

Eşik Mansabındaki Kritik Üstü Açık Kanal Akımının Deneysel ve Sayısal Analizi

N. Göksu SOYDAN¹, Oğuz ŞİMŞEK¹ ve M. Sami AKÖZ^{*1}

¹Çukurova Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana

Geliş tarihi: 01.06.2016

Kabul tarihi: 23.11.2016

Öz

Açık kanalda eşik sonrası oluşan kritik üstü açık kanal akımının hız alanı, laboratuvar ortamında Lazer Doppler Anemometresi (LDA) ile ölçülmüş ve deney ile aynı koşullardaki akım için temel denklemler, sonlu hacimler yöntemine dayalı ANSYS-Fluent paket programı ile üç boyutlu olarak çözülmüştür. Sayısal hesaplamalarda, Reynolds Ortalamalı Navier Stokes (RANS) denklemlerine dayalı *Realizable k-ε* türbülans kapatma modeli ve *Large Eddy Simülasyon* (LES) modeli kullanılmış, su yüzü profili Akışkan Hacimleri Yöntemi ile hesaplanmıştır. Sayısal modellerden elde edilen akım hızları ve su yüzü profilleri deneysel ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Farklı iki modelin deneysel olarak doğrulanması amacıyla yapılan karşılaştırmalarda, *Realizable k-ε* türbülans kapatma modelinin, hız alanının hesaplanmasında ve su yüzünün belirlenmesinde LES modeline göre daha başarılı olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Hız profili, Kritik üstü akım, LES, RANS, Su yüzü profili, VOF

Experimental and Numerical Analysis of Supercritical Open Channel Flow Downstream of a Sill

Abstract

The velocity field of supercritical open channel flow downstream of a sill is measured using Laser Doppler Anemometry (LDA). Basic equations of the problem are solved by ANSYS-Fluent program package based on finite volume method for the flow case having the same experimental conditions. In the numerical simulations, *Realizable k-ε* turbulence closure model based on the Reynolds Average Navier Stokes Equations and *Large Eddy Simulation* model are used for the simulation of turbulence, and the flow profile is computed using Volume of Fluid Method. Computational results for velocities and free surface profiles are compared with measured data. Experimental validations of the turbulence models show that the *Realizable k-ε* turbulence model is more successful than LES in predicting the velocity field and free surface profiles under the present flow conditions.

Keywords: Velocity profile, Supercritical open channel flow, LES, RANS, Free surface profile, VOF

* Sorumlu yazar (Corresponding author): M. Sami AKÖZ, msa@cu.edu.tr

1. GİRİŞ

Açık kanal içerisine bir yapının yerleştirilmesi durumunda akımda bir rejim değişikliği; kritik altı durumdan kritik üstü duruma geçiş süreci, yaşanır. Kritik üstü akımlar, kritik altı akımlara nispetle hızın daha yüksek buna mukabil su derinliğinin daha az olduğu akım koşullarına haizdirler. Yüksek akım hızına sahip kritik üstü akımların görüldüğü nehir yataklarında veya açık kanal akımlarında, kanal kaplamasında veya nehir yatağında aşınmalar söz konusu olabilmektedir. Özellikle nehir yataklarında meydana gelen aşınma ve erozyon üzerinde türbülans ve akım topolojisi önemli bir etkiye sahiptir. Bu bağlamda, akımla etkileşime giren bu tür yapıların mansabında oluşan türbülanslı kritik üstü akımların karakteristik özelliklerinin detaylı bir şekilde bilinmesi lüzumu ortaya çıkmaktadır. Bu amaçla, yapı ile etkileşime giren akımların analizine yönelik deneysel ve sayısal çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Balen ve arkadaşları [1], kavisli açık kanal modelinde birincil ve ikincil akışın türbülans karakterlerini belirlemek için sayısal ve deneysel modelleme çalışmaları yapmışlardır. Large Eddy Simülasyon (LES) ve Reynolds Ortalamalı Navier Stokes (RANS) modelleri kullanılarak elde edilen sayısal model sonuçları, deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda LES modelinden elde edilen sonuçların RANS modeline göre deneylerle daha uyumlu olduğunu, LES modelinin dirsek akımını modellemede daha doğru sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Azimi ve arkadaşları [2], çalışmalarında dairesel kesitli kanalda yan savak üzerinden geçen serbest yüzeyli kritiküstü akımı sayısal olarak modellemişlerdir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiğine dayalı sayısal analizlerde, akım alanını ve akım türbülans karakteristiklerini belirlemek için Renormalization Group $k-\varepsilon$ (RNG) türbülans kapatma modelini ve serbest su yüzü profilinin hesabında ise akışkan hacimleri yöntemini kullanmışlardır. Sayısal hesaplamalardan elde edilen su yüzü profili, savaktan tahliye edilen debi, debi katsayısı ve yan savak başlangıcındaki toplam enerji değerleri, deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda, RNG $k-\varepsilon$ türbülans

kapatma modeli ile elde edilen bulguların deneylerle oldukça uyumlu olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Günümüzdeki teknolojik gelişmelere paralel olarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ile ilgili önemli gelişmeler kaydedilmiş, HAD ile ilgili birçok paket program araştırmacıların kullanımına sunulmuştur. Sanayi sektöründe ve bilimsel çalışmalarda bu paket programlar, fiziksel model deneylerine göre daha ekonomik ve hızlı sonuç vermesi nedeniyle birçok problemin çözümünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, sayısal model deneyleri fiziksel model deneylerine kıyasla akımın birçok karakteristik özelliği hakkında detaylı bilgi elde etme imkânı sunmakta, farklı akım koşullarında farklı parametrelerin akıma olan etkisini daha kolay ve daha hızlı bir biçimde elde etme ve analiz etme olanağı vermektedir. HAD yöntemlerinde, türbülanslı akımın hareketini idare eden temel denklemlerin sayısal olarak hesaplanmasında kullanılan farklı türbülans kapatma modelleri mevcuttur. Bu türbülans kapatma modellerinin doğrulanması için deney sonuçları ile karşılaştırılması gerekmektedir. Literatürde bu amaca yönelik yapılan çalışmalar mevcuttur [3-6]. Farklı sayısal yöntemlerin uygulandığı bu çalışmalarda, genellikle türbülans modellerinin performansları ve ağ yapısının çözümler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Serbest su yüzü profilinin hesabı için Akışkan Hacimleri Yöntemi (Volume of Fluid- VOF) kullanılmıştır [7-10].

