

RADYAL KAPAK İLE ETKİLEŞİMDE BULUNAN AÇIK KANAL AKIMININ SAYISAL MODELLENMESİ

Oğuz ŞİMŞEK¹ (ORCID: 0000-0001-6324-0229)*
Mehmet PARMAKSIZ¹ (ORCID: 0000-0002-3713-4323)
Veysel GÜMÜŞ¹ (ORCID: 0000-0003-2321-9526)

¹Harran Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa

Geliş / Received: 30.01.2019

Kabul / Accepted: 17.06.2019

ÖZ

Radyal kapak kontrollü açık kanal akımının su yüzü profilleri farklı akım koşulları için deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneyler ile aynı koşullardaki akım için temel denklemler, sonlu hacimler yöntemine dayalı ANSYS-Fluent paket programıyla iki boyutlu olarak çözülmüştür. Sayısal hesaplamalarda, Reynolds Ortalamalı Navier Stokes (RANS) denklemlerine dayalı çözüm yapan Renormalization Group (RNG) k-ε, Kayma Gerilmesi Taşınım (Shear Stress Transport-SST) k-ω ve Reynolds Gerilme Model (Reynolds Stress Model-RSM) türbülans modelleri ve serbest su yüzü profilinin belirlenmesinde ise Akışkan Hacimleri Yöntemi (Volume of Fluid-VOF) kullanılmıştır. Limmimetre ile ölçülen deneysel akım profilleri ile farklı türbülans modelleri kullanılarak elde edilen sayısal su yüzü profilleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda, radyal kapak kontrollü açık kanal akımının su yüzü profillerini belirlemede, SST k-ω modelinin kullanılan diğer türbülans modellerine kıyasla daha başarılı olduğu belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Akışkan hacimleri yöntemi, radyal kapak, sayısal modelleme, su yüzü profili, türbülans modeli

NUMERICAL MODELING OF OPEN CHANNEL FLOW INTERACTING WITH RADIAL GATE

ABSTRACT

The surface profiles of open channel flow controlled with radial gate are investigated experimentally and numerically for different flow conditions. Basic equations of the problem are solved by ANSYS-Fluent program package based on finite volume method for the flow case having the same experimental condition. In the numerical simulations, Renormalization group(RNG) k-ε, Shear Stress Transport (SST) k-ω and Reynolds Stress Model (RSM) based on the Reynolds Average Navier Stokes (RANS) equations are used for the simulation of turbulence, and Volume of Fluid (VOF) method is used to determine the free surface profile. Experimental surface profiles measurement by limnimeter are compared with numerical surface profile obtained from different turbulence models. As a result of the comparison, it was found that the open channel flow of the radial gate control, Shear Stress Transport k-ω model was more successful than the other models used in determining the water surface profiles.

Keywords: Volume of fluid (VOF), radial gate, numerical model, surface profile, turbulence model

*Corresponding author / Sorumlu yazar. Tel.: 0414 318 37 86; e-mail / e-posta: oguzsimsek@harran.edu.tr

1. GİRİŞ

Barajlar akarsu yatağını tamamen kapatmak suretiyle inşa edilen hidrolik yapılardır. Barajlar çeşitli hidrolik elemanın bir araya gelmesiyle oluşturulan tesisler olup, farklı amaçlar için inşa edilirler. Suyun mimbada birikmesini sağlayan baraj gövdesi, baraj gölünden suyun cebri borulara alınmasını sağlayan su alma yapısı, taşkın anında fazla suların baraj yapısına ve çevresindeki yerleşim yerlerine zarar vermeden uzaklaştırılmasını sağlayan dolusavak yapısı ve dolusavaktan bırakılan suyun akarsu yatağında oyulmalara ve aşınmalara sebep olmasını önlemek amacıyla inşa edilen enerji kırıcı yapılar barajların temel elemanlarıdır. Barajların güvenliğini tehlikeye atan akım durumlarında, taşkın veya fazla suyun mimbada mansaba aktarılmasında görev alan dolusavaklar, kontrollü veya kontrolsüz olmak üzere iki farklı şekilde inşa edilirler. Kontrollü dolusavaklar, kullanıldığı kapak türüne göre; silindirik kapaklı, radyal kapaklı, düşey düz kapaklı, çatı kapaklı ve sektör kapaklı dolusavaklar şeklinde isimlendirilmektedir. Kapaklı dolu savaklar mimbadaki su seviyesini daha hassas ayarlama ve daha yüksek deşarj kapasitesine sahip oldukları için, kapaksız dolusavaklara kıyasla büyük avantajlara sahiptir [1-4].

Kapaklı dolusavakların tasarımında, taşkın debisinin büyüklüğü, kapakların dolusavak üzerinde mesnet noktasındaki kuvvetin belirlenmesi ve buna uygun tasarımın yapılması için kapağın ağırlığının yanında suyun kapağa uygulayacağı basınç kuvvetinin hesaplanması gerekmektedir. Diğer kapaklara kıyasla daha yüksek debi katsayısına sahip olan radyal kapak ile etkileşim halinde bulunan akıma ait akım çizgilerinin topolojisinin diğer kapaklar ile etkileşimde bulunan akımlara ait akım çizgisi topolojisine kıyasla daha düzenli olması ve ayrılma bölgesi - durma noktası bulunmamasından dolayı su kuvvetinin dengelenmesi yönünden büyük avantajlara sahiptir. Bu özelliklerinden dolayı radyal kapaklar oldukça sık tercih edilmektedir [2, 3].

