

Eğrisel Geniş Başlıklı Savak Üzerinden Geçen Açık Kanal Akımının Deneysel Ve Teorik Analizi

Oğuz ŞİMŞEK^{*1}, M. Sami AKÖZ,¹ ve Veysel GÜMÜŞ¹

¹Çukurova Üniversitesi, Müh. Mim. Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana

Özet

Eğrisel geniş başlıklı savak üzerinden geçen akımın hız alanı, bir boyutlu Lazer Doppler Anemometresi (LDA) kullanılarak ölçülmüştür. Deney ile aynı akım koşullarında, temel denklemler Standart k-ε, RNG k-ε ve Realizable k-ε türbülans modelleri kullanılarak, sonlu hacimler yöntemine dayalı ANSYS-Fluent paket programı yardımıyla çözülmüştür. Su yüzü profilinin hesabı için Akışkan hacimleri yöntemi (Volume of Fluid-VOF) kullanılmıştır. Sayısal hesaplamalardan elde edilen akım hızları ve su yüzü profilleri, sayısal sonuçların doğrulanması bağlamında deneysel ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Sayısal ve deneysel bulguların karşılaştırması sonucunda RNG k-ε türbülans modelinin, hız alanı ve su yüzünün hesaplamasında, bu çalışmada kullanılan diğer türbülans modellerine göre daha başarılı olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Eğrisel geniş başlıklı savak, LDA, Sayısal model, VOF, Hız profili

Experimental and Theoretical Analysis of Open Channel Flow over a Curvilinear Broad-Crested Weir

Abstract

The velocity field of the overflow a curvilinear broad crested weir is measured using a one-dimensional Laser Doppler Anemometry (LDA). Using standard k-ε, RNG k-ε and Realizable k-ε turbulence closure models, the basic equations are solved by ANSYS-Fluent package program based on finite volume method for the same experimental conditions. The volume of fluid (VOF) method is used to compute the free surface of the flow. The numerical results for the velocity field and flow profiles are compared with the experimental results for validation purposes. The comparisons of the numerical and experimental results show that the numerical simulation using the RNG k-ε turbulence closure model predicts the velocity field and free surface profile more accurately compared to those of the other turbulence models used in the present study.

Key words: Curvilinear Broad-crested weir, LDA, Numerical model, VOF, Velocity profile

* Yazışmaların yapılacağı yazar: M.Sami Aköz, Çukurova Üniversitesi, Müh. Mim. Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Adana. msa@cu.edu.tr

1. GİRİŞ

Geniş başlıklı savaklar, açık kanal veya akarsularda suyu kontrol etmek, su seviyesini düzenlemek ve debi ölçmek amacıyla kullanılan su yapılarıdır. Akarsu yatağını yada kanal kesitini kapatacak şekilde tasarlanan geniş başlıklı savakların dikdörtgen, üçgen, trapez ve eğrisel kesite sahip tipleri mevcuttur.

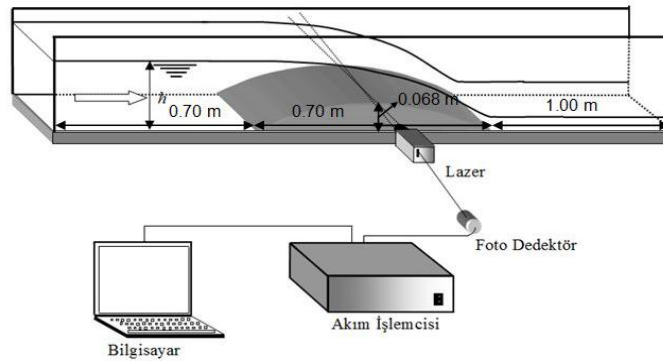
Savak yapısının akım ortamına yerleştirilmesi ile birlikte, akarsu yada kanaldaki su akımının akış karakteristiği de değişir. Kritik-altı rejimden kritik-üstü rejime geçişin yaşandığı, hızlı değişen akım koşullarının cereyan ettiği karmaşık akım yapısı ortaya çıkar. Akım ile etkileşim halinde olan bu tür yapıların tasarımını gerçekleştirebilmek için akım profilinin, hız ve basınç alanlarının doğru bir şekilde belirlenmesinin önemi büyüktür. Su-yapı etkileşiminin söz konusu olduğu bu tür açık kanal akımlarının analizleri, fiziksel model deneyleri ile gerçekleştirilebilmektedir. Bununla birlikte, ölçer etkilerinden kaynaklanan bazı kaçınılmaz hataların, fiziksel model çalışmalarından elde edilen sonuçlara yansıdığı da bilinen bir gerçektir. Diğer taraftan, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics - CFD) yöntemlerinde kaydedilen gelişmeler, bu tür akımların analizinde önemli kolaylıklar ve hızlı çözümlere olanak sağlamasının yanında, fiziksel model çalışmalarına göre, ekonomik yönden önemli ölçüde tasarruf sağlamaktadır.