Bu çalışmada, eşik sonrası oluşan kritik üstü açık kanal akımına ait farklı kesitlerdeki hız profilleri tek boyutlu Lazer Doppler Anemometresi (LDA) ile ölçülmüştür. Türbülanslı kritik üstü akımın hareketini idare eden temel denklemler, ANSYS-Fluent paket programı kullanılarak deney ile aynı akım koşulları altında sayısal olarak çözülmüştür. Sayısal çözümlerde Reynolds Ortalamalı Navier Stokes denklemlerine dayalı çözüm yapan Realizable $k-\varepsilon$ türbülans kapatma modeli ve Large Eddy Simülasyon modeli kullanılmıştır. Sayısal modellemede kullanılan hesaplama ağ yapısının sayısal çözümler

üzerindeki etkisini araştırmak için Ağ Yakınsama İndeksi (Grid Convergence Index-GCI) yöntemi kullanılmıştır. Sayısal hesaplamalardan elde edilen çeşitli kesitlerdeki hız ve su yüzü profilleri deneysel ölçümlerle karşılaştırılmış, bu çalışmada kullanılan modellerinin, hız alanının ve serbest su yüzünün belirlenmesindeki başarısı irdelenmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Deneysel

Deneysel, İnşaat Mühendisliği Hidrolik Laboratuvarında bulunan uzunluğu 8,0 m, genişliği ve yüksekliği 0,3 m olan cam duvarlı bir açık kanalda yapılmıştır (Şekil 1). Hazneden deney kanalına suyun iletilmesi bir pompa yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Akımın hızını artırmak için mansap eğimi 1/5 ve kret yüksekliği 0,075 m olan eşik kullanılmış ve eşik sonrasında kritik üstü akım koşulları sağlanmıştır. LDA ile yapılan hız ölçümleri, akımın debisinin $Q=0,0142 \text{ m}^3/\text{s}$ olduğu akım koşulunda gerçekleştirilmiştir. Eşik üstündeki su derinliği $h_0=5,72 \text{ cm}$, kesit ortalama hızı $V_0=0,82 \text{ m/s}$, Froude sayısı 1,06 ve Reynolds sayısı 119.000 olarak belirlenmiştir.

Hız alanın ölçülmesinde Dantec® LDA62N04 hız ölçüm sistemi kullanılmıştır. Bu sistem, ölçüm bölgesine gönderilen iki lazer ışınının kesiştiği noktadan geçen parçacıklar yardımıyla o noktadaki lazer ışınları düzlemindeki anlık akım hız bileşeninin belirli zaman aralıklarında ölçülmesini sağlamaktadır. Zaman serisi olarak kaydedilen anlık hız değerlerinden, o noktaya ait zamansal ortalama akım hızı, türbülans hız sapıncıları, türbülans şiddeti gibi çeşitli türbülans karakteristiklerinin belirlenmesi mümkün olmaktadır. LDA sistemi, ortalama hız ve hız sapıncı değerlerini %95 doğruluk mertebesinde belirlemektedir. Akımın su yüzü profili limnometre kullanılarak ölçülmüştür.

2.2. Temel Denklemler

Üç-boyutlu, sıkışmayan, türbülanslı açık kanal akımının hareketini idare eden temel denklemler, kütle ve momentumun korunumu (Reynolds-ortalama Navier-Stokes) denklemleri Eşitlik 1 ve 2'de verilmiştir.

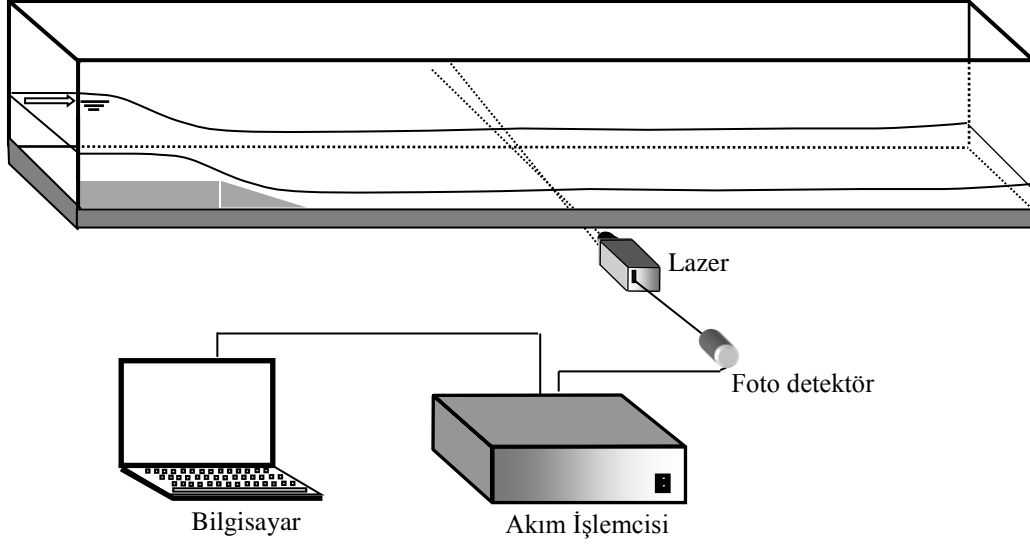
$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

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

(1) ve (2) denklemlerinde u_i , x_i doğrultusundaki hız bileşeni, g yer çekimi ivmesi, p basınç, μ dinamik viskozite, ρ akışkan yoğunluğu ve τ_{ij} türbülans (Reynolds) gerilmeleridir. Bu çalışmaya konu olan üç boyutlu akımı idare eden yukarıdaki 4 adet denklem 10 adet bilinmeyen içermektedir, bunlar: üç hız bileşeni \bar{u}_i , basınç \bar{p} ve 6 bağımsız Reynolds gerilmesidir ($\rho \overline{u_i u_j}$). Böylece, denklem sisteminin çözülebilmesi için türbülans gerilmelerinin tanımlanmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sorun, yukarıdaki zamansal-ortalama denklemlerin sayısal çözümü sürecinde, denklemlerde yer alan türbülans gerilmelerinin uygun türbülans kapatma modelleriyle tanımlanmasını gerektirmektedir. Türbülans viskozitesinin doğrusal olarak ifade edilmesini esas alan Boussinesq yaklaşımına göre (2) denklemindeki türbülans kayma gerilmeleri bünye denklemi ile, sıkışmayan akımlar için Eşitlik 3'te verilmiştir.

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

burada u_i' ve u_j' yatay ve düşey türbülans hız sapıncıları, μ_t türbülans viskozitesi, $k (= \overline{u_i' u_i'} / 2)$ türbülans kinetik enerjisi ve δ_{ij} Kronecker deltasıdır.



