

Eğimli kritik altı açık kanal akımının sayısal modellemesi

Numerical modelling of sloped sub-critical open channel flow

Veysel GÜMÜŞ^{1,a}, Alaattin SEVEN^{1,b}, Oğuz ŞİMŞEK^{*1,c}

¹ Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 63290, Şanlıurfa

• Geliş tarihi / Received: 09.05.2020

• Düzeltilerek geliş tarihi / Received in revised form: 11.11.2020

• Kabul tarihi / Accepted: 22.11.2020

Öz

Bu çalışmada, kritik altı akım koşullarına sahip eğimli açık kanal akımının farklı şartlarda sayısal modellemesi yapılmıştır. Sayısal modellemelerde akımın hareketini sağlayan temel denklemler, sonlu hacimler yöntemine dayalı çözüm yapan ANSYS Fluent paket programı yardımıyla iki boyutlu çözülmüştür. Su yüzü profilinin belirlenmesinde ise Akışkan Hacimleri Yöntemi kullanılmıştır. Sayısal modellemede, türbülansın çözümünde Re-Normalization Group (RNG), Kayma Gerilmesi Taşınımı (Shear Stress Transport-SST), Reynolds Gerilme Modeli (Reynolds Stress Model-RSM) ve Detached Eddy Simülasyon (DES) modelleri kullanılmıştır. Sayısal modelleme sonuçları üzerinde ağ yapısının etkisinin olup olmadığının belirlenmesi için Ağ Yakınsama İndeksi yöntemi kullanılmıştır. Farklı türbülans kapatma modelleri kullanılarak, farklı akım şartlarında elde edilen sayısal hız profilleri deneysel profillerle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda, RNG modeli sadece Durum 5'te, SST modeli Durum 1, Durum 6 ve Durum 7'de, RSM modeli Durum 3'te ve DES modeli ise Durum 2 ve Durum 4'te deneysel verilere en yakın tahminde bulunmuştur. Çalışma sonucunda, hafif eğimli kritik altı açık kanal akımının sayısal çözümünde SST modelinin başarılı bir şekilde kullanılabileceği belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Ağ yakınsama indeksi, Akışkan hacimleri yöntemi, Hesaplama ağı, Kritik altı açık kanal akımı, Sayısal model

Abstract

In this study, numerical modelling of subcritical open channel flow with different conditions has been done. In numerical models, the governing equations are solved in two dimensions with the ANSYS Fluent software, which is based on the finite volume method. Volumes of Fluid Method is used to determine the free surface profile. RNG, SST, RSM and DES models are used to modelling turbulence. Grid Convergence Index method is used to determine the sensitivity of grid structure on the numerical modelling results. The numerical velocity profiles obtained in different cases with different turbulence closure models are compared with the experimental results. According to comparison velocity profiles, the best turbulence closure models are determined RNG for only Case 5, SST for Case 1, Case 6 and Case 7, RSM for Case 3, and DES for Case 2 and Case 4. As a result of the study, it is determined that the SST model can be used successfully in the numerical solution of subcritical flow in sloping open channel.

Keywords: Grid convergence index, Volume of fluid, Calculation grid, Subcritical open channel, Numerical model

*c Oğuz ŞİMŞEK; oguzsimsek@harran.edu.tr, Tel: (0414) 318 30 00/3786 orcid.org/0000-0001-6324-0229

^a orcid.org/0000-0003-2321-9526

^b orcid.org/0000-0003-3698-9749

1. Giriş

Akımın ıslak kesitinin tamamen katı sınır ile çevrelenmediği, serbest yüzeyli ve atmosfer basıncına maruz kalan akımlar, açık kanal akımları olarak adlandırılır. Serbest yüzeye sahip bu akımlar, doğal akarsu ve deniz akımları ile yapay açık kanallar, sulama kanaletleri ve kısmi dolu akan kanalizasyon sistemlerinde bulunur (Kırkgöz, 2018).

Ağırlık ve sürtünme kuvvetleri etkisi altında hareket eden açık kanal akımlarının karakteristiklerinin belirlenmesi için farklı parametreler kullanılmaktadır. Bu parametrelerden en önemli olanlarında biri olan Reynolds sayısı ($Re = 4\rho VR/\mu$; ρ akışkan yoğunluğu, V akışkan hızı, R hidrolik yarıçapı ve μ ise akışkanın dinamik viskozitesi) akımın türbülanslı, laminer ya da geçiş akımı olup olmadığını belirlemek için kullanılan bir büyüklüktür. Reynolds sayısı, atalet kuvvetlerinin viskozite kuvvetlerine oranı olarak tanımlanır ve boyutsuzdur. Buna göre, viskoz kuvvetlerin atalet kuvvetlerine baskın olması durumunda Reynolds sayısı küçülmekte ve akım türü laminer akım özelliklerini taşımaktadır ($Re < 2000$). Ancak, akımda atalet kuvvetleri viskoz kuvvetlere kıyasla daha baskın olur ise, bu durumda akım türbülanslı akış özelliği taşımaktadır ($Re > 4000$). Her iki akış türünün özelliklerinin meydana gelmesi durumunda ise akış, geçiş akımı olarak değerlendirilir ($2000 < Re < 4000$). Reynolds sayısının yanı sıra, açık kanal akımlarını sınıflandırmak için kullanılan bir diğer önemli büyüklük ise Froude sayısıdır ($Fr = V / \sqrt{gh}$; V akım ortalama hızı, g yerçekimi ivmesi, h su derinliği). Froude sayısı, atalet kuvvetlerinin ağırlık kuvvetlerine oranı olup, boyutsuz bir büyüklüktür. Froude sayısına göre akım, kritik, sel rejimi ya da nehir rejimi olarak sınıflandırılabilir. Fr sayısının birden küçük olması durumunda akım kritik altı yani nehir rejimi, 1'den büyük olması durumunda ise kritik üstü yani sel rejimi olarak adlandırılır. Fr sayısının bire eşit olması durumunda ise akım, kritik akım olarak ifade edilir. Akımın büyük derinlikli, hızlı ve düşük eğimli olması durumunda sıklıkla karşılaşılan nehir rejiminde ağırlık kuvvetleri atalet kuvvetlerinden üstün olmaktadır. Tam aksi durum olarak yani atalet kuvvetlerinin ağırlık kuvvetlerinden büyük olması durumunda meydana gelen sel rejiminde ise akım hızı yüksek, su derinliği ise düşük olmakta ve genellikle dolusavakların şüt kanallarında ve vahşi derelerde meydana gelmektedir. Kritik akım ise nehir rejiminde sel rejimine ya da sel rejiminden nehir rejimine geçişte meydana gelmekte ve akımın

özgül enerjisinin en düşük olduğu kesittir (Kırkgöz, 2018).

Açık kanal akımlarının davranışları ve akım karakteristiklerinin belirlenmesi, su ile etkileşimde olan yapıların analiz ve tasarımında oldukça önemlidir. Bu karakteristiklerin incelenmesi için çoğunlukla diferansiyel ve integral yöntemler, boyut analizleri ve deneysel yaklaşımlar kullanılmaktadır. Ancak, özellikle diferansiyel ve integral yöntemler, Navier-Stokes ve enerji denklemlerinin çözümünü gerektirmekte olup, çözümün yapılabilmesi için bazı kabullerin yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Yapılan bu kabullerin, çözümü gerçekleştirmede yetersiz kalması durumunda ise sayısal çözüm için farklı analiz yöntemleri kullanılır. Özellikle türbülansın tanımlanabilmesi için son yıllarda sıklıkla başvurulan yöntemlerden biri Hesaplamalı Akışkan Dinamiği (HAD) yöntemleridir (Gumus vd., 2016; Simsek vd., 2016; Soydan vd., 2017; Akoz vd., 2019; Soydan-Oksal vd., 2020; Ayhan vd., 2020). Bu yöntemlerle ise çözümü oldukça zor ve zahmetli olan temel denklemler, farklı türbülans modelleri kullanılarak çözülebilmektedir.

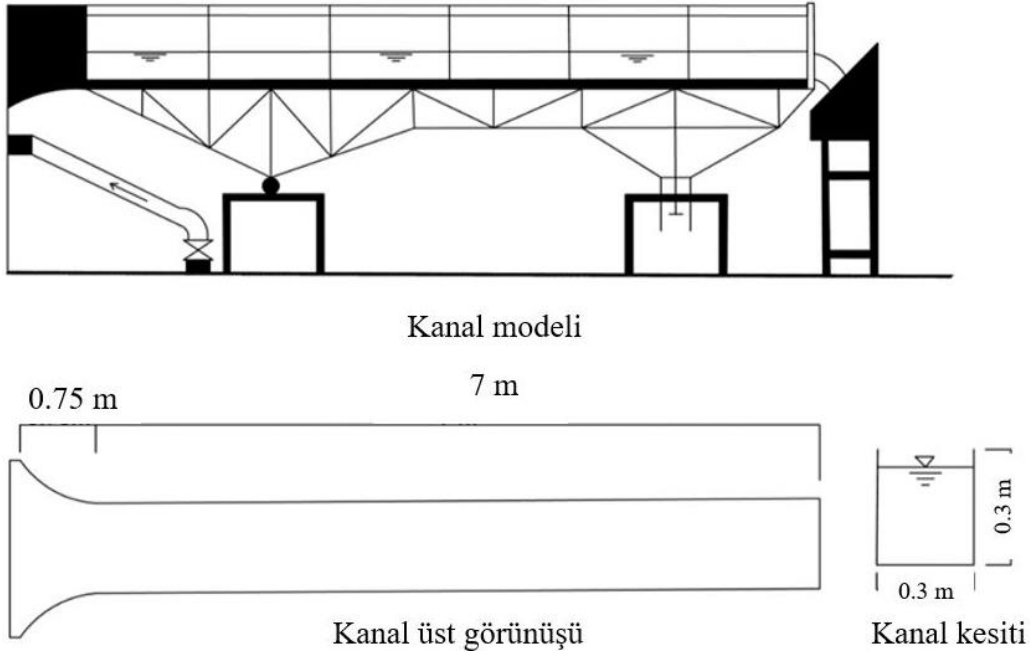
Bu çalışmada, dikdörtgen kesitli, yumuşak eğimli ve kritik altı açık kanal akımı için Ardıçlıoğlu (1994) tarafından Lazer Doppler Anemometresi (LDA) kullanılarak, yedi farklı deney durumu için ölçülen akım alanları deneylerle aynı şartlarda, farklı türbülans kapatma modelleri kullanılarak sonlu hacimler yöntemine dayalı bir HAD yazılımı ile sayısal olarak modellenmiştir. Serbest su yüzünün belirlenebilmesi için Akışkan Hacimleri Yöntemi (Volume of Fluids-VOF), türbülansın tanımlanabilmesi için farklı türbülans kapatma modeli kullanılmıştır. Ağ yapısının sayısal çözümler üzerindeki etkisini incelemek ve yapılan sayısal çözümlerin ağ yapısından bağımsız hale geldiğini belirleyebilmek için ise Ağ Yakınsama İndeksi (Grid Convergence Index-GCI) yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada, deneysel sonuçlara göre kritik altı açık kanal akımını sayısal olarak modellemede kullanılan modeller arasından en başarılı olan türbülans modeli belirlenmiştir.

2. Deneysel çalışma

Deneyler, Ardıçlıoğlu (1994) tarafından Çukurova Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Hidrolik Laboratuvarında Şekil 1'de görülen açık kanal modeli üzerinde yapılmıştır. Deneylerin yapıldığı kanalın yan duvarları ve tabanı camdan imal edilmiştir. Dikdörtgen kesitli açık kanal modelinin boyutları 30x30x700 cm'dir. Suyun sirkülasyonu santrifüj pompa ile yapılmaktadır. Kanal üzerinde

iki farklı eğimde ve toplam 12 farklı akım koşulunda, $x=0.60, 1.40, 1.90, 2.40, 2.90, 3.40, 3.90, 4.40, 4.90$ ve 5.40 m kesitlerinde Lazer

Doppler Anemometresi (LDA) ile hız ölçümleri yapılmıştır. Akım derinliği boyunca yatay hız bileşeninin değişimi elde edilmiştir.