Radyal kapaklara gelen kuvvetlerin belirlenmesi, kapak tasarımında ve mesnet noktasının dizayn edilmesinde en önemli parametredir. Radyal kapak üzerine gelen kuvvetin deneysel olarak belirlenmesi mümkün olmakla birlikte kapak modelinin yeniden dizayn edilmesi durumunda imalat bedeli yeniden ödenecek ve yeniden deneye tabi tutulması gerekmesi durumunda zaman ve insan gücü kaybına neden olacaktır. Literatürde farklı araştırmacılar tarafından radyal kapaklar ile ilgili çeşitli çalışmalar mevcuttur [5, 6]. Shahrokhnia ve Javan [7], radyal kapakların yönetimi için serbest ve batmış akım durumunda kapak açıklığı debi ilişkisini belirlemek üzere boyut analizi yapmışlardır. Bu hedefe ulaşmak için laboratuvarında deneyler gerçekleştirmişlerdir. Kapak açıklığının, mimba ve mansap su derinliğinin debiyi yani kritik derinliği nasıl etkileyeceğini sonuç denklemleriyle ortaya koymuşlardır. Bu denklemler, daha sonra radyal kapak kullanılarak elde edilen deneysel verilerle doğrulanmış ve konvansiyonel kapak denklemi ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda, batık veya serbest koşullar altında boyutsuz denklemler ile saha ve laboratuvar verileri arasında iyi bir uyum olduğu görülmüştür. Boyutsuz denklemlerin, deşarj katsayılarının doğru bir tahmini olmadığı durumlarda, geleneksel olanlardan daha genel ve doğru olduğunu belirtmişlerdir. Zeng ve ark. [8], enerji denkleminde türetilen üç debi formülünü ve radyal kapaklar için boyutsuz analizden türetilen bir deşarj formülü ile karşılaştırmışlardır. Deşarj formülünde yeni parametre tanımlama için en küçük kareler yöntemi kullanılmış ve deşarj formülleri için yeni debi katsayıları elde edilmiştir. Sonuçlardan, dört formülün ortalama nispi hatalarının sırasıyla %18,99, %34,26, %24,10 ve %21,11 olduğu görülmüş, ortalama nispi hataların parametre tanımlama tekniği kullanılarak sırasıyla %3,54, %3,54, %1,90 ve %1,09'a düşürülmüştür. Değerlerden de anlaşılacağı üzere doğruluğun büyük ölçüde arttığını göstermişlerdir. Çalışma neticesinde, parametre tanımlama yönteminin radyal kapakların altındaki debinin hesaplanmasının doğruluğunu geliştirmek için potansiyel bir uygulamaya sahip olabileceğini ve diğer kapaklar içinde uygulanabileceğini belirtmişlerdir.

Deneysel çalışmaların yanı sıra, gelişen bilgisayar teknolojisiyle birlikte sayısal modelleme tekniklerinin akım-yapı etkileşimi problemlerinin çözümünde oldukça yaygın kullanılmaktadır [9-14]. Sayısal model çalışmaları, fiziksel model çalışmalarına kıyasla ekonomik olması, zaman açısından daha az süre gerektirmesi ve iş gücüne gereksinim duymaması açısından avantajlara sahiptir. Ayrıca, sayısal modelleme sonucunda, deneysel ölçümlere göre akım ile ilgili daha fazla parametreye kolaylıkla ulaşılabilmekte ve farklı senaryolar için hızlı sonuçlar alınabilme imkânı sunmaktadır.

Bu çalışmada, radyal kapak kontrollü açık kanal akımının su yüzü profili farklı akım durumları için deneysel ve sayısal olarak elde edilmiştir. Akım profilinin sayısal olarak belirlenmesinde Akışkan Hacimleri Yöntemi kullanılmıştır. Deneysel ve farklı türbülans modeli kullanılarak elde edilen akım profilleri karşılaştırılmış, niceliksel karşılaştırma sonucunda deneysel verilere en yakın tahminde bulunan türbülans modeli sonuçlarından kapak üzerindeki basınç dağılımı, hız ve serbest su yüzü profilleri farklı akım koşullarında değerlendirilmiştir.

RADYAL KAPAK İLE ETKİLEŞİMDE BULUNAN AÇIK KANAL AKIMININ SAYISAL MODELLENMESİ

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Deneyler

Deneyler, Harran Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarı'nda Şekil 1'de görülen açık kanal modeli içinde gerçekleştirilmiştir. Açık kanalın yan duvarları ve tabanı camdan imal edilmiştir. Dikdörtgen kesitli açık kanalın boyutları 300x20x10 cm'dir. Ölçüm yapılan sistem, kapalı çevrim olarak çalışan bir sistem olup, laboratuvar kanalının mansap bölgesinde bulunan haznede su depolanarak, suyun sirkülasyonu bir santrifüj pompa ile hazneden kanal girişine, debi ayarı ise pompanın frekans ayarıyla yapılmaktadır. Deney modeli olarak, şekilde görüldüğü gibi radyal kapak açık kanal modelinin orta noktasına ($x=147,5$ cm) kanal tabanından kapak açıklığı 5,7 cm olacak şekilde yerleştirilmiştir. Akımın debisi kanal giriş bölgesinde boru üzerinde montaj edilen debimetreye ve su yüzü değişimleri limnometre kullanılarak ölçülmüştür.

Deneylerde kullanılan farklı debi durumlarında giriş kesitine ait akım özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Tabloda bulunan, h memba su derinliğini, V memba bölgesindeki akım ortalama hızını, Q akım debisini, Fr Froude sayısını ve Re açık kanaldaki akımın hidrolik yarıçapına bağlı Reynolds sayısını ifade etmektedir.

