

RSM Türbülans Modeli İle Enerji Kırıcı Yapı Üzerindeki Akımın Sayısal Modellenmesi

M. Sami Aköz¹, Oğuz Şimşek¹, N. Göksu Soydan²,
Veysel Gümüş³, M. Salih Kırkgöz¹

msa@cu.edu.tr; oguzsimsek@cu.edu.tr; soydang@cu.edu.tr;
gumus@harran.edu.tr; skirkgoz@cu.edu.tr

¹ Çukurova Üniversitesi Müh. Mim. Fak. İnşaat Müh. Bölümü, Adana

² Çukurova Üniversitesi Ceyhan Müh. Fak. İnşaat Müh. Bölümü, Adana

³ Harran Üniversitesi Müh. Fak. İnşaat Müh. Bölümü, Şanlıurfa

Öz

Laboratuvar kanalında, dolusavak mansabında bulunan enerji kırıcı yapı ile etkileşim halindeki serbest yüzeyli akımın hız alanı Laser Doppler Anemometresi (LDA) ile ölçülmüştür. Akımı idare eden denklemler, deney koşullarındaki iki-boyutlu türbülanslı akımlar için Sonlu Hacimler Yöntemine dayalı ANSYS-Fluent paket programı yardımıyla sayısal olarak çözülmüştür. Sayısal hesaplamalarda RSM türbülans kapatma modeli kullanılmış ve su yüzü profilleri Akışkan Hacimleri (VOF) yöntemi ile belirlenmiştir. Sayısal hesaplamalardan elde edilen su yüzü ve hız profilleri deneysel ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Sayısal model bulgularının deneysel olarak doğrulanması bağlamında yapılan karşılaştırmalarda, RSM türbülans modelinin incelenen akım probleminde hız alanı, su yüzü profili ve enerji kaybının belirlenmesinde başarılı olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar sözcükler: Enerji Kırıcı Yapı, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, akışkan hacimleri Yöntemi (VOF), RSM, Hız Profili

Giriş

Barajların güvenlik elemanı olan dolusavak yapıları üzerinden tahliye edilen akım, memba ve mansap su yüzü kot farkından dolayı yüksek kinetik enerjiye sahiptir. Yüksek enerjiye sahip bu akımın, baraj yapısına ve nehir yatağına zarar vermeden baraj mansabına aktarılabilmesi için, dolusavak mansabında enerji kırıcı bir yapının kullanılması gerekmektedir (Savage ve diğ., 2001, Shahheydari ve diğ., 2014, Champagne and Barkdoll, 2015).

Enerji kırıcı yapıların geliştirilmesi ve hidrolik performansı ile ilgili yürütülen kapsamlı araştırmalar geçmişten günümüze çeşitli teknikler kullanılarak devam etmektedir. Bu yapıların enerji sönümlenme oranları ve geometrik özellikleri fiziksel model deneyleri ile araştırılabilmektedir. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen fiziksel model çalışmaları zaman kaybına ve yüksek maliyetlere neden olabilmektedir. Bunun yanı sıra, ölçek etkilerinden kaynaklanan hataların sonuçlar üzerinde etkisinin olduğu da bilinmektedir.