Şekil 1. Deney düzeneğinin şematik görünümü

Deneysel olarak ölçülmüş akım değerleri Tablo 1’de verilmiştir. Tablodaki eğim değeri kanalın memba yüzünün eğim yüzdesini, h_1 su derinliğini, h_1/b kesit oranını (b , kanal genişliği), Fr sayısı ise kanal girişinde hesaplanan Froude sayısını temsil etmektedir. Farklı akım özelliklerinin temsil

edilmesi ve hesaplama zorluklarından dolayı sayısal modellemede tüm deneysel durumların analizleri yapılmamıştır. Sayısal modellemesi yapılan akım değerleri Tablo 1’de italik ve * işareti ile gösterilmektedir.

Tablo 1. Deneylerin akım özellikleri

Deney	Eğim	Debi (l/s)	h_1 (mm)	h_1/b	Fr
<i>1*</i>	<i>0.0005</i>	<i>19.5</i>	<i>200</i>	<i>1.50</i>	<i>0.232</i>
<i>2*</i>	<i>0.0020</i>	<i>19.5</i>	<i>100</i>	<i>3.00</i>	<i>0.656</i>
<i>3*</i>	<i>0.0005</i>	<i>14.5</i>	<i>150</i>	<i>2.00</i>	<i>0.266</i>
<i>5*</i>	<i>0.0005</i>	<i>10.0</i>	<i>120</i>	<i>2.50</i>	<i>0.256</i>
<i>7*</i>	<i>0.0005</i>	<i>6.0</i>	<i>75</i>	<i>4.00</i>	<i>0.311</i>
<i>9*</i>	<i>0.0005</i>	<i>3.2</i>	<i>50</i>	<i>6.00</i>	<i>0.300</i>
<i>10*</i>	<i>0.0005</i>	<i>3.2</i>	<i>40</i>	<i>7.50</i>	<i>0.419</i>
11	0.0005	3.2	30	10.00	0.645
12	0.0020	3.2	25	12.00	0.848

3. Sayısal modelleme

3.1. Temel denklemler ve türbülans modelleri

Kritik altı açık kanal akımı türbülanslı bir akım olup, akımın çözülebilmesi amacıyla kullanılacak temel denklemler süreklilik ve Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemleridir. Bu denklemler, Denklem 1 ve 2’de sırasıyla verilmiştir:

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

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

Süreklilik ve RANS denklemlerinde bulunan u_i ortalama hız bileşenlerini, p ortalama basıncı, μ akışkanın dinamik viskozitesini, ρ akışkanın yoğunluğunu, ρg_i yerçekiminin sebep olduğu kütleli kuvveti, t zamanı, τ_{ij} ise türbülans (Reynolds) gerilmelerini ifade etmektedir.

Türbülans yani Reynolds gerilmeleri Boussinesq yaklaşımına göre Denklem 3'teki gibi ifade edilir:

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

Burada, u_i' ve u_j' türbülans hız sapınçları ve μ_t türbülans viskozitesi olup δ_{ij} Kronecker deltasıdır ($i=j$ için $\delta_{ij}=1$). Türbülans viskozitesinin sayısal olarak hesaplanabilmesi için literatürde sıklıkla kullanılan RNG (Yakhot ve Orszag, 1986; Yakhot vd., 1992), SST (Menter, 1994), RSM (Launder vd., 1975) ve DES (Soydan-Oksal vd., 2020) türbülans modelleri kullanılmıştır. Bu modeller ile ilgili detaylar Gümüş (2014) ve Bal (2019)'da verilmiştir.

3.2. Akışkan hacimleri yöntemi (Volume of fluid-VOF)

VOF yöntemi, birbirine karışmayan iki veya daha fazla akışkan arasındaki ara yüzeyin şeklinin belirlenebilmesi için çözüm ağına uygulanabilir (Hirt ve Nichols, 1981). Bu çalışma kapsamında su-hava ara kesitinin belirlenebilmesi için

Buna göre;

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

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

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

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

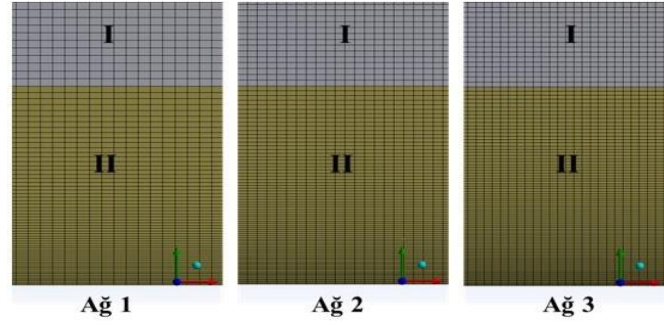
Burada bulunan d_1 , d_2 ve d_3 sırasıyla Ağ 1, Ağ 2 ve Ağ 3'te bulunan ağ elemanının yüksekliğini ifade etmektedir. u_1 , u_2 ve u_3 sırasıyla Ağ 1, Ağ 2 ve Ağ 3'te belirlenen noktadaki akışkanın hızını ifade etmektedir. p ifadesi de doğruluk mertebesini, F_s ise güvenlik faktörünü belirtmektedir. e_{12} ve e_{23} hız farklarını, r_{12} ve r_{23} ise ağ elemanının yükseklik oranını ifade 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 (Roache, 1994; Roache, 1998). İşlem sonucunda hesaplanan GCI_{23}^{incc} değeri %2'den daha küçük ise ağa bağlı

kullanılan bu yöntem, hücrelerin boş, kısmen ya da tamamen 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. VOF yönteminde ara kesitin hesaplanmasında farklı yaklaşımlar bulunmakla beraber, bu çalışmada "Geo-Reconstruct" yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yöntem ile ilgili detaylar Gümüş (2014)'te verilmiştir.

3.3. Ağ yakınsama indeksi (Grid convergence index-GCI)

Sayısal ayrıklaşma duyarlılığının belirlenmesi amacıyla kullanılan GCI yöntemi (Roache, 1994), aynı problemin farklı ağ yapısına ait sayısal sonuçlarının 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 (Roache, 1998).

sayısal hesaplama sonuçlarının kabul edilebilir hata sınırlarında olduğu ve hesaplama hassasiyetinin ağ yoğunluğundan bağımsızlaştığı sonucuna varılır. Bu yöntemde gerekli olan üç farklı ağ yapısı, ağ sıklığının %25 ve %50 artırılması suretiyle oluşturulmuş ve oluşturulan %50 sıklaştırılmış ağ, en iyi ağ yani ince ağ olarak adlandırılmıştır (Şekil 2). Bu çalışmada iki farklı akım durumu için üç farklı sıklıkta ağ yapısı kullanılmış ve sayısal çözüm bölgesi iki alt bölgeye ayrılmıştır. GCI yöntemi için oluşturulan farklı yoğunluktaki hesaplama ağlarına ait eleman sayılarına ait detaylar Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Hesaplama ağı

Tablo 2. Farklı alt bölgelerde bulunan ağ elemanı sayıları

Durum	Alt Bölge	Ağ 1	Ağ 2	Ağ 3
I. Durum	I. Bölge	13x667	17x833	20x1000
	II. Bölge	63x667	17x833	95x1000
IX. Durum	I. Bölge	53x667	65x833	80x1000
	II. Bölge	23x667	30x833	35x1000

En düşük ve en yüksek giriş su yüksekliklerine sahip iki debide farklı kesitlerde, GCI analizleri yapılmıştır. Ağ yakınsama indeksi yöntemi ile Durum 1 için $x=290$ ve 390 cm'de 10 farklı derinlikte elde edilen sonuçlar sırasıyla Tablo 3 ve 4'te verilmiştir. Buna göre, ele alınan diğer akım durumlarına göre hız değerleri yüksek olan Durum 1 için $x=290$ cm'de elde edilen en küçük ve en büyük GCI_{23}^{ince} değerleri sırasıyla % 0.001 ile % 0.935 olarak belirlenmiştir. Katı sınıra yakın olan bölgede akım hızlarının viskoz gerilmeler neticesinde hızlı değişimlere uğraması nedeniyle

en yüksek GCI_{23}^{ince} değerleri katı sınıra yakın olan bölgede elde edilmiştir. Ayrıca, akımın katı sınır etkisinden çıkmaya başladığı noktadan itibaren GCI_{23}^{ince} değerleri azalma eğilimine girmiştir. Yine Durum 1 için $x=390$ cm kesitinde, $x=290$ cm'ye benzer bir şekilde katı sınıra yakın olan bölgede GCI değerleri daha yüksek olarak % 0.018 değerinde olurken, katı sınırdan uzaklaştıkça büyük bir azalma göstermiştir. Bu nedenle, Durum 1 için elde edilmiş olan GCI değerlerine göre, kullanılan ağ yapısının çözüm üzerine etkisinin olmadığı belirlenmiştir.

Tablo 3. Durum 1 için $x=290$ cm'deki GCI sonuçları

n(mm)	d_1 (mm)	d_2 (mm)	d_3 (mm)	U_{s1}	U_{s2}	U_{s3}	r_1	r_2	p	GCI
10	1.866	1.494	1.195	0.268	0.267	0.266	1.249	1.250	-4.769	-0.935
20	2.511	1.965	1.612	0.301	0.301	0.300	1.278	1.219	-8.334	-0.699
30	2.501	2.001	1.666	0.326	0.326	0.324	1.250	1.201	-22.297	-0.538
40	2.499	1.690	1.666	0.349	0.349	0.348	1.479	1.014	-23.565	-0.353
50	3.033	1.666	2.499	0.365	0.366	0.365	1.821	0.667	-23.565	-0.353
70	3.758	2.997	2.499	0.376	0.377	0.376	1.254	1.199	1.648	0.311
90	4.002	2.852	2.499	0.379	0.380	0.379	1.403	1.141	-1.595	-0.559
110	4.000	2.861	2.499	0.379	0.382	0.382	1.398	1.145	4.855	0.110
140	3.749	3.006	2.499	0.383	0.384	0.383	1.247	1.203	3.356	0.097
180	3.848	3.124	2.499	0.369	0.367	0.367	1.232	1.250	14.350	0.001

Tablo 4. Durum 1 için $x=390$ cm'deki GCI sonuçları

n(mm)	d_1 (mm)	d_2 (mm)	d_3 (mm)	U_{s1}	U_{s2}	U_{s3}	r_1	r_2	p	GCI
10	1.879	1.491	1.200	0.265	0.264	0.263	1.260	1.243	-1.843	-0.018
20	2.507	1.972	1.607	0.297	0.296	0.295	1.272	1.227	-1.975	-0.015
30	2.503	2.003	1.666	0.318	0.318	0.317	1.249	1.202	-4.860	-0.008
40	2.498	1.666	1.665	0.337	0.337	0.336	1.499	1.001	-13.331	-0.007
50	3.034	3.031	2.500	0.356	0.355	0.354	1.001	1.212	18.719	0.000
70	3.752	2.997	2.500	0.379	0.379	0.379	1.252	1.199	-1.733	-0.004
90	4.001	2.857	2.497	0.383	0.384	0.383	1.400	1.144	-3.114	-0.003
110	4.001	2.857	2.500	0.385	0.386	0.385	1.400	1.143	-2.742	-0.003
140	3.748	3.003	2.497	0.387	0.387	0.387	1.248	1.203	2.437	0.001
180	3.846	3.127	2.500	0.372	0.371	0.370	1.230	1.250	0.641	0.011

Durum 6 için, $x=290$ ve 390 cm için 10 farklı yükseklikte hesaplanan GCI değerleri sırasıyla Tablo 5 ve 6'da verilmiştir. Buna göre, çok daha düşük bir derinliğe sahip olan bu akım için GCI değerleri $x=290$ cm'de %1.972 değerine ulaşırken, en düşük değer %0.1 olmuştur. Burada da Durum 1'e benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bunun yanında, $x=390$ cm'de akım tamamen gelişmiş düzenli

üniform bir akım durumuna geçtiği, tipik bir açık kanal akımına dönüştüğünden GCI değerlerinin oldukça düşük değerlerde olduğu görülmüştür. Elde edilen tüm değerlerin %2'den küçük olduğu görülmektedir. Dolayısıyla hesaplamalarda Ağ 3 yapısının kullanılması durumunda, hesaplama ağının sayısal model sonuçlar üzerinde etkisinin olmadığı söylenebilir.