Şekil 1. Deney düzeneği

2.3. Sayısal Modeller

Denklem (3)'te görülen μ_t türbülans viskozitesinin hesaplanmasında birçok türbülans kapatma modeli geliştirilmiştir. Bu çalışmada, μ_t 'nin hesabında Reynolds Ortalamalı Navier Stokes denklemlerinin (RANS) çözümüne dayalı $k-\varepsilon$ tabanlı Realizable $k-\varepsilon$ türbülans kapatma modeli (RKE) ve Large Eddy Simülasyon (LES) modeli kullanılmıştır.

2.3.1 Realizable $k-\varepsilon$ Türbülans Modeli (RKE)

Akım alanındaki yüksek şekil değiştirme hızlarının ve sınır tabakası ayrılmasının mevcut olduğu karmaşık akım durumlarında Standart $k-\varepsilon$ türbülans modeli (SKE) üzerinde, performans artırıcı olarak RKE modeli adı altında şu iyileştirmeler yapılmıştır: (a) türbülans viskozitesi, μ_t , ifadesinde, sabit bir değer yerine değişken C_μ terimi kullanılarak SKE modelindeki katı yüzeye dik şekil değiştirme bileşenlerinin değeri küçültülmüş, ve (b) ε transport denkleminde yerel şekil değiştirme hızını esas alan farklı bir kaynak terimi kullanılmıştır. Shih ve arkadaşları [11] C_μ^* için aşağıdaki formülü vermişlerdir (Eşitlik 4 ve 5).

$$C_\mu^* = \frac{1}{A_o + A_s \frac{U^* k}{\varepsilon}} \quad (4)$$

Burada, $A_o = 4$, $A_s = \sqrt{6} \cos \phi$,

$$\phi = \frac{1}{3} \arccos(\sqrt{6}W), \quad W = \frac{S_{ij} S_{jk} S_{ki}}{\tilde{S}^3}, \quad \tilde{S} = \sqrt{S_{ij} S_{ij}},$$

$$U^* = \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij} \tilde{\Omega}_{ij}}, \quad \tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk} \omega_k^*,$$

$$\Omega_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk} \omega_k^*, \quad \Omega_{ij} = \frac{1}{2} (\bar{u}_{i,j} - \bar{u}_{j,i})$$

$\bar{\Omega}_{ij}$, ω_k^* açılmal hızı ile dönen eksen takımına göre ölçülen ortalama rotasyon hızı tansörüdür.

ε -denklemini aşağıdaki gibi ifade edilmiştir:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \bar{u}_j \frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (5)$$

Model sabitleri aşağıdaki gibi önerilmiştir:

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, \quad S = \sqrt{S_{ij} S_{ij}},$$

$$C_2 = 1.9, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.2$$

RKE modelinin, ivmelenen, eğrisel, sınır tabakasının ayrıldığı, ikincil akımların var olduğu akımlarda SKE modeline göre daha başarılı olduğu ifade edilmiştir [11].

2.3.2. Large Eddy Simülasyon (LES) Modeli

Large Eddy Simülasyon modeli, büyük çalkantıların direk olarak çözüldüğü ve küçük çalkantıların ise modellendiği bir türbülans modelidir. LES modelinde momentum, kütle, enerji ve pasif skalerler büyük çalkantılar tarafından taşınmaktadır. Büyük çalkantıların çözümü daha büyük problemler içerir. Bu büyük çalkantılar akımın başlangıç ve sınır koşulları ile belirlenirler. Küçük çalkantıların akımın geometrisine bağlılığı çok azdır, izotropik yapıda olma eğilimindedirler, dolayısıyla daha evrenseldirler. Küçük çalkantıların evrensel bir türbülans modeli ile çözümü mümkündür. Burada belirtilmesi gereken önemli ayrıntı küçük ölçekli çalkantıların filtrelenmesi ağ yapısındaki hücrelerin boyutlarına bağlıdır. Kullanılan ağ hücrelerinin boyutlarının artması filtrelenen çalkantıların boyutlarını da artırmaktadır. LES modelinde filtrelenen bileşen Eşitlik 6'da verildiği gibi ifade edilir.

$$\bar{f}(x) = \int_D f(x') G(x, x') dx', \quad f'(x) = f(x) - \bar{f}(x) \quad (6)$$

Burada $f(x')$, $f(x)$ ve $G(x, x')$ sırasıyla filtrelenmeyen fonksiyonu, alt grid ölçekli çalkantı kısmını ve filtrelenen fonksiyonu göstermektedir. Filtrelenen fonksiyon $G(x, x')$ şu özelliğe sahiptir.

$$\int_{-\infty}^{\infty} G(x, x') = 1 \quad (7)$$

Sıkışmayan akımlar için filtrelenmiş Navier Stokes denklemleri (Eşitlik 8):

$$\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_i \partial x_j} \quad (8)$$

ve süreklilik denklemi (Eşitlik 9):

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (9)$$

şeklinde ifade edilir.

LES modeli, herhangi bir RANS türbülans modeline göre çözüm için daha sık bir ağ yapısına ihtiyaç duymaktadır. Buna bağlı olarak stabil bir çözüm sonucuna ulaşabilmek için LES hesaplamaları daha fazla zaman gerektirmektedir. Bu durumun sonucu olarak LES ile yapılan hesaplamalar RANS modelleri ile yapılan hesaplamalara göre daha fazla kayıt hafızasına ihtiyaç duymaktadır.

RANS modellerinde de olduğu gibi LES modelinde de alt grid ölçek türbülans kayma gerilmeleri (Eşitlik 10):

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2\mu_t \bar{S}_{ij} \quad (10)$$

şeklinde ifade edilir. Burada, μ_t türbülans viskozitesini, τ_{kk} alt grid ölçek gerilmesinin izotropik kısmını göstermektedir ve modellenmemektedir, ancak statik basınç terimine eklenmektedir. \bar{S}_{ij} ise şekil değiştirme terimini göstermektedir ve Eşitlik 11'de verildiği gibi ifade edilir [12]:

$$\bar{S}_{ij} \equiv \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (11)$$

Bu çalışmada, LES modelinde alt grid ölçek modeli olarak Smagorinsky-Lily modeli kullanılmıştır.

Smagorinsky-Lily modeli: Bu model ilk olarak Smagorinsky (1963) tarafından öne sürülen basit bir modeldir. Smagorinsky Lily modelinde türbülans viskozitesi (Eşitlik 12):

$$\mu_t = \rho L_s^2 |\bar{S}| \quad (12)$$

şeklinde ifade edilir. Burada L_s alt grid ölçek için karışma boyunu ve $|\bar{S}| \equiv \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}}$ 'yi göstermektedir. ANSYS Fluent programında L_s Eşitlik 13'te verildiği gibi hesaplanır.

$$L_s = \min(\kappa d, C_s \Delta) \quad (13)$$

Burada κ von Karman sabitini, d katı sınıra en yakın ağ yüksekliğini, C_s Smagorinsky sabitini ve Δ ise yersel ağ büyüklüğünü göstermektedir. ANSYS Fluent programında Δ hesaplama ağının hacmine göre hesaplanır (Eşitlik 14).