Bu çalışmada, laboratuvar kanalına yerleştirilmiş, eğrisel geniş başlıklı bir savak ile etkileşim halindeki serbest yüzeyli akımın hız alanı, Lazer Doppler Anemometresi (LDA) ile ölçülmüştür. Sonlu hacimler yöntemine dayalı ANSYS-Fluent

paket programı yardımıyla akımı idare eden temel denklemler, üç farklı türbülans modeli kullanılarak çözülmüştür. Su yüzünün teorik olarak belirlenmesinde VOF yöntemi kullanılmıştır. Sayısal modellerden elde edilen akım hızları ve su yüzü profilleri, deneysel olarak ölçülen hız ve su yüzü profilleri ile karşılaştırılmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneyler, uzunluğu 2.4 m, genişliği 0.2 m ve derinliği 0.2 m, tabanı da camdan yapılmış, hidrolik bakımdan cilalı yatay bir laboratuvar kanalında yapılmıştır (Şekil 1). Deney modeli olarak, şekildeki gibi kanala yerleştirilmiş, uzunluğu 0.70 m ve yüksekliği 0.068 m olan eğrisel geniş başlıklı savak kullanılmıştır. Akımın debisi $Q=0.00546 \text{ m}^3/\text{s}$ ve memba su derinliği $h_0=0.126 \text{ m}$ olarak ölçülmüştür. Memba akımında Froude sayısı $Fr_0 (=V_0/(gh_0)^{1/2})=0.1987$ ve Reynolds sayısı $Re_0 (=4V_0R_0/\nu)=18000$ 'dir (V_0 kesit ortalama hızı, R_0 hidrolik yarıçap ve ν kinematik viskozitedir). Akım hızlarının belirlenmesinde Dantec® LDA62N04 hız ölçme sistemi kullanılmıştır. Kullanılan LDA sisteminin deney koşullarındaki şematik düzeni, Şekil 1'de görülmektedir. Bu sistem, ölçüm bölgesine gönderilen iki lazer ışınının kesiştiği noktadan geçen parçacıklar yardımıyla, o noktadaki lazer ışınları düzlemindeki anlık hız bileşeninin belirli zaman aralıklarında ölçülmesini sağlamaktadır. Zaman serisi olarak kaydedilen hız değerlerinden, söz konusu noktaya ait zamansal ortalama akım hızı, türbülans hız sapıncıları, türbülans şiddeti gibi çeşitli türbülans karakteristiklerinin belirlenmesi mümkün olmaktadır.



Şekil 1. Deney düzeneği ve LDA hız ölçüm sistemi

3. TEMEL DENKLEMLER VE SAYISAL ÇÖZÜM

3.1. Temel Denklemler

İncelenen geniş başlıklı savak ile etkileşim halindeki akım düzenli, iki-boyutlu, sıkışmayan, türbülanslı serbest yüzeyli bir akımdır. Akımı idare eden temel denklemler, kütle korunumu ve momentumun korunumu (Reynolds-ortalama Navier-Stokes denklemleri), aşağıdaki gibidir:

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

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

(1) ve (2) denklemlerinde u_i , x_i doğrultusundaki hız bileşeni g_i yer çekimi ivmesi, p basınç, μ dinamik viskozite, ρ akışkan yoğunluğu ve τ_{ij} türbülans (Reynolds) gerilmeleridir.

