullanılarak elde edilen  $u$  hızlarının derinlikle değişimleri Şekil 11’de verilmiştir. Buna göre, katı sınıra yakın olan bölgede akım hızlarının düşük olduğu ve su yüzüne yaklaştıkça hızlarda bir artış meydana geldiği görülmektedir. Özellikle tabana yakın bölge içerisinde olan ve daralmanın bittiği noktadan sonra yan duvara yakın olan bölgelerde durma noktası meydana geldiği, ancak katı sınırdan uzaklaştıkça akım profilinde pozitif bir hız bileşeni meydana geldiği görülmüştür.



Şekil 11. DES ile hesaplanan  $u$  hızının topolojisinin derinlikle değişimi

### 3.6. Sayısal Hız Vektörlerinin Üç Boyutlu Dağılımları (3D Distributions of Numerical Velocity Vectors)

DES modeli kullanılarak hesaplanan hız vektörlerinin derinlikle değişimleri Şekil 12’de verilmiştir. Buna göre hız vektörlerinin derinlikle beraber arttığı ve daralma bölgesinde de beklendiği gibi hız vektörlerinin en yüksek değere eriştiği görülmektedir.

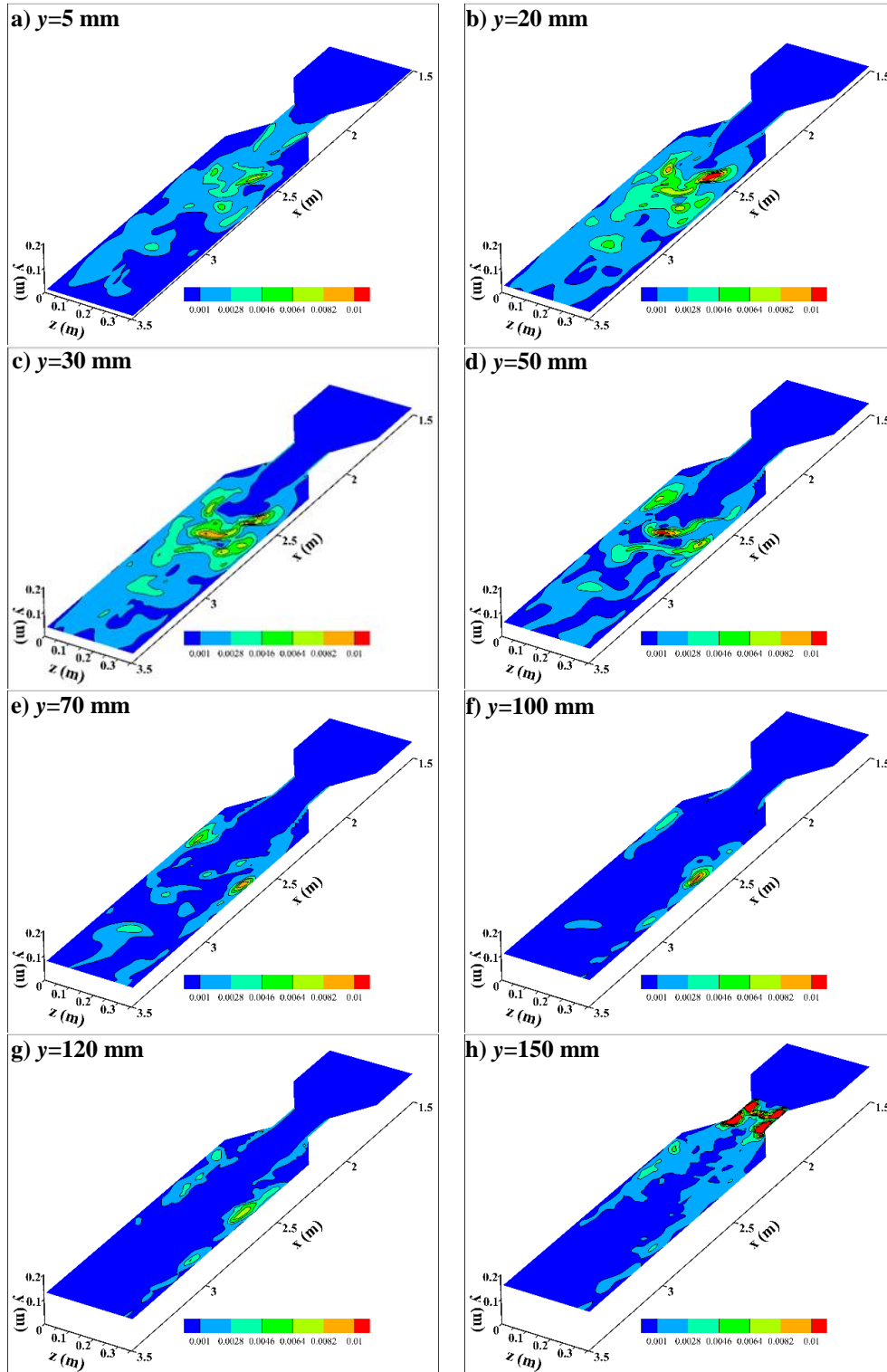


Şekil 12. DES ile hesaplanan hız vektörlerinin derinlikle değişimi



### 3.7. Sayısal Türbülans Kinetik Enerjisinin Üç Boyutlu Dağılımı (3D Distribution of Numerical Turbulence Kinetic Energy)

DES modeli ile hesaplanan türbülans kinetik enerjisi (TKE) topolojisinin derinlikle değişimi Şekil 13'te verilmiştir. TKE değeri kanal tabanında genellikle  $0.002 \text{ m}^2/\text{s}^2$  ile  $0.006 \text{ m}^2/\text{s}^2$  arasında değişim gösterirken, özellikle daralma elemanının sonrasında meydana gelen kuyruk akımında arttığı görülmüştür. Daralma bölgesinde akım alanında meydana gelen değişimden dolayı hızda meydana gelen değişimler artmakta, su yüzeyine yakın olan bölgede TKE değeri artmakta ve TKE değeri maksimum olmaktadır.



Şekil 13. DES ile hesaplanan TKE topolojisinin derinlikle değişimi