Tablo 1. Deneylerde kullanılan akım özellikleri

Durum	h (m)	V (m/s)	Q (m ³ /s)	Fr	Re
Durum 1	0,105	0,464	0,00486	0,457	55060,7
Durum 2	0,127	0,433	0,00549	0,388	54452,9
Durum 3	0,148	0,414	0,00613	0,344	54273,9



Şekil 1. Deney düzeneği

2.2. Temel Denklemler

Üç-boyutlu, sıkışmayan, türbülanslı açık kanal akımının hareketini idare eden temel eşitlikler, kütle ve momentumun korunumu (Reynolds-ortalama Navier-Stokes) eşitlikleri 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) eşitliklerinde u_i , x_i doğrultusundaki hız bileşeni, g yer çekimi ivmesi, p basınç, μ dinamik viskozite, ρ akışkan yoğunluğu ve τ_{ij} türbülans (Reynolds) gerilmeleridir. Bu çalışmaya konu olan üç boyutlu akımı idare eden yukarıdaki 4 adet eşitlik 10 adet bilinmeyen içermektedir, bunlar: üç hız bileşeni \bar{u}_i , basınç \bar{p} ve 6 bağımsız Reynolds gerilmesidir ($\rho \bar{u}_i \bar{u}_j$). Böylece, eşitlik sisteminin çözülebilmesi için türbülans gerilmelerinin tanımlanmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sorun, yukarıdaki zamansal-ortalama eşitliklerinin sayısal çözümü sürecinde, eşitliklerde yer alan türbülans gerilmelerinin uygun türbülans kapatma modelleriyle tanımlanmasını gerektirmektedir. Türbülans viskozitesinin doğrusal olarak ifade edilmesini esas alan Boussinesq yaklaşımına

O. ŞİMŞEK, M. PARMAKSIZ, V. GÜMÜŞ

göre (2) eşitliğindeki türbülans kayma gerilmeleri bünye eşitliği ile, sıkışmayan akımlar için aşağıdaki gibi verilmiştir:

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

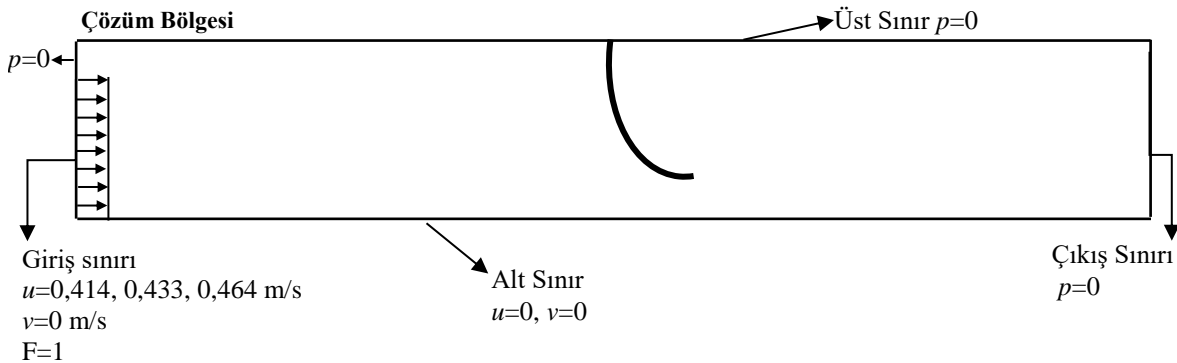
burada u_i' ve u_j' yatay ve düşey türbülans hız sapınçları, μ_t türbülans viskozitesi, k ($= \overline{u_i' u_i'}/2$) türbülans kinetik enerjisi ve δ_{ij} Kronecker deltasıdır.

Eşitlik (3)'te görülen μ_t türbülans viskozitesinin hesaplanmasında Reynolds Ortalamalı Navier Stokes denklemlerinin (RANS) çözümüne dayalı Renormalization Group $k-\varepsilon$ (RNG) [15], Shear Stress Transport $k-\omega$ (SST) [16] ve Reynolds Stress Model (RSM) [17, 18] türbülans kapatma modelleri kullanılmıştır. RNG türbülans modeli türbülans kinetik enerji (k) ve türbülans kinetik enerjinin kayıp miktarı (ε) denklemini; SST türbülans modeli türbülans kinetik enerji (k) ve türbülans kinetik enerjinin özgül kayıp miktarı (ω) denklemini; RSM türbülans modeli ise Reynolds gerilmelerini doğrudan çözerek süreklilik ve momentum denkleminin kapatılmasını yani çözümünü sağlamaktadır. RNG modelinin çözdüğü denklemler içerisinde şekil değiştirme tensörünün bulunmasından dolayı eğrisel yörüngeli, ikincil akımların bulunduğu ve ayrılmaların bulunduğu akımlarda iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir [15]. SST türbülans modeli katı sınıra yakın bölgede $k-\varepsilon$ denklemini, üst bölgede ise $k-\omega$ denklemini çözdüğü için hibrit model olarak geliştirilmiştir [16]. RSM türbülans modeli ise diğer türbülans modelleri gibi iki denklem çözerek Reynolds gerilmelerini hesaplamak yerine, Reynolds gerilmelerini doğrudan çözmektedir. Bu özelliğinden dolayı ikinci mertebeli kapatma modeli olarak da anılmaktadır. RSM türbülans modeli, diğer modellere kıyasla çözüm için daha fazla bilgisayar donanımı ve zaman gerektirmektedir [17, 18].

Akışkan hacimleri yöntemi su-hava ara kesitinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Bu yöntem su hava ara kesitindeki hücrelerin boş, kısmen ya da tam su ile dolu olduğunu belirlemektedir. Hacimsel doluluk oranını temsilen bir akışkan hacmi (F) tanımlanır ve $F=1$ 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 [19, 20].

