

Dolusavak Akımının Farklı Türbülans Kapatma Modelleri ile Sayısal Hesabı

Veysel GÜMÜŞ^{1*}, M. Salih KIRKGÖZ¹

¹Ç.Ü., Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana

Özet

Laboratuvardaki bir dolusavak modelindeki akımda hızlar ve su yüzü profili ölçülmüştür. Deneyle aynı özelliklerdeki akımı idare eden temel denklemler Sonlu Hacimler yöntemi ile sayısal olarak çözülmüştür. Sayısal modellemede, Standard k-ε, Renormalization-group k-ε ve Realizable k-ε türbülans kapatma modelleri kullanılmıştır. Sayısal model bulgularının doğrulanmasına yönelik olarak deneysel bulgularla yapılan karşılaştırmalar, Renormalization-group k-ε ve Realizable k-ε türbülans modellerinden elde edilen sayısal bulguların birbirlerine çok yakın, ve her iki modelin de hız alanı ve su yüzü profilinin hesaplanmasında Standard k-ε modeline göre daha başarılı olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Dolusavak, hız profili, VOF, Türbülans kapatma modelleri, Sayısal hesaplama

Numerical Analysis of Spillway Flow Using Different Turbulence Closure Models

Abstract

Velocity field and free surface profile of flow over a spillway is measured in a laboratory channel. The governing equations are numerically solved using Finite Volume method for the flow having the same conditions with experiment. In the numerical simulation of the flow, Standard k-ε, Renormalization-group k-ε and Realizable k-ε turbulence closure models are employed. Experimental validations of the computations show that the numerical results from the Renormalization-group k-ε and Realizable k-ε turbulence model are very close to each other, and they are both more successful compared to the Standard k-ε turbulence model, in predicting the velocity field and free surface of the flow.

Keywords: Spillway, Velocity field, VOF, Turbulence closure models, Numerical analysis

* Yazışmaların yapılacağı yazar: Veysel GÜMÜŞ, Ç.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana. vgumus@cu.edu.tr

1. GİRİŞ

Barajlar, su kaynaklarının geliştirilmesi kapsamında inşa edilen ve ülke kalkınmasına büyük katkılar sağlayan önemli mühendislik yapılarıdır. Dolusavaklar, baraj haznesine gelen taşkın sularını güvenli bir şekilde baraj mansabına aktarmaya yarayan baraj elemanlarıdır. Yeterli kapasiteye sahip bir dolusavak sistemi ve sonunda daha hızlı, ekonomik ve güvenli hesaplama yöntemlerine ihtiyaç duyulduğu söylenebilir.

Günümüzde, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics-CFD) bağlamında geliştirilen sayısal çözüm tekniklerinin kullanımıyla, yapılar ile etkileşimleri sırasında ortaya çıkan karmaşık akımların daha hızlı ve güvenilir bir şekilde analizi mümkün olup, bu sayede tasarım amaçlı alternatif çözümlerin hızlı ve ekonomik şekilde gerçekleştirilip yorumlanmasında önemli avantajlar sağlanmış bulunmaktadır [1-6]. Bu bakımdan sayısal model deneyleri, inşaat mühendisliği uygulamalarına konu olan su yapılarının tasarımına da önemli kolaylıklar getirmiş olup bu yöntemler giderek daha yaygın şekilde kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, bir laboratuvar dolusavak modelinden elde edilen deneysel bulgular, aynı geometriye sahip modelin sayısal yöntemlerle hesaplanmasından edinilen bulguların doğrulanmasında kullanılmıştır. Dolusavak modeli ile etkileşim halindeki akımı idare eden temel denklemler, sonlu hacimler yöntemine dayalı ANSYS-Fluent paket programı ile sayısal olarak çözülmüştür. Üç farklı türbülans modeli, Standart $k-\varepsilon$ (SKE), Renormalization-group $k-\varepsilon$ (RNG) ve Realizable $k-\varepsilon$ (RKE) modelleri kullanılarak yer alan enerji kırıcı yapının hidrolik tasarımı, deneysel verilere dayalı geleneksel yöntemlerle başarılı bir şekilde yapılmaktadır. Tasarım amaçlı çalışmalar, gerektiğinde, fiziksel model deneyleriyle de desteklenmektedir. Ancak, bu tür çalışmalar zaman alıcı olduğu gibi proje maliyetini de olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Dolayısıyla, dolusavak tasarımında performans belirleyici nitelikte akımda hız alanının sayısal çözümü yapılmıştır. Su yüzü profilinin