Tablo 5. Durum 6 için $x=290$ cm'deki GCI sonuçları

n(mm)	d_1 (mm)	d_2 (mm)	d_3 (mm)	U_{s1}	U_{s2}	U_{s3}	r_1	r_2	p	GCI
2.5	1.414	1.171	0.928	0.106	0.103	0.108	1.208	1.262	-1.374	-0.224
5	1.581	1.308	1.049	0.132	0.127	0.132	1.209	1.246	-0.012	-1.972
7.5	1.779	1.429	1.125	0.144	0.138	0.145	1.245	1.270	0.320	0.696
10	1.870	1.490	1.201	0.153	0.146	0.153	1.255	1.241	-0.174	-1.488
15	1.992	1.627	1.292	0.159	0.152	0.159	1.224	1.259	0.793	0.283
17.5	2.372	1.885	1.490	0.169	0.161	0.169	1.258	1.265	0.491	0.467
22.5	2.646	2.053	1.673	0.177	0.168	0.176	1.289	1.227	-0.480	-0.602
27.5	2.494	1.773	1.673	0.183	0.174	0.182	1.407	1.060	-11.080	-0.117
35	2.494	2.007	1.673	0.189	0.181	0.189	1.242	1.200	-0.953	-0.318
45	2.494	1.667	1.657	0.194	0.188	0.196	1.496	1.006	-18.330	-0.082

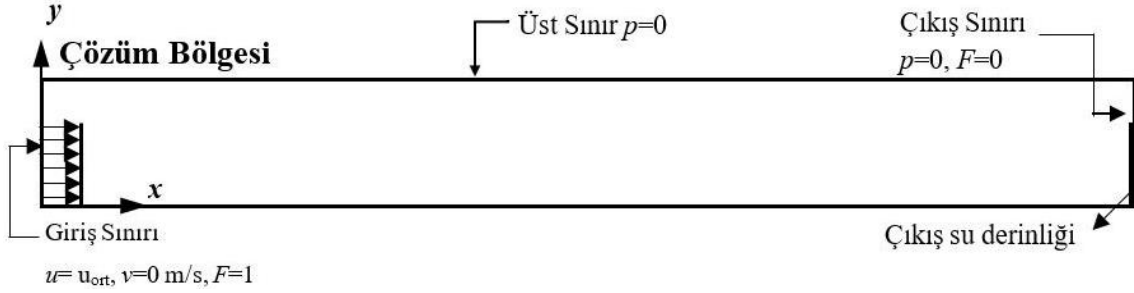
Tablo 6. Durum 6 için $x=390$ cm'deki GCI sonuçları

n(mm)	d_1 (mm)	d_2 (mm)	d_3 (mm)	U_{s1}	U_{s2}	U_{s3}	r_1	r_2	p	GCI
2.5	1.417	1.179	0.931	0.108	0.108	0.112	1.202	1.267	-16.777	-0.050
5	1.580	1.298	1.039	0.133	0.133	0.137	1.217	1.250	-9.240	-0.042
7.5	1.774	1.428	1.114	0.146	0.145	0.150	1.242	1.282	-6.463	-0.044
10	1.883	1.493	1.201	0.155	0.153	0.158	1.261	1.243	-6.318	-0.048
15	1.991	1.634	1.298	0.161	0.159	0.164	1.219	1.258	-4.106	-0.061
17.5	2.370	1.883	1.493	0.171	0.168	0.174	1.259	1.261	-3.042	-0.077
22.5	2.651	2.056	1.666	0.178	0.175	0.180	1.289	1.234	-3.129	-0.083
27.5	2.499	1.668	1.666	0.183	0.180	0.186	1.498	1.001	-79.824	-0.067
35	2.499	2.002	1.666	0.189	0.185	0.192	1.249	1.201	-3.217	-0.093
45	2.499	1.669	1.666	0.194	0.191	0.197	1.497	1.002	-57.475	-0.061

Ayrıca, iki farklı debi ile farklı kesitlerde ve farklı yüksekliklerde elde edilen GCI değerleri incelendiğinde, hesaplanan büyük GCI değerlerinin akımın ani değişimler sergilediği katı sınıra yakın olan bölgelerde olduğu ve tabandan itibaren yapılacak sıkılaştırmaların çözüm üzerine olumlu etkiler sağlayacağı değerlendirilmiştir.

3.4. Çözüm bölgesi, başlangıç ve sınır şartları

Sayısal modellemede kullanılan çözüm bölgesi, sınır ve başlangıç şartları Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Sayısal çözüm bölgesi ve sınır şartları

4. Bulgular ve tartışmalar

4.1. Deneysel ve sayısal hız profilleri

Deneysel ve farklı türbülans modelleri kullanılarak elde edilen sayısal hız profillerinin karşılaştırılmasında niceliksel kriter olarak Ortalama Karesel Hata (OKH) ve Ortalama Mutlak Göreceli Hata (OMGH) parametreleri kullanılmıştır. OKH ve OMGH değerleri sırasıyla Denklem 8 ve 9'da verildiği gibi hesaplanmaktadır.

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

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

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

Buna göre, kanal tabanında sıfır hız sınır şartı (no-slip stationary wall condition- $u=0, v=0$), giriş sınırının hemen üstünde, kanal üst ve çıkış sınırında $p=0$ (pressure outlet), giriş sınırında (velocity inlet) $v=0$ alınmış ve u hızı ise her bir durum için deneysel verilerden hesaplanarak tanımlanmıştır. Kanal sonunda çıkış su derinliğine bağlı olarak açık kanal çözümü yapılmış ve her bir deneyin çıkış su derinliği ayrı ayrı tanımlanmıştır. Sayısal modellemelerde başlangıç şartı olarak çözüm bölgesi tamamen boş ($F=0$), sadece giriş sınırında $F=1$ olarak tanımlanmıştır.

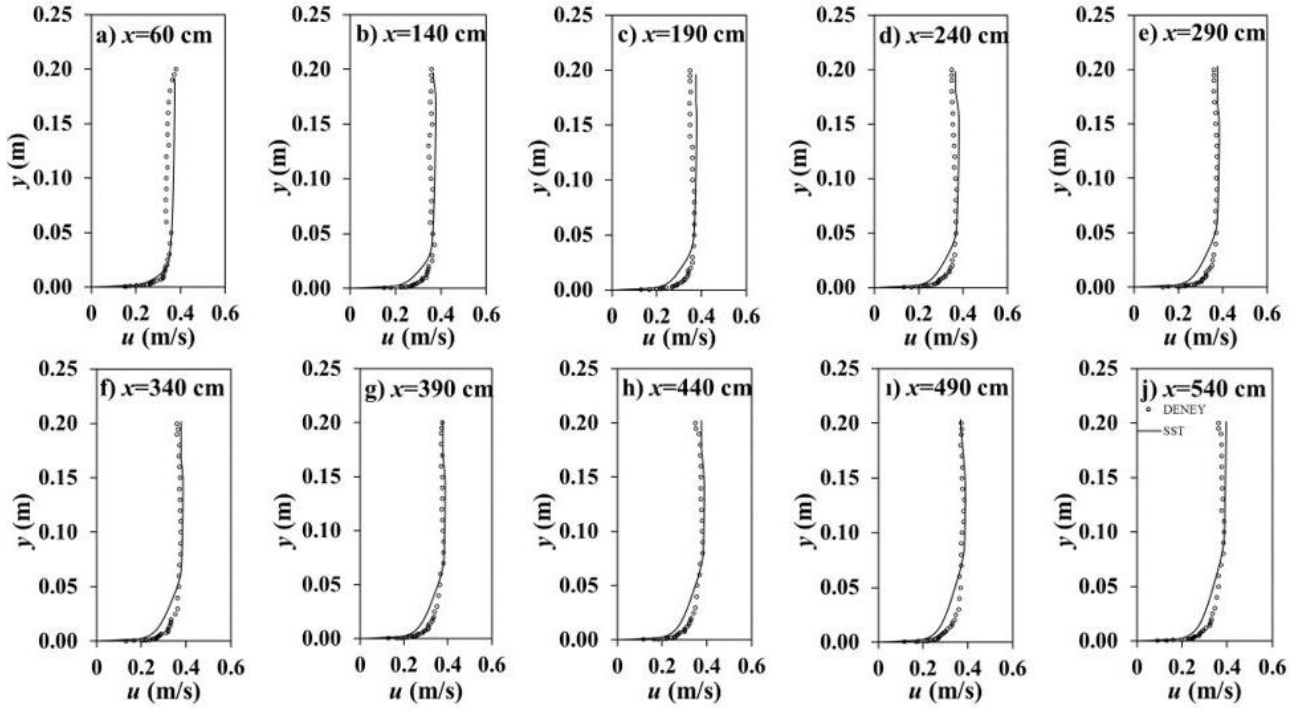
Tablo 7'de, Durum 1 için farklı türbülans modelleri ile elde edilen OKH ve OMGH değerleri verilmiştir. Tablo da en başarılı olan model sonuçları koyu yazılmış ve modellerin başarı sıralaması parantez içerisinde üstel olarak verilmiştir. Tablodaki değerlere göre, kanal başlangıcında ($x=0.6-2.4$ m) SST modeli en başarılı model olurken, kanal ortasında (2.9 ve 3.4 m) ise DES modeli deneysel verilere diğer modellere kıyasla daha fazla yakınsamıştır. Kanal sonuna doğru ($x=3.9-5.4$ m) ise yine SST modelinin deneysel verilere yakın tahminde bulunduğu görülmüştür. Tablonun son satırında verilen tüm kanal boyunca ele alınan kesitlerde elde edilen OKH ve OMGH değerlerinin ortalamaları değerlendirildiğinde, kullanılan türbülans modellerinin başarı sıralaması SST, DES, RNG ve RSM şeklinde olmuştur. OKH değerlerine göre, ele alınan 10 kesitten 6'sında SST modeli, $x=2.9$ ve 3.4 m kesitlerinde ise DES daha başarılı olmuştur. Ancak, SST ve DES modelleriyle elde edilen OKH değerleri arasındaki farkın da oldukça küçük olduğu belirlenmiştir.

Tablo 7. Durum 1 için farklı türbülans modellerine göre OKH (cm^2/s^2) ve OMGH (%) değerleri

x (m)	RNG		SST		RSM		DES	
	OKH	OMGH	OKH	OMGH	OKH	OMGH	OKH	OMGH
0.6	6.60(3)	6.78(3)	5.91(1)	6.41(2)	6.15(2)	6.36(1)	9.13(4)	8.04(4)
1.4	6.26(4)	5.69(3)	5.33(1)	5.51(2)	5.97(2)	5.26(1)	6.00(3)	6.16(4)
1.9	7.54(3)	6.35(3)	6.40(1)	6.03(1)	7.58(4)	6.14(2)	6.78(2)	6.47(4)
2.4	7.98(3)	6.81(4)	5.64(1)	5.78(1)	8.89(4)	6.72(3)	6.68(2)	6.57(2)
2.9	7.67(3)	5.88(3)	5.12(2)	4.95(2)	9.58(4)	6.18(4)	4.37(1)	4.86(1)
3.4	6.99(3)	5.78(3)	4.57(2)	4.70(1)	9.13(4)	6.40(4)	4.23(1)	4.96(2)
3.9	5.73(3)	5.56(2)	3.48(1)	3.96(1)	7.87(4)	6.28(4)	5.13(2)	5.63(3)
4.4	6.08(3)	6.02(3)	3.87(1)	4.55(1)	8.50(4)	6.79(4)	4.63(2)	5.52(2)
4.9	6.96(2)	5.96(2)	5.24(1)	5.03(1)	8.19(4)	6.33(3)	7.57(3)	6.78(4)
5.4	5.38(2)	5.69(3)	5.37(1)	5.62(2)	5.39(3)	5.51(1)	8.43(4)	7.26(4)
Ort.	6.72(3)	6.05(2)	5.09(1)	5.25(1)	7.73(4)	6.20(3)	6.30(2)	6.23(4)

Durum 1 için kanal boyunca ele alınan kesitlerde elde edilen OKH ve OMGH değerinin ortalamasına göre deneysel hız profillerine en yakın tahminde bulunan SST modeli ile elde edilen sayısal hız profillerinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması Şekil 4'te verilmiştir. Verilen grafikler incelendiğinde, SST modelinin kanal boyunca ele alınan kesitlerde deneysel verilere yakın sonuçlar verdiği, ancak katı sınıra yakın olan bölgede

deneysel verilerden uzaklaştığı ve genel olarak deneysel verilerden daha küçük bir hız değeri tahmin ettiği görülmüştür. Su yüzüne yakın bölgede, kanal tabanına yakın bölgeye kıyasla sayısal modelleme sonuçlarının deneysel profile daha fazla yakınsadığı görülmektedir. Ayrıca, sayısal ve deneysel sınır tabakası kalınlıklarının birbirinden farklılık gösterdiği ifade edilebilir.

