



# Kritik Üstü Açık Kanal Akımının Detached Eddy ve Large Eddy Simülasyon ile Sayısal Modellenmesi

M. Sami AKÖZ<sup>1</sup>, N. Göksu SOYDAN<sup>1, \*</sup>, Oğuz ŞİMŞEK<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana,

Başvuru:10/06/2016 Düzeltme: 10/08/2016 Kabul: 11/10/2016

## ÖZ

Kritik üstü açık kanal akımının üç boyutlu sayısal analizi, sonlu hacimler yöntemine dayalı ANSYS-Fluent ile yapılmıştır. Sayısal hesaplamalarda türbülanslı akımın karakteristiklerinin belirlenmesinde Large Eddy ve Realizable  $k-\varepsilon$  tabanlı Detached Eddy Simülasyonu kullanılmıştır. Sayısal hesaplamalarda su yüzü profili, Akışkan Hacimleri Yöntemi ile elde edilmiştir. Kritik üstü akımın hız alanı Lazer Doppler Anemometresi kullanılarak ölçülmüştür. Sayısal modellerden elde edilen akım hızları ve su yüzü profilleri deneysel ölçümlerle karşılaştırılmış, Detached Eddy Simülasyon modelinin hız alanının hesaplanmasında ve su yüzü profilinin belirlenmesinde Large Eddy Simülasyon modeline göre daha başarılı olduğu görülmüştür.

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

## Numerical Modeling of Supercritical Open Channel Flow with Detached Eddy and Large Eddy Simulation

## ABSTRACT

Three-dimensional numerical analysis of supercritical open channel flow is performed by ANSYS FLUENT-based on the finite volume method. In the numerical analysis of supercritical turbulent flow, Large Eddy Simulation and Detached Eddy Simulation based on the Realizable  $k-\varepsilon$  turbulence models are used in order to determine turbulence characteristics. The free surface profile is computed using Volume of Fluid method. The velocity field of supercritical open channel flow is measured using Laser Doppler Anemometry (LDA). Computational results for velocities and free surface profiles are compared with measured data. Comparisons show that the *Detached Eddy Simulation* model is more successful than *Large Eddy Simulation* in predicting the velocity field and free surface profiles.

**Keywords:** DES, Velocity profile, Supercritical flow, LES, Surface profile, VOF

\*İletişim yazarı, e-mail: soydang@cu.edu.tr

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Açık kanal akımları, hidrolik mühendisliği alanında birçok çalışmaya konu olmuştur. Bu tür akımlar çeşitli kriterlere göre sınıflandırılmaktadır. Bunlardan en yaygın olanı Froude sayısına ( $Fr=V/(gh)^{1/2}$ );  $V$ ; akım hızı,  $g$ ; yer çekim ivmesi ve  $h$ ; akım derinliği göre yapılan sınıflandırmadır.  $Fr$  sayısının birden küçük, bire eşit ya da birden büyük olmasına göre akarsu ya da kanaldaki akım sırasıyla kritik altı akım (nehir rejimi), kritik akım ve kritik üstü akım (sel rejimi) olarak isimlendirilmektedir. Serbest yüzeysel akım alanına bir yapının inşa edilmesi halinde bu üç farklı akım rejimi aynı anda gerçekleşebilir. Kritik altı akımlar kritik üstü akımlara göre hızın daha az olduğu su derinliğinin daha yüksek olduğu akım türüdür ve kontrol edilmesi kritik üstü akımlara kıyasla daha kolaydır. Kritik üstü akımlarda hızın yüksek olması, akarsu ya da kanallarda katı yüzeylere uygulanan sürtünme kuvvetinin daha büyük olmasına, dolayısıyla akarsu veya kanalın ıslak çeperi boyunca aşınmasına ve zamanla deforme olmasına sebep olabilmektedir.

Geçmişte açık kanal akımları ile ilgili birçok deneysel ve sayısal çalışmalar yapılmıştır. Açık kanal akımlarının fiziksel model deneyleriyle incelenmesi maliyet ve zaman açısından oldukça külfetlidir. Son yıllarda bilgisayar teknolojisinde meydana gelen gelişmeler, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemlerinin kullanımını sağlayan yazılımlarda da gelişmeye sebep olmuştur. Bu gelişmeler ile birlikte HAD yöntemleri, araştırmacılara akışkan hareketini fiziksel model çalışmalarına göre daha kısa süre içerisinde daha ekonomik ve daha detaylı inceleme imkânı sunmaktadır.

HAD hesaplamalarında, türbülanslı akımın hareketini idare eden temel denklemlerin sayısal çözümleri farklı sayısal yöntem ve türbülans modelleri kullanılarak elde edilmektedir. Bu yöntem ve modellerin doğrulanması için sayısal sonuçların deneysel ölçümlerle karşılaştırılması gerekmektedir. Geçmişte birçok araştırmacı tarafından bu amaca yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir [1-4]. Xu ve ark., [5], silindirik etrafındaki ayrılmış türbülanslı akımı Large-Eddy Simülasyon (LES), Detached Eddy Simülasyon (DES) ve düzensiz Reynolds ortalama Navier Stokes (URANS) modellerini kullanarak sayısal olarak irdelenmişlerdir. Sayısal model sonuçlarından elde edilen ortalama basınç ve sürüklenme katsayılarını, hız profillerini, Strouhal sayısını ve Reynolds gerilmesi değerlerini literatürde bulunan deneysel ve sayısal sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Kullanılan sayısal modellerin, silindirik etrafındaki türbülanslı akım ayrılmasını başarılı bir biçimde tahmin ettiğini belirlemişlerdir. Constantinescu ve ark., [6], kavisli bir kanalda sekonder akımların, türbülans ve sınır kayma gerilmesi üzerindeki etkilerini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Deneysel olarak elde edilen akım doğrultusundaki hız ve vortisite dağılımlarını, DES ve Reynolds ortalama Navier Stokes (RANS) modelinden elde ettikleri sayısal sonuçlar ile karşılaştırmışlar ve DES modelinin RANS'a göre deneysel sonuçlara daha fazla yakınsadığını belirtmişlerdir. Nasif ve ark., [7], sıvı su koşullarında açık kanal akımı içerisine yerleştirilmiş keskin kenarlı dik engel etrafındaki üç boyutlu akımı,  $k-\omega$  SST tabanlı DES modelini kullanarak sayısal olarak modellemişlerdir. Kuyruk bölgesindeki ortalama ve

anlık hız alanı karakteristiklerini, farklı mansap yerleşim durumlarında incelemişlerdir. At nalı vortekslerin, yapının önünde ve akım doğrultusunda pozitif hızın yatay düzlemde yatağa yakın kuyruk merkez çizgisinde oluştuğunu rapor etmişlerdir. Hassanzadeh ve ark., [8], küre etrafındaki türbülanslı akımı LES modelini kullanarak sayısal olarak modellemişler ve elde edilen sonuçları önceki çalışmalarla karşılaştırmışlardır. Küre mansabında oluşan ayrılmış bölgedeki akım yapısını, hız alanını, ve akımın topolojisini ayrıntılı bir şekilde sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel ölçümlerle yapılan karşılaştırmalardan, LES modelinin oldukça başarılı olduğunu rapor etmişlerdir. Gholami ve ark., [9], dik eğimli taban üzerindeki açık kanal akımını sayısal olarak modellemişler ve deneysel ölçümlerle karşılaştırmışlardır. Sayısal modellemede, Renormalization Group  $k-\varepsilon$  türbülans modelini kullanmışlar ve su yüzünü akışkan hacimleri yöntemi ile hesaplamışlardır. Sayısal ve deneysel karşılaştırmalardan Renormalization Group  $k-\varepsilon$  modelinin dik eğimli açık kanal akımını modellemede başarılı olduğu sonucuna varmışlardır.