Diğer taraftan, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD-CFD) yöntemlerinde son yıllarda kaydedilen önemli gelişmeler sayesinde, bu tür karmaşık akım problemlerinin sayısal model deneyleriyle, bilgisayar yöntemleri kullanılarak pratik amaçlara yönelik daha ekonomik ve ayrıntılı analizlerinin yapılması imkânı sağlanmıştır. HAD yöntemleri ile, türbülanslı akımı idare eden temel denklemler sayısal olarak çözülmekte ve denklemlerde yer alan türbülans karakteristiklerini belirleyici terimlerin, türbülans kapatma modelleri ile formülasyonu yapılmaktadır. Bu bağlamda, Ho ve diğ., (2003), dolusavak üzerinden geçen akımın özelliklerini teorik olarak incelemiştirlerdir. İki ve üç boyutlu sayısal model çalışmaları sonucunda elde ettikleri sayısal bulguları Warragamba, Hume ve Buffalo Barajlarının dolusavaklarında yaptıkları ölçümler ile karşılaştırmışlardır. Tabara ve diğ., (2005), basamaklı dolu savaklar üzerinden geçen akımı sayısal ve deneysel olarak modellemiştirlerdir. ADINA programı yardımıyla elde ettikleri sayısal bulguları, laboratuvar ortamında yaptıkları ölçümlerden elde ettikleri deneysel bulgularla karşılaştırmışlar ve HAD çözüm tekniklerinin, basamaklı dolu savak üzerindeki akımların karakteristik özelliklerinin belirlenmesinde başarılı bir şekilde kullanılabileceği sonucuna varmışlardır. Dursun ve diğ., (2009), basamaklı ve basamaksız dolusavak mansabında oluşan enerji kırılmasını deneysel ve sayısal olarak incelemiştirlerdir. ANSYS-Fluent paket programı yardımıyla farklı yapı ve akım koşulları altındaki akımı idare eden denklemler $k-\varepsilon$ türbülans modeli kullanılarak çözülmüştür. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda sayısal ve deneysel akım karakteristiklerinin birbirleriyle gayet uyumlu oldukları belirlenmiştir. Morales ve diğ., (2012), Ogee profilli dolusavak üzerinden geçen akımı ve sonrasında oluşan hidrolik sıçramayı deneysel ve sayısal olarak modellemiştirlerdir. Sayısal modellemelerde türbülans viskozitesinin hesabı için $k-\omega$ türbülans modelini kullanmışlardır. Akım profili ve hidrolik sıçrama uzunluğu ile ilgili elde edilen sayısal bulguları deneysel ölçümlerle karşılaştırmışlar; sayısal bulguların, deneysel ölçümlere olan yakınlığının kabul edilebilir derecelerde olduğu sonucuna varmışlardır. Babaali ve diğ., (2015), çalışmalarında, USBR II tipi sıçrama havuzu kullanarak meydana gelen hidrolik sıçramayı sayısal ve deneysel olarak incelemiştirlerdir. Sayısal analizlerden Sonlu Hacimler yöntemine dayalı Flow-3D modelini kullanmışlardır. Standard $k-\varepsilon$ (SKE) ve Re-normalization Group (RNG) türbülans modellerini kullanarak yaptıkları sayısal modelleme sonucunda Flow-3D ile yapılan sayısal modellemenin, genel akım profilini ve hidrolik sıçramayı doğru bir şekilde tahmin ettiği sonucuna ulaşmışlardır. Sayısal bulguların deneysel ölçümlerle karşılaştırılması sonucunda, RNG modeli ile elde edilen bulguların SKE modeline göre deneylerle daha uyumlu olduğunu belirlemiştirlerdir.

Bu çalışmada, enerji kırıcı yapı üzerinden geçen akım deneysel ve sayısal olarak modellenmiştir. Akımı idare eden temel denklemler, kütle ve momentumun korunumu (Reynolds-ortalama Navier-Stokes denklemleri), Sonlu Hacimler Yöntemine dayalı ANSYS-Fluent paket programı yardımıyla Reynolds Gerilmesi (Reynolds Stress Model-RSM) türbülans modeli kullanılarak sayısal olarak çözülmüştür. Sayısal modellemelerde su yüzünün geometrisinin belirlenmesinde, Akışkan Hacimleri (Volume of Fluid-VOF) yöntemi kullanılmıştır. Sayısal modelden elde edilen akım profili ve hız alanı ile ilgili bulgular, laboratuvar ortamında yapılan deneysel ölçümlerden elde edilen bulgularla karşılaştırılmıştır. Deneylerde, hız alanının ölçülmesi için Laser Doppler Anemometresi (LDA) kullanılmıştır. Sayısal modellemenin deneylerle doğrulanmasına yönelik yapılan karşılaştırmalarda, enerji kırıcı yapı üzerindeki akım karakteristiklerinin ve özelliklerinin tahmin edilmesindeki performansı test edilmiştir.

Deney Düzeneği

Deneyler, uzunluğu 2,4 m, genişliği ve derinliği 0,2 m olan, hidrolik bakımdan cilalı sürtünme niteliğine sahip yatay bir laboratuvar kanalında yapılmıştır. Deney modeli olarak, Şekil 1’de görüldüğü gibi kanala yerleştirilmiş, uzunluğu 32 cm, genişliği 20 cm ve kret yüksekliği 10,5 cm olan dolu savak modeli kullanılmıştır. Dolusavak kontrol yapısının 35 cm mansabına, taban genişliği 4,5 cm, kret genişliği 3 cm ve yüksekliği 3 cm olan trapez kesitli bir eşik yerleştirilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, kanaldaki akımın derinliği, kanal sonuna yerleştirilmiş keskin kenarlı bir kapak yardımıyla ayarlanmıştır. $Q=2,85$ l/s akım durumu için akım alanı tek boyutlu LDA sistemi ile ve su yüzü profili kanal boyunca limnometre ile ölçülmüştür. Sıçrama bölgesinde su yüzünün zamansal değişimi dikkate alınarak bu bölgede çok sayıda okuma yapılmış ve bunların ortalaması kullanılmıştır.