**Şekil 4.** Durum 1 için deneysel ve sayısal hız profilleri

Tablo 8'de, Durum 2 için farklı türbülans modelleri ile elde edilen OKH ve OMGH değerleri verilmiştir. OKH kriterine göre $x=0.6, 1.9, 2.4, 2.9, 3.4$ ve 3.9 m kesitlerinde DES modeli, 1.4 ve 4.4 m kesitlerinde RSM modeli, 4.9 ve 5.4 m kesitlerinde ise RNG türbülans modeli en başarılı olmuştur.

OMGH kriterine göre ise $x=0.6, 1.9, 2.4$ ve 2.9 m kesitlerinde DES modeli OKH kriterine benzer olarak başarılı olurken, $x=3.4, 3.9$ ve 4.9 m kesitlerinde ise OMGH kriterine göre SST türbülans modeli en başarılı olmuştur. Ayrıca, 5.4 m kesitinde OKH kriterinde olduğu gibi RNG

türbülans modeli deneysel verilere daha yakın tahminde bulunmuştur. Ortalama değerlere göre, en küçük OKH ve OMGH değeri, DES modelinde elde edilmiştir. Yani diğer bir ifadeyle DES modeli kullanılarak gerçekleştirilen sayısal model sonucunda deneysel verilere en yakın tahminde bulunmuştur. Türbülans modellerinin başarı sıralaması DES, SST, RNG ve RSM şeklinde oluşmuştur. Bu sonuçtan ikincil akımlarda ve akımda ayrılmaların olduğu akım durumlarında

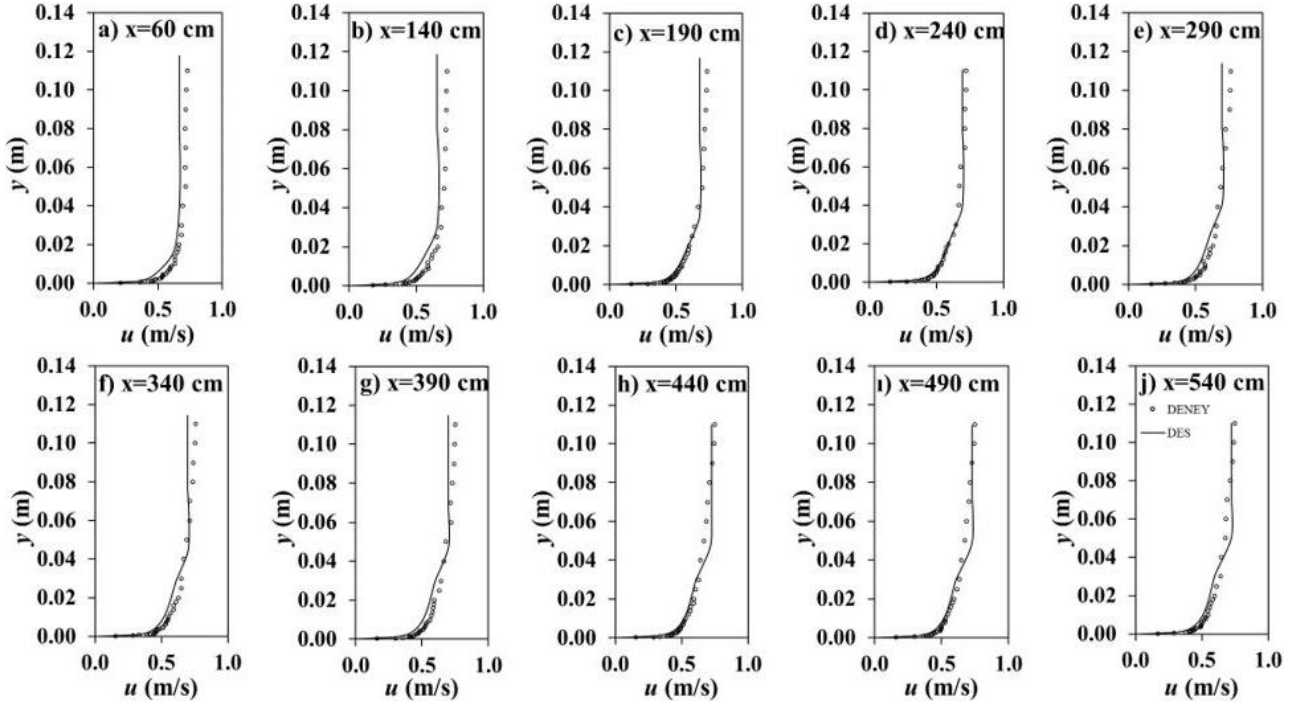
başarılı sonuçlar verdiği bilinen RSM modelinin en başarısız model olduğu görülmektedir. Ele alınan akım durumunda ayrılmanın ve ikincil akımların oluşmamasının bu sonuca neden olduğu söylenebilir. Katı sınıra yakın bölgede $k-\epsilon$ denklemlerini çözen, katı sınırdan uzaklaştıkça $k-\omega$ denklemlerini çözmesinden dolayı hibrit bir model olan SST modelinin, tüm akım derinliği boyunca $k-\epsilon$ denklemini çözen RNG modeline üstünlük sağladığı görülmektedir.

Tablo 8. Durum 2 için farklı türbülans modellerine göre OKH (cm^2/s^2) ve OMGH (%) değerleri

x (m)	RNG		SST		RSM		DES	
	OKH	OMGH	OKH	OMGH	OKH	OMGH	OKH	OMGH
0.6	38.87 ⁽³⁾	8.74 ⁽³⁾	31.19 ⁽²⁾	7.30 ⁽²⁾	67.43 ⁽⁴⁾	10.55 ⁽⁴⁾	22.67⁽¹⁾	6.77⁽¹⁾
1.4	57.26 ⁽³⁾	10.01 ⁽⁴⁾	58.01 ⁽⁴⁾	9.69 ⁽³⁾	7.25⁽¹⁾	3.58⁽¹⁾	30.49 ⁽²⁾	7.81 ⁽²⁾
1.9	315.00 ⁽³⁾	7.55 ⁽³⁾	304.74 ⁽²⁾	6.84 ⁽²⁾	345.19 ⁽⁴⁾	11.12 ⁽⁴⁾	287.79⁽¹⁾	4.95⁽¹⁾
2.4	14.64 ⁽²⁾	4.40 ⁽²⁾	26.73 ⁽⁴⁾	5.61 ⁽⁴⁾	16.17 ⁽³⁾	4.48 ⁽³⁾	4.18⁽¹⁾	2.71⁽¹⁾
2.9	34.39 ⁽²⁾	6.31 ⁽²⁾	40.95 ⁽³⁾	7.30 ⁽³⁾	127.28 ⁽⁴⁾	15.90 ⁽⁴⁾	15.39⁽¹⁾	5.15⁽¹⁾
3.4	26.27 ⁽³⁾	5.89 ⁽³⁾	18.65 ⁽²⁾	4.86⁽¹⁾	57.59 ⁽⁴⁾	10.58 ⁽⁴⁾	15.81⁽¹⁾	5.27 ⁽²⁾
3.9	17.14 ⁽³⁾	4.48 ⁽²⁾	15.37 ⁽²⁾	4.12⁽¹⁾	37.73 ⁽⁴⁾	8.75 ⁽⁴⁾	14.67⁽¹⁾	5.35 ⁽³⁾
4.4	10.70 ⁽⁴⁾	3.55 ⁽²⁾	9.72 ⁽³⁾	3.83 ⁽³⁾	4.58⁽¹⁾	2.56⁽¹⁾	8.89 ⁽²⁾	4.09 ⁽⁴⁾
4.9	5.44⁽¹⁾	3.17 ⁽²⁾	6.77 ⁽²⁾	2.81⁽¹⁾	32.06 ⁽⁴⁾	8.44 ⁽⁴⁾	9.23 ⁽³⁾	4.13 ⁽³⁾
5.4	5.11⁽¹⁾	2.57⁽¹⁾	5.66 ⁽²⁾	3.05 ⁽²⁾	7.48 ⁽³⁾	3.36 ⁽³⁾	11.24 ⁽⁴⁾	4.67 ⁽⁴⁾
Ort.	52.48 ⁽³⁾	5.67 ⁽³⁾	51.78 ⁽²⁾	5.54 ⁽²⁾	70.28 ⁽⁴⁾	7.93 ⁽⁴⁾	42.04⁽¹⁾	5.09⁽¹⁾

Durum 2 için kanal boyunca ortalama OKH ve OMGH değerlerine göre hız alanını kullanılan diğer modellere kıyasla daha başarılı modellediği görülen DES modeli ile elde edilen sayısal hız profillerinin deneysel profillerle karşılaştırılması Şekil 5'te verilmiştir. DES modelinin $x=60$ ve 140 cm kesitlerinde katı sınıra yakın bölgede ve akım derinliği boyunca deneysel verilerden uzak tahminde bulunmasının yanında hız profilinin genel olarak gidişatının benzer olduğu görülmektedir. Kanal boyunca ele alınan diğer kesitlerde, $x=60$ ve 140 cm kesitlerine kıyasla

deneysel verilere daha fazla yakınsamıştır. Durum 2 için DES modeli kullanılarak elde edilen hız profillerinin Durum 1'e kıyasla katı sınıra yakın bölgede deneysel verilerle daha uyumlu olduğu söylenebilir. Aksine, tam türbülanslı bölgede ise deneysel ve sayısal hız profillerinin uyumu kanal eğiminin artmasıyla azalmaktadır. Bu bölgede Durum 1'de elde edilen sayısal hız profilleri deneysel sonuçlara Durum 2'ye kıyasla daha fazla yakınsamıştır.



Şekil 5. Durum 2 için deneysel ve sayısal hız profilleri

Durum 3 için farklı türbülans modelleri ile elde edilen OKH ve OMGH değerleri Tablo 9’da verilmiştir. Buna göre, OKH değerleri kanal girişinde ($x=0.6$ ve 2.4 m) DES modeli başarılı olurken, bu kesitler haricindeki ele alınan diğer tüm kesitlerde ise RSM modeli en başarılı model olmuştur. OMGH değerlerine bakıldığında ise kanal başlangıcında DES modeli RSM modelinden daha başarılı olmuştur. DES modeli ile RNG modelinin sonuçlarının birbirine daha yakın olduğu görülmektedir. Tüm kanal boyunca elde edilen OKH ve OMGH değerlerinin ortalamaları

değerlendirildiğinde, kullanılan türbülans modellerinin başarı sıralaması RSM, RNG, DES ve SST şeklinde olmuştur. OKH değerlerine göre, ele alınan 10 kesitin 8 kesitinde RSM modeli başarılı olmuş, RNG, RSM, DES modellerinin sonuçlarının arasındaki farkın küçük olmuş ve SST türbülans modeli sonucunda elde edilen OKH ve OMGH değerlerinin büyük olması, bu modelin diğer modellere göre hata değerlerinin daha büyük olduğunu ifade etmektedir. Bu sonuçtan, SST modelinin Durum 3 için deneysel verileri tahmin etmekte başarısız olduğu söylenebilir.