Aköz ve ark., [10], yarım silindirik üzerinden geçen açık kanal akımının özelliklerini sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Hız alanını Lazer Doppler Anemometresini kullanarak ölçmüşlerdir. Türbülanslı akımın hareketini idare eden temel denklemler, ANSYS-Fluent programı yardımı ile Standart  $k-\varepsilon$ , Renormalization Group  $k-\varepsilon$ , Realizable  $k-\varepsilon$ , Modified  $k-\omega$ , Shear Stress Transport ve Reynolds Stress türbülans modelleri kullanılarak çözülmüştür. Sayısal hesaplamalardan elde edilen hız alanı ve su yüzü profilleri, deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır ve çalışma sonucunda Reynolds Stress modelinin akım karakteristiklerini tahmin etmede diğer modellere göre daha başarılı olduğunu belirlemişlerdir.

Bu çalışmada, eşik sonrası oluşan kritik üstü üç boyutlu açık kanal akımı iki farklı debi durumu için Large Eddy Simülasyon (LES) ve Realizable  $k-\varepsilon$  tabanlı Detached Eddy Simülasyon (DES) modelleri ile sayısal olarak modellenmiştir. Sayısal modelleme sonuçlarının ağ yapısından bağımsızlığını kontrol etmek için Ağ Yakınsama İndeksi (Grid Convergence Index-GCI) yöntemi kullanılmış ve farklı yoğunluklara sahip çözüm ağları oluşturulmuştur. Laboratuvar ortamında yapılan hız alanı ile ilgili deneysel ölçümler Lazer Doppler Anemometresi (LDA) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal hesaplamalardan elde edilen hız ve akım profillerine ait bulgular deneysel ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Yüksek eğriliğe sahip çok daha karmaşık açık kanal akımlarının modellenmesinde LES ve DES ile ilgili literatürde birçok çalışma bulunmaktadır ve büyük çalkantıların bulunduğu bölgelerde Reynolds Ortalama Navier Stokes modellerine göre daha başarılı tahminler yapabildiği bilinen bir gerçektir (ANSYS [11], Jiang ve Lai [12]). Bu çalışma literatüre ek olarak, çok karmaşık olmayan akım şartları altında LES ve DES modellerinin nasıl bir performans sergileyeceği ve küçük çalkantı durumlarındaki hız alanının ve serbest su yüzünün belirlenmesindeki başarısının test edilmesi amacı ile gerçekleştirilmiştir.

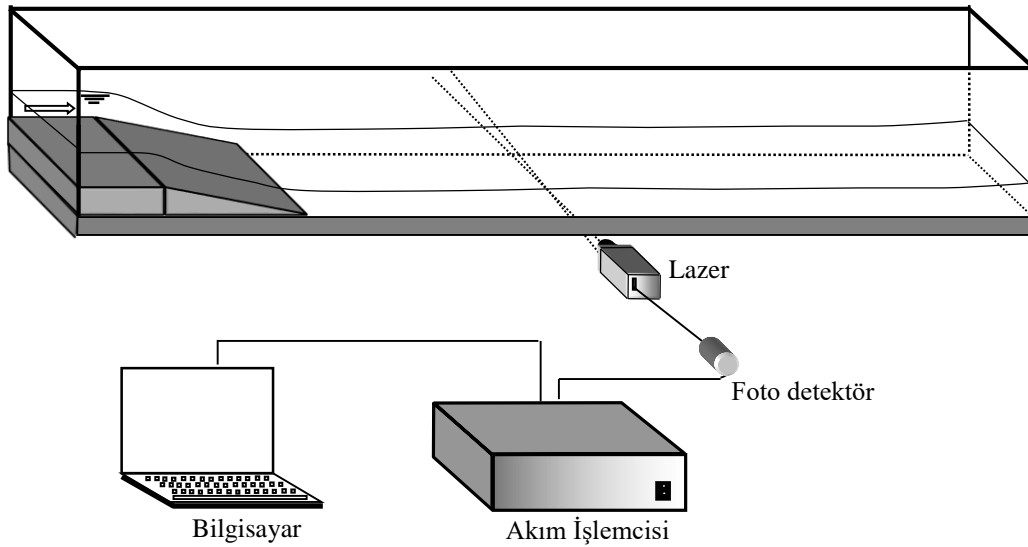
## 2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

### 2.1. Deneyler (Experiments)

Deneyler, 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. Kritik üstü akım koşullarının sağlanabilmesi için mansap eğimi 1/5 ve kret yüksekliği 0,075 m olan eşik kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan eşik 0,5 m uzunluğunda olup kanal girişine 2,1 m mesafededir. Lazer Doppler Anemometresi (LDA) ile yapılan hız ölçümleri, akım debisi  $Q_1=0,0076 \text{ m}^3/\text{s}$  (Durum 1) ve  $Q_2=0,0142 \text{ m}^3/\text{s}$  (Durum 2) olacak şekilde iki farklı akım koşulunda gerçekleştirilmiştir. Durum 1 için eşik üstündeki su derinliği  $h_1=3,50 \text{ cm}$ , ortalama hız  $V_1=0,67 \text{ m/s}$ , Froude sayısı  $Fr_1 (=V_1/(gh_1)^{1/2})=1,15$  ve Reynolds sayısı  $Re_1 (=4V_1R_1/\nu)\approx 67000$  olarak belirlenmiştir. Durum 2 için  $h_2=5,72 \text{ cm}$ , ortalama hız  $V_2=0,80 \text{ m/s}$ , Froude sayısı  $Fr_2$

$(=V_2/(gh_2)^{1/2})=1,06$  ve Reynolds sayısı  $Re_2 (=4V_2R_2/\nu)\approx 119000$  olarak belirlenmiştir ( $R_0$ ; hidrolik yarıçap ve  $\nu$ ; kinematik viskozitedir ve hesaplamalarda  $1,14 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  olarak alınmıştır). Ele alınan bölge, eşik kret başlangıcının ( $x=70 \text{ cm}$ ) mansabında, yani eşik sonrası kritik üstü akım koşullarının olduğu bölgedir. Burada hesaplanan Fr sayısı küçük debi için 3,77 ve büyük debi için ise 2,8'dir.

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 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.



Şekil 1. Deney Düzenegi (Experimental Set-up)

### 2.2. Temel Denklemler (Governing Equations)

Üç-boyutlu, sıkışmayan, türbülanslı açık kanal akımının hareketini idare eden temel denklemler, kütle ve momentumun korunumu (Reynolds-ortalama Navier-Stokes) denklemleri aşağıdaki gibidir:

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

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

(1) ve (2) denklemlerinde  $u_i$ ,  $x_i$  doğrultusundaki hız bileşeni,  $g$  yer çekimi ivmesi,  $p$  basınç,  $\mu$  dinamik viskozite,  $\rho$  akışkan yoğunluğu ve  $\tau_{ij}$  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

$(-\rho u'_i u'_j)$ . 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 aşağıdaki gibi 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,  $\mu_t$  türbülans viskozitesi,  $k$  ( $=\overline{u'_i u'_i} / 2$ ) türbülans kinetik enerjisi ve  $\delta_{ij}$  Kronecker deltasıdır.