hesaplanmasında VOF yöntemi kullanılmıştır. Sayısal hesaplamalardan elde edilen su yüzü profili ve çeşitli kesitlerdeki akım hız profilleri, deneysel ölçümlerle karşılaştırılmış ve kullanılan türbülans modellerinin hesaplamadaki başarısı tartışılmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Deneyler

Deneyler, Güzel [7] tarafından, İnşaat Mühendisliği Hidrolik Laboratuvarında bulunan ve boyutları Şekil 1'de görülen yuvarlak başlıklı bir dolusavak modelinde yapılmıştır. Akım hızları lazer anemometresi ile ölçülmüştür. Şekilde görüldüğü gibi, savağın memba yüzünün eğim açısı $\alpha=32^\circ$, tabanı hidrolik cilalı kabul edilen cam duvarlı kanalın uzunluğu 1.8 m, genişliği 0.2 m ve yüksekliği 0.2 m'dir. Deneyde kullanılan akımın debisi $Q=0.0106 \text{ m}^3/\text{s}$ olarak ölçülmüştür. Sayısal hesaplama bölgesinde kullanılan x,y yatay ve düşey eksen takımının yanı sıra, şüt kanalındaki bulgular, şekil üzerinde gösterilen kanal doğrultusu ve normalini esas alan s,n eksen takımına göre değerlendirilmiştir.

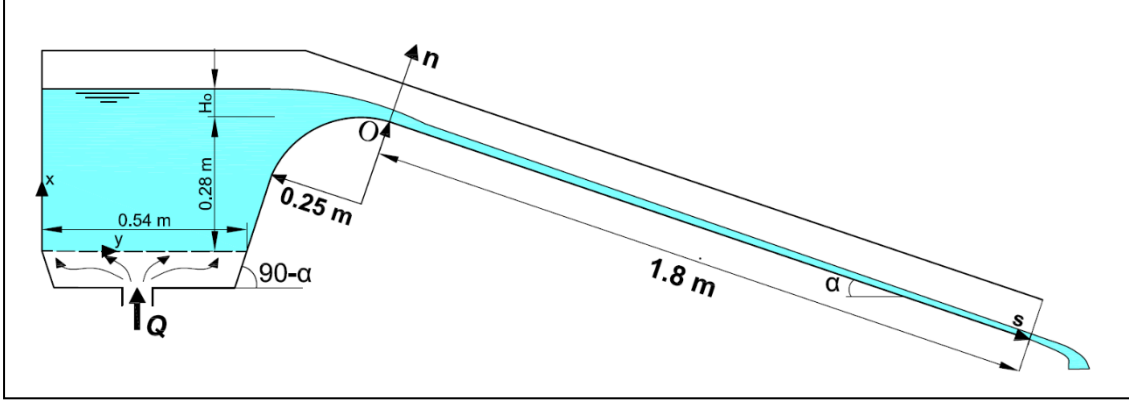
2.2. Temel Denklemler

İncelenen dolusavak akımı düzenli, iki-boyutlu, sıkışmayan, türbülanslı bir serbest yüzeyli akımdır. Akımı idare eden temel denklemler, kütlelin korunumu 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_i yer çekimi ivmesi, p basınç, μ dinamik viskozite, ρ akışkan yoğunluğu ve τ_{ij} türbülans (Reynolds) gerilmeleridir. Bu çalışmaya konu olan



Şekil 1. Deney düzeneği

2-boyutlu akımı idare eden yukarıdaki 3 adet denklem 6 adet bilinmeyen içermektedir (iki hız bileşeni \bar{u}_i , basınç \bar{p} ve üç bağımsız Reynolds gerilmesi $-\rho \overline{u'_i u'_j}$). Böylece, denklem sisteminin çözülebilmesi 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) denklemdeki türbülans kayma gerilmeleri bünye denklemi ile, sıkışmayan akımlar için, aşağıdaki gibi verilmiştir:

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

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

2.3. Türbülans Modelleri

Denklem (3)'de görülen μ_t türbülans viskozitesinin

hesaplanmasında bir çok türbülans modeli geliştirilmiştir. Bu çalışmada, μ_t 'nin hesabında, k - ε tabanlı üç türbülans kapatma modeli kullanılmıştır:

- Standart k - ε (SKE) [8],
- Renormalization Group k - ε (RNG) [9],
- Realizable k - ε (RKE) [10]

Bu modeller aşağıda kısaca açıklanmıştır.