Şekil 1 Deney düzeneği.

Temel Denklemler ve Sayısal Çözüm

Temel Denklemler

Açık kanaldaki enerji kırıcı yapı modeli ile etkileşim halindeki akım; düzenli, iki-boyutlu, sıkışmayan, türbülanslı serbest yüzeyli bir akımdır. Akımı idare eden temel denklemler, kütle korunumu ve momentumun korunumu (Reynolds-ortalımalı 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 \bar{u}_i , x_i doğrultusundaki ortalama hız bileşeni, g_i yer çekimi ivmesi, \bar{p} ortalama basınç, μ dinamik viskozite, ρ suyun yoğunluğu ve τ_{ij} türbülans (Reynolds) gerilmeleridir.

Genel halde, üç-boyutlu akım alanında, (1) ve (2) ile verilen 4 denklem 10 adet bilinmeyen içermektedir, bunlar: üç hız bileşeni \bar{u}_i , basınç \bar{p} , ve altı bağımsız Reynolds gerilmesi $-\rho\overline{u'_i u'_j}$ 'dir. Buna göre, 6 adet bilinmeyen 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 ile tanımlanmasını gerektirmektedir. Bu çalışmaya konu olan akım için (1) ve (2) denklemlerinin iki-boyutlu çözümü yapılmıştır. Türbülans viskozitesinin doğrusal formda formülasyonunu esas alan Boussinesq yaklaşımına göre (2) denklemdeki türbülans 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 delta'dır.

Akışkan hareketinin HAD yöntemleri ile modellenmesinde, (3) denklemdeki μ_t türbülans viskozitesinin ifade edilmesinde birçok türbülans modeli geliştirilmiştir. Bu çalışmada, aşağıda ifade edilen RSM (Gibson ve Launder, 1978; Launder, 1989) türbülans kapatma modeli kullanılmıştır.

Reynolds Gerilmesi Türbülans Modeli (RSM)

Reynolds Gerilmesi Modeli (Reynolds Stress Model-RSM) adını taşıyan bu yöntem hareket denklemlerinde yer alan Reynolds gerilmelerinin ($= \overline{\rho u'_i u'_j}$) doğrudan transport denklemlerinin çözümüyle hesaplanması esasına dayanmaktadır (Gibson ve Launder, 1978; Launder, 1989).

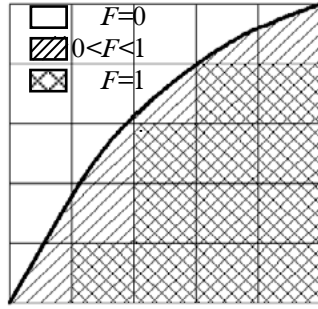
$$\frac{\partial}{\partial t} (\overline{\rho u'_i u'_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{\rho u_k u'_i u'_j}) = \underset{1}{D_{T,ij}} + \underset{2}{D_{L,ij}} + \underset{3}{P_{ij}} + \underset{4}{\phi_{ij}} + \underset{5}{\varepsilon_{ij}} \quad (4)$$

Denklemin sağında 1-5 arasında sıralanan terimler; türbülans difüzyonu, moleküler difüzyon, türbülans gerilmeleri üretim terimi, basınç uzatma terimi ve disipasyon terimini ifade etmektedir.

Akışkan Hacimleri Yöntemi (VOF) ile Su Yüzünün Hesaplanması

Sayısal modellemelerde, sıvı ile havanın ara kesitindeki serbest su yüzünün bulunmasında Akışkan Hacimleri (Volume of Fluid-VOF) yöntemi güvenilir bir teknik olarak kullanılmaktadır (Hirt ve diğ., 1981). Bu yöntem, hesaplama ağında, sıvı ile havanın ara kesitindeki ağ elemanlarının hacimsel doluluk oranını esas almakta ve bir sayısal hesaplama ağına belirli zaman aralıklarında giren sıvının eleman hacimlerini doldurma oranlarının belirlenmesini ve böylece, akımda serbest yüzey profilinin seçilmiş zaman adımlarında hesaplanmasını gerçekleştiren bir sürece dayanmaktadır. Şekil 2'de görüldüğü gibi, hacimsel 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 olmaktadır. Sayısal çözüm sürecinde, VOF yöntemi ile zamana bağlı temel denklemlerin her bir zaman adımındaki sayısal çözümünden, hesaplama ağı içerisindeki akım yüzeyinin konumu tespit edilebilmektedir.