### 2.3. Sayısal Modeller (Numerical Models)

Denklem (3)'de görülen  $\mu_t$  türbülans viskozitesinin hesaplanmasında birçok türbülans kapatma modeli geliştirilmiştir. Bu çalışmada,  $\mu_t$ 'nin hesabında Reynolds Ortalamalı Navier Stokes denklemlerinin çözümüne dayalı Realizable  $k$ - $\varepsilon$  tabanlı Detached Eddy Simülasyonu modeli ve Large Eddy Simülasyonu modeli kullanılmıştır (ANSYS, [11]).

#### 2.3.1. Detached Eddy Simülasyonu (DES) Türbülans Modeli

##### (Detached Eddy Simulation Turbulence Model)

DES modeli genellikle LES ve RANS modellerinin birleştirilmesi sonucunda elde edilmiş hibrit bir modeldir. Bu model, LES ve RANS modellerini yüksek Reynolds sayılı, harici aerodinamik simülasyonlarının mevcut olduğu uygulamalar için birleştirmektedir.

ANSYS-Fluent, DES için 4 farklı model önermektedir. Bunlar, Spalart-Allmaras, Realizable  $k$ - $\varepsilon$ , SST  $k$ - $\omega$  ve Transition SST modelleridir. DES modelinin hesaplama maliyeti, RANS modellerine göre daha fazla ancak LES modeline göre daha azdır. Bu çalışmada, DES ile yapılan sayısal hesaplamalarda Realizable  $k$ - $\varepsilon$  alt modeli kullanılmıştır.

##### Realizable $k$ - $\varepsilon$ (RKE) Tabanlı Detached Eddy Simülasyonu (DES) Türbülans Modeli

##### (Detached Eddy Simulation with the Realizable $k$ - $\varepsilon$ Model)

RKE türbülans modeli ile çalıştırılan DES modeli, RKE modelinin çözdüğü ve denklem 4'te verilen  $k$  türbülans kinetik enerji denklemindeki kayıp terimi dışında, benzer denklemleri kullanmaktadır.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (4)$$

Denklem 4'te verilen  $G_k$  terimi türbülans kinetik enerji üretim miktarını,  $\varepsilon$  ise türbülans kinetik enerji kayıp miktarını göstermektedir. DES modelinde, RKE denklemindeki kayıp terimi şu şekilde ifade edilmiştir:

$$Y_k = \frac{\rho k^{\frac{3}{2}}}{l_{des}} \quad (5)$$

burada,

$$l_{des} = \min(l_{rke}, l_{les}) \quad (6)$$

$$l_{rke} = \frac{k^{\frac{3}{2}}}{\varepsilon} \quad (7)$$

$$l_{les} = C_{des} \Delta_{max} \quad (8)$$

burada  $C_{des}$ , DES modelinde kullanılan kalibrasyon sabitidir ve değeri 0,61 olarak alınır ANSYS [11].  $\Delta_{max}$  ise maksimum yersel ağ aralığıdır ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ ).  $l_{des}=l_{rke}$  durumlarında RKE modelindeki "k" formülasyonunun kayıp terimi için şu şekilde bir denklem elde edilecektir:  $Y_k = \rho \varepsilon$ . Spalart-Allmaras modeline benzer şekilde, sınır tabakası boyunca RANS modunu korumak için gecikme kavramı Realizable DES modeline de uygulanabilir. Bu uygulamada RANS modeli için ilk ağ yüksekliği,  $\Delta_{max}$ ,  $\delta$  sınır tabakası kalınlığını aştığı durumda DES modeli tüm sınır tabakası boyunca RANS modunda çözüm yapar. Eğer  $\Delta_{max} < \delta$  ise, DES modeli sınır tabakasını çözmek için LES modunu kullanır. Bundan dolayı, sınır tabakası boyunca RANS modunu korumak için, ANSYS Fluent, gecikmiş seçenek veya DDES olarak bilinen yeni bir DES formülasyonu bulundurmaktadır. Bu koşullarda Denklem 6'daki DES uzunluğu ( $l_{des}$ ), şu şekilde yeniden tanımlanır:

$$l_{des} = l_{rke} - f_d \max(0, l_{rke} - C_{des} \Delta_{max}) \quad (9)$$

#### 2.3.2. Large Eddy Simülasyonu (LES) Türbülans Modeli

##### (Large Eddy Simulation Turbulence Model)

Large Eddy Simülasyonu modeli, büyük çalkantıların direkt olarak çözüldüğü ve küçük çalkantıların ise modellendiği bir modeldir. 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 şu şekilde ifade edilir:

$$\bar{f}(x) = \int_D f(x')G(x,x')dx', \quad f'(x) = f(x) - \bar{f}(x) \quad (10)$$

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:

$$\int_{-\infty}^{\infty} G(x,x') = 1 \quad (11)$$

Sıkışmayan akımlar için filtrelenmiş Navier Stokes denklemleri:

$$\left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_i \partial x_j} \quad (12)$$

ve süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (13)$$

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 durum 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;

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2\mu_t \bar{S}_{ij} \quad (14)$$

şeklinde ifade edilir. Burada,  $\mu_t$  türbülans viskozitesini,  $\tau_{kk}$  alt grid ölçek gerilmesinin izotropik kısmını göstermektedir ve modellenmemektedir, ancak statik basınç terimine eklenmektedir.  $\bar{S}_{ij}$  ise şekil değiştirme terimini göstermektedir ve şu şekilde ifade edilir:

$$\bar{S}_{ij} \equiv \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (15)$$

Bu çalışmada, LES modelinde alt grid ölçek modeli olarak Smagorinsky-Lily modeli kullanılmıştır (ANSYS, [11]).

#### Smagorinsky-Lily modeli (Smagorinsky-Lily Model)

Bu model ilk olarak Smagorinsky [13] tarafından öne sürülen basit bir modeldir. Smagorinsky Lily modelinde türbülans viskozitesi,

$$\mu_t = \rho L_s^2 |\bar{S}| \quad (16)$$

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  $L_s$  şu şekilde hesaplanır:

$$L_s = \min(\kappa d, C_s \Delta) \quad (17)$$

Burada  $\kappa$  von Karman sabitini,  $d$  katı sınıra en yakın ağ yüksekliğini,  $C_s$  Smagorinsky sabitini ve  $\Delta$  ise yersel ağ büyüklüğünü göstermektedir. ANSYS Fluent programında  $\Delta$ , hesaplama ağı hacmi  $V$ 'ye göre aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

$$\Delta = V^{1/3} \quad (18)$$

#### 2.4. Akışkan Hacimleri Yöntemi (Volume of Fluid Method-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 (Hirt ve Nichols [14]). Bu çalışmada su-hava ara kesitinin hesabında akışkan hacimleri yöntemi (Volume of Fluid, VOF) kullanılmıştır. VOF yöntemi hücrelerin boş, kısmen ya da tam su ile 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 (ANSYS [15]). 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.