3-boyutlu akım alanında yukarıdaki 4 denklem 10 adet bilinmeyen içermektedir (üç hız bileşeni \bar{u}_i , basınç \bar{p} ve altı bağımsız Reynolds gerilmesi, $-\rho \overline{u'_i u'_j}$). Böylece bilinmeyenler açısından denklem sisteminin kapatılabilmesi için türbülans gerilmelerinin tanımlanmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sorun, yukarıdaki zamansal-ortalama denklemlerin sayısal hesaplama sürecinde, denklemlerde yer alan türbülans gerilmelerinin türbülans kapatma modelleri kullanılarak çözülmesini gerektirmektedir. Türbülans viskozitesinin doğrusal tanımlanmasını esas alan Boussinesq yaklaşımına göre (2) denklemindeki türbülans kayma gerilmesi bünye denklemi ile, sıkışmayan akımlar için, aşağıdaki gibi verilmiştir:

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

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial(\rho k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

SKE model sabitleri, $C_\mu=0.09$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\epsilon=1.3$, $C_{1\epsilon}=1.44$, $C_{2\epsilon}=1.92$ değerlerini almaktadır [Launder ve Spalding, 1972].

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 deltadır.

3.2. Türbülans Modelleri

Akışkan hareketinin CFD yöntemleri ile modellenmesinde, (3) denklemindeki μ_t türbülans viskozitesinin ifade edilmesinde birçok türbülans modeli geliştirilmiştir [Wilcox, 2000]. Bu çalışmada, *Standart k-ε* (SKE) [Launder ve Spalding, 1972], *RNG k-ε* (RNG) [Yakhot ve Orszag, 1986; Yakhot ve ark., 1992], *Realizable k-ε* (RKE) [Shih ve ark., 1995] türbülans modelleri kullanılmıştır. Bunlar doğrusal türbülans viskozitesi formülasyonuna dayanan iki-denklemlilik türbülans modelleridir. İki adet transport diferansiyel denkleminde biri türbülans kinetik enerjisi, *k-denklemlilik*; diğeri *k-ε* modellerinde enerji kayıp oranı, *ε-denklemlilik*' dir. RNG ve RKE türbülans modelleri, bazı karmaşık akımların hesaplanmasında gözlenen yetersizliklerin iyileştirilmesi için SKE modelinin yeniden düzenlenmesiyle elde edilmişlerdir. Kullanılan türbülans modelleri aşağıda kısaca özetlenmiştir.

SKE modeli

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

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4)$$

C_μ boyutsuz model sabitidir. (4) denklemindeki k ve ϵ değerlerinin bulunması için iki adet kısmi diferansiyel transport denkleminin çözülmesi gerekmektedir:

RNG modeli

Bu modelde *k-denklemlilik* SKE ile aynı olup *ε-denklemlilik* ilave kaynak terimi içermektedir:

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon}^* \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

Model sabitleri aşağıdaki gibi verilmiştir [Yakhot ve ark., 1992]:

$$C_\mu = 0.0845, \quad \sigma_k = \sigma_\varepsilon = 0.7194,$$

$$C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3}, \quad C_{2\varepsilon} = 1.68, \quad C_{1\varepsilon} = 1.42,$$

$$\eta = (2S_{ij}S_{ij})^{1/2} \frac{k}{\varepsilon}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2}(\bar{u}_{i,j} + \bar{u}_{j,i}),$$

$$\eta_0 = 4.377, \quad \beta = 0.012 \quad (\text{Deneysel})$$

S_{ij} şekil değiştirme hızı tansörüdür. Görüldüğü gibi (7) denklemi akışkan şekil değiştirmesine bağlı η parametresini içermektedir. Bu ilave parametre sayesinde RNG modelinin ivmelenen, şiddetli eğriselliğe maruz, sınır tabakasının ayrıldığı, ikincil akımlar ve durma noktasının mevcut olduğu akımlarda SKE modeline göre daha gerçekçi sonuçlar verdiği iddia edilmiştir.

RKE modeli

Akım alanındaki yüksek şekil değiştirme hızlarının ve sınır tabakası ayrılmasının mevcut olduğu karmaşık akım durumlarında SKE türbülans modeli üzerinde, performans artırıcı olarak RKE modeli adı altında şu iyileştirmeler yapılmıştır: (a)

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v\varepsilon}} \quad (9)$$

Model sabitleri aşağıdaki gibi önerilmiştir:

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

$$S = \sqrt{S_{ij}S_{ij}}, \quad C_2 = 1.9, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.2$$

RKE modeli de RNG modeli gibi, ivmelenen, eğrisel, sınır tabakasının ayrıldığı, ikincil akımların var olduğu akımlarda SKE modeline göre daha başarılı olduğu ifade edilmiştir.