2.3. Çözüm Bölgesi, Sınır ve Başlangıç Şartları

Radyal kapak kontrollü açık kanal akımının sayısal modellemesinde kullanılan çözüm bölgesi, sınır ve başlangıç şartları Şekil 2'de verilmiştir. Çözüm bölgesinin sol alt köşesi x-y koordinat sisteminin orijini olarak tanımlanmıştır. Şekil 2'de verilen çözüm bölgesinin üst sınırı, giriş sınırının üstündeki bölge ve çıkış bölgesi sınır şartı sıfır basınç ($p=0$), kanal tabanında ve radyal kapak yüzeyi sıfır hız sınır şartı, yani $u=v=0$ olarak tanımlanmıştır. Farklı akım durumlarında sayısal modellemede giriş sınır şartı olarak deneysel ölçümlerden elde edilen debiden hesaplanan yatay hız bileşeni Durum 1, Durum 2 ve Durum 3 için sırasıyla $u=0.464$, 0.433 ve 0.414 m/s ortalama akım hızı değerleri ve tüm durumlar için düşey hız bileşeni ise $v=0$ kullanılmıştır. 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.



Şekil 2. Sayısal çözüm bölgesi ve sınır şartları

Sayısal modellemede kullanılan tüm türbülans modelleri için zaman adımı $\Delta t=0.001$ s olarak seçilmiş ve sayısal çözümün kararlı hale geldiği 50s kadar çözüm yapılmıştır. (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. Sonlu hacimler yöntemini esas alan hesaplamalı akışkanlar

RADYAL KAPAK İLE ETKİLEŞİMDE BULUNAN AÇIK KANAL AKIMININ SAYISAL MODELLENMESİ

dinamiği problemlerini çözmek için ANSYS firması tarafından hazırlanmış olan Fluent modülü, karmaşık akımları modelleme başarısı ve Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemlerinin çözümünde sunmuş olduğu farklı türbülans modelleri ile öne çıkmaktadır.

2.4. Hesaplama Ağı

Hesaplama ağının sayısal modelleme sonuçları üzerinde etkili olduğu bilinmektedir. Radyal kapak ile etkileşim halinde bulunan akımın yapısına uygun hesaplama ağının oluşturulması önem arz etmektedir. Eski tecrübelere bağlı olarak akımın temasta bulunduğu kanal tabanına ve radyal kapak yapısına (katı sınırlara) doğru hesaplama ağı sıklaştırılması yapılmış ve bölgedeki hızda meydana gelen hızlı değişimlerin daha hassas belirlenmesi sağlanmıştır. Farklı akım koşulları altında giriş sınırının yüksekliğinin farklı olmasından dolayı ve aynı hesaplama ağının bütün akım koşullarında kullanılmasını sağlamak için 3 farklı akım durumuna ait giriş şartı yüksekliğine bağlı hesaplama ağı alt bölgeye ayrılmıştır. Şekil 3'te görüldüğü gibi, çözüm bölgesi 8 alt bölgeye ayrılmış ve dikdörtgen elemanlardan oluşan hesaplama ağı oluşturulmuştur.

Bu çalışmadaki sayısal hesaplamalarda tasarlanan hesaplama ağının etkisini incelemek ve çözümü ağıdan bağımsız hale getirmek için ASME (American Society of Mechanical Engineering) tarafından önerilen [21] Ağ Yakınsama İndeksi (Grid Convergence Index-GCI) yöntemi kullanılmıştır. GCI, model çözümlerinin sayısal ayrıklaşmalara duyarlılığını test etmek amacıyla ilk olarak Roache [22] tarafından önerilmiştir. Bu yöntem temelde, farklı çözümlerin karşılaştırılmasını içeren, genelleştirilmiş Richardson Ekstrapolasyon yaklaşımına dayanmaktadır. Bu yöntemde, çözüm ağından hesaplanan sayısal bulguların yakınsamasının tespiti ve sonuçlardaki ağ geometrisine bağlı belirsizliğin tahmini için en az üç farklı yoğunluktaki (kaba, orta ve ince) hesaplama ağına ihtiyaç duyulmaktadır [23]. Bu yöntemde göre:

$$d_3 < d_2 < d_1 \tag{4}$$

$$e_{12} = u_1 - u_2, e_{23} = u_2 - u_3, r_{12} = \frac{d_1}{d_2}, r_{23} = \frac{d_2}{d_3} \tag{5}$$

$$p = \frac{1}{\ln(r_{23})} \ln \left(\frac{(r_{23}^p - 1)e_{12}}{(r_{12}^p - 1)e_{23}} \right) \tag{6}$$

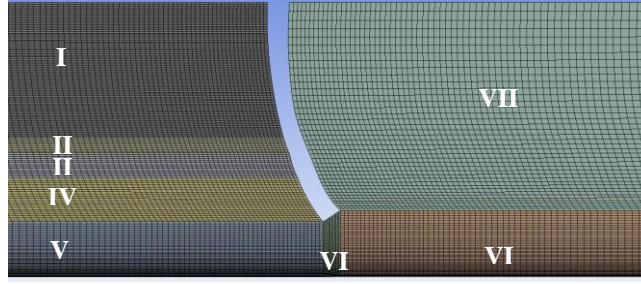
$$E_{23} = \frac{u_3 - u_2}{u_3} \tag{7}$$

$$GCI_{23}^{incc} = F_s \frac{|E_{23}|}{r_{23}^p - 1} \tag{8}$$

ifadeleri ile verilen değerler belirlenir. Eşitlik (5)'te bulunan u_1 , d_1 aralığıyla tanımlanan kaba hassasiyetli ağ ile elde edilen hız değeri, u_2 , d_2 aralığıyla tanımlanan orta hassasiyetli ağ ile elde edilen hız değeri u_3 , d_3 aralığıyla tanımlanan hassas ağ ile elde edilen hız değeri, p : doğruluk mertebesi, F_s güvenlik faktörüdür. Roache [22]'e göre r_{23} , $r_{12} \geq 1.10$ olmalıdır. Üç veya daha fazla ağ yapısı için güvenlik faktörü F_s , 1,25 olarak önerilmektedir [24]. Yukarıda ifade edilen GCI_{23}^{incc} değerinin %2'nin altında olması durumunda, ağıdan kaynaklı sayısal hesaplama bulgularının kabul edilebilir hata sınırlarında yakınsadığı ve hesaplama hassasiyetinin ağ yoğunluğundan bağımsızlaştığı kanaatine varılır. Elde edilen ağ yakınsama indeksi sonuçlarından, sayısal model sonuçlarının ağ yapısından etkilenmediği diğer bir ifadeyle sonuçların ağ yapısından bağımsızlaştığı kanaatine ulaşılmış ve Şekil 3'te verilen Ağ 3 yapısı modellemelerde kullanılmıştır. Ağ-3 sistemi için alt bölgelerde bulunan eleman sayıları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Alt bölgelere ait eleman sayıları (Ağ 3)