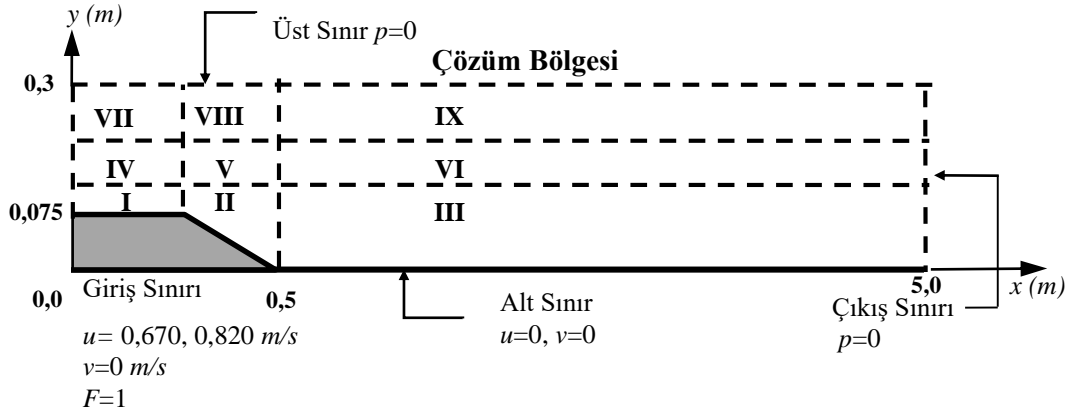
#### 2.5. Çözüm Bölgesinin Sınır Şartları (Boundary Conditions of Solution Domain)

Eşik sonrası oluşan kritik üstü açık kanal akımının sayısal modeli için kullanılan çözüm bölgesi, sınır şartları ve alt bölgeleri Şekil 2'de verilmiştir. Kullanılan koordinat sisteminin orijini, çözüm bölgesinin sol alt köşesi olarak alınmıştır. Şekil 2'de verilen çözüm bölgesinin üst sınırı ve çıkış bölgesi sınır şartı sıfır basınç ( $p=0$ ), kanal tabanında ve eşik alt tabanında sıfır hız sınır şartı, yani  $u=0$ ,  $v=0$  olarak tanımlanmıştır. Akım durumunda sayısal modelde giriş sınır şartı olarak uniform hız dağılımı 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. Bu çalışmada RKE tabanlı DES ve LES modelleri kullanılmış, LES modelinde ise katı sınıra yakın bölgeler Smagorinsky-Lily modeli seçilerek hesaplanmıştır. (1) ve (2) temel denklemlerinin, Şekil

2'de 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 elde edilmiştir.



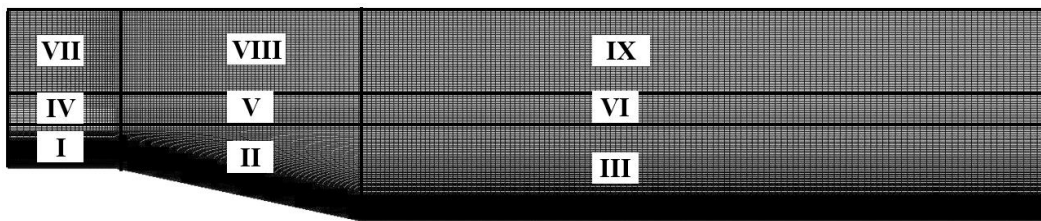
Şekil 2. Sayısal çözüm bölgesi ve sınır şartları (Solution domain and boundary conditions)

## 2.6. Hesaplama Ağı (Computational Grid)

Yapı ile etkileşim halindeki bir akımın sayısal hesaplamalarında hesaplama ağının sonuçlar üzerinde etkili olduğu bilinen bir gerçektir. 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 2'de verilen sayısal çözüm bölgesi, Şekil 3'de 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.

Ele alınan üçlü ağ sisteminde yapılan sıklaştırmanın uygunluğu, bir başka ifadeyle ağ yapısından bağımsız sayısal çözümler elde etmek amacıyla, Ağ Yakınsama İndeksi (Grid Convergence Index-GCI) yöntemi kullanılmıştır (Çelik ve ark., [16]; Roache, [17]). Ağ-3 sistemiyle, akım hızlarındaki hataların kabul edilebilir bir sınır olan % 2'den küçük olduğu görülmüş ve hesaplama hassasiyetinin ağ yoğunluğundan bağımsızlaştığı kanaatine varılmıştır.

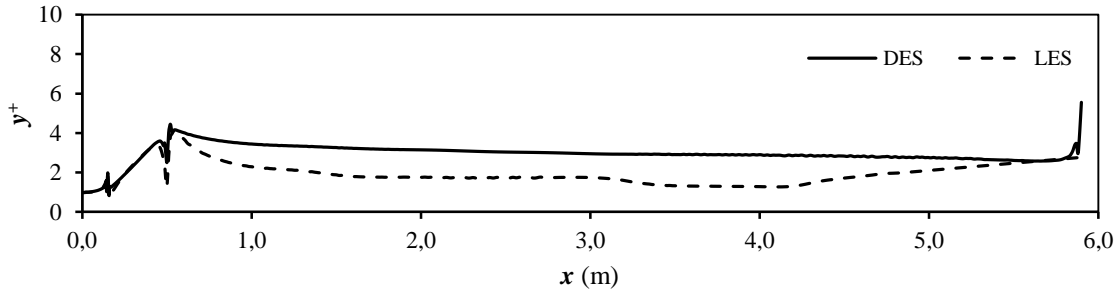
Tablo 1'de Ağ-3 sistemi için alt bölgelerde bulunan eleman sayıları verilmiştir. Şekil 4, DES ve LES türbülans modelleri ile elde edilen  $y^+$  değerlerinin kanal boyunca değişimini göstermektedir. Kırkgöz ve Ardıçlıoğlu [18],  $y^+ (=u_*\Delta/\nu)$  değerinin  $10^3$ 'den küçük olması halinde hız dağılımının, viskoz alt tabakadaki lineer dağılıma uyduğunu rapor etmişlerdir ( $u_*$ =kayma hızı;  $\Delta$ = yükseklik;  $\nu$ =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 modelde kullanılan hesaplama ağı ve alt bölgeleri (Computational grid and sub-domains in the numerical models)

**Tablo 1.** Ağ-3'ün eleman sayıları (Element numbers of Grid 3)

Bölge	Eleman Sayısı	Bölge	Eleman Sayısı
I	50x200	VI	550x10
II	70x200	VII	50x40
III	550x200	VIII	70x40
IV	50x10	IX	550x40
V	70x10		

**Şekil 4.** DES ve LES ile elde edilen  $y^+$  değerleri ( $y^+$  values obtained from DES and LES)

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

#### 3.1. Deneysel ve Hesaplanan Hız Profilleri

##### (Experimental and Numerical Velocity Profiles)

Bu çalışmada kullanılan DES ve LES modellerinin başarılarının kıyaslanması bağlamında, deneysel ve sayısal hesap bulgularının niceliksel olarak karşılaştırılmasında, hız ve su yüzü profilleri için Denklem 19 ve Denklem 20'den hesaplanan *Ortalama Karesel Hata* (OKH) ve *Ortalama Mutlak Göreceli Hata* (OMGH) değerleri ölçüt olarak alınmış, Durum 1 ve Durum 2'den elde edilen hız ve su yüzü profilleri için hesaplanan bu değerler sırasıyla Tablo 2 ve Tablo 3'te sunulmuştur.

$$OKH = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (v_d - v_h)^2 \quad (19)$$

$$OMGH = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left| \frac{v_d - v_h}{v_d} \right| \times 100 \quad (20)$$

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

Tablo 2, ölçülen ve hesaplanan hız profillerinden elde edilen OKH ve OMGH değerlerini göstermektedir. Tablonun son satırında ise tüm kesitler göz önünde bulundurularak elde edilen ortalama OKH ve OMGH değerleri sunulmuştur. Tablo incelendiğinde DES modeli kullanılarak elde edilen sayısal hız değerleri ile hesaplanan OKH ve OMGH değerlerinin her iki durumda da LES modeline göre tüm kesitlerde daha küçük olduğu görülmektedir. Buradan, DES türbülans modelinin eşik sonrası oluşan kritik üstü akımın sayısal modellenmesinde LES'e göre daha başarılı olduğu anlaşılmaktadır.