3.3. Serbest Yüzeyin Hesaplanmasında Akışkan Hacimleri (VOF) Yöntemi

Açık kanal akımlarının sayısal hesaplama ağında, sıvı ile havanın ara kesitinde bulunan, ağ elemanları hacimlerinde akışkan doluluk oranını esas alan ve Akışkan Hacimleri (*Volume of Fluid-*

türbülans viskozitesi, μ_t , ifadesinde, sabit 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 ark. (1995) C_μ^* için aşağıdaki formülü vermişlerdir:

$$C_\mu^* = \frac{1}{A_o + A_s \frac{U^* k}{\varepsilon}} \quad (8)$$

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

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

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

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

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

ε -denklemi aşağıdaki gibi ifade edilmiştir:

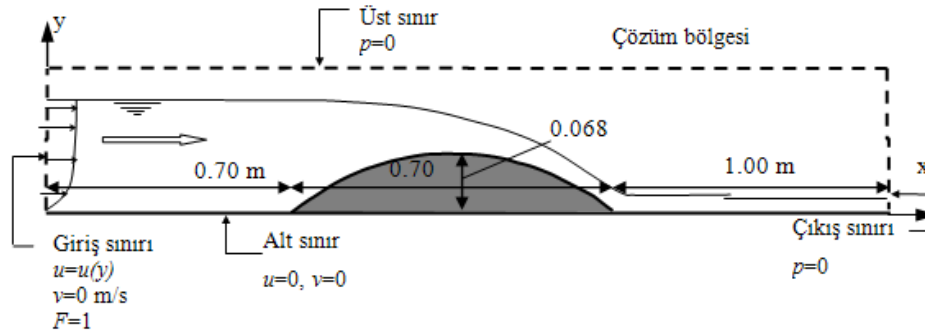
VOF) adıyla anılan yöntem, açık kanal akımlarında serbest yüzey şeklinin belirlenmesinde güçlü ve başarılı bir teknik olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem, verilmiş bir sayısal hesap ağına belirli zaman aralıklarında giren sıvının eleman hacimlerini doldurma oranlarının belirlenmesini ve buna bağlı olarak akımda serbest yüzey profilinin seçilmiş zaman aralıklarında hesaplanmasını gerçekleştiren bir süreçte dayanmaktadır [Hirt ve Nichols, 1981]. Doluluk oranını temsilen $F=1$ için ağ elemanı sıvı ile tam dolu, $F=0$ için boş (hava ile dolu), ve $0 < F < 1$ için sıvı ile kısmen dolu olmakta, böylece her bir zaman adımında hesap ağı içerisindeki akım yüzeyinin konumu tespit edilebilmektedir. Herhangi bir anda temel denklemlerin sayısal çözümünden bulunan akım hızları, profilin bir

sonraki zaman adımındaki yerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Serbest akım yüzeyinin belirlenmesinde, CLEAR-VOF (*Computational Lagrangian-Eulerian Advection Remap*) algoritması olarak bilinen bu yöntemin ayrıntıları Ashgriz ve ark. (2004) tarafından verilmiştir.

3.4. Çözüm Bölgesi, Sınır ve Başlangıç Şartları

Eğrisel savak akımının sayısal modeli için kullanılan çözüm bölgesinin geometrisi ve

boyutları Şekil 2’de görülmektedir. Koordinat sisteminin orijini, çözüm bölgesinin sol alt köşesi olarak alınmıştır. Çözüm bölgesinin üst sınırı memba su seviyesinin biraz üstünde, alt sınırı ise kanal tabanı ve savak yüzeyinden geçmektedir. Alt sınırdaki sıfır-hız duvar sınır şartı, yani $u=v=0$ kabulü yapılmıştır. Çözüm bölgesinin giriş sınırında, yatay hız bileşeni olarak girişteki deneysel hız profili ve düşey hız bileşeni $v=0$ alınmıştır. Kanal sonundaki serbest dökülme kesiti olan çıkış sınırında ve çözüm bölgesinin üst sınırında basınç şartı $p=0$ değeri kullanılmıştır.