Bölge	Eleman Sayısı	Bölge	Eleman Sayısı
I	80x150	V	50x150
II	10x150	VI	50x12
III	12x150	VII	50x200
IV	20x150	VIII	40x200



Şekil 3. Sayısal modelde kullanılan hesaplama ağı ve alt bölgeleri

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Deneysel ve Sayısal Su Yüzü Profilleri

Radyal kapak kontrollü açık kanal akımının sayısal olarak modellenmesinde kullanılan RNG, SST ve RSM modellerinin su yüzü profillerini tahmin etmedeki başarıları sıralamalarının belirlenmesinde bağlamında, farklı akım durumlarına ait su yüzü profilleri için Eşitlik (9)'dan hesaplanan Ortalama Karesel Hata (OKH) ve Eşitlik (10)'dan hesaplanan Ortalama Mutlak Göreceli Hata (OMGH) değerleri niceliksel ölçüt olarak kullanılmıştır.

$$OKH = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (v_d - v_h)^2 \quad (9)$$

$$OMGH = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left| \frac{v_d - v_h}{v_d} \right| \times 100 \quad (10)$$

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

Tablo 3'te farklı akım durumunda RNG, SST ve RSM modelleri kullanılarak elde edilen sayısal su yüzü profillerinin deneysel ölçümler ile karşılaştırılarak elde edilen OKH ve OMGH değerlerini sunulmuştur. Tablonun son iki sütununda Durum 1, Durum 2 ve Durum 3 için elde edilen OKH ve OMGH değerlerinin ortalama değerlerini göstermektedir. Değerler üzerinde parantez içerisinde verilen rakamlar türbülans modelinin başarı sıralamasını göstermektedir. Tabloda verilen değerler incelendiğinde Durum1, Durum 2 ve Durum 3 akım koşullarının hepsinde en düşük OKH ve OMGH değerleri SST türbülans modeli ile elde edilmiştir. Bu sonuçtan, deneysel verilere daha yakın tahminde bulunduğu görülen SST türbülans kapatma modelinin radyal kapak kontrollü açık kanal akımının sayısal olarak modellenmesinde RNG ve RSM modellerine kıyasla az da olsa daha başarılı olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, ortalama ve Durum 1, Durum 2 ve Durum 3 için elde edilen OKH ve OMGH değerlerinden türbülans modellerinin başarı sırasının SST, RSM ve RNG şeklinde olduğu görülmektedir. Tablodaki değerler incelendiğinde genel olarak aynı akım durumunda farklı türbülans modeli kullanılarak elde edilen OKH ve OMGH değerleri arasında büyük farklılıklar bulunmamaktadır. Buradan, bu çalışmada kullanılan türbülans modellerinin hepsinin radyal kapak kontrollü açık kanal akımının serbest su yüzü profilini belirlemede güvenle kullanılacağı anlaşılmaktadır.

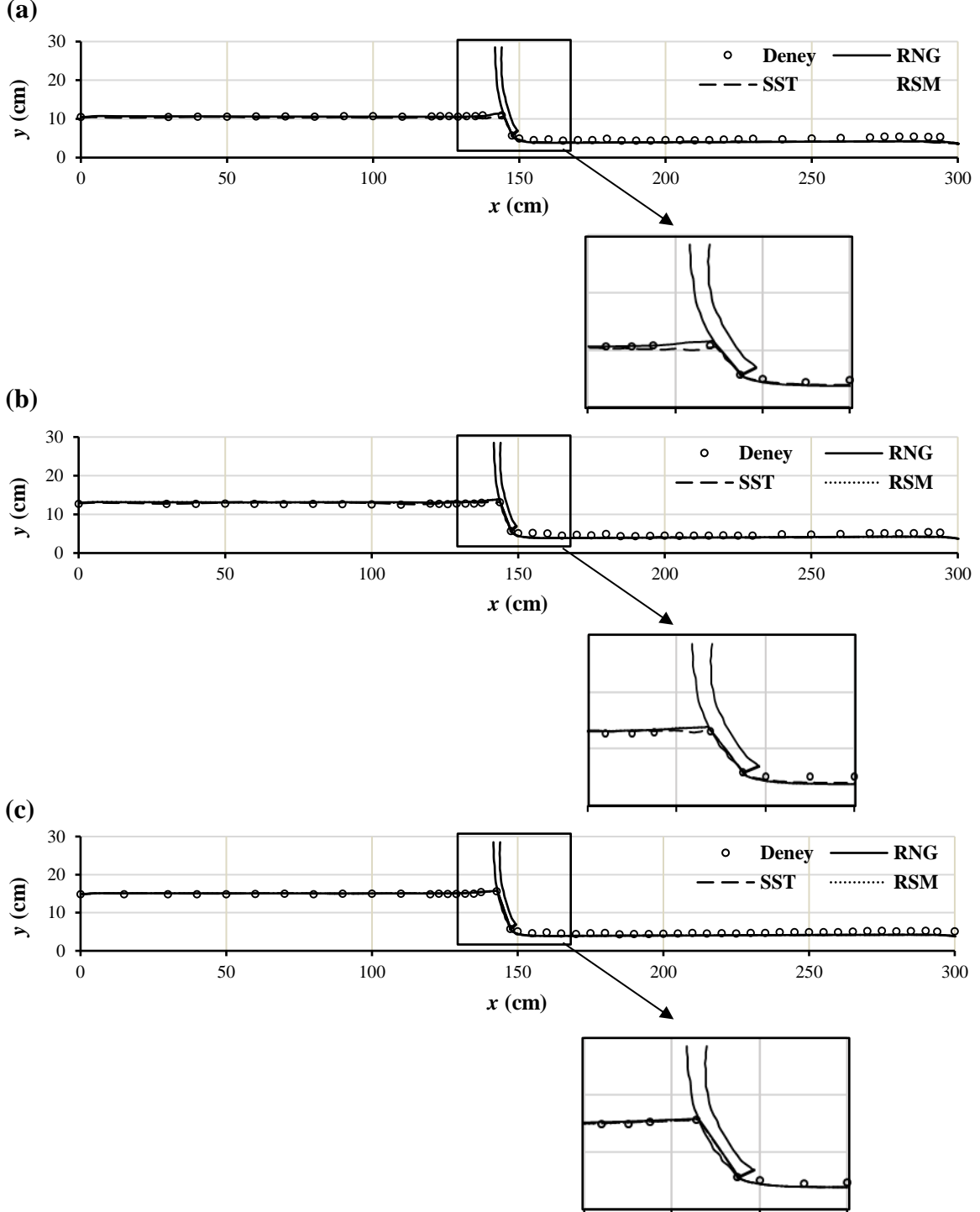
Tablo 3. Su yüzü profilleri için farklı türbülans modelleri ile hesaplanan OKH (m^2/s^2) ve OMGH (%) değerleri