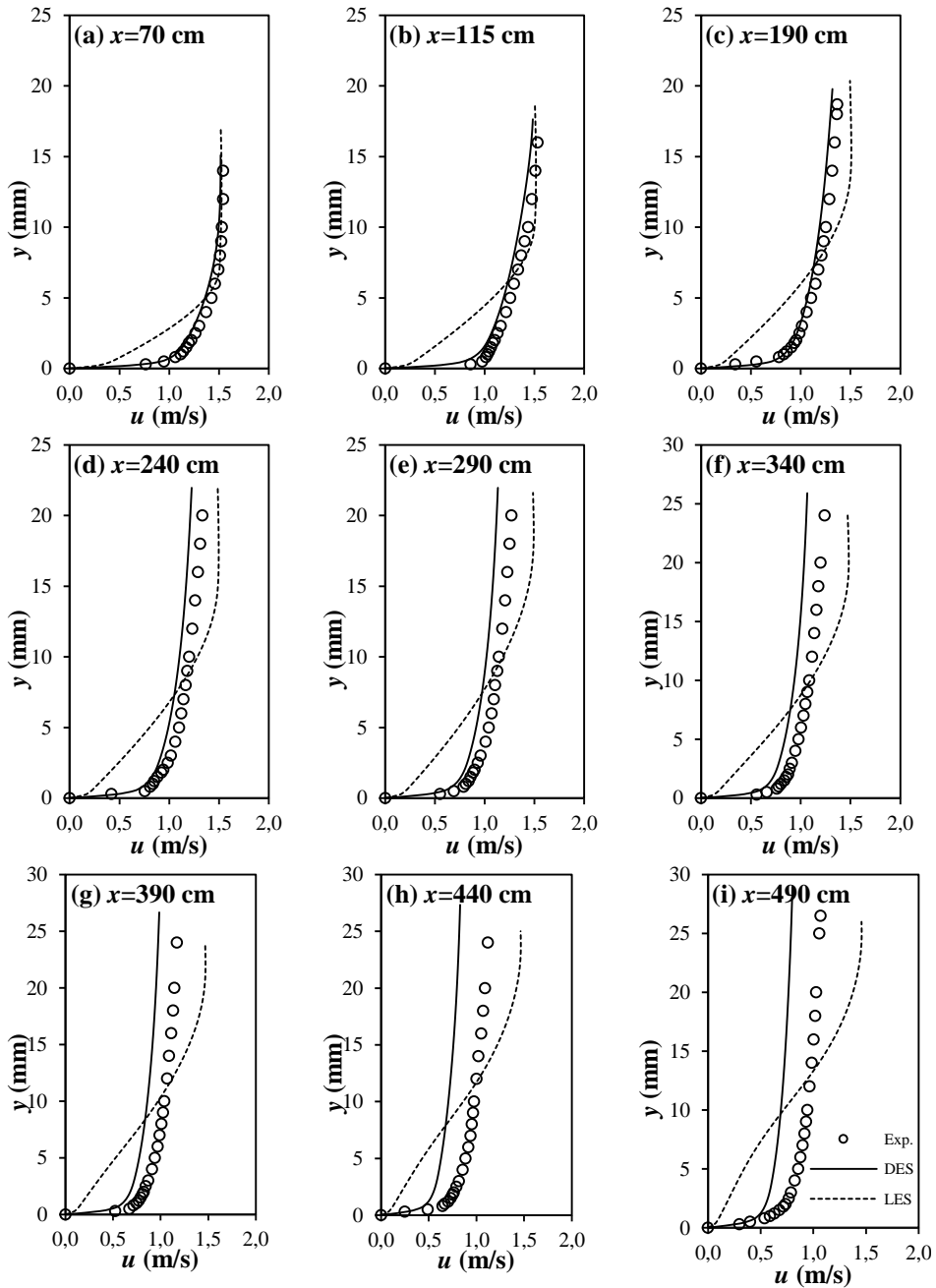
**Tablo 2.** Hız profilleri için DES ve LES türbülans modelleri ile hesaplanan OKH ( $m^2/s^2$ ) ve OMGH (%) değerleri (Calculated MSE ( $m^2/s^2$ ) and MARE (%) values with DES and LES for the velocity profiles)

x (cm)	Durum 1				Durum 2			
	DES		LES		DES		LES	
	OKH	OMGH	OKH	OMGH	OKH	OMGH	OKH	OMGH
70	0,002	3,245	0,043	10,371	0,001	1,458	0,015	4,320
115	0,007	6,153	0,068	15,048	0,001	1,808	0,033	7,750
190	0,004	5,771	0,056	18,904	0,009	6,365	0,043	11,468
240	0,010	8,631	0,071	21,738	0,001	1,519	0,054	13,973
290	0,016	11,529	0,074	23,143	0,009	6,933	0,058	16,317
340	0,023	14,233	0,085	25,666	0,001	2,554	0,066	17,082
390	0,032	17,557	0,102	29,484	0,014	9,105	0,074	19,335
440	0,072	27,371	0,109	32,691	0,002	3,438	0,068	19,683
490	0,061	25,827	0,131	37,316	0,010	7,908	0,068	20,241
Ort.	0,025	13,369	0,082	23,818	0,005	4,565	0,053	14,463

Şekil 5 ve 6'da Durum 1 ve Durum 2 için kanalın farklı kesitlerinde DES ve LES modellerinden hesaplanan sayısal hız profilleri ile deneysel olarak ölçülen hız profilleri sunulmuştur. Bu profillerden, ele alınan tüm kesitlerde DES modelinin LES modeline göre, her iki akım durumu için deneylerle daha uyumlu sonuçlar verdiği grafiksel olarak da görülmektedir. LES modeli özellikle katı sınıra yakın bölgelerde oldukça başarısız iken katı sınırdan uzaklaştıkça deneysel ölçümlerle nispeten daha uyumlu bir durum sergilemektedir. Diğer taraftan DES modeli, hem katı sınıra yakın hem de katı sınırdan uzak bölgelerde hızların tahmin edilmesinde