SKE Türbülans Modeli

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

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

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

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

C_μ boyutsuz model sabitidir. (4) denklemdeki k ve ε değerlerinin bulunması için iki adet kısmı

diferansiyel transport denkleminin çözülmesi gerekmektedir, bunlar: SKE model sabitleri, $C_\mu=0.09$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\varepsilon=1.3$, $C_{1\varepsilon}=1.44$, $C_{2\varepsilon}=1.92$ değerlerini almaktadır [8].

RNG Türbülans Modeli

Bu modelde k -denklemi SKE ile aynı olup ε -denklemi aşağıdaki gibi ilave kaynak terimi içermektedir:

Model sabitleri aşağıdaki gibi verilmiştir:

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

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

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

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

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 eğriliğe maruz, sınır tabakasının ayrıldığı, ikincil akımlar ve durma noktasının mevcut olduğu akımlarda SKE modeline göre daha gerçekçi sonuçlar verdiği iddia edilmiştir [9].

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

RKE Türbülans 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) 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 diğ., [10] C_μ^* için aşağıdaki formülü vermişlerdir:

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

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

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

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

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

$\bar{\Omega}_{ij}$, ω_k^* açısal hızı ile dönen eksen takımına göre ölçülen ortalama rotasyon hızı tansörüdür. ε -denklemi aşağıdaki gibi ifade edilmiştir:

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_{1\varepsilon} \varepsilon - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu\varepsilon}} \quad (9)$$

2.4. Akışkan Hacimleri Yöntemi (VOF)

Bu çalışmada su-hava ara kesitinin hesabında akışkan hacimleri (Volume of Fluid-VOF) yöntemi kullanılmıştır [11]. VOF yöntemi, hesaplama ağındaki eleman hacimlerinin boş, kısmen dolu ya da tamamen su ile dolu olduğunu belirlemede kullanılmaktadır. Hacimsel doluluk oranını temsilen, $F=1$ için ağ elemanı tam dolu, $F=0$ için boş (hava ile dolu) ve $0 > F > 1$ için su ile 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 hesaplanır.

2.5. Sınır Şartları

Şekil 2, dolusavak üzerinden geçen açık kanal akımının sayısal modeli için kullanılan çözüm bölgesi ve sınır şartlarını göstermektedir. x, y koordinat sisteminin orijini, çözüm bölgesinin sol alt köşesi olarak alınarak, şekilde verilen çözüm bölgesi beş bölgeye ayrılmış ve çözüm bölgesinin üst sınırı ve çıkış bölgesi sınır şartı $p=0$, kanal tabanında ve savak alt tabanında sıfır hız sınır şartı, yani $u=0, v=0$ olarak tanımlanmıştır. Giriş sınır şartı olarak düşey hız bileşeni $v=0.0987 \text{ m/s}$ olarak tanımlanırken yatay hız bileşeni $u=0$ olarak alınmıştır. Zamana bağlı çözüm sürecinde, başlangıç şartı olarak, $t=0$ anında boş olan çözüm bölgesinin giriş sınırında VOF yöntemi için $F=1$ alınmıştır.