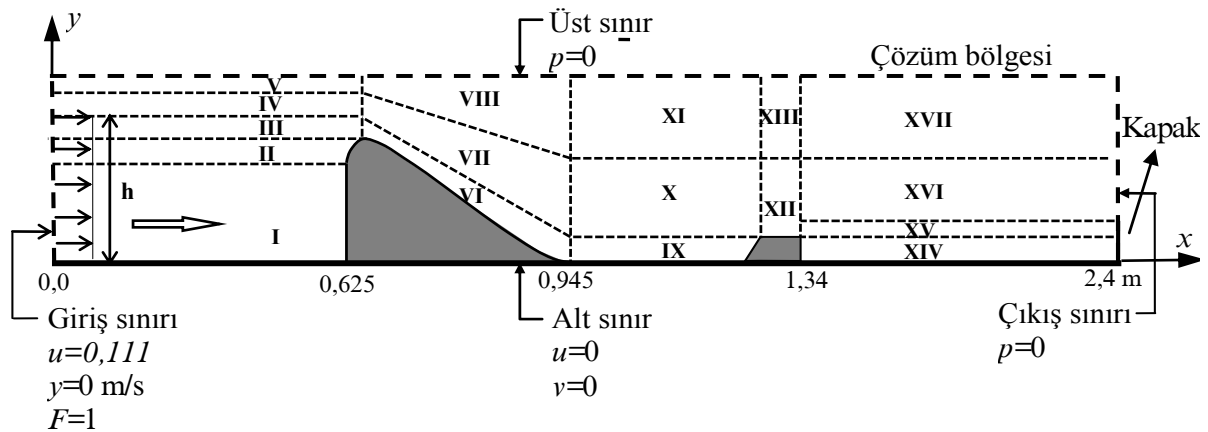


Şekil 2 Akım profili altındaki ağ elemanlarının doluluk oranı.

VOF yöntemi ile serbest su yüzünün hesaplanmasında “Geo-Reconstruct” yaklaşımı kullanılmıştır (Fluent, 2012). 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 bulunur. Son olarak, bir önceki adımda hesaplanan akışkan miktarları göz önüne alınarak, süreklilik denklemi ile her bir hücrenin yeni hacimsel doluluk oranı hesaplanır.

Çözüm Bölgesi, Sınır ve Başlangıç Şartları

Dolusavak sonundaki enerji kırıcı yapı ile etkileşim halindeki akımın sayısal modeli için kullanılan çözüm bölgesinin geometrisi ve boyutları Şekil 3'te verilmiştir. Koordinat sisteminin orijini, çözüm bölgesinin sol alt köşesi olarak alınmıştır. Çözüm bölgesinin üst sınırı memba su seviyesinin biraz üstünde, alt sınırı ise kanal tabanından geçmektedir. Alt sınırda ve kanal sonundaki kapağı temsilen sıfır-hız duvar sınır şartı, yani $u=v=0$ kabulü yapılmıştır. Çözüm bölgesinin giriş sınırında, yatay hız bileşeni üniform kabul edilmiş ve kesit ortalama hızına eşdeğer olarak $u=0.111$ m/s kullanılmış, giriş sınırında 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.

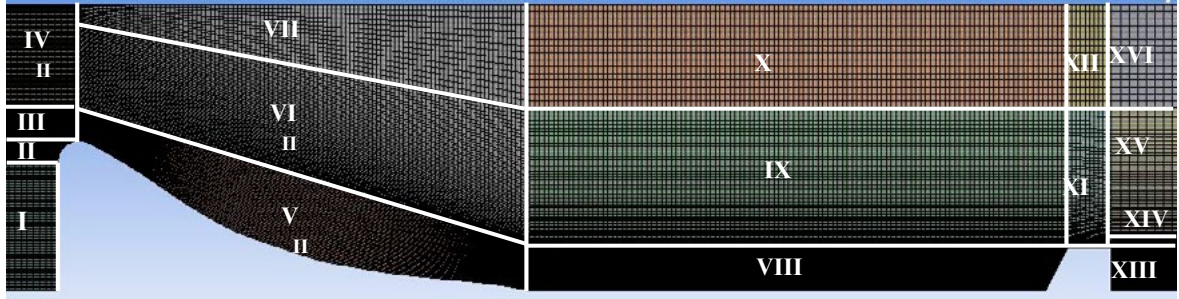


Şekil 3 Çözüm bölgesi ve sınır şartları.