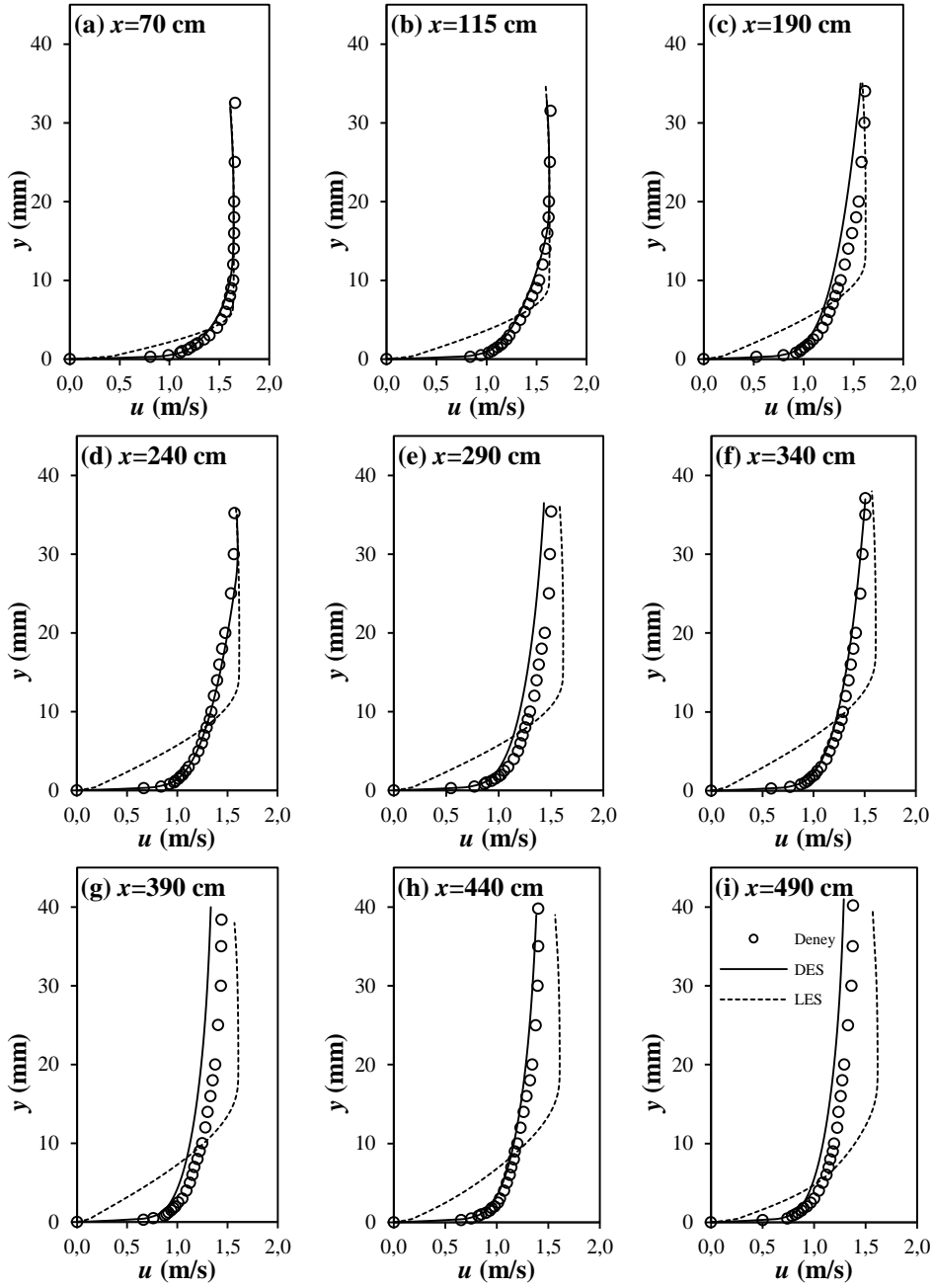
oldukça başarılı bir performans göstermiştir. DES bulgularının deneysel ölçümlerle gayet uyumlu olduğu şekillerdeki akım profillerinden de görülmektedir.

Deneysel olarak tek boyutlu ölçümler yapılmasına karşın sayısal hesaplamalardan elde edilen bulgulara göre düşey hız büyüklüğü, eğimli yüzey üzerinde yani iki boyutlu akımın görüldüğü bölgede yaklaşık olarak yatay hızın 1/3'ü mertebesindedir. Eşiğin hemen sonrasında ise düşey hızın %0,6 mertebelerinden sıfır değerine doğru gittiği yapılan sayısal modellemeler sonucunda belirlenmiştir.



Şekil 5. Kanal boyunca farklı kesitlerde deneysel ve hesaplanan hız profilleri (Durum 1) (Experimental and numerical velocity profiles along the channel in different sections, Case 1)





Şekil 6. Kanal boyunca farklı kesitlerde deneysel ve hesaplanan hız profilleri (Durum 2) (Experimental and numerical velocity profiles along the channel in different sections, Case 2)

### 3.2. Deneysel ve Hesaplanan Su Yüzü Profilleri

#### (Experimental and Numerical Free Surface Profiles)

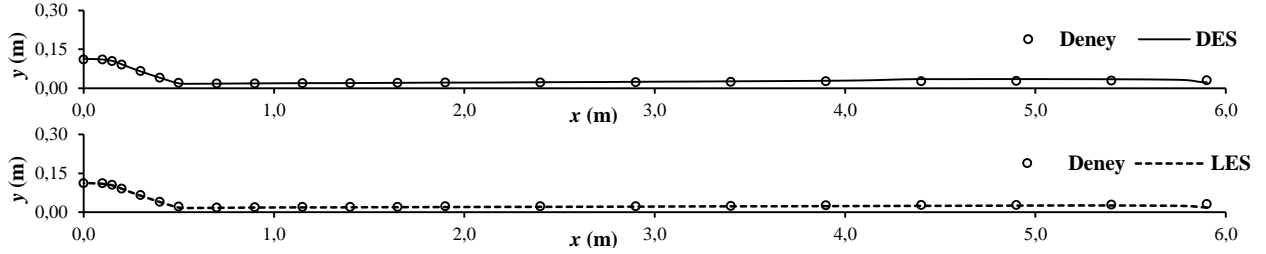
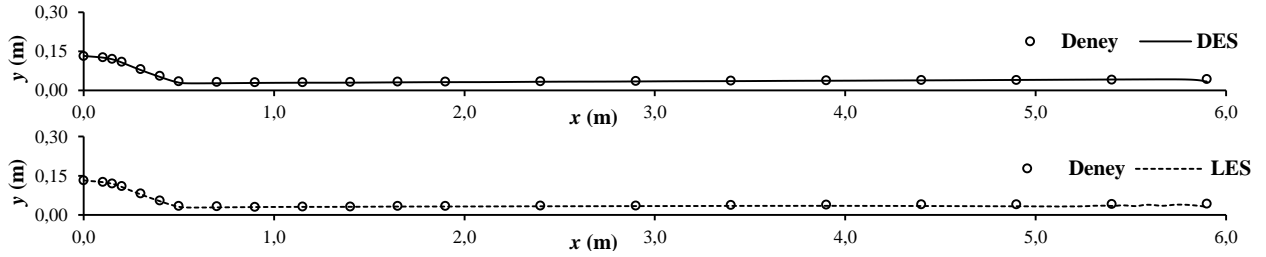
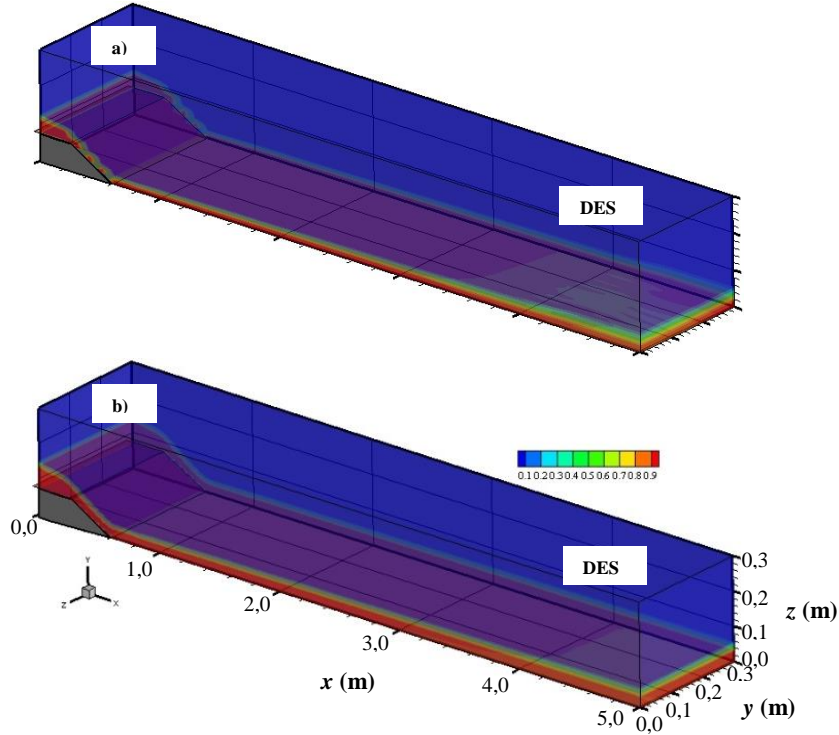
Tablo 3 'te Durum 1 ve Durum 2 için DES ve LES modelleri kullanılarak elde edilen su yüzü profillerine ait OKH ve OMGH değerleri verilmiştir. Tablodaki değerlerden, hız profillerinde de olduğu gibi her iki durumda da, DES modeli ile elde edilen su yüzü profilinin, LES modellerine göre daha iyi sonuçlar verdiği ve deneylere daha fazla yakınsadığı görülmektedir. Şekil 7 ve 8'de Durum 1 ve Durum 2 için DES ve LES modelleri kullanılarak elde edilen su yüzü profillerinin deneysel ölçümlerle grafiksel olarak