Tablo 9. Durum 3 için farklı türbülans modellerine göre OKH (cm^2/s^2) ve OMGH (%) değerleri

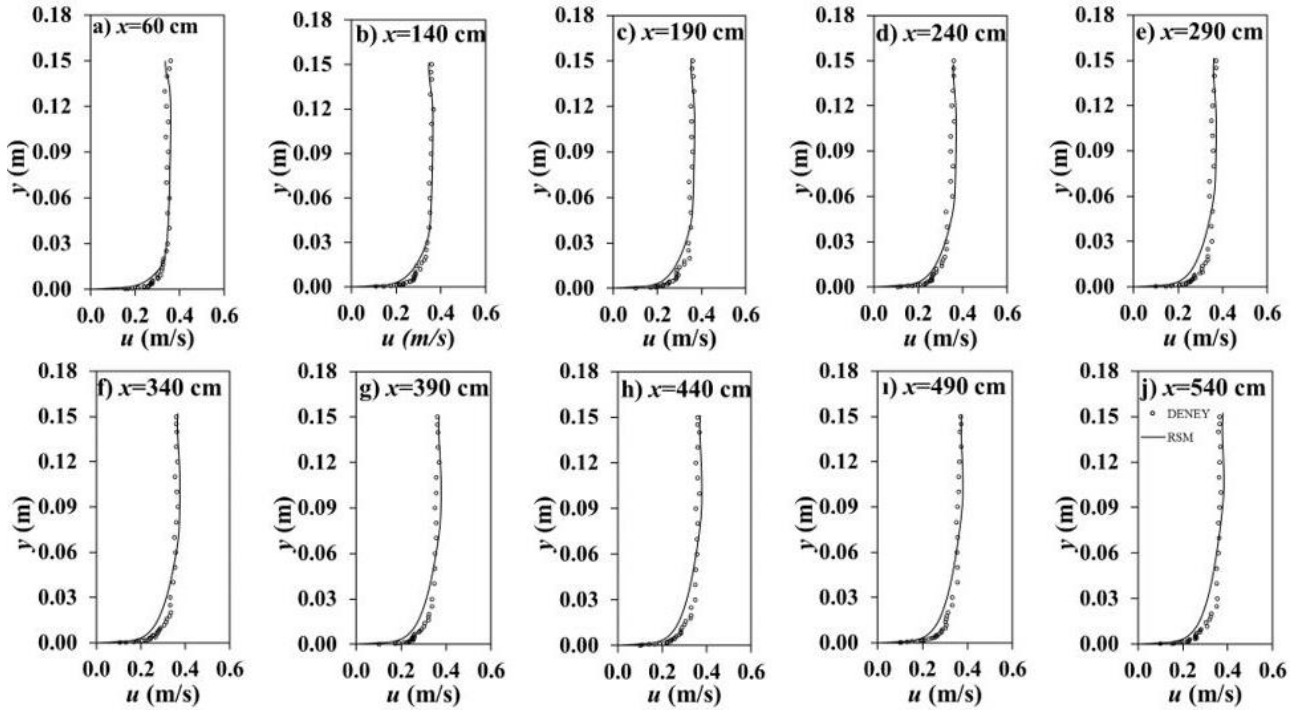
x (m)	RNG		SST		RSM		DES	
	OKH	OMGH	OKH	OMGH	OKH	OMGH	OKH	OMGH
0.6	2.98 ⁽³⁾	4.03 ⁽⁴⁾	3.23 ⁽⁴⁾	3.82 ⁽³⁾	2.68 ⁽²⁾	3.79 ⁽²⁾	2.47 ⁽¹⁾	3.59 ⁽¹⁾
1.4	2.49 ⁽³⁾	3.63 ⁽⁴⁾	2.77 ⁽⁴⁾	3.37 ⁽³⁾	2.16 ⁽¹⁾	3.14 ⁽²⁾	2.35 ⁽²⁾	2.68 ⁽¹⁾
1.9	3.72 ⁽³⁾	4.96 ⁽⁴⁾	4.10 ⁽⁴⁾	4.35 ⁽²⁾	3.34 ⁽¹⁾	4.44 ⁽³⁾	3.66 ⁽²⁾	3.84 ⁽¹⁾
2.4	3.44 ⁽³⁾	5.12 ⁽⁴⁾	3.66 ⁽⁴⁾	4.82 ⁽³⁾	3.20 ⁽²⁾	4.80 ⁽²⁾	2.79 ⁽¹⁾	3.94 ⁽¹⁾
2.9	6.11 ⁽²⁾	6.53 ⁽³⁾	9.27 ⁽⁴⁾	7.13 ⁽⁴⁾	5.57 ⁽¹⁾	6.01 ⁽²⁾	6.43 ⁽³⁾	5.59 ⁽¹⁾
3.4	4.52 ⁽²⁾	5.59 ⁽³⁾	9.65 ⁽⁴⁾	7.74 ⁽⁴⁾	4.03 ⁽¹⁾	4.86 ⁽¹⁾	5.20 ⁽³⁾	4.91 ⁽²⁾
3.9	5.41 ⁽²⁾	6.23 ⁽³⁾	10.25 ⁽⁴⁾	8.10 ⁽⁴⁾	4.81 ⁽¹⁾	5.45 ⁽²⁾	5.59 ⁽³⁾	5.35 ⁽¹⁾
4.4	5.88 ⁽³⁾	6.61 ⁽³⁾	11.59 ⁽⁴⁾	8.87 ⁽⁴⁾	4.87 ⁽¹⁾	5.77 ⁽²⁾	5.64 ⁽²⁾	5.65 ⁽¹⁾
4.9	5.48 ⁽²⁾	6.40 ⁽²⁾	10.84 ⁽⁴⁾	8.60 ⁽⁴⁾	4.90 ⁽¹⁾	5.65 ⁽¹⁾	6.46 ⁽³⁾	6.40 ⁽³⁾
5.4	6.45 ⁽²⁾	6.63 ⁽³⁾	11.49 ⁽⁴⁾	8.62 ⁽⁴⁾	5.48 ⁽¹⁾	5.9 ⁽¹⁾	7.70 ⁽³⁾	6.54 ⁽²⁾
Ort.	4.65 ⁽²⁾	5.57 ⁽³⁾	7.69 ⁽⁴⁾	6.54 ⁽⁴⁾	4.10 ⁽¹⁾	4.98 ⁽²⁾	4.83 ⁽³⁾	4.85 ⁽¹⁾

Durum 3 için ortalama OKH ve OMGH değerlerine göre kanal boyunca hız alanını kullanılan diğer modellere kıyasla RSM modeli

daha başarılı modellemiştir. Bu model ile elde edilen sayısal hız profillerinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması Şekil 6’da verilmiştir. Grafikler

incelendiğinde, RSM modelinin $x=60$ ve 240 cm kesitlerinde katı sınıra yakın bölgede deneysel sonuçlara yakın tahminde bulunurken, katı sınırının akım alanı üzerinde etkisinin olmadığı, bölgede akım derinliği boyunca deneysel verilerden uzak tahminde bulunduğu görülmektedir. $x=60$ ve 240 cm kesitleri dışında kalan tüm kesitlerde ise akım derinliği boyunca deneysel verilere yakın tahminde bulunduğu görülmektedir. Tablo 9’da verilen OKH ve OMGH değerlerine göre, RSM modeli Durum 3 ve 4 dışında kullanılan diğer modellere göre deneysel sonuçlardan daha kötü tahminde bulunduğu görülmüştür. Kanal girişinde deneysel hız profilleriyle sayısal model sonucunun uyumu gözlenirken, kanalın sonlarına doğru uyum gittikçe azalmıştır. RSM türbülans modeli kanal tabanında yani katı sınırına yakın bölgede akım hız alanlarını deneysel verilere göre daha düşük tahmin ederken, katı sınırın etkisi dışında kalan bölgede akım derinliği boyunca deneysel sonuçlara daha yakın tahminde bulunmuştur. OKH ve OMGH değeri incelendiğinde en yakın tahmini $x=190$ cm kesitinde elde ederken, en uzak tahmini de $x=290$ cm kesitinde gerçekleşmiştir.

Tablo 10’da, Durum 4 için farklı türbülans modelleri ile elde edilen OKH ve OMGH değerleri verilmiştir. Tabloya göre ele alınan tüm kanal kesitlerinde en küçük OKH ile OMGH değerlerinin DES modeliyle elde edilmesi, DES türbülans modelinin en başarılı model olduğunu belirtmektedir. Tablodan, SST ve RSM modellerine ait OKH ve OMGH değerleri incelendiğinde birbirine yakın olduğu görülmekte, bu akım durumu için SST ve RSM modellerinin birbirine benzer tahminde bulunduğunu göstermektedir. RNG modelinin OKH ve OMGH değerlerinin kullanılan diğer üç modele kıyasla çok büyük olması başarısız olduğunu göstermektedir. SST modeli, kanal girişinde $x=2$ m kesitine kadar oldukça iyi tahminde bulunurken, $x=2$ m kesitinden sonra SST türbülans modeliyle elde edilen hız profillerinin, deneysel profillerden uzaklaştığı anlaşılmaktadır. Kanal boyunca 10 farklı kesitte elde edilen OKH ve OMGH ortalama değerlerine göre, en küçük OKH ve OMGH değeri DES modelinde elde edilmiştir. Türbülans modellerinin başarı sıralaması DES, RSM, SST, ve RNG şeklinde olmuştur.



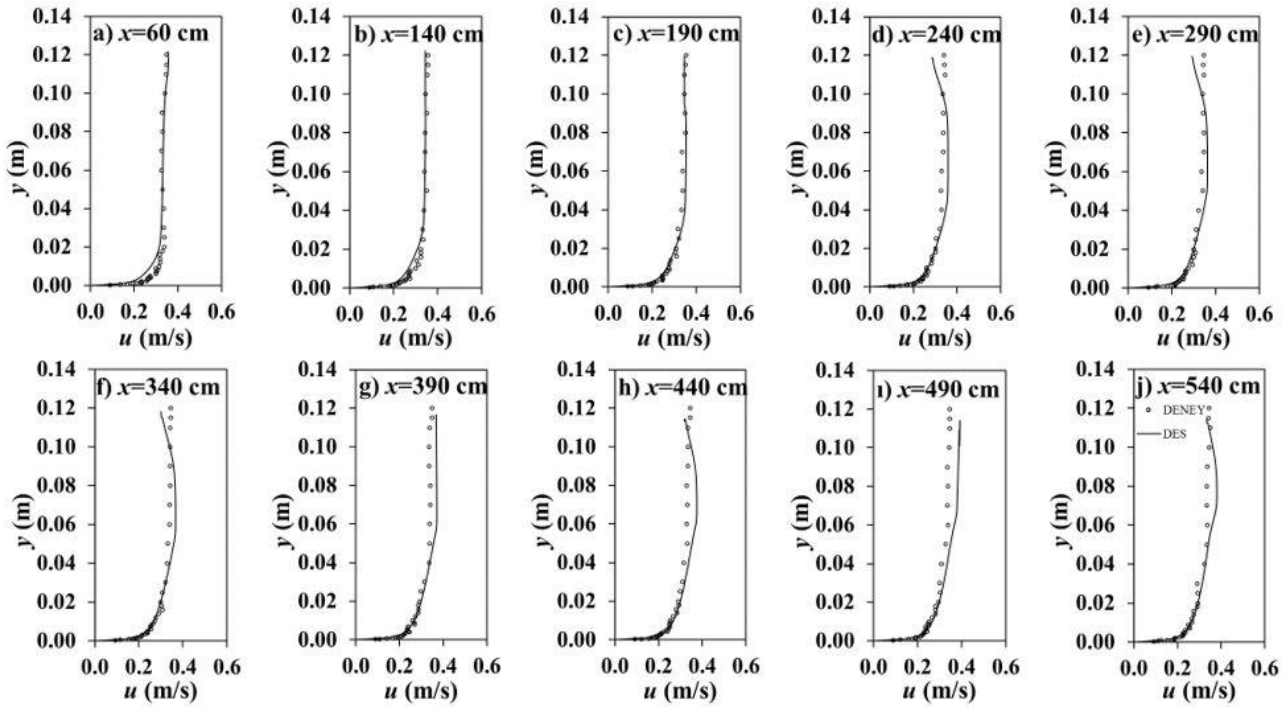
Şekil 6. Durum 3 için deneysel ve sayısal hız profilleri