2.6. Sayısal Çözüm

Akımı idare eden (1) ve (2) denklemlerinin, Şekil 3'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. Hız-basınç eşleştirmesi için SIMPLE (*Semi-implicit method for pressure-linked equations*) algoritması [13] kullanılmıştır. Bu algoritma hız, basınç ve diğer değişkenler için ilk tahmin değerleri ile momentum denklemlerinin çözümünü yapmaktadır. Bulunan değerler ile hız ve basınç düzeltmesi yaparak türbülans modellerindeki transport denklemlerini çözmekte ve sayısal bulgularda yakınsama gerçekleşinceye kadar iterasyona devam etmektedir. Hesaplamalarda tüm değişkenler (u, v, k, ε) için yakınsama kriteri olarak artık hatanın (residual error) 10^{-5} in altına düşmesi şartı aranmıştır. Momentum ve türbülans kinetik enerjisi ifadelerinin ayrıştırılması için *ikinci mertebe upwind* yöntemi kullanılırken, basınç teriminin ayrıştırılmasında PRESTO (*Pressure staggered option*) metodu [14] kullanılmıştır. Ayrıca, zamana bağlı ayrıştırmanın gerçekleştirilmesinde, birinci mertebe sonlu farklar kapalı çözüm formülasyonu kullanılmış ve $\Delta t=0.001 \text{ s}$ olarak seçilen her bir zaman adımındaki maksimum iterasyon sayısı 10 alınmıştır. Kanal tabanında katı sınıra yakın akım

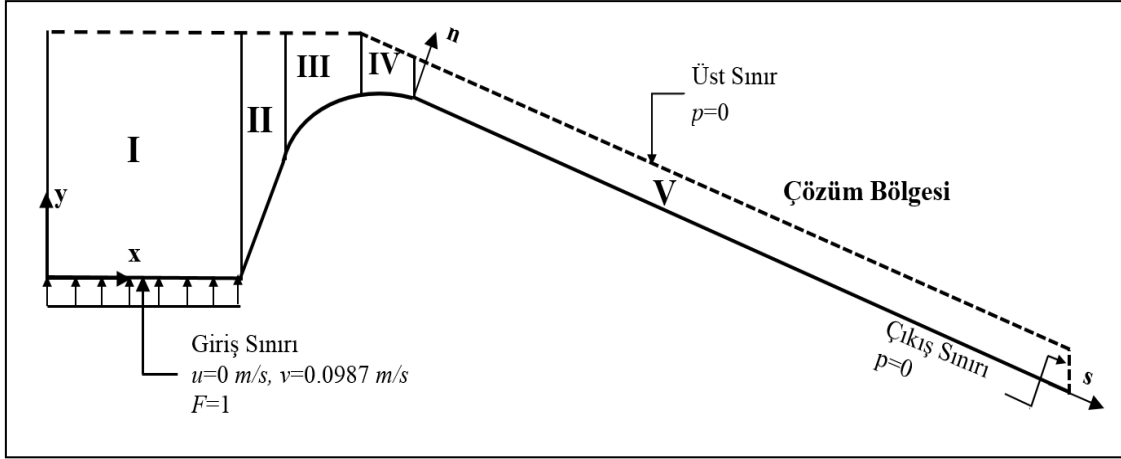
bölgesinin modellenmesinde Chen ve Patel [15] tarafından önerilen iki-tabakalı çözümü esas alan ve genişletilmiş iki-tabakalı duvar-yakını modellemesi olarak anılan yöntem kullanılmıştır [12].