Zamana bağılı çözüm sürecinde, başlangıç şartı olarak çözüm bölgesinin giriş sınırında doluluk oranı $F=1$ alınırken, sayısal modellemede zaman adımı $\Delta t=0.001$ s olarak seçilmiştir.

Hesaplama Ağının Tasarımı

Akımların bir yapı ile etkileşim alanlarının sayısal hesaplamalarında, çözüm bölgesine ait hesaplama ağı tasarımının sonuçlar üzerinde büyük ölçüde etkili olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada hesaplama ağı oluşturulurken, Şekil 3’de verilen sayısal çözüm bölgesi, Şekil 4’de görüldüğü gibi, 16 alt bölgeye ayrılmış, her bir alt bölgede, dikdörtgen elemanlardan oluşan ağ yapısı elde edilmiştir. Hesaplama ağı oluşturulurken katı yüzeylere doğru sıkılaştırma yapılmıştır ve böylelikle katı yüzeye yakın bölgede daha hassas çözüm elde edilmesi amaçlanmıştır. Akımda su yüzünün ulaşmadığı bölgelerde (VII, X, XII, XVI) daha kaba ağ elemanı tercih edilmiştir. Tablo 1, sayısal hesaplamalarda kullanılan ağ yapısı için eleman sayılarını göstermektedir.



Şekil 4 Hesaplama ağı ve alt bölgeleri.

Tablo 1 Hesaplama ağının alt bölgelerinde kullanılan eleman sayıları.

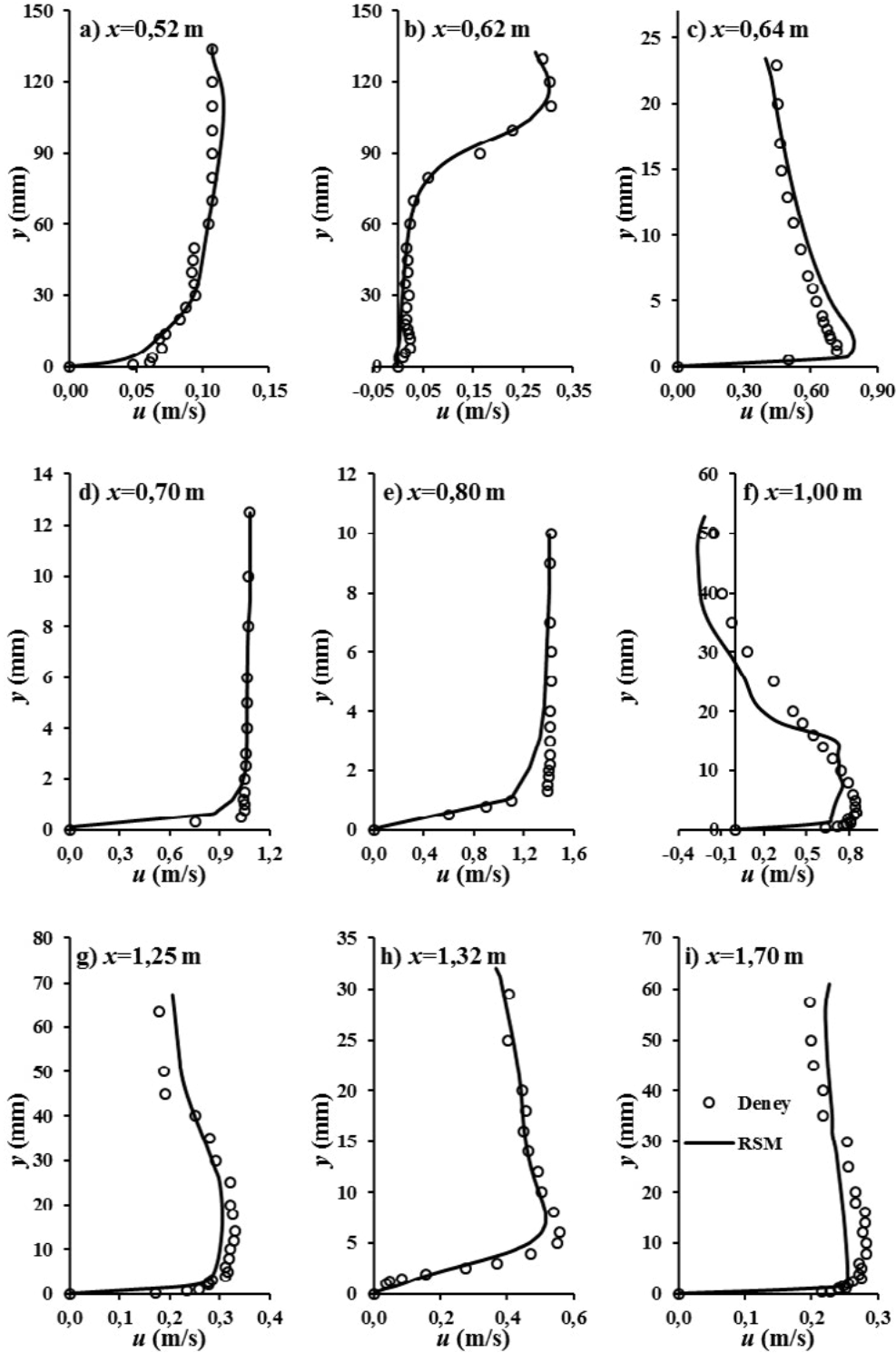
Alt Bölge No	Eleman Sayısı	Alt Bölge No	Eleman Sayısı
I	80x150	IX	65x110
II	30x150	X	15x110
III	50x150	XI	65x10
IV	80x150	XII	15x10
V	50x100	XIII	50x180
VI	65x100	XIV	5x180
VII	15x100	XV	60x180
VIII	50x110	XVI	15x180