karşılaştırılması sunulmuştur. Tablo 3 ile paralel olarak, DES modeli ile elde edilen su yüzü profillerinin LES modeline göre az da olsa deneylerle daha uyumlu olduğu şekillerden de görülmektedir. Türbülans şiddetinin fazla olduğu katı sınıra yakın bölgelerde LES, DES'e göre deneylerden çok daha fazla uzaklaşmaktadır. Buna karşın türbülans şiddetinin azaldığı su yüzüne yakın olan bölgelerde ise nispeten daha başarılıdır (Şekil 5 ve 6). Şekil 9'da ise Durum 1 ve Durum 2 için sayısal modellemede daha başarılı olan DES ile elde edilen su yüzü profilinin üç boyutlu gösterimi sunulmuştur.

**Tablo 3.** Su yüzü profilleri için DES ve LES türbülans modelleri ile hesaplanan OKH (m<sup>2</sup>) ve OMGH (%) değerleri

(Calculated MSE (m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>) and MARE (%) values with DES and LES for the free surface profiles)

	Durum 1		Durum 2	
	DES	LES	DES	LES
OKH	8x10 <sup>-6</sup>	13x10 <sup>-6</sup>	4,11x10 <sup>-6</sup>	1,60x10 <sup>-5</sup>
OMGH	7.50	7.58	3,32	7,69

**Şekil 7.** Kanal boyunca farklı kesitlerde deneysel ve hesaplanan su yüzü profilleri (Durum 1) (Experimental and numerical free surface profiles along the channel in different sections Case 1)**Şekil 8.** Kanal boyunca farklı kesitlerde deneysel ve hesaplanan su yüzü profilleri (Durum 2) (Experimental and numerical free surface profiles along the channel in different sections Case 2)**Şekil 9.** DES modeli ile hesaplanan üç boyutlu sayısal su yüzü profili: a) Durum 1, b) Durum 2 (3-D free surface profile calculated with DES model: a) Case1 and b) Case 2)

### 3.2. Deneysel ve Sayısal Türbülans Şiddeti

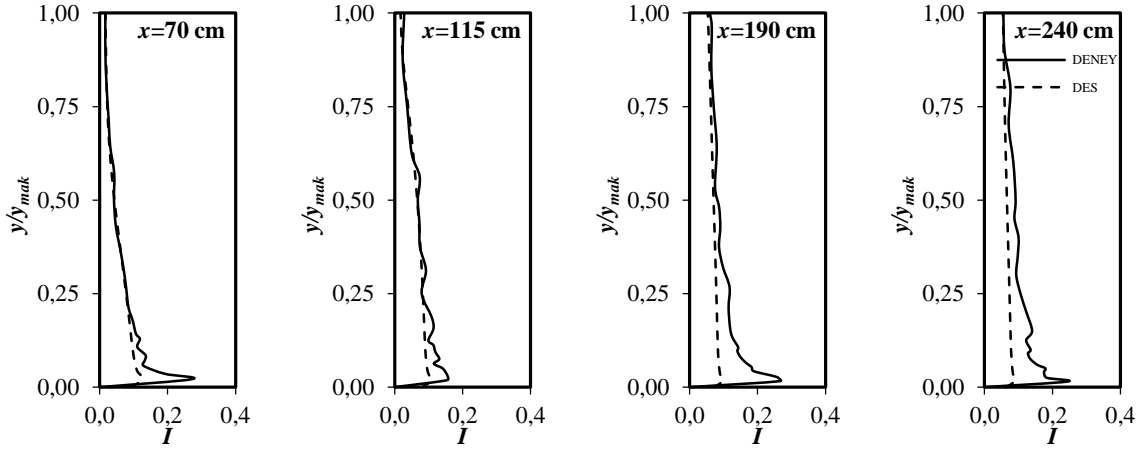
#### (Experimental and Numerical Turbulence Intensity)

Şekil 10 ve 11’de, Durum 1 ve Durum 2 için deneysel ve DES modelinden elde edilen kanal boyunca farklı kesitlerdeki türbülans şiddetlerinin derinlik boyunca değişimleri sunulmuştur. Kanal orta eksenindeki türbülans şiddeti,  $I$ , Denklem 21 kullanılarak hesaplanmıştır:

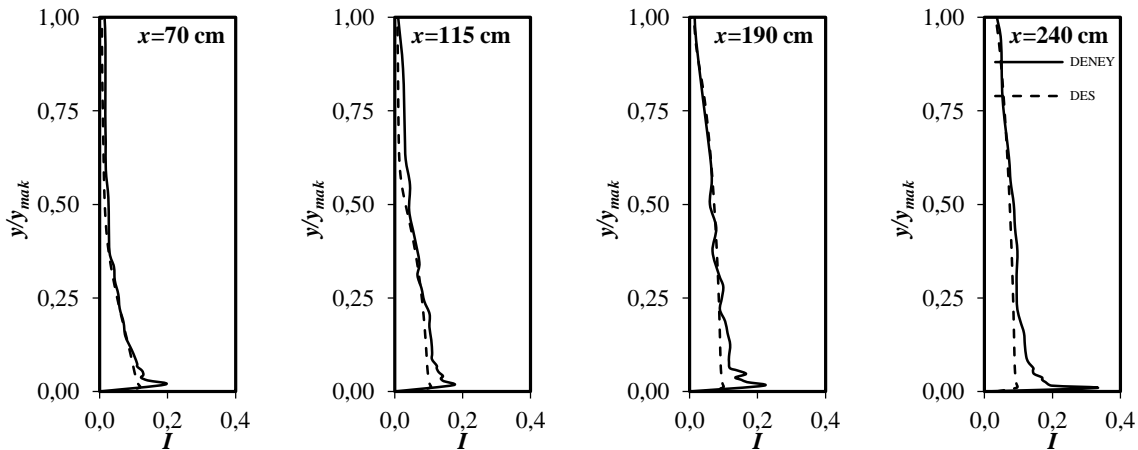
$$I = \frac{\sqrt{u'^2}}{\bar{u}} \quad (21)$$

Burada,  $u'$  ölçüm yapılan noktadaki hız sapıncını,  $\bar{u}$  ise aynı noktadaki ortalama hızı göstermektedir. Şekil 10 ve 11 incelendiğinde, her iki durumda da DES modeli

kullanılarak elde edilen sayısal türbülans şiddetinin ele alınan kesitlerde deneylerle makul ölçüde uyumlu olduğu, eşişe yaklaştıkça uyumun daha da iyileştiği söylenebilir.  $k-\varepsilon$  türbülans modellerinin katı sınıra yakın bölgede akımı modellemede başarısız olduğu, katı sınırdan uzaklaştıkça başarısının arttığı bilinen bir gerçektir. Dolayısıyla mansaba doğru ilerledikçe, türbülans şiddetinin artması ile birlikte RKE modeli daha başarısız olmuştur. Türbülans şiddeti katı sınıra yakın bölgelerde daha büyük değerlere sahip iken katı sınırdan uzaklaştıkça yani serbest yüzeye yaklaştıkça şiddeti azalmaktadır. Öte yandan, eşik yapısından kanal sonuna doğru gittikçe türbülans şiddetinin az da olsa arttığı, bu artışın hem katı sınıra yakın bölgelerde hem de serbest yüzeye yakın bölgelerde gerçekleştiği ifade edilebilir. Bu durum gelişmekte olan kritik üstü akım bölgesinde türbülans kinetik enerjisinin artmasından dolayı türbülans şiddetinin artması ile izah edilebilir.



Şekil 10. Kanal boyunca farklı kesitlerdeki deneysel ve sayısal türbülans şiddeti (Durum 1) (Experimental and numerical turbulence intensity along the channel in different sections Case 1)



Şekil 11. Kanal boyunca farklı kesitlerdeki deneysel ve sayısal türbülans şiddeti (Experimental and numerical turbulence intensity along the channel in different sections Case 2)

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, türbülanslı kritik üstü açık kanal akımın hareketini idare eden temel denklemler, sonlu hacimler yöntemine dayalı ANSYS-Fluent programı kullanılarak çözülmüştür. Üç boyutlu sayısal modellemelerde Realizable  $k-\varepsilon$  tabanlı DES modeli ve LES modeli kullanılmıştır. Serbest su yüzü profilinin hesabı akışkan hacimleri yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. 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  $k-\varepsilon$  tabanlı DES türbülans modelinin LES modeline göre hız profillerini daha başarılı bir şekilde tahmin ettiği görülmüştür. Kanal boyunca oluşan su yüzü profilinin belirlenmesinde ise DES ve LES türbülans modelleri oldukça başarılı sonuçlar vermiştir. Deneysel ve sayısal olarak elde edilen türbülans şiddetlerinin birbirleri ile uyumlu olduğu görülmüş, türbülans şiddetinin maksimum değerine katı sınıra yakın bölgede ulaştığı ve serbest yüzeye doğru ilerledikçe şiddetinin azaldığı tespit edilmiştir.

#### 5. KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Kırkgöz, M. S., Aköz, M. S., ve Öner, A. A., (2008) "Experimental and Theoretical Analyses of Two-Dimensional Flows Upstream of Broad-Crested Weirs", **Canadian Journal of Civil Engineering**, 35(9): p. 975-986.
- Akoz, M. S. ve Kırkgöz, M. S., (2009) "Numerical and experimental analyses of the flow around a horizontal wall-mounted circular cylinder", **Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering**, 33(2): p. 189-215.
- Gumus, V., ve ark., (2015) "Numerical Modeling of Submerged Hydraulic Jump from a Sluice Gate", **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, 142(1): p. 04015037.
- Yüce, M. I., Al-Babely, A. A., ve Al-Dabbagh, M. A., (2015) "Flow simulation over oblique cylindrical weirs", **Canadian Journal of Civil Engineering**, (ja).
- Xu, C.-y., Chen, L.-w., ve Lu, X.-y., (2007) "Large-eddy and detached-eddy simulations of the separated flow around a circular cylinder", **Journal of Hydrodynamics, Ser. B**, 19(5): p. 559-563.
- Constantinescu, G., Koken, M., ve Zeng, J., (2011) "The structure of turbulent flow in an open channel bend of strong curvature with deformed bed: Insight provided by detached eddy simulation", **Water Resources Research**, 47(5).
- Nasif, G., Barron, R., ve Balachandar, R., (2014) "DES evaluation of near-wake characteristics in a shallow flow", **Journal of Fluids and Structures**, 45: p. 153-163.
- Hassanzadeh, R., Sahin, B., ve Ozgoren, M., (2011) "Numerical investigation of flow structures around a sphere", **International Journal of Computational Fluid Dynamics**, 25(10): p. 535-545.
- Gholami, A., ve ark., (2014) "Experimental and numerical study on velocity fields and water surface profile in a strongly-curved 90 open channel bend", **Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics**, 8(3): p. 447-461.
- Aköz, M. S., Gümüş, V., ve Kırkgöz, M. S., (2014) "Numerical Simulation of Flow over a Semicylinder Weir", **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, 140(6).
- ANSYS, (2012) "**Fluent Theory Guide**, ANSYS Inc. ". Vol. 5, p.
- Jiang, X. ve Lai, C.-H., (2016) "**Numerical techniques for direct and large-eddy simulations**". CRC Press, p.
- Smagorinsky, J., (1963) "General circulation experiments with the primitive equations: I. the basic experiment\*", **Monthly weather review**, 91(3): p. 99-164.
- Hirt, C. W. ve Nichols, B. D., (1981) "Volume of Fluid (Vof) Method for the Dynamics of Free Boundaries", **Journal of Computational Physics**, 39(1): p. 201-225.
- ANSYS, (2012) "**Fluent Users Guide**, ANSYS Inc. ". USA, p. 1243-1389.
- Çelik, I. B., ve ark., (2008) "Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications", **Journal of Fluids Engineering-Transactions of the Asme**, 130(7).
- Roache, P. J., (1998) "Verification of Codes and Calculations", **Aiaa Journal**, 36(5): p. 696-702.
- Kırkgöz, M. S. ve Ardıçlıoğlu, M., (1997) "Velocity profiles of developing and developed open channel flow", **Journal of Hydraulic Engineering**, 123(12): p. 1099-1105.