Tablo 10. Durum 4 için farklı türbülans modellerine göre OKH (cm^2/s^2) ve OMGH (%) değerleri

x (m)	RNG		SST		RSM		DES	
	OKH	OMGH	OKH	OMGH	OKH	OMGH	OKH	OMGH
0.6	43.58 ⁽⁴⁾	15.95 ⁽⁴⁾	6.80 ⁽²⁾	6.11 ⁽²⁾	12.17 ⁽³⁾	8.00 ⁽³⁾	2.85⁽¹⁾	3.86⁽¹⁾
1.4	21.45 ⁽⁴⁾	11.01 ⁽⁴⁾	3.59 ⁽²⁾	5.03 ⁽²⁾	15.60 ⁽³⁾	10.86 ⁽³⁾	1.50⁽¹⁾	2.62⁽¹⁾
1.9	13.57 ⁽⁴⁾	9.96 ⁽⁴⁾	6.93 ⁽²⁾	6.81 ⁽²⁾	9.95 ⁽³⁾	8.91 ⁽³⁾	1.31⁽¹⁾	2.97⁽¹⁾
2.4	28.88 ⁽⁴⁾	16.06 ⁽⁴⁾	12.62 ⁽³⁾	9.96 ⁽³⁾	9.78 ⁽²⁾	7.90 ⁽²⁾	5.33⁽¹⁾	5.94⁽¹⁾
2.9	24.44 ⁽⁴⁾	14.35 ⁽⁴⁾	13.18 ⁽²⁾	10.41 ⁽²⁾	18.34 ⁽³⁾	11.25 ⁽³⁾	4.53⁽¹⁾	5.56⁽¹⁾
3.4	32.32 ⁽⁴⁾	16.89 ⁽⁴⁾	16.97 ⁽²⁾	12.04 ⁽²⁾	22.89 ⁽³⁾	13.02 ⁽³⁾	4.26⁽¹⁾	5.27⁽¹⁾
3.9	31.85 ⁽⁴⁾	16.93 ⁽⁴⁾	21.97 ⁽²⁾	13.81 ⁽³⁾	22.07 ⁽³⁾	13.33 ⁽²⁾	4.58⁽¹⁾	5.51⁽¹⁾
4.4	35.07 ⁽⁴⁾	17.85 ⁽⁴⁾	32.50 ⁽³⁾	16.81 ⁽³⁾	14.75 ⁽²⁾	10.98 ⁽²⁾	6.92⁽¹⁾	6.97⁽¹⁾
4.9	25.40 ⁽³⁾	15.33 ⁽³⁾	32.73 ⁽⁴⁾	16.57 ⁽⁴⁾	10.64 ⁽²⁾	9.34 ⁽²⁾	6.47⁽¹⁾	6.94⁽¹⁾
5.4	11.97 ⁽³⁾	10.11 ⁽³⁾	30.07 ⁽⁴⁾	15.83 ⁽⁴⁾	7.93 ⁽²⁾	7.73 ⁽²⁾	5.91⁽¹⁾	5.86⁽¹⁾
Ort.	26.85 ⁽⁴⁾	14.44 ⁽⁴⁾	17.74 ⁽³⁾	11.34 ⁽³⁾	14.41 ⁽²⁾	10.13 ⁽²⁾	4.37⁽¹⁾	5.15⁽¹⁾

Tablo 10'da, Durum 4 için kanal boyunca ele alınan kesitlerde elde edilen OKH ve OMGH değerlerinin ortalama değerlerine göre kanal boyunca hız alanını, DES modeli kullanılan diğer modellere kıyasla daha başarılı modellemiştir. Deneysel sonuçlar ile DES modeli kullanılarak elde edilen sayısal hız profillerinin karşılaştırılması Şekil 7'de verilmiştir. Verilen grafikler incelendiğinde, DES modeli $x=60, 140$ ve 190 cm kesitlerinde deneysel verileri tahminde çok başarılı olmuştur. Kanal girişinde $x=60$ ve 140 cm

kesitlerinde katı sınıra yakın bölgede deneysel veriden uzaklaşırken, akım derinliği boyunca bu sınırın üstünde kalan kısımda daha yakın tahminde bulunmuştur. Kanal boyunca $x=60$ ve 140 cm dışında kalan kesitlerde kanal tabanına yakın bölgeyi deneysel verilere yakın tahminde bulunarak bu bölgede çok başarılı olmuştur. Tablo 10'da verilen OKH değeri incelendiğinde deneysel verilere en yakın tahmini $x=190$ cm kesitinde ($1.31 \text{ cm}^2/\text{s}^2$) yaparken, en uzak tahmini de $x=440$ cm kesitinde ($6.92 \text{ cm}^2/\text{s}^2$) yapmıştır.

**Şekil 7.** Durum 4 için deneysel ve sayısal hız profilleri

Durum 5 için farklı türbülans modelleri ile elde edilen OKH ve OMGH değerleri Tablo 11'de verilmiştir. Tüm durumlar göz önünde bulundurulduğunda RNG türbülans modeli sadece

Durum 5'te başarılı olurken diğer 6 durumda deneysel verileri tahminde başarısız olmuştur. Tabloda değerler incelendiğinde, $x=1.9, 2.4$ m kesitlerinde ve kanal sonlarına doğru ($x=4.4, 4.9,$

5.4 m) toplamış ve başarılı sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır. Tüm kesitlerin ortalaması değerlendirildiğinde en başarılı model RNG türbülans modeli olmuş, RNG modelini SST modeli takip etmiştir. RSM ve DES model ise çok küçük fark ile de olsa RNG ve SST modellerine

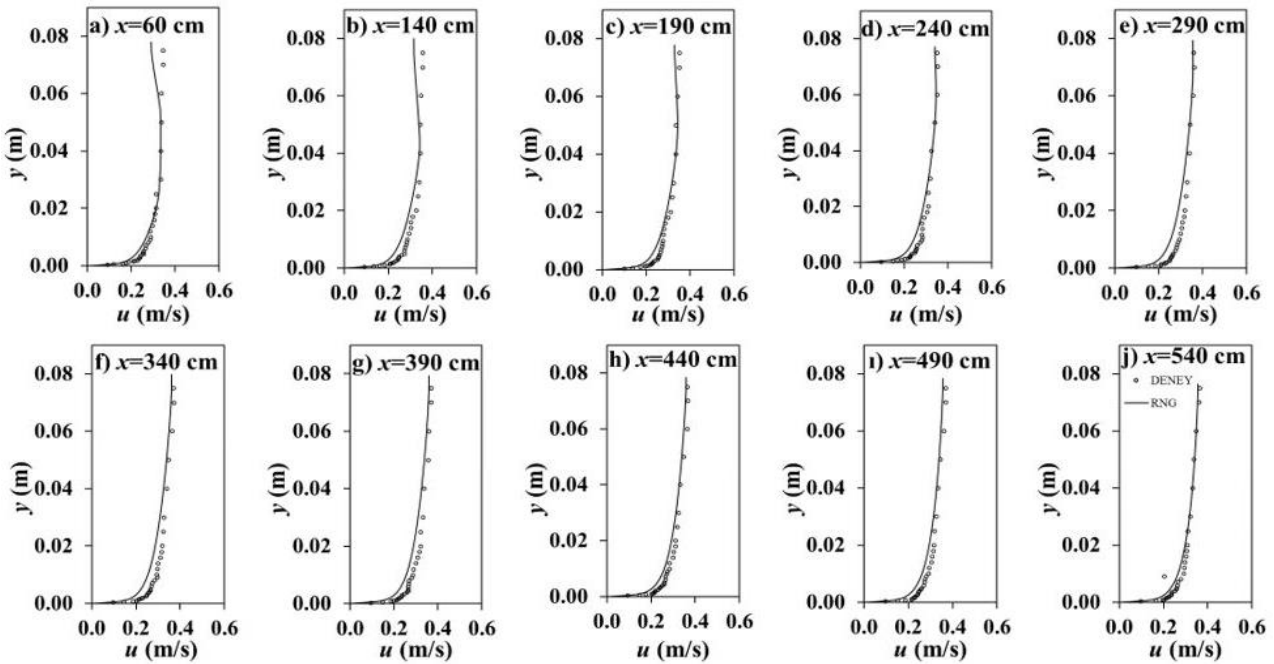
kıyasla başarısız olmuştur. Bu değerler değerlendirildiğinde, genel olarak değerlerin birbirine yakın olması ve oldukça küçük OKH ve OMGH değerlerinin elde edilmesinden kullanılan tüm türbülans modellerinin, Durum 5 için kullanılabileceğini ifade edilebiliriz.

Tablo 11. Durum 5 için farklı türbülans modellerine göre OKH (cm^2/s^2) ve OMGH (%) değerleri

x (m)	RNG		SST		RSM		DES	
	OKH	OMGH	OKH	OMGH	OKH	OMGH	OKH	OMGH
0.6	4.44 ⁽³⁾	4.72 ⁽³⁾	4.33 ⁽¹⁾	4.69 ⁽²⁾	6.70 ⁽⁴⁾	7.03 ⁽⁴⁾	4.35 ⁽²⁾	4.18 ⁽¹⁾
1.4	5.81 ⁽⁴⁾	6.78 ⁽⁴⁾	4.82 ⁽³⁾	5.97 ⁽³⁾	3.49 ⁽¹⁾	5.13 ⁽¹⁾	4.28 ⁽²⁾	5.45 ⁽²⁾
1.9	2.73 ⁽¹⁾	4.37 ⁽¹⁾	2.81 ⁽²⁾	4.45 ⁽²⁾	4.35 ⁽⁴⁾	6.27 ⁽⁴⁾	3.43 ⁽³⁾	4.97 ⁽³⁾
2.4	2.77 ⁽¹⁾	4.23 ⁽¹⁾	3.22 ⁽²⁾	4.79 ⁽²⁾	5.07 ⁽⁴⁾	6.38 ⁽⁴⁾	3.34 ⁽³⁾	4.99 ⁽³⁾
2.9	6.24 ⁽²⁾	6.70 ⁽³⁾	6.85 ⁽⁴⁾	6.52 ⁽²⁾	3.04 ⁽¹⁾	4.7 ⁽¹⁾	6.79 ⁽³⁾	6.76 ⁽⁴⁾
3.4	6.58 ⁽²⁾	7.38 ⁽⁴⁾	7.25 ⁽³⁾	7.11 ⁽²⁾	3.03 ⁽¹⁾	4.7 ⁽¹⁾	7.42 ⁽⁴⁾	7.20 ⁽³⁾
3.9	5.03 ⁽²⁾	6.69 ⁽²⁾	6.01 ⁽³⁾	6.79 ⁽³⁾	3.72 ⁽¹⁾	5.47 ⁽¹⁾	7.11 ⁽⁴⁾	7.71 ⁽⁴⁾
4.4	3.22 ⁽¹⁾	5.31 ⁽¹⁾	4.09 ⁽²⁾	5.78 ⁽²⁾	6.49 ⁽⁴⁾	7.37 ⁽⁴⁾	6.12 ⁽³⁾	7.24 ⁽³⁾
4.9	3.63 ⁽¹⁾	5.47 ⁽¹⁾	4.72 ⁽²⁾	6.21 ⁽²⁾	7.44 ⁽³⁾	7.62 ⁽³⁾	8.67 ⁽⁴⁾	8.56 ⁽⁴⁾
5.4	2.00 ⁽¹⁾	3.20 ⁽¹⁾	2.80 ⁽²⁾	4.17 ⁽²⁾	9.31 ⁽⁴⁾	8.84 ⁽³⁾	9.15 ⁽³⁾	9.19 ⁽⁴⁾
Ort.	4.25 ⁽¹⁾	5.48 ⁽¹⁾	4.69 ⁽²⁾	5.65 ⁽²⁾	5.26 ⁽³⁾	6.35 ⁽³⁾	6.06 ⁽⁴⁾	6.62 ⁽⁴⁾

Şekil 8’de, Durum 5 için kanal boyunca ele alınan kesitlerde elde edilen OKH ve OMGH değerinin ortalamasına göre deneysel hız profillerine en yakın tahminde bulunan RNG modeli ile elde edilen sayısal hız profillerinin deneysel sonuçlar ile grafiksel karşılaştırılması verilmiştir. Tüm diğer durumlar incelendiğinde, RNG modeli sadece Durum 5’te başarılı olmuştur. Şekil 8

incelendiğinde, RNG modeli, kanal giriş bölgesinde $x=60, 140$ ve 190 cm kesitlerinde katı sınıra ve su yüzüne yakın bölgenin dışında (akım derinliğinin orta kısmında) deneysel veriye yakın tahminde bulunmuştur. Bu kesitlerden sonra RNG modelinin, serbest su yüzüne doğru deneysel verilere yakın tahminde bulunduğu görülmektedir.