2.7. Hesaplama Ağının Tasarımı

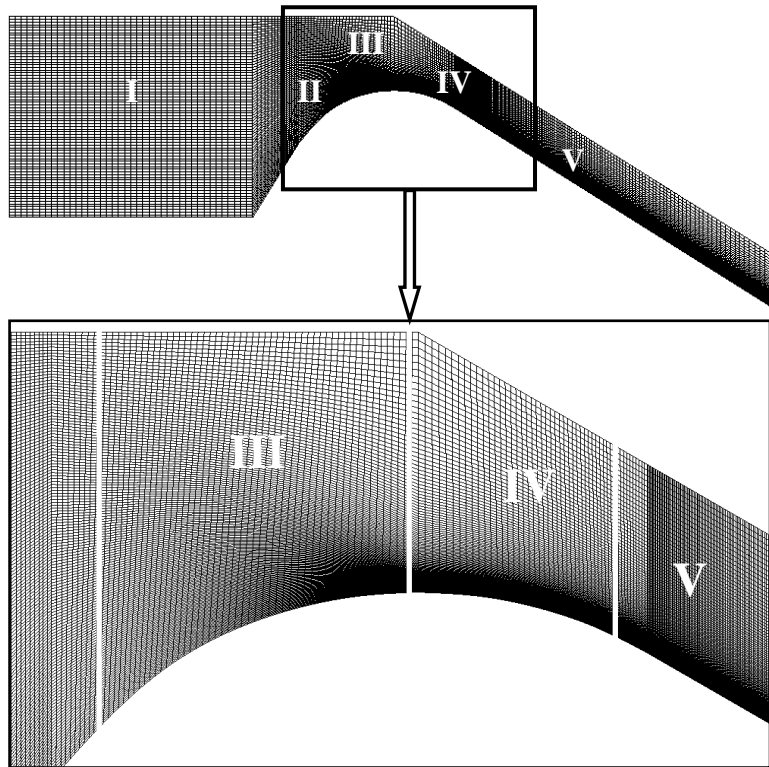
Hesaplama ağının tasarımı için çözüm bölgesi, Şekil 3'te görüldüğü gibi beş alt bölgeye ayrılmış ve ağ yapısının çözüm üzerindeki etkisinin incelenmesinde kullanılan ayrıklaştırma hatasının tespiti için üç farklı hesaplama ağı oluşturulmuştur. Oluşturulan ağ yapısının her bir alt bölgesindeki eleman sayısı yaklaşık olarak %50 ve %75 oranında artırılmak suretiyle dörtgen elemanlardan oluşan 3 farklı yoğunluğa sahip hesaplama ağları kullanılmıştır. Çizelge 1'de, sayısal hesaplamalarda kullanılan üç farklı ağ yapısı için eleman sayıları verilmiştir. 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 [16-17]. Üç farklı kesitte ($s=0,04 \text{ m}, 0,74 \text{ m}$ ve $1,36 \text{ m}$) yapılan ağ yakınsama indeksi değerlerinin % 0,0001 ile % 1.3 değerleri arasında değiştiği görülmüştür. Böylece, Ağ 3 sistemiyle, akım hızlarındaki hataların kabul edilebilir değer olan 2 den küçük olduğu görülmüş ve hesaplama hassasiyetinin ağ yoğunluğundan bağımsızlaştığı kanaatine varılmıştır.

Ağ 3 kullanılarak üç farklı türbülans modeli ile yapılan hesaplamalarda, tabandaki birinci ağ elemanı için hesaplanan $y^+ (=u_*y/\nu)$ değerinin IV ve V bölgelerindeki en büyük değerleri Çizelge 1'de görülmektedir. Burada $u_* (=(\tau_w/\rho)^{1/2})$ kayma hızı, y birinci ağ elemanının tabana dik boyutu ve ν kinematik viskozitedir.

Çizelgede görüldüğü gibi y^+ 'nın en büyük değeri, süt kanalının sonunda oluşmakta ve 7'yi aşmamaktadır. Yani katı sınırdaki birinci ağ elemanı, geçmişteki deneysel verilerin göstergeleri dikkate alındığında [18], tüm çözüm



Şekil 2. Sayısal çözüm bölgesi ve sınır şartları



Şekil 3. Sayısal modelde kullanılan hesaplama ağı

Çizelge 1. Farklı yoğunluktaki hesaplama ağlarında bölgesel eleman sayıları

Bölge	Ağ 1	Ağ 2	Ağ 3	Min y ⁺	Mak y ⁺
I	40x75	60x100	80x150	-	-
II	15x75	20x100	30x150	-	-
III	30x75	45x100	60x150	-	-
IV	25x75	35x100	50x150	3	3.75
V	200x75	300x100	400x150	2.8	6.95

bölgesinde viskoz alt tabakanın içerisinde yer almaktadır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Deneysel ve Hesaplanan Hız Profilleri

$k-\varepsilon$ tabanlı türbülans modellerinin doğrulanması bağlamında hesaplanan ve deneysel hız profillerinin niceliksel karşılaştırılmasında *Ortalama Karesel Hata* (OKH) ölçüt olarak kullanılmıştır:

$$OKH = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (v_d - v_h)^2 \quad (12)$$

Burada, v_d ve v_h sırasıyla deneysel ve hesaplanan hız değerini, N hız profilinde kullanılan nokta sayısını göstermektedir.