Şekil 2. Sayısal hesaplama bölgesi ve sınır şartları

Zamana bağlı çözüm sürecinde, başlangıç şartı olarak çözüm bölgesinin giriş sınırında doluluk oranı $F=1$ alınırken, sayısal modellemeye kullanılan tüm türbülans modelleri için zaman adımı $\Delta t=0.0001$ s olarak seçilmiştir.

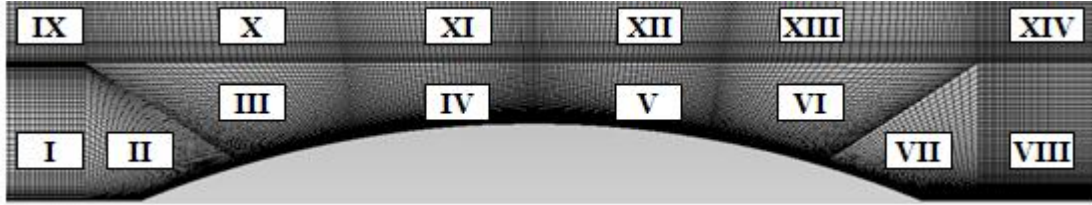
(1) ve (2) temel denklemlerinin, Şekil 2’de görülen sınır şartlarına göre \bar{u} , \bar{v} ve \bar{p} için sayısal çözümü, sonlu hacimler yöntemine dayalı ANSYS-Fluent® v.12.1 paket programı kullanılarak yapılmıştır.

4. DENEYSEL VE HESAPLANAN BULGULAR

4.1. Sonlu Hacimler Hesaplama Ağı

Akışkan akımlarının bir yapı ile etkileşiminin söz konusu olduğu akım alanlarının sayısal hesaplamalarında, hesaplama ağı tasarımının 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 ağ geometrisinin sıklaştırılmasına çalışılmıştır. Akımın karakteri göz önüne alınarak, Şekil 2’de verilen sayısal çözüm bölgesi, Şekil 3’de görüldüğü gibi, 14 alt bölgeye ayrılmış, her bir alt bölgede eleman sayısı yaklaşık olarak %50 ve %75 artırımla suretiyle, lineer dörtgen elemanlardan oluşan 3 farklı yoğunluğa sahip ağ yapısı elde edilmiştir. Tablo 1, sayısal hesaplamalarda kullanılan üç farklı ağ yapısı için eleman sayılarını göstermektedir. 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, GCI (*Grid convergence index-Ağ yakınsama indeksi*) yöntemiyle test edilmiştir [Roache, 1998]. Sonuçta, Ağ 3 sistemiyle akım hızlarındaki hataların kabul edilebilir değerlere yakınsadığı görülmüş ve hesaplama hassasiyetinin ağ yoğunluğundan bağımsızlaştığı kanaatine varılmıştır.



Şekil 3. Sayısal modelin hesaplama ağında kullanılan alt bölgeler

Tablo 1. Üç farklı yoğunluktaki ağ yapısı için eleman sayıları

Bölge	Ağ-1	Ağ-2	Ağ-3	Bölge	Ağ-1	Ağ-2	Ağ-3
I	40x50	60x75	80x100	VIII	50x100	75x150	100x200
II	40x40	60x60	80x80	IX	10x50	15x75	20x100
III, IV	25x40	40x60	50x80	X, XI	10x25	15x40	20x50
V, VI	25x40	40x60	50x80	XII, XIII	10x25	15x40	20x50
VII	40x40	60x60	80x80	XIV	10x100	15x150	20x200