Şekil 8. Durum 5 için deneysel ve sayısal hız profilleri

Durum 6 için farklı türbülans modelleri ile elde edilen OKH ve OMGH değerleri Tablo 12’de verilmiştir. SST türbülans modeli kanal girişinde en başarılı model olurken, $x=4.9$ ve 5.4 m kesitlerinde DES en başarılı model olmuştur. SST türbülans modelinin OKH değerleri kanal girişinde ($x=0,6$ m kesitinde) 1.27 iken, kanal sonlarına doğru başarılı olduğu kesitlerde giderek bu değer küçülmüş yani deneysel değerleri tahmin başarıları artmıştır. $x=4.9$ ve 5.4 m kesitlerinde değerler

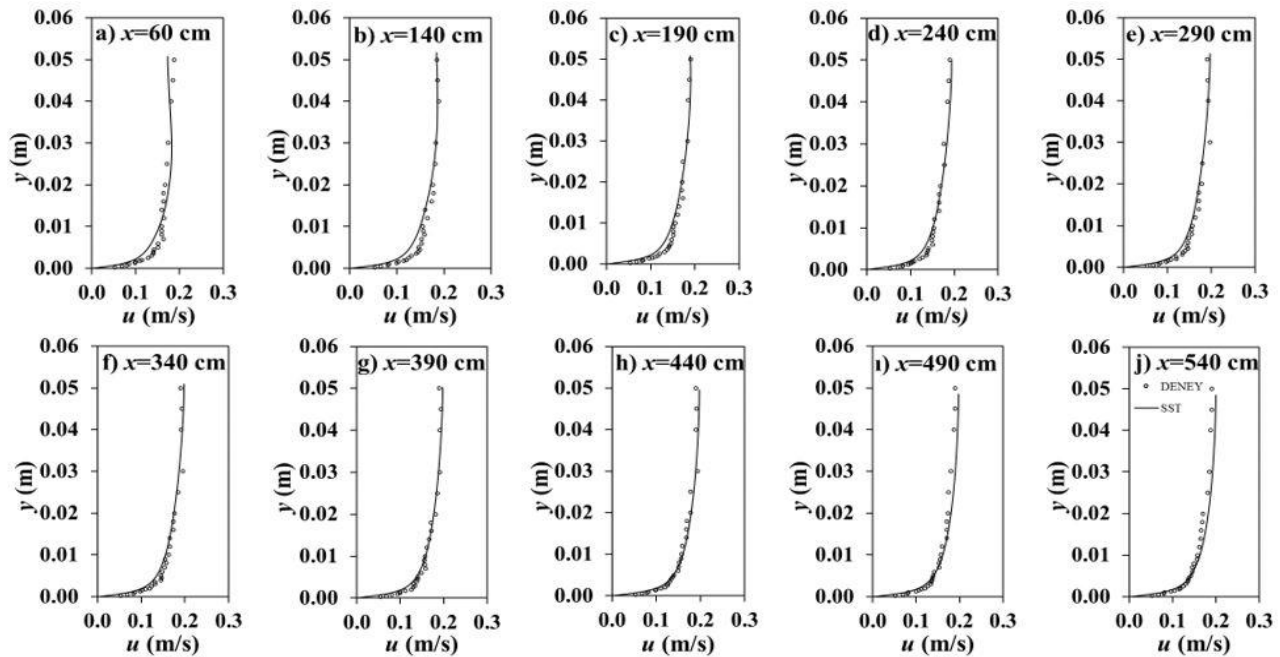
artmış, dolayısıyla tahminde başarılı olmamıştır. SST modeli 10 kesitin sekizinde başarılı olurken iki kesitte başarısız olmuştur. Son satırda verilen, ele alınan tüm kesitlerde elde edilen OKH ve OMGH değerlerinin ortalamasına bakıldığında SST modeli en başarılı model olmuştur. Tüm kesitlerin ortalamalarında deneysel verileri tahminde başarı sıralaması SST, DES, RNG ve RSM şeklinde olmuştur.

Tablo 12. Durum 6 için farklı türbülans modellerine göre OKH (cm^2/s^2) ve OMGH (%) değerleri

x (m)	RNG		SST		RSM		DES	
	OKH	OMGH	OKH	OMGH	OKH	OMGH	OKH	OMGH
0.6	1.72 ⁽³⁾	6.76 ⁽³⁾	1.27⁽¹⁾	6.26⁽¹⁾	1.81 ⁽⁴⁾	7.09 ⁽⁴⁾	1.31 ⁽²⁾	6.44 ⁽²⁾
1.4	1.59 ⁽³⁾	6.04 ⁽³⁾	0.90⁽¹⁾	4.34⁽¹⁾	1.79 ⁽⁴⁾	6.19 ⁽⁴⁾	1.18 ⁽²⁾	5.08 ⁽²⁾
1.9	1.28 ⁽³⁾	5.64 ⁽³⁾	0.63⁽¹⁾	3.87⁽¹⁾	1.55 ⁽⁴⁾	6.15 ⁽⁴⁾	0.96 ⁽²⁾	4.98 ⁽²⁾
2.4	1.01 ⁽³⁾	5.28 ⁽³⁾	0.61⁽¹⁾	4.20⁽¹⁾	1.33 ⁽⁴⁾	6.07 ⁽⁴⁾	0.79 ⁽²⁾	4.80 ⁽²⁾
2.9	1.72 ⁽³⁾	7.14 ⁽⁴⁾	0.70⁽¹⁾	4.43⁽¹⁾	1.77 ⁽⁴⁾	6.95 ⁽³⁾	1.41 ⁽²⁾	6.54 ⁽²⁾
3.4	1.63 ⁽³⁾	6.91 ⁽⁴⁾	0.54⁽¹⁾	3.85⁽¹⁾	1.65 ⁽⁴⁾	6.73 ⁽³⁾	1.32 ⁽²⁾	6.38 ⁽²⁾
3.9	1.35 ⁽³⁾	6.16 ⁽⁴⁾	0.40⁽¹⁾	2.91⁽¹⁾	1.39 ⁽⁴⁾	6.01 ⁽³⁾	1.08 ⁽²⁾	5.79 ⁽²⁾
4.4	0.91 ⁽³⁾	4.96 ⁽⁴⁾	0.36⁽¹⁾	3.15⁽¹⁾	0.97 ⁽⁴⁾	4.82 ⁽³⁾	0.75 ⁽²⁾	4.74 ⁽²⁾
4.9	0.80 ⁽²⁾	4.47 ⁽²⁾	0.81 ⁽³⁾	5.07 ⁽⁴⁾	0.96 ⁽⁴⁾	4.73 ⁽³⁾	0.53⁽¹⁾	3.36⁽¹⁾
5.4	0.63 ⁽²⁾	3.84 ⁽²⁾	0.75 ⁽³⁾	5.00 ⁽⁴⁾	0.79 ⁽⁴⁾	3.90 ⁽³⁾	0.51⁽¹⁾	3.70⁽¹⁾
Ort.	1.26 ⁽³⁾	5.72 ⁽³⁾	0.70⁽¹⁾	4.31⁽¹⁾	1.40 ⁽⁴⁾	5.86 ⁽⁴⁾	0.98 ⁽²⁾	5.18 ⁽²⁾

Tablo 12’de Durum 6 için son satırda verilen OKH ve OMGH ortalama değerlerine göre kanal boyunca hız alanını, DES modeli diğer modellere kıyasla daha başarılı modellemiştir. Deneysel sonuçlar ile DES modeli kullanılarak elde edilen sayısal hız profillerinin karşılaştırılması Şekil 9’da verilmiştir. Verilen grafikler incelendiğinde, kanal

tabanına yakın bölgede deneysel verilerle uyum azken, kanal tabanından uzaklaştıkça akım derinliğinin artmasıyla hız profilleri arasındaki uyum çok iyi olmuştur. Durum 6 için tüm kesitler karşılaştırıldığında en iyi uyum $x=440$ cm kesitinde olmuş ve tüm akım derinliği boyunca uyum çok iyi olmuştur.



Şekil 9. Durum 6 için deneysel ve sayısal hız profilleri

Tablo 13'te, Durum 7 için farklı türbülans modelleri ile elde edilen OKH ve OMGH değerleri verilmiştir. Tablo 13'te verilen OKH değerleri incelendiğinde, deneysel verilere en yakın tahmini $x=190$ cm kesitinde ($0.62 \text{ cm}^2/\text{s}^2$) yaparken en uzak tahmini de $x=340$ cm kesitinde ($6.34 \text{ cm}^2/\text{s}^2$) yapmıştır. Bu sonuç, grafiksel karşılaştırmadan da

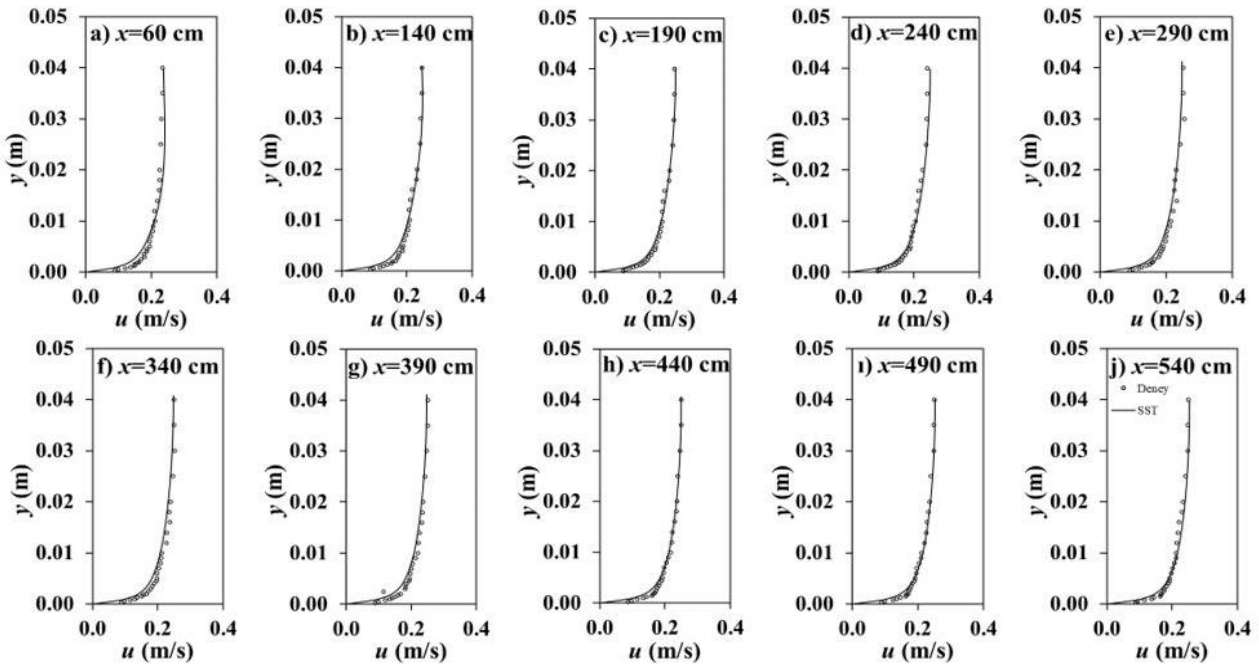
görülmektedir. RNG türbülans modeli hiçbir kesitte başarılı olmazken, RSM türbülans modeli $x=3.4$ m'de, DES türbülans modeli $x=1.9, 2.4, 3.9$ ve 4.4 m'de ve SST türbülans modeli $x=0.6, 1.4, 2.9, 4.9$ ve 5.4 m'de en başarılı olmuştur. Kullanılan modellerin başarı sıralaması SST, DES, RSM ve RNG şeklinde olmuştur.