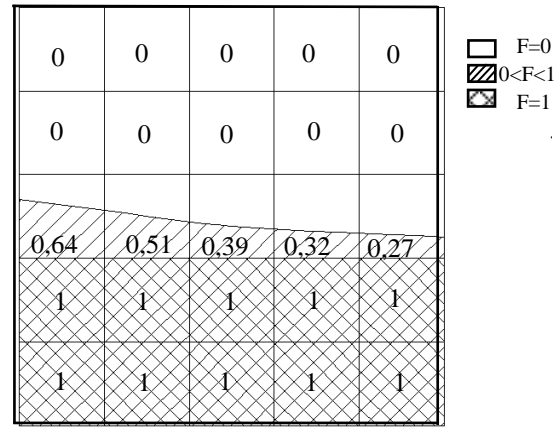
$$\Delta = V^{1/3} \quad (14)$$

2.4. Akışkan Hacimleri Yöntemi (VOF)

Birbiri ile karışmayan iki veya daha fazla akışkan arasındaki fazlar arası ara yüzeyin şekli ve oluşumu incelenmek istendiğinde genellikle sabit bir Eulerian çözüm ağına uygulanabilen VOF modeli kullanılmaktadır [13]. Bu çalışmada su-hava ara kesitinin hesabında akışkan hacimleri yöntemi (Volume of Fluid, VOF) kullanılmıştır. VOF yöntemi hücrelerin boş, kısmen ya da tam suyla dolu olduğunu belirlemede kullanılmaktadır. Hacimsel doluluk oranını temsilen 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. Akışkan Hacimleri Yöntemi ile serbest su yüzünün hesaplanmasında "Geo-Reconstruct" yaklaşımı kullanılmıştır [12]. Bu yaklaşıma göre, öncelikle, kısmen dolu her bir hücrenin, doluluk oranı ve onun türevleri ile ilgili bilgilere dayanılarak, hava-su doğrusal ara yüzünün hücre ağırlık merkezine göre yeri belirlenir. Bir sonraki adımda, hesaplanmış doğrusal ara yüzün yeri ve eleman yüzeylerinde hesaplanmış normal ve teğetsel hız bilgileri kullanılarak her bir eleman yüzeyinden

taşınan akışkan miktarları hesaplanır. Son olarak, bir önceki adımda hesaplanan akışkan miktarları göz önüne alınarak, süreklilik denklemi ile her bir hücrenin hacimsel doluluk oranı belirlenir.

Şekil 2 çalışma alanında belirli bir bölgedeki su-hava arakesitinin doluluk oranına örnek teşkil etmektedir. Şekil üzerindeki sayısal değerler, çalışmada gerçek bir kesitteki F doluluk oranlarının sayısal değerlerini göstermektedir.



Şekil 2. Ağ elemanlarının doluluk oranı

2.5. Çözüm Bölgesinin Sınır Şartları

Şekil 3, eşik sonrası oluşan kritik üstü açık kanal akımının sayısal modeli için kullanılan çözüm bölgesini, sınır şartlarını ve alt bölgeleri göstermektedir. Kullanılan koordinat sisteminin orijini, çözüm bölgesinin sol alt köşesi olarak alınmıştır. Şekil 3'de verilen çözüm bölgesinin üst sınırı ve çıkış bölgesi sınır şartı sıfır basınç ($p=0$), kanal tabanında ve savak alt tabanında sıfır hız sınır şartı, yani $u=0$, $v=0$ olarak tanımlanmıştır. Akım durumunda sayısal modelde giriş sınır şartı olarak yatay hız bileşeni için deneysel hız profilleri kullanılmıştır. Düşey hız bileşeni ise $v=0$ olarak tanımlanmıştır. Zamana bağlı çözüm sürecinde, başlangıç şartı olarak, çözüm bölgesinin giriş sınırında doluluk oranı $F=1$, diğer bölgeler ve çözüm bölgesinin çıkış sınırında ise $F=0$ alınmıştır.

Sayısal modellemede kullanılan tüm türbülans modelleri için zaman adımı $\Delta t=0.001$ s olarak seçilmiş ve sayısal çözümün kararlı hale geldiği 30 s kadar çözüm yapılmıştır. RKE modelinde, kanal tabanında katı sınıra yakın akım bölgesinin modellenmesinde Chen ve Patel [14] tarafından önerilen iki-tabakalı çözümü esas alan ve genişletilmiş iki-tabakalı duvar-yakını modellemesi olarak anılan yöntem kullanılmıştır. LES modelinde ise katı sınıra yakın bölgeler Smagorinsky-Lily modeli seçilerek hesaplanmıştır. (1) ve (2) temel denklemlerinin, Şekil 3'te görülen sınır şartlarına göre \bar{u} , \bar{v} ve \bar{p} için sayısal çözümü, sonlu hacimler yöntemine dayalı ANSYS-Fluent® v.12.1 paket programı kullanılarak yapılmıştır.

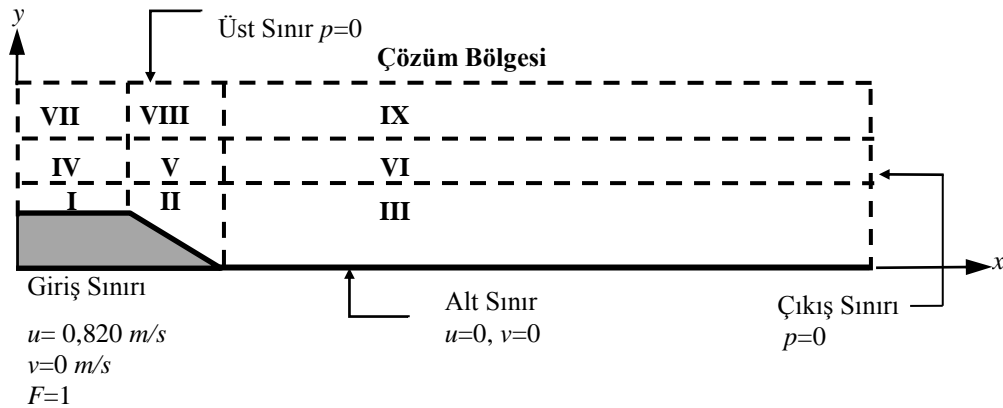
2.6. Hesaplama Ağının Tasarımı

Yapı ile etkileşiminin söz konusu olduğu akım problemlerinin sayısal hesaplamalarında, hesaplama ağı yapısının sonuçlar üzerinde etkili olduğu bilinmektedir. Bu çalışmadaki probleme uygun hesaplama ağının oluşturulmasında, edinilen deneyimlere bağlı olarak, katı sınırlara doğru ve yüzey profilinde hızlı değişimin söz konusu olduğu bölgelerde hesap ağı sıklaştırılmıştır. Akımın karakteri göz önüne alınarak, Şekil 3'te verilen sayısal çözüm bölgesi, Şekil 4'te görüldüğü gibi, 9 alt bölgeye ayrılmıştır. Üç boyutlu hesaplamalarda kullanılmak üzere modellenen ve şekilde verilen ağ yapısı z doğrultusu boyunca kanal genişliğine eşit şekilde