	Durum 1		Durum 2		Durum 3		Ortalama	
	OKH	OMGH	OKH	OMGH	OKH	OMGH	OKH	OMGH
RNG	0,341 ⁽³⁾	8,512 ⁽³⁾	0,388 ⁽³⁾	9,218 ⁽³⁾	0,261 ⁽³⁾	7,669 ⁽³⁾	0,330 ⁽³⁾	8,467 ⁽³⁾
SST	0,335⁽¹⁾	8,508⁽¹⁾	0,332⁽¹⁾	8,543⁽¹⁾	0,251⁽¹⁾	7,504⁽¹⁾	0,306⁽¹⁾	8,185⁽¹⁾
RSM	0,339 ⁽²⁾	8,510 ⁽²⁾	0,384 ⁽²⁾	9,143 ⁽²⁾	0,254 ⁽²⁾	7,557 ⁽²⁾	0,326 ⁽²⁾	8,400 ⁽²⁾

Şekil 4 a, b ve c'de sırasıyla Durum 1, Durum 2 ve Durum 3 için RNG, SST ve RSM türbülans modelleri kullanılarak elde edilen sayısal su yüzü profilleri deneysel ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Şekillerden de açıkça

RADYAL KAPAK İLE ETKİLEŞİMDE BULUNAN AÇIK KANAL AKIMININ SAYISAL MODELLENMESİ

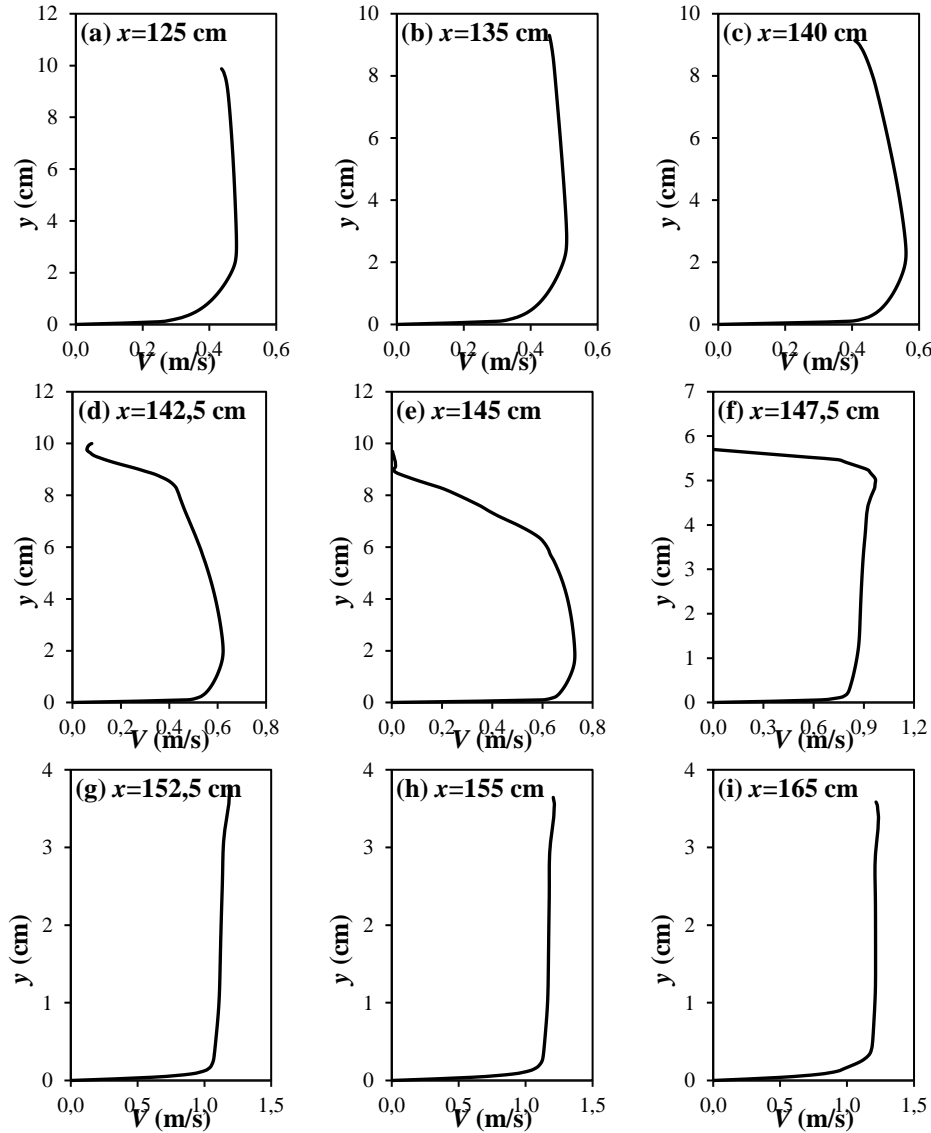
görülebileceği gibi kullanılan türbülans modellerinden elde edilen su yüzü profilleri arasında bariz farklılıklar bulunmamaktadır. Bu durum Tablo 2’de verilen değerlerle de örtüşmektedir. Radyal kapağın memba bölgesinde oluşan durma noktasının belirlenmesinde türbülans modelleri arasında çok az da olsa farklılıklar bulunduğu söylenebilir. Ayrıca akım hızının mansap bölgesine kıyasla daha az olduğu memba bölgesinde türbülans modelleri ile elde edilen akım profillerinin mansap bölgesine göre deneysel ölçümlere daha yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 4. Deneysel ve sayısal su yüzü profilleri; a) Durum 1, b) Durum 2, c) Durum 3