Çizelge 2’te, bu çalışmada kullanılan türbülans modelleriyle farklı kesitlerde hesaplanan hız profilleri için OKH değerleri verilmiştir. Çizelgedeki değerlerden, kullanılan türbülans modellerinden RNG ve RKE nin tüm kesitlerde SKE türbülans modeline göre daha başarılı olduğu, RNG ve RKE türbülans modellerinin ise genel olarak birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmekle birlikte, RKE modelinin, az da olsa daha başarılı olduğu söylenebilir.

Şekil 4’te, şüt kanalı üzerinde deneysel olarak ölçülen hız profillerinin, üç farklı türbülans modeli ile hesaplanan profillerin grafiksel olarak karşılaştırılması sunulmuştur. Şekillerden, RNG ve

Çizelge 2. Türbülans modelleri ile hesaplanan hız profilleri için OKH değerleri,

s (m)	OKH (cm ² /s ²)		
	SKE	RNG	RKE
0.04	30	12	10
0.14	21	9	8
0.24	29	9	8
0.34	37	13	12
0.44	39	13	13
0.54	41	22	22
0.74	65	32	32
0.91	86	28	27
1.06	100	30	29
1.21	126	34	32
1.36	114	52	50
1.51	161	96	91
Ortalama	71 ³	29 ²	28 ¹

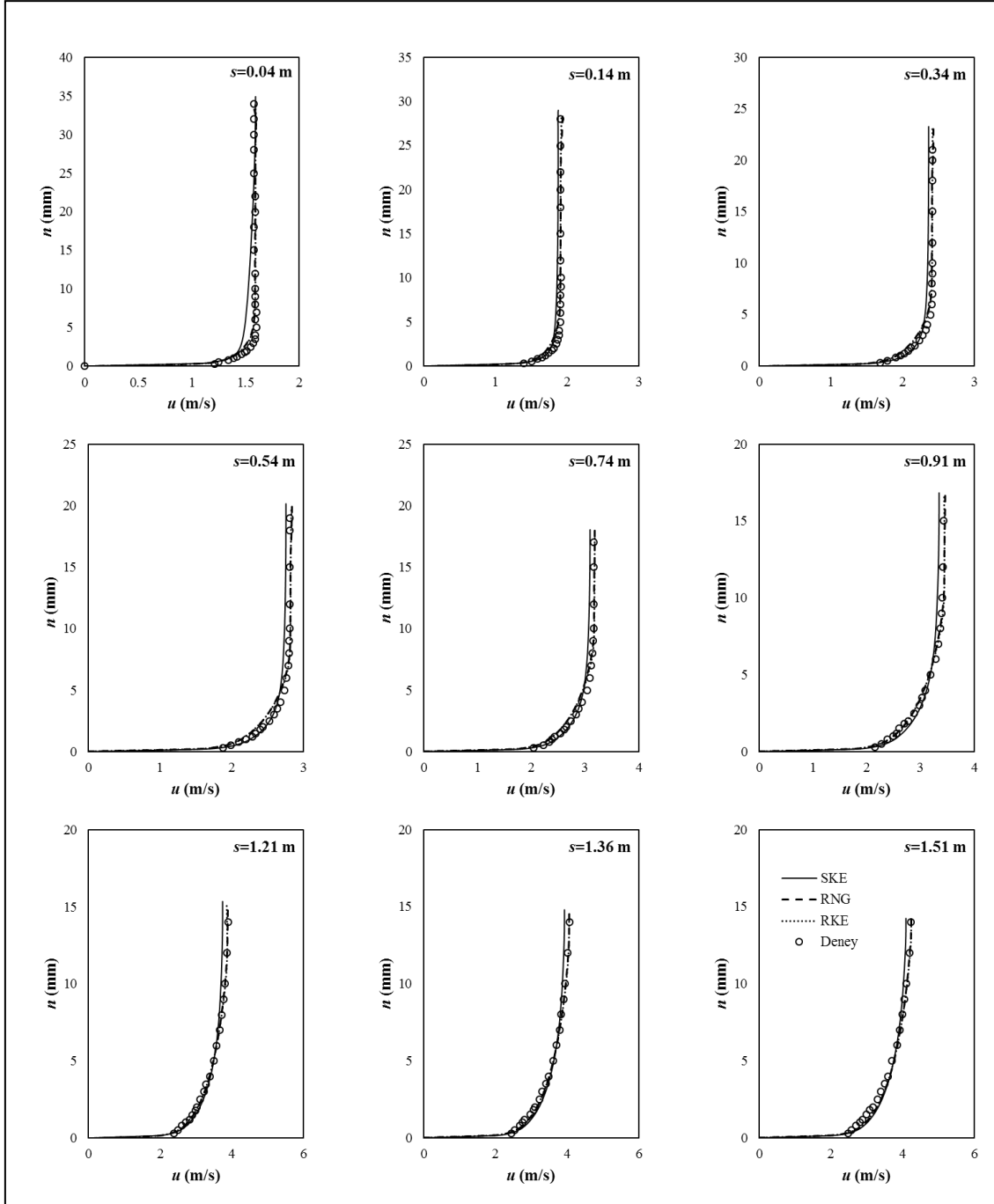
RKE türbülans modelleri ile hesaplanan hız profillerinin birbirleriyle ve deneylerle uyumlu olduğu görülmektedir. Ancak SKE türbülans modeli ile hesaplanan hız profillerinin diğer iki modele göre, deneysel profillerle uyumunun daha zayıf olduğu görülmektedir.