Bulgular

Deneyel Ve Hesaplanan Hız Profilleri

RSM türbülans kapatma modelini kullanan sayısal model bulgularının doğrulanması bağlamında, sayısal ve deneysel modelleme bulguları karşılaştırılmıştır. Şekil 5’te kanal boyunca farklı kesitlerde ölçülen ve RSM türbülans modeli ile hesaplanan hız profilleri verilmiştir. Savak düşey yüzünden savak kret yüksekliği olan $h=10,5$ cm kadar membada yer alan $x=0,52$ m kesitinde, RSM türbülans modeli ile elde edilen hız profillerinin deneysel bulgularla gayet uyumlu olduğu, $x=0,62$ kesitinde, yani savak yapısının hemen membasında ise akımın ayrılma bölgesinin durumu hem deneysel hem

de sayısal hız profillerinde açıkça görülmektedir. $x=0,64$ m'deki dolusavak kretinde, deneysel olarak elde edilen eğri yörüngeli akımdaki hız profilinin RSM türbülans modeli ile de başarılı biçimde tahmin edildiği açıkça görülmektedir. Dolusavak üzerindeki $x=0,70$ ve $0,80$ m kesitlerinde deneysel ve sayısal hız profillerinin incelenmesinden, RSM türbülans modeli ile elde edilen hız profillerinin katı sınıra yakın bölgeler dışında deneylerle uyumlu olduğu görülmektedir.

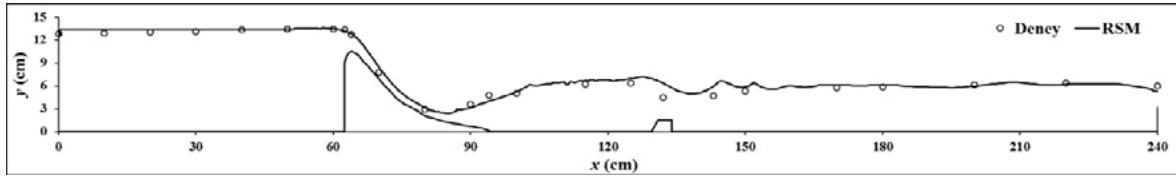


Şekil 5 Deneysel ve sayısal hız profilleri.