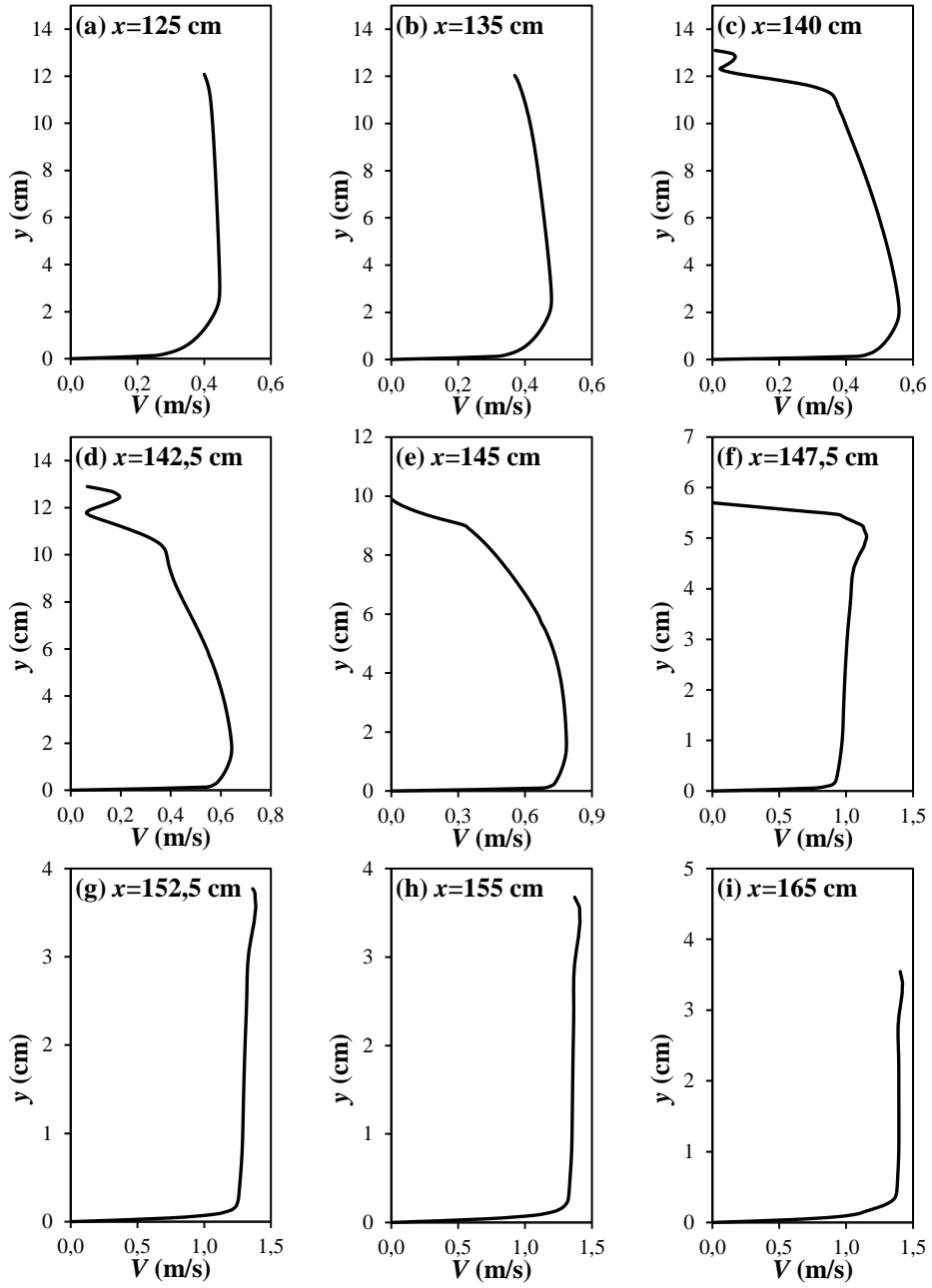
3.2. Sayısal Hız Profilleri

Şekil 5, 6 ve 7’de sırasıyla Durum 1, Durum 2 ve Durum 3 akım koşullarında SST türbülans modelleri ile elde edilen hız profillerinin kanal boyunca değişimleri verilmiştir. Farklı debi durumunda $x=125$ cm kesitte elde edilen hız profilleri incelendiğinde her üç akım durumunda da bu kesitte tipik bir açık kanal akımının söz konusu olduğu söylenebilir. Diğer bir deyişle radyal kapağın akım alanı üzerindeki etkisinin varlığından bu kesitte söz etmek mümkün değildir. Kapak yapısına doğru yaklaşıldıkça ($x=125$ cm kesitinden $x=145$ cm kesitine) radyal kapağın akım alanı üzerindeki etkisi açıkça görülmektedir. $x=135, 140, 142,5$ ve 145 cm kesitlerinde elde edilen hız profillerinden, radyal kapaktan kaynaklı akım alanındaki daralmaya bağlı olarak kanal tabanına yakın bölgedeki hız değerinin arttığı, su yüzüne yakın bölgede ise hız değerinin azaldığı söylenebilir. Debinin artmasıyla