3.2. Deneysel ve Hesaplanan Su Yüzü Profilleri

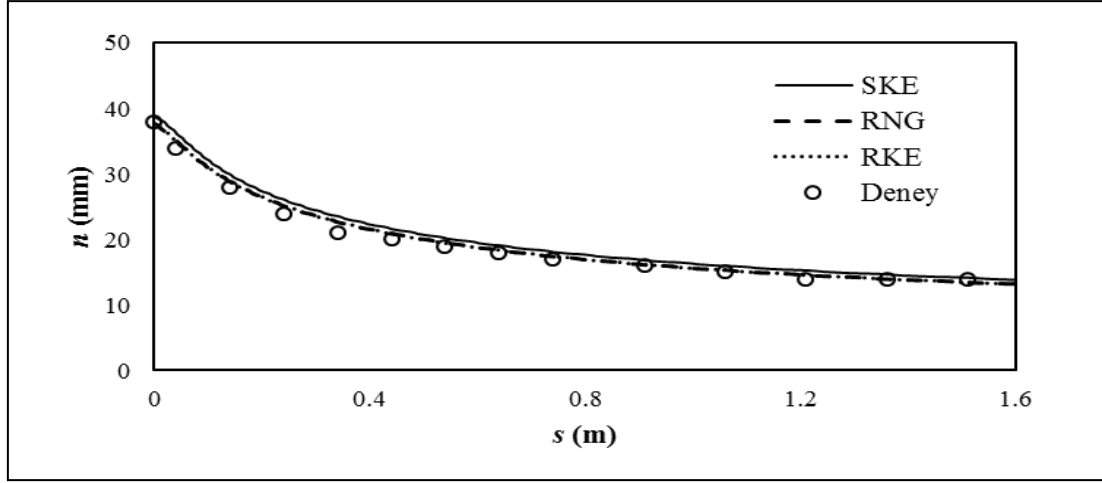
Şekil 5’de, üç türbülans modeline ait hesaplanan su yüzü profillerinin deneyler ile karşılaştırılması görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, RNG ve RKE türbülans modellerinin kullanıldığı sayısal hesaplamalardan elde edilen su yüzü profilleri ölçülen su yüzü profili ile daha uyumludur.

4. SONUÇ

Dolusavak üzerinden geçen serbest yüzeyli akımın sayısal modellenmesinde akımı idare eden denklemler, sonlu hacimler yöntemine dayalı ANSYS-Fluent programı ile çözülmüştür. SKE, RNG ve RKE türbülans modelleri kullanılarak yapılan sayısal hesaplamalarda serbest su yüzünün profili, VOF yöntemi ile belirlenmiştir. Sayısal modellemeye kullanılan ağ yapısının, hesaplar üzerindeki etkisini incelemek üzere, Ağ Yakınsama İndeksi (GCI) kullanılmış ve ağ yoğunluğuna bağlı hesaplama hatasının % 2’nin