4.2. Deneysel ve Hesaplanan Hız Profilleri

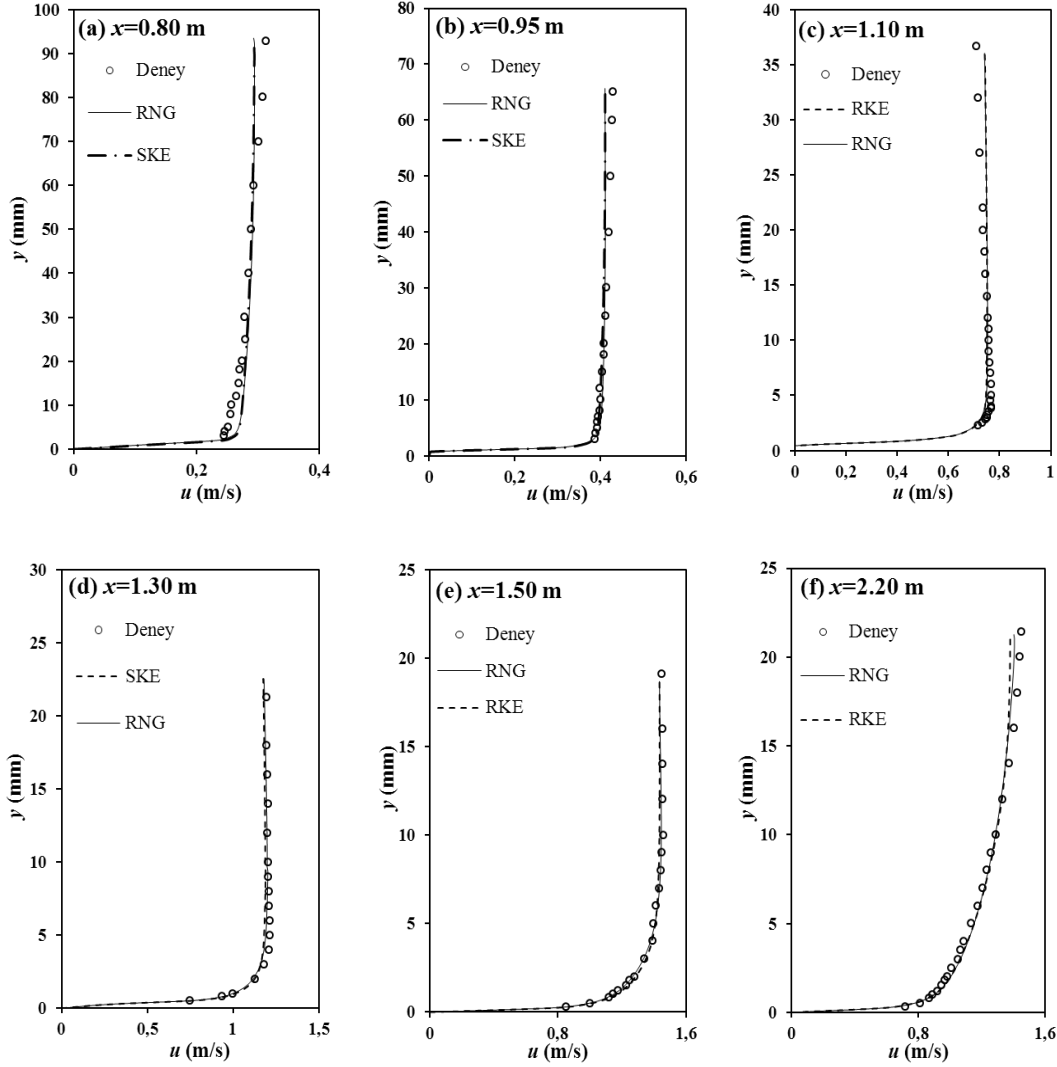
Yukarıda sıralanan türbülans kapatma modellerinin doğrulanması bağlamında, deneysel ve sayısal hesap bulgularının farklı modeller için niceliksel olarak karşılaştırılmasında aşağıda ifade edilen *ortalama karesel hata* (OKH) değeri ölçüt olarak kullanılmıştır:

$$OKH = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\bar{u}_d - \bar{u}_h)^2 \quad (10)$$

Burada, \bar{u}_d ve \bar{u}_h sırasıyla deneysel ve hesaplanan hız değerleri, N kesit derinliğindeki noktasal ölçüm sayısıdır. Tablo 2, kanalın farklı kesitlerinde, bu çalışmada kullanılan türbülans modelleri için hesaplanan OKH değerlerini göstermektedir. Tabloda görülen parantez içindeki rakamlar, OKH değerleri baz alınarak, ilgili türbülans modeli bulgularının, deneysel bulgulara olan yakınlığı ile ilgili sıralamayı göstermektedir.