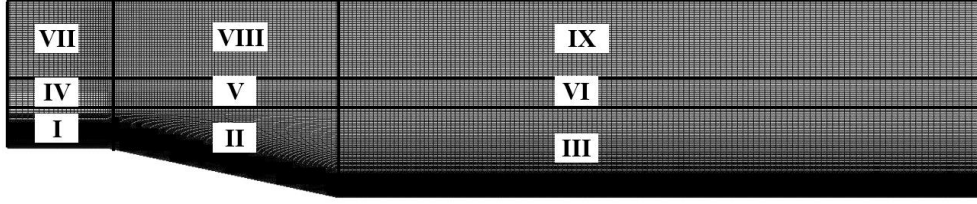
(30 cm) uzatılmış ve 80 eş parçaya bölünmüştür. Her bir alt bölgede eleman sayısı yaklaşık olarak %50 ve %75 artırılmak suretiyle, lineer dörtgen elemanlardan oluşan 3 farklı yoğunluğa sahip ağ yapıları (Ağ-1, Ağ-2, Ağ-3) elde edilmiştir.

Sayısal çözüm alanındaki ağ yapısının yeterli sıklıkta olup olmadığı, bir başka ifadeyle ağ yapısından bağımsız sayısal çözümler elde etmek amacıyla ele alınan üçlü ağ sisteminde yapılan sıklaştırmanın uygunluğu, Ağ Yakınsama İndeksi (Grid Convergence Index-GCI) yöntemiyle test edilmiştir [15,16]. Ağ-3 sistemiyle, akım hızlarındaki hataların kabul edilebilir bir sınır olan %2'den küçük olduğu görülmüş ve hesaplama hassasiyetinin ağ yoğunluğundan bağımsızlaştığı kanaatine varılmıştır.

Çizelge 1'de Ağ-3 sistemi için alt bölgelerde bulunan eleman sayıları ve en sıkı ağ yani Ağ-3 için en küçük ağ elemanın yüksekliği ve maksimum y^+ değerleri verilmiştir. Şekil 5'te RKE türbülans modeli ile elde edilen y^+ değerlerinin kanal boyunca değişimini göstermektedir. Kırkgöz ve Ardıçlıoğlu [17], $y^+ (=u^*y/\nu)$ değerinin 10'dan küçük olması halinde hız dağılımının, viskoz alt tabakadaki lineer dağılıma uyduğunu rapor etmişlerdir. (u^* =kayma hızı; y : yükseklik; ν =suyun kinematik viskozitesi). Grafik incelendiğinde y^+ değerinin kanal boyunca 10 değerinin altında olduğu yani ilk ağ elemanının viskoz alt tabaka içerisinde kaldığı görülmektedir.



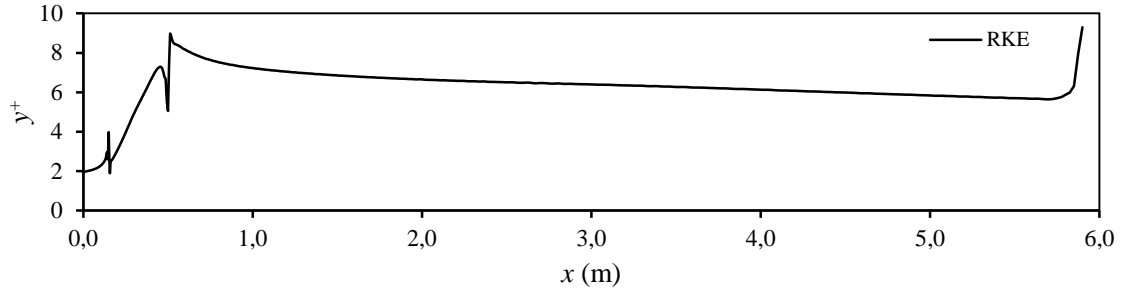
Şekil 3. Sayısal çözüm bölgesi ve sınır şartları



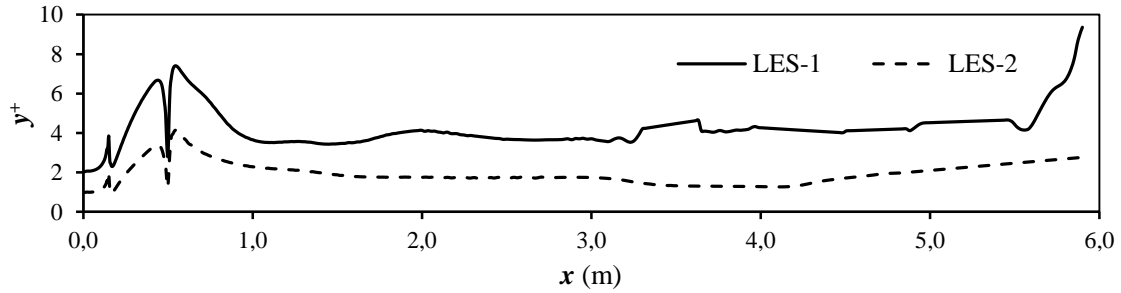
Şekil 4. Sayısal modelde kullanılan hesaplama ağı ve alt bölgeleri

Çizelge 1. Ağ-3'ün eleman sayıları ve bazı değerler

Bölge	Eleman Sayısı	Min h (m)	Max y^+	Bölge	Eleman Sayısı
I	50x120	0,000088	3,97	VI	400x10
II	70x120	0,000089	7,29	VII	50x40
III	400x120	0,000209	8,98	VIII	70x40
IV	50x10			IX	400x40
V	70x10				