## 5. SONUÇ (CONCLUSION)

Açık kanal içerisinde trapez başlıklı bir yapı ile oluşturulan daralma ve genişleme kesitlerine sahip akım deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda, akım alanı Akustik Doppler Hız Ölçer ile ve akım profili limnometre yardımıyla ölçülmüştür. Sayısal modellemelerde SKE, RKE, RNG, SKW, SST, RSM, DES ve LES olmak üzere sekiz model kullanılmış ve bu modellerin akım alanını ve su yüzü profilini tahmin etmedeki başarısı test edilmiştir. Ağ yapısının sıklığının yeterliliği yani sayısal çözümün ağ yapısından bağımsız olup olmadığı belirlenebilmesi için GCI yöntemi ile analizler yapılmış ve hata değerinin %2'den küçük olduğu görülmüş ve çözümün ağ yapısından bağımsızlaştığı sonucu elde edilmiştir. Sayısal hız ve su yüzü profillerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılmasından, DES modeli tüm kanal boyunca elde edilen OKH ve OMGH değerlerine göre en başarılı model olmuştur. Yatay hız bileşeni ( $u$ ) değerinin daralma bölgesi sonrasında oluşan negatif hız değerinin olduğu bölgenin büyüklüğü kanal tabanından su yüzüne doğru ilerledikçe azalmaktadır. Kanal orta eksenine göre hız bileşenin dağılımının simetrik olduğu belirlenmiştir. Kanal tabanından serbest su yüzüne doğru ilerledikçe sayısal hız vektörlerinin yoğunluğunun arttığı görülmüştür. TKE değerleri kanal tabanında genellikle  $0.002 \text{ m}^2/\text{s}^2$  ile  $0.006 \text{ m}^2/\text{s}^2$  arasında değişim gösterirken, özellikle daralma elemanının sonrasında meydana gelen kuyruk akımında arttığı ve daralma bölgesinde su yüzeyine yakın olan bölgede maksimum değere ulaştığı görülmüştür. Ayrıca elde edilen sonuçlardan, sayısal hesaplama yöntemlerinin bu tür akım problemlerinin çözümünde başarılı bir şekilde kullanılabileceği görülmüştür.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma Harran Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (HÜBAP) tarafından desteklenmiştir (Proje No:17080).