Enerji kırma havuzunda, $x=1,00$ ve $1,25$ m'deki hidrolik sıçramanın meydana geldiği kesitlerde, sayısal ve deneysel hız profillerinin jet akımının görüldüğü alt bölgelerde birbiri ile uyumlu olduğu, ancak jet akımının dışındaki üst bölgelerde birbirinden uzaklaştığı görülmektedir. $x=1,32$ m kesiti havuz eşiği üzerindeki ölçülen ve hesaplanan hız profillerini göstermektedir. $x= 1,70$ m kesiti ise kuyruk suyu bölgesinde elde edilen deneysel ve sayısal hız profilleridir. Kanal boyunca farklı akım koşullarının olduğu bölgeleri temsil eden Şekil 5'teki ölçülen ve hesaplanan hız profillerinin karşılaştırılmasından, genelde, RSM türbülans modelinin bu akımdaki hız alanını belirlemede başarılı olduğu sonucuna varılmıştır.

Deneysel ve Hesaplanan Su Yüzü Profilleri

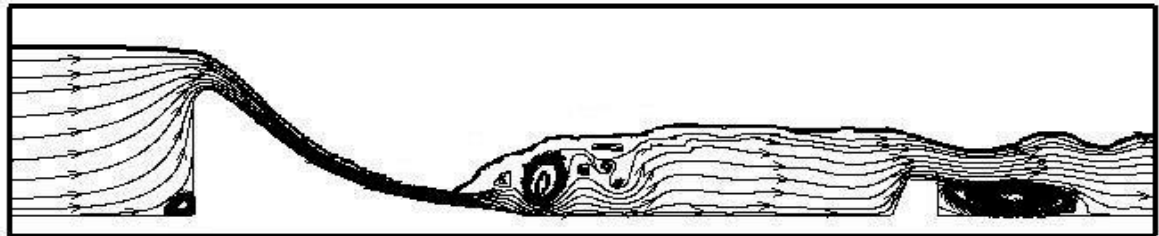
Şekil 6'da, deneysel ve RSM türbülans modeli kullanılarak sayısal olarak elde edilen su yüzü profilleri verilmiştir. Dolusavak öncesinde meydana gelen kabarma hem deneysel hem sayısal su yüzü profillerinden açıkça görülmektedir. Şeklin incelenmesinden, hesaplanan su yüzü profilinin sıçrama bölgesi dışındaki tüm bölgelerde deneylerle gayet uyumlu olduğu, hidrolik sıçrama gibi karmaşık bir akım yapısının mevcut olduğu bölgede ise sayısal çözümün kabul edilebilir derecede başarılı olduğu görülmektedir. Enerji kırıcı yapının çıkışından suyu akarsu yatağına ileten açık kanalın tasarımında, bu kanaldaki su yüzü profilinin belirlenmesi önem arz etmektedir.



Şekil 6 Deneysel ve sayısal su yüzü profilleri.

RSM Modeli ile Hesaplanan Akım Çizgileri

Şekil 7'de, dolusavak ve enerji kırıcı yapı üzerindeki akım için RSM türbülans modeli kullanılarak hesaplanan akım çizgilerinin topolojisi verilmiştir. Şekildeki akım çizgilerinin geometrisinden, dolusavak membasında oluşan ayrılma bölgesi, hidrolik sıçrama bölgesindeki çevriler ve salınımlar ile eşik sonrası oluşan ayrılma bölgesi açıkça görülebilmektedir.

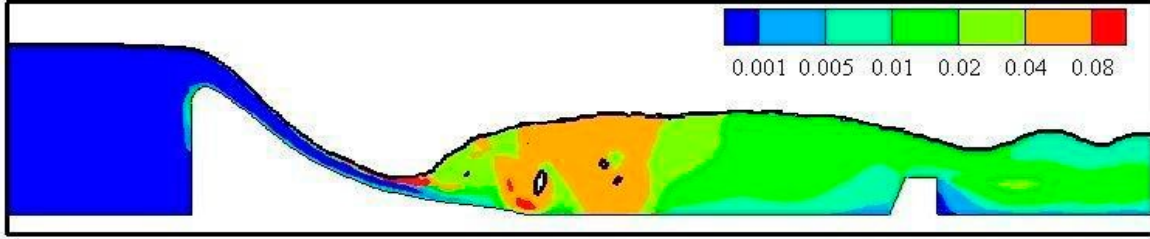


Şekil 7 RSM türbülans modeli ile hesaplanan akım çizgileri.