Şekil 5. RKE ile elde edilen y^+ değerleri



Şekil 6. LES-1 ve LES-2 ile elde edilen y^+ değerleri

Sayısal hesaplamalarda LES modeli, RANS tabanlı modellere göre daha sıkı ağ yapısına ihtiyaç duymaktadır [12]. Bu sebeple LES-1 ve RKE modelinde kullanılan hesaplama ağı %75 oranında sıkılaştırılarak LES-2 modeli için yeni bir ağ elde edilmiştir. Dolayısıyla RKE modeli ile aynı hesaplama ağına sahip LES-1

hesaplamalarının yanı sıra daha sıkı bir ağ yapısının LES modeli ile elde edilen çözümler üzerindeki etkisi araştırılmış ve kullanılan tüm numerik model sonuçları deneysel ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Şekil 6'da LES-1 ve LES-2 modellerine ait y^+ değerleri sunulmuştur. Şekilden de görüldüğü gibi y^+ değerleri ağ yapısının

sıkılaştırılması ile birlikte mansap bölgesinde 4, eşik bölgesinde ise 2 değerinin altına düşmektedir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Deneysel ve Hesaplanan Hız Profilleri

Bu çalışmada kullanılan RKE ve LES modellerinin başarılarının kıyaslanması bağlamında, deneysel ve sayısal hesap bulgularının niceliksel olarak karşılaştırılmasında, hız ve su yüzü profilleri için sırasıyla Eşitlik 15 ve 16'da verilen *Ortalama Karesel Hata* (OKH) ve *Ortalama Mutlak Göreceli Hata* (OMGH) değerleri ölçüt olarak alınmıştır:

$$OKH = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (v_d - v_h)^2 \quad (15)$$

$$OMGH = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left| \frac{v_d - v_h}{v_d} \right| \times 100 \quad (16)$$

Burada, v_d ve v_h sırasıyla deneysel ve hesaplanan hız değerlerini, N işlem yapılan hız profilinde ele alınan nokta sayısını göstermektedir.

Çizelge 2'de, RKE türbülans modeli ve LES modelleri kullanılarak, LES-1 ve LES-2, farklı kesitlerden elde edilen sayısal hız profillerinin deneysel bulgularla karşılaştırılmasından elde edilen OKH ve OMGH değerleri verilmiştir. Çizelgenin son satırında, tüm kesitler göz önünde bulundurularak elde edilen ortalama OKH ve OMGH değerleri sunulmuştur. Bu değerler incelendiğinde, tüm çözüm bölgesini kapsayacak şekilde, RKE türbülans modelinin ölçüm yapılan kesitlerin tümünde hem OKH hem de OMGH değerlerine göre, LES modellerinden daha başarılı olduğu açıkça görülmektedir. Buna ilave olarak, LES modelinde hesaplama ağında yapılan sıkılaştırmanın numerik sonuçlar üzerinde çok da fark yaratacak şekilde bir iyileştirme yapmadığı görülmektedir. Sonuç olarak eşik sonrası kritik üstü türbülanslı akımın sayısal modellenmesinde RKE türbülans modelinin, büyük çalkantıların

direkt olarak çözüldüğü ve küçük çalkantıların ise modellendiği LES modeline göre deneylerle daha uyumlu olduğu belirlenmiştir.

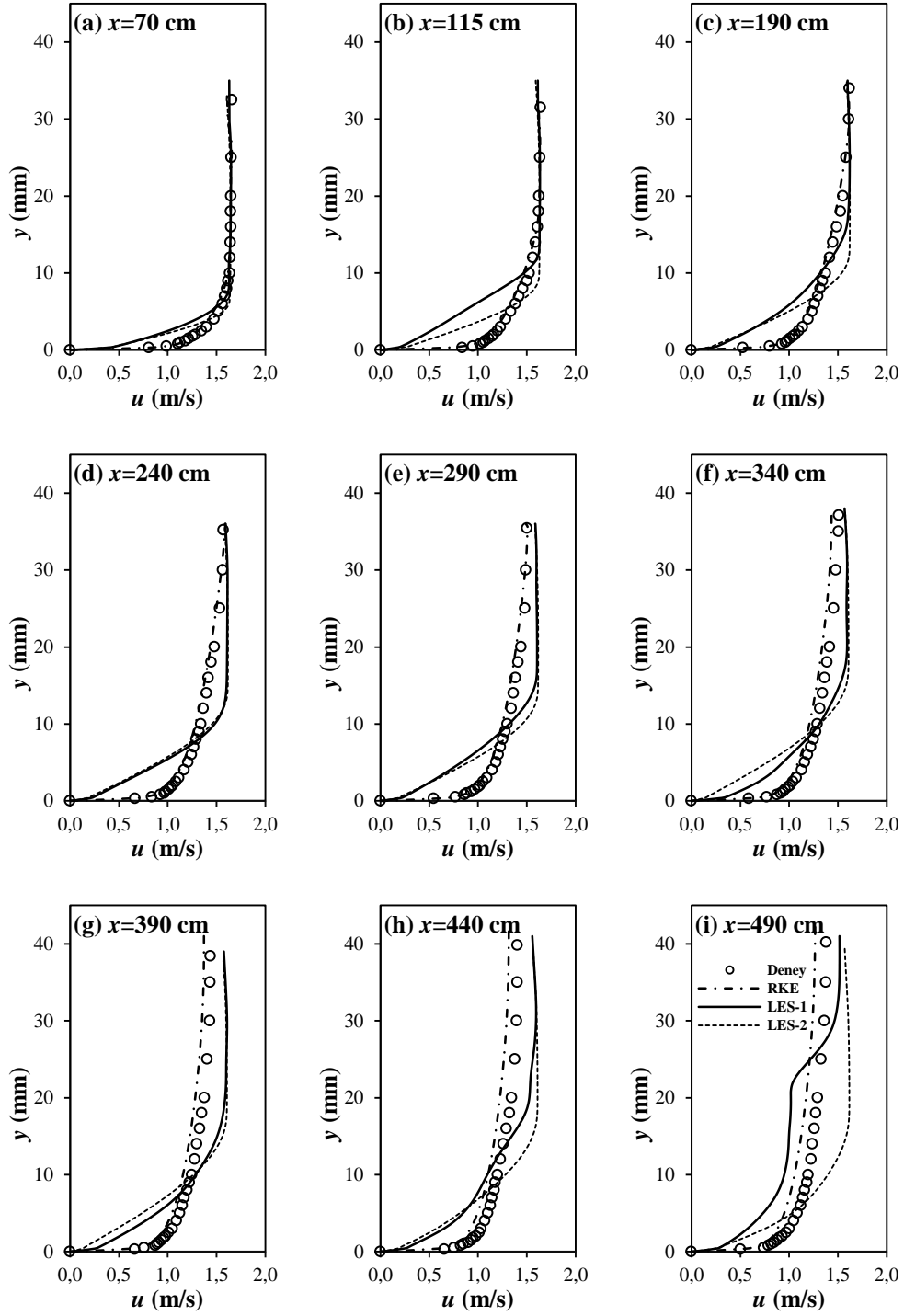
Şekil 7'de kanalın farklı kesitlerinde RKE, LES-1 ve LES-2 modellerinden hesaplanan sayısal hız profilleri ile deneysel olarak ölçülen hız profilleri sunulmuştur. Bu grafiklerden, $x=70$, 115 ve 190 cm kesitlerinde katı sınıra yakın bölgede LES-1 ve LES-2'den elde edilen bulguların, RKE modeli ile kıyaslandığında daha başarısız olduğu açıkça görülmektedir. Katı sınırdan serbest yüzeye yaklaştıkça, LES modelleri deneylerle daha uyumludur. Diğer yandan, $x=240$, 290, 340, 390, 440 ve 490 cm kesitlerinde ise LES modelleri hem katı sınıra yakın hem de serbest yüzeye yakın bölgelerde deneylerle daha uyumsuzdur. Daha yoğun ağ yapısı kullanılmasının sonuçlar üzerinde belirgin bir fark oluşturmadığı görülmektedir. Bununla birlikte RANS tabanlı RKE türbülans modeli kanalın tüm kesitlerinde oldukça başarılıdır.