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Ho, D., Boyes, K., Donohoo, S., & Cooper, B. (2004). Numerical flow analysis for spillways. 43rd Aincold Bulletin, Hobart, Tasmania, 127-138.
- [2] Daneshkhan, A., & Vosoughifar, H. (2012). Solution of flow field equations to investigate the best turbulent model of flow over a standard ogee spillway in finite volume method. The First International Conference on Dams-Hydropower, Iran, 1-9.
- [3] Soydan, N. G., Şimşek, O., & Aköz, M. S. (2017). Prediction and validation of turbulent flow around a cylindrical weir. European Water, 57, 85-92.
- [4] Soydan, N. G., Şimşek, O., & Aköz, M. S. (2018). Köprü ayağı etrafındaki türbülanslı akımın sayısal ve deneysel analizi. Politeknik Dergisi, 21(1), 137-147.
- [5] Ozmen-Cagatay, H., & Kocaman, S. (2012). Investigation of dam-break flow over abruptly contracting channel with trapezoidal-shaped lateral obstacles. Journal of Fluids Engineering, 134(8), 081204.
- [6] Huang, J., Weber, L. J., & Lai, Y. G. (2002). Three-dimensional numerical study of flows in open-channel junctions. Journal of hydraulic engineering, 128(3), 268-280.
- [7] Bell, S. W., Elliot, R. C., & Hanif Chaudhry, M. (1992). Experimental results of two-dimensional dam-break flows. Journal of Hydraulic Research, 30(2), 225-252.
- [8] Aköz, M. S., Simsek, O., & Soydan, N. G. (2019). Numerical modeling of interaction of turbulent flow with a buried circular cylinder on a plane surface. Teknik Dergi, 30(6), 9621-9645.
- [9] Gumus, V., Simsek, O., Soydan, N. G., Aköz, M. S., & Kirkgoz, M. S. (2015). Numerical modeling of submerged hydraulic jump from a sluice gate. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 142(1), 04015037.

- [10] Simsek, O., Aköz, M. S., & Soydan, N. G. (2016). Numerical validation of open channel flow over a curvilinear broad-crested weir. *Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal*, 16(6), 364-378.
- [11] Telkiran, M. N., Aköz, M. S., Şimşek, O., & Soydan, N. G. (2019). Dolusavak üzerinden geçen akımın sayısal analizi: Mersin Dereyurt Göleti dolusavak örneği. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(1), 155-168.
- [12] Şimşek, O., Parmaksız, M., & Gümüş, V. (2019). Radyal kapak ile etkileşimde bulunan açık kanal akımının sayısal modellenmesi. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(2), 965-978.
- [13] Aköz, M. S., Soydan, N. G., & Şimşek, O. (2016). Kritik üstü açık kanal akımının detached eddy ve large eddy simülasyon ile sayısal modellenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 4(4), 213-224.
- [14] Launder, B. E., & Spalding, D. B. (1972). *Mathematical models of turbulence*. Academic Press, New York, 169s, 1972.
- [15] Shih, T. H., Liou, W. W., Shabbir, A., Yang, Z., & Zhu, J. (1995). A new  $k-\epsilon$  eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows. *Computers & Fluids*, 24(3), 227-238.
- [16] Yakhot, V., & Orszag, S. A. (1986). Renormalization-group analysis of turbulence. *Physical Review Letters*, 57:14, 1722-1724.
- [17] Yakhot, V. S. A. S. T. B. C. G., Orszag, S. A., Thangam, S., Gatski, T. B., & Speziale, C. G. (1992). Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 4(7), 1510-1520.
- [18] Wilcox, D. C. (2006). *Turbulence modeling for CFD (Third Edition)*. La Canada, CA: DCW Industries. Inc, November. 522s, 2006.
- [19] Menter, F. R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA journal*, 32(8), 1598-1605.
- [20] Launder, B. E., Reece, G. J., & Rodi, W. (1975). Progress in the development of a Reynolds-stress turbulence closure. *Journal of fluid mechanics*, 68(3), 537-566.
- [21] ANSYS. (2018). *Fluent Theory Guide*, ANSYS Inc. USA.
- [22] Roache, P. J. (1994). Perspective: a method for uniform reporting of grid refinement studies. *Journal of fluids engineering-transactions of the ASME*, 116:3, 405-413.
- [23] Roache, P. J. (1998). Verification of codes and calculations. *AIAA journal*, 36(5), 696-702.
- [24] Roache, P. J. (1997). Quantification of uncertainty in computational fluid dynamics. *Annual review of fluid Mechanics*, 29(1), 123-160.
- [25] Hirt, C. W., & Nichols, B. D. (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of computational physics*, 39(1), 201-225.
- [26] Gümüş, V. (2014). Dolusavak akımının sayısal modellenmesi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Adana, 129s.