Tablo 2. Bu çalışmada kullanılan türbülans modelleri için OKH değerleri

Kesit yerleri, x (m)	SKE	RNG	RKE	
Savak	0.80	0.00015 ⁽²⁾	0.00014 ⁽¹⁾	0.00024 ⁽⁴⁾
Membada	0.95	0.00007 ⁽²⁾	0.00006 ⁽¹⁾	0.00009 ⁽⁴⁾
Savak Masabında	1.10	0.00039 ⁽³⁾	0.00028 ⁽²⁾	0.00026 ⁽¹⁾
	1.30	0.00370 ⁽¹⁾	0.00375 ⁽³⁾	0.00373 ⁽²⁾
Mansapda	1.50	0.00092 ⁽³⁾	0.00029 ⁽¹⁾	0.00091 ⁽²⁾
	2.20	0.00450 ⁽⁵⁾	0.00110 ⁽¹⁾	0.00140 ⁽²⁾
Ort. OKH	—	0.00162 ⁽³⁾	0.00094 ⁽¹⁾	0.00111 ⁽²⁾



Şekil 4. Kanalın farklı kesitlerinde deneysel ve hesaplanan hız profilleri

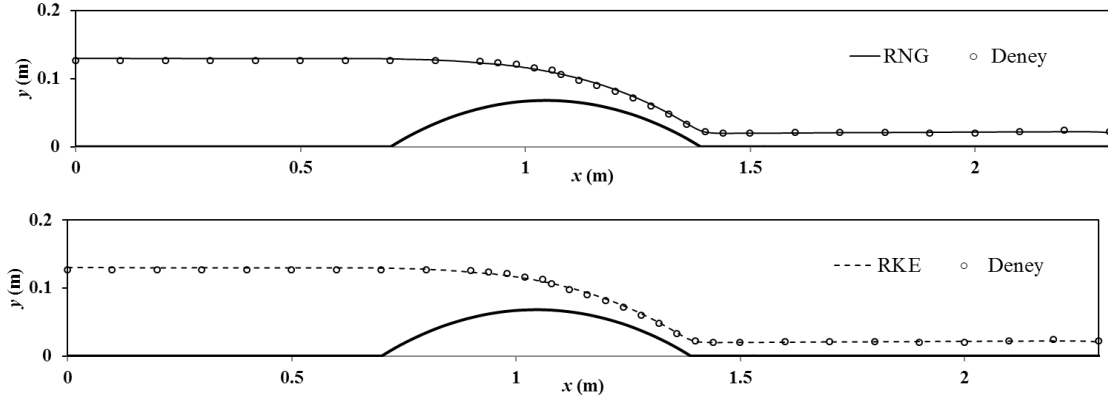
4.3. Deneysel ve Hesaplanan Su Yüzü Profilleri

Bu çalışmadaki sayısal hesaplamalarda, su yüzü profilinin hesabında *akışkan hacimleri* (VOF) yöntemi kullanılmıştır. Şekil 5'de en iyi üç modelden (RNG, RKE, SKE) bulunan akım profillerinin deney ile karşılaştırılması verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, akım hızlarına benzer şekilde, RNG ve RKE türbülans modellerinden hesaplanan su yüzü profilleri, ölçülen su yüzü profili ile oldukça uyumludur. Türbülans modelleri

ile hesaplanan su yüzü profilleri için hesaplanan OKH değerleri Tablo 3 de verilmiştir.

Tablo 3. Farklı türbülans modelleriyle hesaplanan su yüzü profili için OKH değerleri