3.2. Deneysel ve Hesaplanan Su Yüzü Profilleri

Çizelge 3'te RKE ve LES modelleri kullanılarak elde edilen su yüzü profillerine ait OKH ve OMGH değerleri verilmiştir. Çizelgedeki değerlerden, hız profillerinde olduğu gibi, RKE modeli ile elde edilen su yüzü profilinin, LES modellerine göre deneysel ölçümlere daha fazla yakınsadığı görülmektedir. Bununla birlikte Şekil 8'den de görüleceği üzere LES-1 ve LES-2 modelleri de su yüzü profilini tahmin etmede oldukça başarılıdır. Bu başarı, Şekil 9'da verilen RKE ve LES modellerinden elde edilen üç boyutlu su yüzü profillerinden de açıkça görülmektedir.

Çizelge 3. Farklı türbülans modelleri ile hesaplanan su yüzü profilleri için OKH (m^2) ve OMGH (%) değerleri

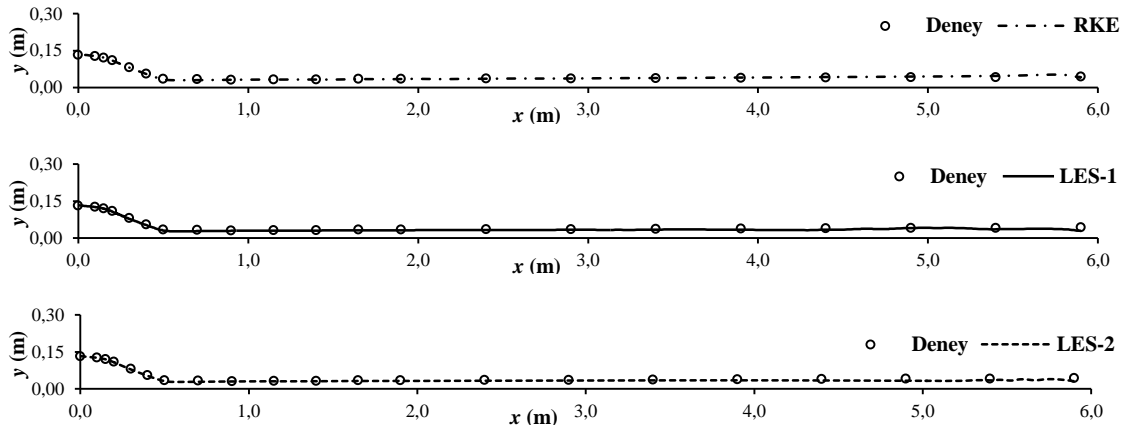
	RKE	LES-1	LES-2
OKH	$0,867 \times 10^{-5}$	$1,28 \times 10^{-5}$	$1,60 \times 10^{-5}$
OMGH	4,52	6,90	7,69



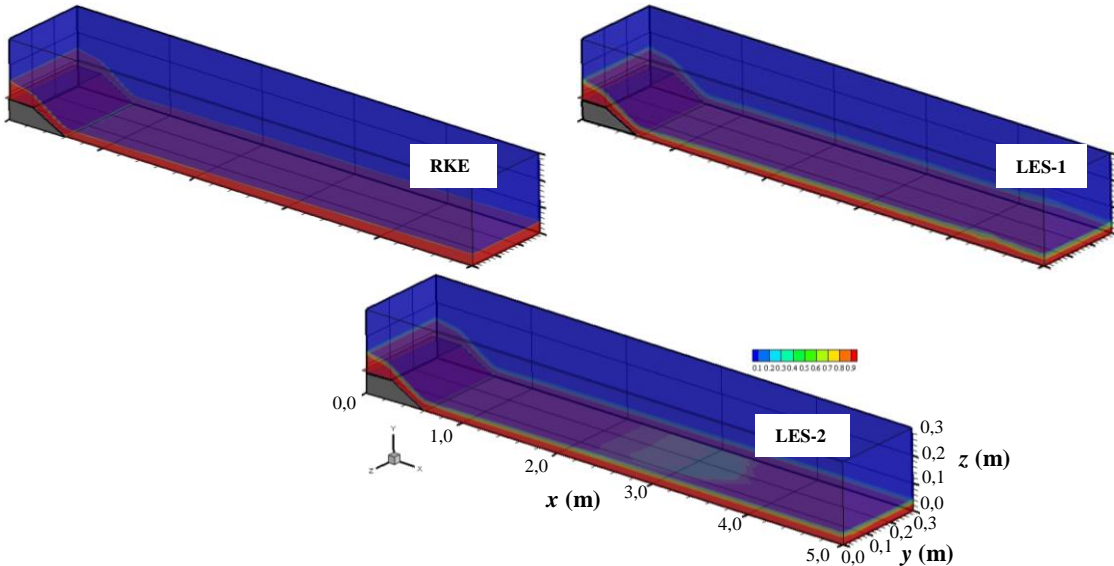
Şekil 7. Kanal boyunca farklı kesitlerde deneysel ve farklı modeller ile hesaplanan hız profilleri