Tablo 13. Durum 7 için farklı türbülans modellerine göre OKH (cm^2/s^2) ve OMGH (%) değerleri

x (m)	RNG		SST		RSM		DES	
	OKH	OMGH	OKH	OMGH	OKH	OMGH	OKH	OMGH
0.6	3.29 ⁽⁴⁾	7.74 ⁽⁴⁾	1.73⁽¹⁾	5.55⁽¹⁾	2.00 ⁽³⁾	5.94 ⁽³⁾	1.76 ⁽²⁾	5.58 ⁽²⁾
1.4	4.07 ⁽⁴⁾	9.27 ⁽⁴⁾	1.05⁽¹⁾	3.67 ⁽²⁾	1.48 ⁽³⁾	4.40 ⁽³⁾	1.06 ⁽²⁾	3.55⁽¹⁾
1.9	3.28 ⁽⁴⁾	8.35 ⁽⁴⁾	0.62 ⁽²⁾	2.91 ⁽²⁾	1.20 ⁽³⁾	4.42 ⁽³⁾	0.60⁽¹⁾	2.70⁽¹⁾
2.4	1.97 ⁽⁴⁾	6.08 ⁽⁴⁾	0.71 ⁽²⁾	3.40 ⁽²⁾	1.69 ⁽³⁾	5.62 ⁽³⁾	0.71⁽¹⁾	3.36⁽¹⁾
2.9	3.59 ⁽⁴⁾	8.58 ⁽⁴⁾	1.11⁽¹⁾	4.15⁽¹⁾	1.47 ⁽³⁾	4.72 ⁽³⁾	1.19 ⁽²⁾	4.24 ⁽²⁾
3.4	7.34 ⁽⁴⁾	13.19 ⁽⁴⁾	6.34 ⁽²⁾	10.68 ⁽²⁾	6.34⁽¹⁾	10.33⁽¹⁾	6.36 ⁽³⁾	10.78 ⁽³⁾
3.9	2.08 ⁽⁴⁾	6.16 ⁽⁴⁾	1.03 ⁽²⁾	3.94 ⁽²⁾	1.32 ⁽³⁾	4.64 ⁽³⁾	0.98⁽¹⁾	3.55⁽¹⁾
4.4	1.34 ⁽³⁾	4.25 ⁽³⁾	0.69 ⁽²⁾	2.51⁽¹⁾	1.58 ⁽⁴⁾	5.10 ⁽⁴⁾	0.67⁽¹⁾	2.56 ⁽²⁾
4.9	1.11 ⁽³⁾	3.77 ⁽³⁾	0.70⁽¹⁾	2.57⁽¹⁾	1.88 ⁽⁴⁾	5.66 ⁽⁴⁾	0.76 ⁽²⁾	2.96 ⁽²⁾
5.4	1.01 ⁽³⁾	3.73 ⁽²⁾	0.86⁽¹⁾	3.65⁽¹⁾	3.02 ⁽⁴⁾	7.57 ⁽⁴⁾	0.95 ⁽²⁾	4.01 ⁽³⁾
Ort.	2.91 ⁽⁴⁾	7.11 ⁽⁴⁾	1.49⁽¹⁾	4.30⁽¹⁾	2.20 ⁽³⁾	5.84 ⁽³⁾	1.51 ⁽²⁾	4.33 ⁽²⁾

Durum 7 için deneysel sonuçlar ile SST modelinden elde edilen hız profillerinin karşılaştırılması Şekil 10'da verilmiştir. Şekiller incelendiğinde, SST modelinin kanal boyunca ele alınan kesitlerde deneysel verilere yakın sonuçlar verdiği, ancak katı sınıra yakın olan bölgede deneysel verilerden uzaklaştığı görülmüştür. Ayrıca, sayısal ve deneysel sınır tabakası

kalınlıklarının birbirinden farklılık gösterdiği ifade edilebilir. Katı sınıra yakın bölgede sayısal hız değerlerinin deneysel hız verilerinden küçük olduğu görülmektedir. Kanal girişinde $x=60$ cm kesitinde sınır tabakasının üst tarafını deneysel hız verilerinden büyük tahmin ederken diğer kesitlerde nispeten küçük tahminde bulunmuştur.

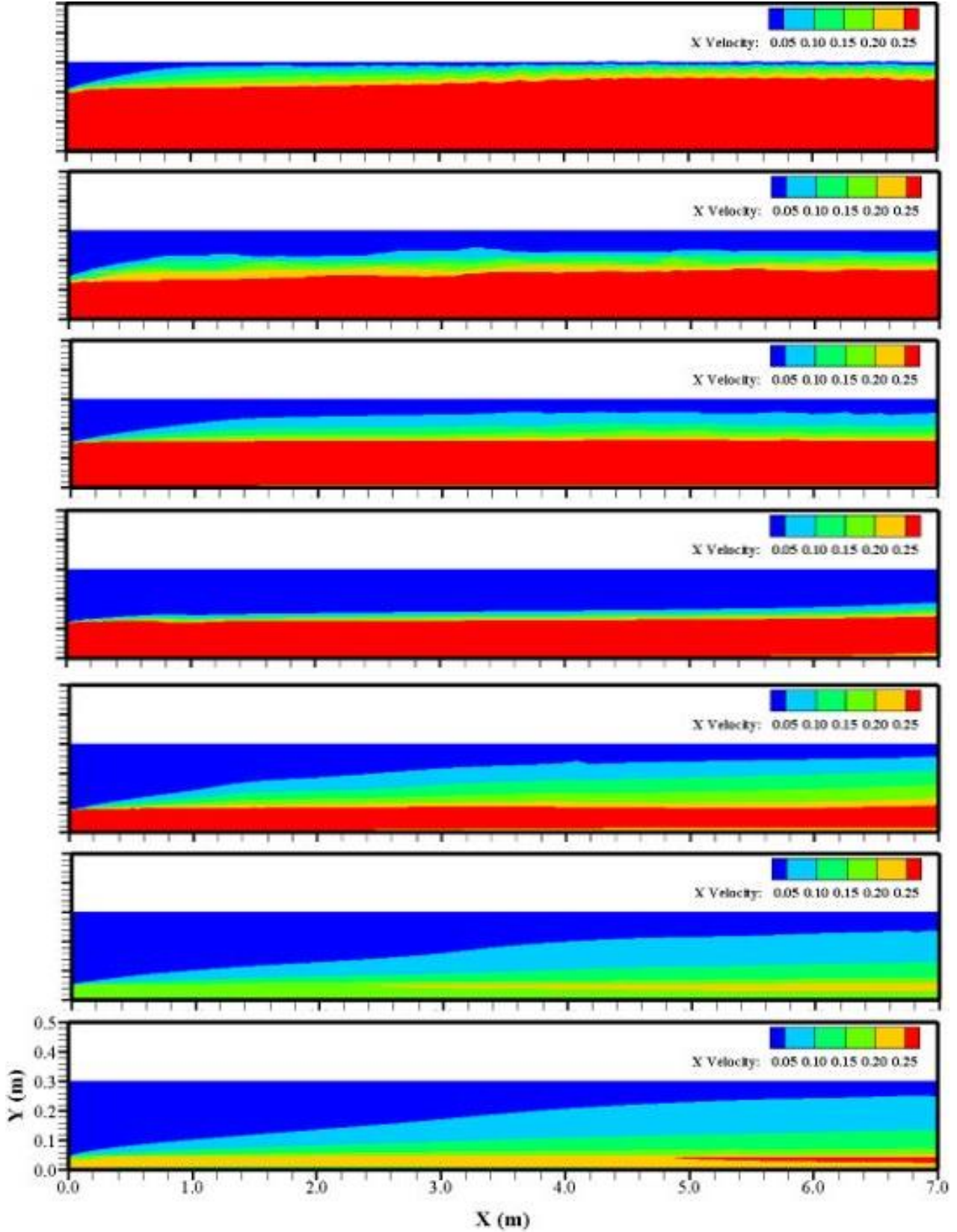


Şekil 10. Durum 7 için deneysel ve sayısal hız profilleri

4.2. Sayısal hız kontörleri

Deneysel ve farklı türbülans modelleri kullanılarak elde edilen sayısal hız profillerinin karşılaştırılması sonucunda en küçük OKH ve OMGH değerlerinin

elde edildiği türbülans modelinde elde edilen yatay hız bileşeninin kanal boyunca dağılımı Şekil 11’de verilmiştir. Farklı akım koşullarında elde edilen hız kontörlerinin karşılaştırılması için değişim aralığı aynı değerlendirilmiştir.



Şekil 11. Farklı akım durumları için sayısal hız kontörleri

Şekil 11’de verilen grafikler incelendiğinde beklenildiği gibi maksimum akım hızlarının kanal tabanına yakın bölgede olduğu, akım debisinin ve akım derinliğinin azalmasıyla maksimum hızın olduğu bölgenin azaldığı görülmektedir. Durum 1’de elde edilen hız kontörlerinin incelendiğinde, 0.1 m/s hızın olduğu bölgenin hemen hemen su yüzüne ulaştığı söylenebilir. Kanal tabanının eğimli olduğu durumda elde edilen hız kontörlerinde, kanal eğiminin hız alanı üzerinde etkisinin bulunduğu görülmektedir.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, eğimli kritik altı açık kanal akımının farklı türbülans modelleri kullanılarak sayısal modellemesi yapılmıştır. Akımın hareketini kontrol eden süreklilik ve momentum denklemleri sonlu hacimler yöntemine dayalı çözüm yapan ANSYS Fluent paket programı yardımıyla çözülmüş ve akım profilinin belirlenmesinde ise Akışkan Hacimleri Yöntemi kullanılmıştır. Sayısal modellemede, türbülansın çözümünde Re-Normalization Group (RNG), Shear Stress Transport (SST), Reynolds Stress Model (RSM) ve Detached Eddy Simülasyon (DES) modelleri kullanılmıştır. Ağ yapısının sayısal sonuçlar üzerindeki etkisinin olup olmadığının belirlenmesi için Ağ Yakınsama İndeksi yöntemi kullanılmış ve elde edilen sonuçlardan sayısal model sonuçlarının ağ yapısından bağımsızlaştığı belirlenmiştir. Farklı akım şartlarında, farklı türbülans kapatma modelleri kullanılarak sayısal olarak elde edilen sayısal hız profilleri deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalarda, niceliksel kriter olarak Ortalama Karesel Hata ve Ortalama Mutlak Göreceli Hata değerleri kullanılmıştır. Durum 1’de en başarılı model olan SST için OKH ve OMGH değerleri sırasıyla 5.09 ve 5.25, Durum 2’de en başarılı model olan DES için OKH ve OMGH değerleri sırasıyla 42.04 ve 5.09, Durum 3’te OKH kriterine göre en başarılı model olan RSM için OKH değeri 4.10 ve OMGH kriterine göre en başarılı model olan DES için OMGH değeri 4.85, Durum 4’te en başarılı model olan DES için OKH ve OMGH değerleri sırasıyla 4.37 ve 5.15, Durum 5’te en başarılı model olan RNG için OKH ve OMGH değerleri sırasıyla 4.25 ve 5.48, Durum 6’da en başarılı model olan SST için OKH ve OMGH değerleri sırasıyla 0.70 ve 4.31 ve Durum 7’de en başarılı model olan SST için OKH ve OMGH değerleri sırasıyla 1.49 ve 4.30 olarak elde edilmiştir. Çalışma sonucunda, RNG ve RSM modelleri sadece bir akım durumunda, SST modeli üç farklı akım durumunda ve DES modeli ise iki farklı akım durumunda, kullanılan diğer modellere kıyasla daha başarılı olmuştur. Elde edilen

sonuçlardan, OKH ve OMGH değerlerinin çok küçük farklılıklar göstermesinden dolayı hafif eğimli kritik altı açık kanal akımının sayısal çözümünde SST modelinin başarılı bir şekilde kullanılabileceği belirlenmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma, Harran Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri birimi (HÜBAP) tarafından 18197 numaralı proje ile maddi olarak desteklenmiştir.

Kaynaklar

- Akoz, M. S., Şimşek, O. and 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.
- Ayhan, İ, Şimşek, O., Gümüş, V. and Avşaroğlu, Y. (2020). H2 su yüzü profiline sahip açık kanal akımının sayısal modellemesi. *Euroasia Journal of Mathematics-Engineering Natural & Medical Sciences*, 8(1), 33-42.
- Bal, Ş. (2019). *Değişken Enkesitli Açık Kanal Akımının Deneysel ve Sayısal Modellemesi*. Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Şanlıurfa.
- Gumus, V., Simsek, O., Soydan, N. G., Aköz, M. S. and Kırkgöz, M. S. (2016). Numerical modeling of submerged hydraulic jump from a sluice gate. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(1), 04015037.
- Gümüş, V. (2014). *Dolusavak Akımının Sayısal Modellemesi*. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Adana.
- Hirt, C. W. and Nichols, B. D. (1981). Volume of fluid (vof) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39(1), 201-225.
- Kırkgöz, M. S. (2018). *Çözülmüş problemlerle akışkanlar mekaniği*. İstanbul: Birsan Kitabevi.
- Launder, B. E., Reece, G. J. and Rodi, W. (1975). Progress in the development of a reynolds-stress turbulence closure. *Journal of Fluid Mechanics*, 68(3), 537-566.
- Menter, F. R. (1994). 2-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 32(8), 1598-1605.
- 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.

- Roache, P. J. (1998). Verification of codes and calculations. *AIAA Journal*, 36(5), 696-702.
- Simsek, O., Aköz, M. S. and 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.
- Soydan Oksal, N. G., Aköz, M. S. and Simsek, O. (2020). Numerical modelling of trapezoidal weir flow with rans, les and des models. *Sadhana*, 45(91), 1-18.
- Soydan, N. G., Şimşek, O. and Aköz, M. S. (2017). Prediction and validation of turbulent flow around a cylindrical weir. *European water*, 57, 85-92.
- Yakhot, V. and Orszag, S. A. (1986). Renormalization group analysis of turbulence I. Basic theory. *Journal of Scientific Computing*, 1(1), 3-51.
- Yakhot, V., Orszag, S. A., Thangam, S., Gatski, T. B. and 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.