Türbülans modeli	SKE	RNG	RKE
OKH	5.10×10^{-6}	4.88×10^{-6}	4.98×10^{-6}

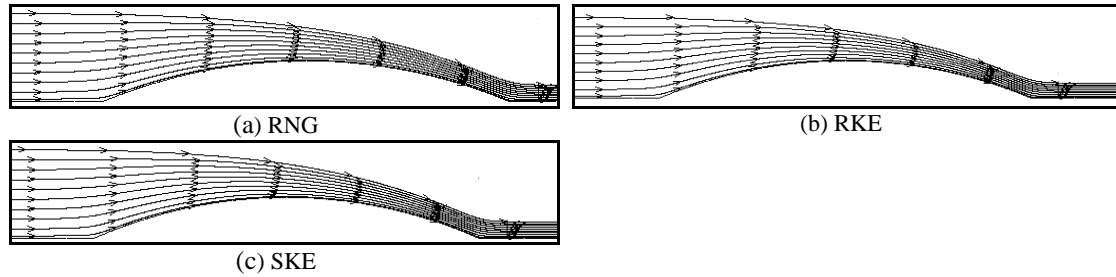


Şekil 5. Deneysel ve hesaplanan su yüzü profilleri

4.4. Hesaplanan Akım çizgileri

Şekil 6'da, eğrisel geniş başlıklı savak akımının farklı türbülans modelleriyle yapılan sayısal hesaplamalarından elde edilen akım çizgileri görülmektedir. Bu çalışmada kullanılan türbülans modellerinden elde edilen akım çizgileri şekil itibariyle birbirlerine benzemektedirler. Savak yapısının hemen ön ve arkasında sınır tabakası ayrılması tüm modeller tarafından yakalanmakla

birlikte, çok küçük boyutlarda olduğu için şekillerde görülememektedir. Akım çizgileri, hızının düşük olduğu kritik-altı bölgede seyrek iken, rölatif olarak hızın daha büyük olduğu kritik-üstü bölgede daha sık bir görünüme bürünmüştür. Akım çizgileri topolojisinden, savak yapısının hemen önü itibari ile iki boyutlu bir akımın söz konusu olduğu ve bunun savak yapısı bitimine kadar devam ettiği de görülebilmektedir.



Şekil 6. Farklı türbülans modelleri ile hesaplanan akım çizgileri

5. SONUÇLAR

Eğrisel geniş başlıklı savak akımını idare eden temel denklemlerin, sonlu hacimler yöntemine dayalı ANSYS-Fluent paket programı yardımıyla sayısal çözümleri yapılmıştır. Serbest su yüzünün profili *akışkan hacimleri* (VOF) yöntemi ile hesaplanmıştır. SKE, RNG ve RKE türbülans modelleri kullanılarak hesaplanan akım hızları ve su yüzü profilleri, fiziksel model üzerinde Lazer Doppler Anemometresi ile ölçülen deneysel bulgularla karşılaştırılmıştır. Sayısal modellemede,

katı sınır sürtünmelerinden etkilenen yerlerde ve yüzey profilinde hızlı değişimin görüldüğü bölgelerde ağ yapısında uygulanan sıklaştırmaların, sayısal hesap bulgularını olumlu yönde etkilediği görülmüştür. Bu çalışmadaki akım hızları ve su yüzü profillerinin deneysel ve sayısal hesaplama bulgularının karşılaştırılmasından, RNG ve RKE türbülans modellerinin diğer modellere göre genelde daha başarılı olduğu sonucuna varılmıştır.

6. TEŞEKKÜR

Bu çalışma MMF2010YL41 nolu proje ile Çukurova Üniversitesi, Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir, teşekkür ederiz.

7. KAYNAKLAR

1. Ashgriz, N., Barbat, T., Wang, G., (2004). "A computational Lagrangian-Eulerian advection remap for free surface flows", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 44, 1-32.
2. Hirt, C.W., Nichols, B.D., (1981). "Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries", *Journal of Computational Physics*, 39, 201-225.
3. Launder B. E. ve Spalding D. B., (1972). "Lectures in Mathematical Models of Turbulence", *Academic Press*, London.
4. Roache, P.J., (1998). "Verification of codes and calculations", *AIAA Journal*, 36(5), 696-702.
5. Sarker, M.A., Rhodes, D.G., (2004). "Calculation of free-surface profile over a rectangular broad-crested weir", *Flow Measurement and Instrumentation*, 15, 215-219.
6. Shih, T.-W., Liou, W.W., Shabbir, A., Yang, Z., Zhu, J., (1995). "A new k- ϵ eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows - model development and validation", *Computers and Fluids*, 24(3), 227-238.
7. Wilcox, D.C., (2000). "Turbulence Modeling For CFD", *DCW Industries, Inc.*, California.
8. Yakhot, V., Orszag, S. A., (1986). "Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic Theory", *Journal of Scientific Computing*, 1(1), 3-51.
9. Yakhot, V., Orszag, S.A., Thangam, S., Gatski, T.B., Speziale, C.G., (1992). "Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique", *Physics of Fluids*, 4(7), 1510-1520.