Çizelge 2. Hesaplanan hız profilleri için OKH (m^2/s^2) ve OMGH (%) değerleri

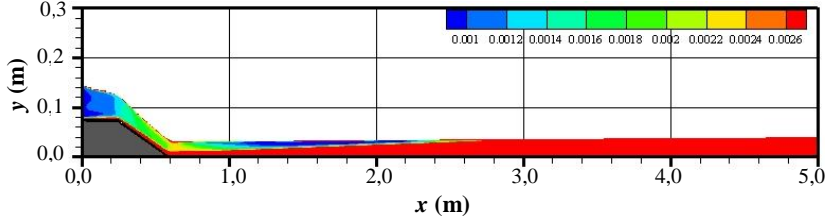
x (cm)	RKE		LES-1		LES-2	
	OKH	OMGH	OKH	OMGH	OKH	OMGH
70	0,002	1,567	0,019	4,663	0,015	4,320
115	0,001	1,717	0,079	12,475	0,033	7,750
190	0,001	2,137	0,040	10,575	0,043	11,468
240	0,002	2,760	0,049	13,349	0,054	13,973
290	0,001	2,636	0,054	15,641	0,058	16,317
340	0,005	5,388	0,031	12,253	0,066	17,082
390	0,007	6,332	0,047	15,793	0,074	19,335
440	0,011	8,158	0,044	15,571	0,068	19,683
490	0,015	10,020	0,059	18,868	0,068	20,241
Ort.	0,005	4,524	0,047	13,243	0,053	14,463



Şekil 8. Deneysel ve farklı çözüm modelleri ile hesaplanan su yüzü profilleri



Şekil 9. RKE ve LES modelleri ile hesaplanan üç boyutlu sayısal su yüzü profilleri



Şekil 10. RKE türbülans modeli ile hesaplanan türbülans kinetik enerjisi

3.3. Türbülans Kinetik Enerji Dağılımı

Şekil 10'da, RKE modeli kullanılarak elde edilen türbülans kinetik enerjisinin (TKE) kanal boyunca değişimi verilmiştir. Kanal tabanından su yüzüne doğru ilerledikçe TKE'nin şiddeti gittikçe azalmaktadır. Sınır tabakası içinde, katı sınıra yakın bölgedeki türbülanslı iç bölgede ise TKE en büyük değerlerine ulaşmaktadır. Eşik kretinden başlayarak sınır tabakasının gelişimi ile birlikte TKE'nin rölatif olarak daha etkili olduğu bölgenin kalınlığı da artmaktadır. TKE'nin minimum değeri $0.001 \text{ m}^2/\text{s}^2$ değeri iken, maksimum değeri ise $0.0026 \text{ m}^2/\text{s}^2$ olmaktadır.

4. SONUÇ

Eşik mansabında oluşan türbülanslı kritik üstü açık kanal akımının hareketini idare eden temel denklemler, sonlu hacimler yöntemine dayalı ANSYS-Fluent programı kullanılarak çözülmüştür. Üç boyutlu sayısal modellemelerde RANS denklemlerine dayalı Realizable $k-\varepsilon$ modeli ve LES modeli kullanılmıştır. Serbest su yüzünün profili VOF yöntemi ile belirlenmiştir. Hesaplama ağ yapısının, sayısal çözümler üzerindeki etkisini incelemek üzere, Ağ Yakınsama İndeksi (GCI) ölçütü olarak kullanılmış ve hesaplama hatasının % 2'nin altında kaldığı tespit edilmiştir. Deneysel ölçümler ile yapılan karşılaştırmalardan, Realizable $k-\varepsilon$ türbülans modelinin LES modeline göre hız profillerini daha başarılı bir şekilde tahmin ettiği görülmüştür. Kanal boyunca su yüzü profilinin belirlenmesinde ise bu çalışmada kullanılan modeller oldukça başarılı sonuçlar vermiştir.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın ikinci yazarı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından yurtiçi doktora bursiyeri olarak desteklenmektedir. İkinci yazar TÜBİTAK'a desteklerinden dolayı teşekkürlerini sunmaktadır.

6. KAYNAKLAR

1. Van Balen, W., Blanckaert, K., Uijtewaal, W.S.J., 2010. Analysis of the Role of Turbulence in Curved Open-Channel Flow at Different Water Depths by Means of Experiments, LES and RANS, Journal of Turbulence, 11(12):1-34.
2. Azimi, H., Shabanlou, S., Salimi, M.S., 2014. Free Surface and Velocity Field in a Circular Channel along the Side Weir in Supercritical Flow Conditions, Flow Measurement and Instrumentation, 38: 108-115.
3. Kırkgöz, M.S., Aköz, M.S., Öner, A.A., 2008. Experimental and Theoretical Analyses of Two-Dimensional Flows Upstream of Broad-Crested Weirs, Canadian Journal of Civil Engineering, 35(9): 975-986.
4. Öner, A.A., Aköz, M.S., Kırkgöz, M.S., Gümüş, V., 2012. Experimental Validation of Volume of Fluid Method for a Sluice Gate Flow, Advances in Mechanical Engineering, 2012: 10.
5. Gümüş, V., Aköz, M.S., Kırkgöz, M.S., 2013. Experimental and Numerical Modeling of Submerged Hydraulic Jump Downstream of a Sluice Gate, Teknik Dergi, 24(2): 6379-6397.
6. Kırkgöz, M.S., Aköz, M.S., Öner, A.A., 2009. Numerical Modeling of Flow over a Chute

- Spillway, Journal of Hydraulic Research, 47(6): 790-797.
7. Ramamurthy, A.S., Qu, J.Y., Vo, D., 2006. VOF Model for Simulation of a Free Overfall in Trapezoidal Channels, Journal of Irrigation and Drainage Engineering-ASCE, 132(4): 425-428.
 8. Aydın, M.C., 2012. CFD Simulation of Free-Surface Flow over Triangular Labyrinth Side Weir, Advances in Engineering Software, 45(1): 159-166.
 9. Haun, S., Olsen, N.R.B., Feurich, R., 2011. Numerical Modeling of Flow over Trapezoidal Broad-Crested Weir, Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 5(3): 397-405.
 10. Öner, A.A., Aköz, M.S., Kırkgöz, M.S., Gümüş, V., 2012. Experimental Validation of Volume of Fluid Method for a Sluice Gate Flow, Advances in Mechanical Engineering, 4:461708.
 11. 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.
 12. ANSYS., 2012. FLUENT Theory Guide, USA: ANSYS Inc.
 13. 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.
 14. Chen, H.C., Patel, V.C., 1988. Near-Wall Turbulence Models for Complex Flows Including Separation, Aiaa Journal, 26(6): 641-648.
 15. Roache, P.J., 1998. Verification of Codes and Calculations, Aiaa Journal, 36(5): 696-702.
 16. Çelik, I.B., Ghia, U., Roache, P.J., Freitas, C.J., 2008. Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty due to Discretization in CFD Applications, Journal of Fluids Engineering-Transactions of the Asme, 130(7).
 17. Kırkgöz, M.S., Ardiclioğlu, M., 1997. Velocity Profiles of Developing and Developed Open Channel Flow, Journal of Hydraulic Engineering, 123(12): 1099-1105.