Şekil 4. Deneysel ve sayısal hız profilleri



Şekil 5. Deneysel ve sayısal su yüzü profilleri

altında kaldığı görülmüştür. Hız profilleri ve şüt kanalındaki su yüzü profilleri için deneysel ve sayısal bulguların karşılaştırılmasından, çalışmaya konu olan akım koşulları bakımından RNG ve RKE türbülans modellerinin SKE modeline göre daha başarılı olduğu görülmüştür. Buna göre, RKE ve RNG türbülans modelleri kullanılarak elde edilen bulguların birbirlerine çok yakın olması nedeniyle, her iki türbülans modelinin de dolusavak akımının sayısal çözümünde ve dolayısıyla dolusavakların hidrolik tasarımında başarılı bir şekilde kullanılabilceği sonucuna varılmıştır.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma MMF2011D3 nolu proje ile Çukurova Üniversitesi, Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir, teşekkür ederiz.

6. KAYNAKLAR

1. Kırkgöz, M.S., Aköz, M.S. ve Öner, A.A. 2008. "Experimental And Theoretical Analyses of 2D Fows Upstream of Broad-Crested Weirs", Canadian Journal of Civil Engineering, 35(9): 975-986.
2. Aköz, 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), 29-55.
3. Aköz, M.S., Kırkgöz, M.S. ve Öner, A.A. 2009. "Experimental and Numerical Modeling of a Sluice Gate Flow", Journal of Hydraulic Research. 47(2), 167-176.
4. Öner A. A, Aköz M. S., Kırkgöz M. S., and Gümüş, V. 2012. "Experimental Validation of Volume of Fluid Method for a Sluice Gate Flow," Advances in Mechanical Engineering, vol. 2012, 10.
5. Soydan N. G., Aköz, M. S., Şimşek, O. ve Gümüş, V. 2012. "Trapez Kesitli Geniş Başlıklı Savak Akımının K-E Tabanlı Türbülans Modelleri ile Sayısal Modellenmesi", Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 27(2), ss. 47-58.
6. Kırkgöz, M.S., Gümüş, V., Soydan, N.G., Şimşek, O. ve Aköz, M.S. 2012. "Experimental and Numerical Modeling of Flow over a Gate- Controlled Semi-Cylinder Weir", 10th International Congress on Advances in Civil Engineering, 17-19 October, Ankara, 0184:1-10.
7. Güzel, H. 1991. "Baraj Dolusavak Kanalında Enerji Kaybının İncelenmesi", Y. Lisans Tezi, Ç.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü. Adana.

8. Launder B. E. ve Spalding D. B., 1972. "Lectures in Mathematical Models Ofturbulence. Academic Press", London, England.
9. Yakhot, V., Orszag, S.A., Thangam, S., Gatski, T.B. ve Speziale, C.G., 1992. "Development of Turbulence Models for Shear Flows by a Double Expansion Technique", Physics of Fluids A, 4(7), 1510-1520.
10. Shih T.H., Liou W.W., Shabbir A., Yang Z. ve Zhu J, (1995). "A New k- ϵ Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows - Model Development and Validation", Computers Fluids, 24(3).227-238.
11. Hirt, C. W. ve Nichols, B. D., 1981. "Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries", J. Comput. Phys., 39, pp., 201-225.
12. Ansys Inc., 2012. Release 14.0. www.ansys.com.
13. Patankar, S.V. ve Spalding, D.B., 1972. "A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-Dimensional Parabolic Flows", International Journal of Heat and Mass Transfer, 15, 1787-1806.
14. Patankar, S.V., 1980. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere, Washington.
15. Chen, H.C. ve Patel, V.C., 1988. "Near-Wall Turbulence Models for Complex Flows Including Separation", AIAA journal, 26(6), 641-648.
16. Roache, P.J., 1998. "Verification of Codes and Calculations", AIAA Journal, 36(5), 696-702.
17. Çelik, İ.B., Ghia, U., Roache, P.J., Freitas, C.J., Coleman, H. ve Raad, P.E., 2008. "Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD applications", ASME Journal of Fluids Engineering, 130(1), 1-4.
18. Kırkgöz, M.S. ve Ardıçlıoğlu, M., 1997. "Velocity Profiles of Developing and Developed Open Channel Flow", Journal of Hydraulic Engineering, 123(12), 1099-1105.