RSM Modeli ile Hesaplanan Türbülans Kinetik Enerji

RSM türbülans modeli ile sayısal olarak elde edilen türbülans kinetik enerjisinin kanal boyunca dağılımı Şekil 8'de verilmiştir. Görüldüğü gibi türbülans kinetik enerjisi en

yüksek değerine havuzdaki hidrolik sıçramanın başlangıcında ulaşmaktadır. Havuzdaki hidrolik sıçrama, belirgin bir enerjinin kaybına sebep olmaktadır. Bu çalışmada hidrolik sıçramanın başlangıcı ve bitişi arasında meydana gelen enerji kayıp değerleri deneysel ve sayısal olarak sırasıyla %33 ve %30 olarak hesaplanmıştır. Farklı havuz boyutlarında ve eşik geometrilerinde meydana gelecek enerji kırılmalarının belirlenmesi için benzer çalışmaların çoğaltılmasına ihtiyaç vardır.



Şekil 8 RSM türbülans modeli ile hesaplanan türbülans kinetik enerji.

Sonuçlar

Dolusavak sistemindeki enerji kırıcı yapı üzerinden geçen açık kanal akımını idare eden temel denklemler, Sonlu Hacimler Yöntemine dayalı ANSYS-Fluent paket programı yardımıyla sayısal olarak çözülmüştür. Serbest su yüzünün profili, Akışkan Hacimleri (VOF) yöntemi ile hesaplanmıştır. RSM türbülans kapatma modeli kullanılarak hesaplanan hız ve su yüzü profilleri, deneysel olarak elde edilen bulgular ile karşılaştırılmıştır. RSM türbülans modeli ile elde edilen akım çizgileri topolojisinin, akım özelliklerini yansıtıcı nitelikte gerçekçi davranışlar sergilediği görülmüştür. Deneysel ve sayısal olarak elde edilen enerji sönümlenme oranlarının birbirine yakın olduğu belirlenmiş ve yaklaşık % 30 oranında enerji kaybı hesaplanmıştır. Sonuç olarak, RSM türbülans modelinin bu tür su yapı etkileşiminin olduğu karmaşık akım problemlerinde başarı ile kullanılabilmesi kanaatine varılmıştır.

Teşekkür

Çalışmanın ikinci yazarı, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından yurt içi doktora bursu ile desteklenmektedir. İkinci yazar bu desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkürlerini sunmaktadır.

Kaynaklar

- 1- ANSYS Inc. (2012) Release 14,0 . www.ansys.com.
- 2- Babaali, H., Shamsai, A., and Vosoughifar, H. (2015) Computational Modeling of the Hydraulic Jump in the Stilling Basin with Convergence Walls Using CFD Codes. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40(2), 381-395.
- 3- Champagne, T. M. and B. D. Barkdoll (2015) Oscillating Hydraulic Jump in a Stilling Basin. *World Environmental and Water Resources Congress 2015*: pp: 1686-1695.
- 4- Dursun, Ö. F. ve Öztürk, M. (2009) Basamaklı Dolusavakların Akımın Enerjisini Sönümlenme Özelliğinin Sayısal Analizi. *e-Journal Of New World Sciences Academy*, Vol.4, Num. 2, pp. 165-175.

- 5- Gibson, M. M. and Launder, B. E. (1978) Ground Effects on Pressure Fluctuations in the Atmospheric Boundary Layer. *J. Fluid Mech.*, 86. 491-511.
- 6- Hirt, C.W. and B.D. Nichols (1981) 'A Computational Method for Free-Surface Hydrodynamics. *Journal of Pressure Vessel Technology-Transactions of the Asme.* 103(2): p. 136-141.
- 7- Ho, D., Boyes, K., Donohoo, S. and Cooper, B. (2003) Numerical flow analysis for spillways. *43rd ANCOLD Conference*, Hobart, Tasmania.
- 8- Launder, B. E. (1989) 2nd-Moment Closure and Its Use in Modeling Turbulent Industrial Flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 98. 963-985.
- 9- Morales, V., Tokyay, T., E., and Garcia, M. (2012) Numerical Modeling Of Ogee Crest Spillway And Tainter Gate Structure Of A Diversion Dam On Canar River, Ecuador. *XIX International Conference on Water Resources*, June 17-22.
- 10- Savage, B. M., & Johnson, M. C. (2001) Flow over ogee spillway: Physical and numerical model case study. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol:127, No:8, pp. 640-649.
- 11- Shahheydari, H., Nodoshan, E. J., Barati, R., and Moghadam, M. A. (2014) Discharge coefficient and energy dissipation over stepped spillway under skimming flow regime. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19(4), 1174-1182.
- 12- Tabbara, M., Chatila, J., Awwad, R. (2005) Computational simulation of flow.