birlikte radyal kapağın akım üzerindeki etkisinin de arttığı hız profillerinden anlaşılmaktadır. Akım debisinin artması durumunda akım çizgilerinde meydana gelen eğriselliğin artışı hız profillerinden de söylenebilir. Kapak mansap bölgesinde ele alınan $x=152,5, 155$ ve 165 cm kesitlerinde kritik üstü akım koşullarının oluştuğu, sınır tabakasının gelişme gösterdiği ve kalınlığının arttığı görülmektedir. Kapak mansap bölgesinden kanal sonuna doğru ilerledikçe kanal tabanına yakın bölgede elde edilen hız değerinin büyüdüğü ve su derinliğinin azaldığı hız profillerinden görülmektedir. Debinin artmasıyla birlikte tüm kesitlerde meydana gelen hız değerleri de artış göstermektedir.



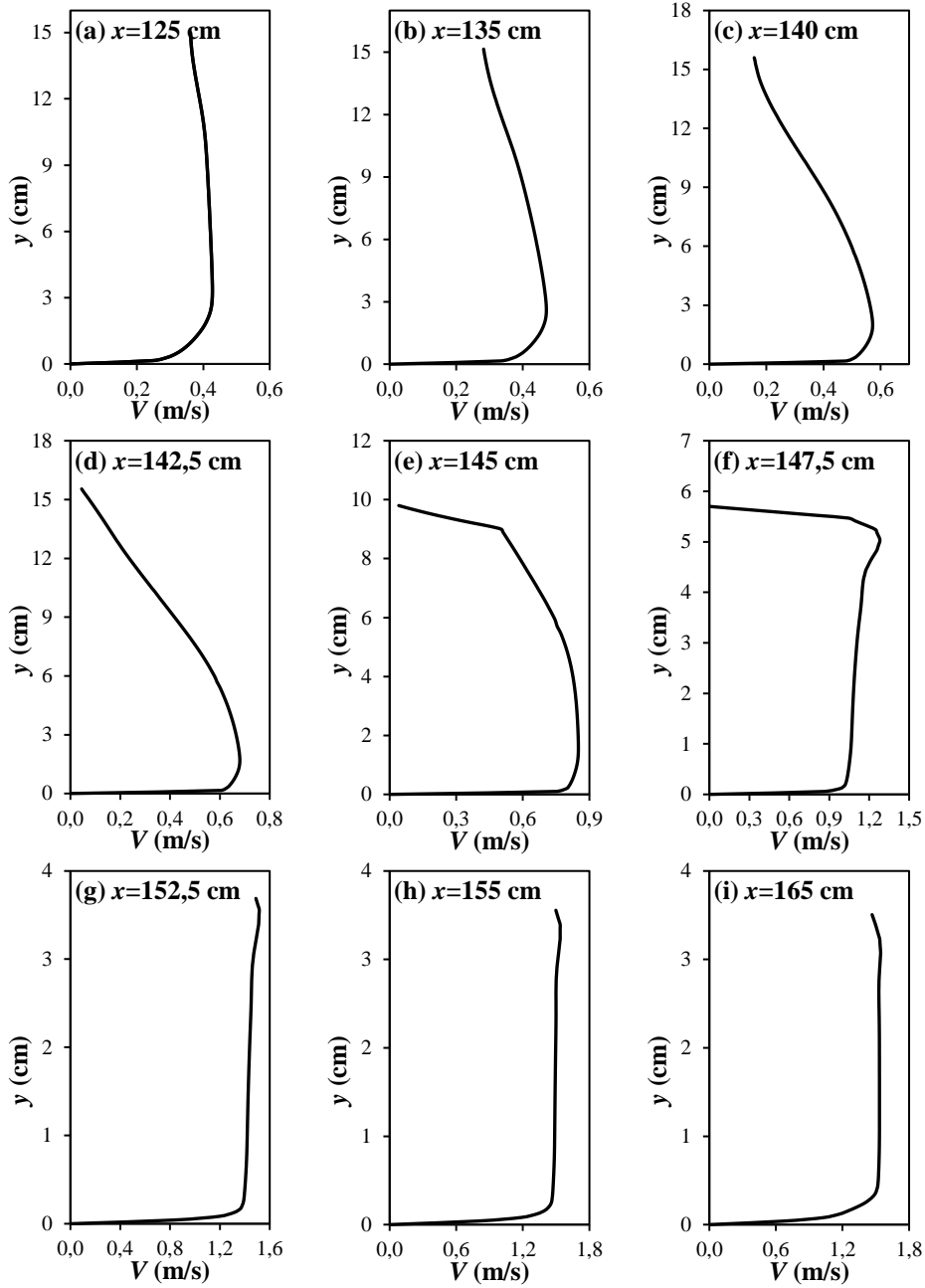
Şekil 5. Durum 1 için SST türbülans modeliyle elde edilen hız profilleri

RADYAL KAPAK İLE ETKİLEŞİMDE BULUNAN AÇIK KANAL AKIMININ SAYISAL MODELLENMESİ



Şekil 6. Durum 2 için SST türbülans modeliyle elde edilen hız profilleri

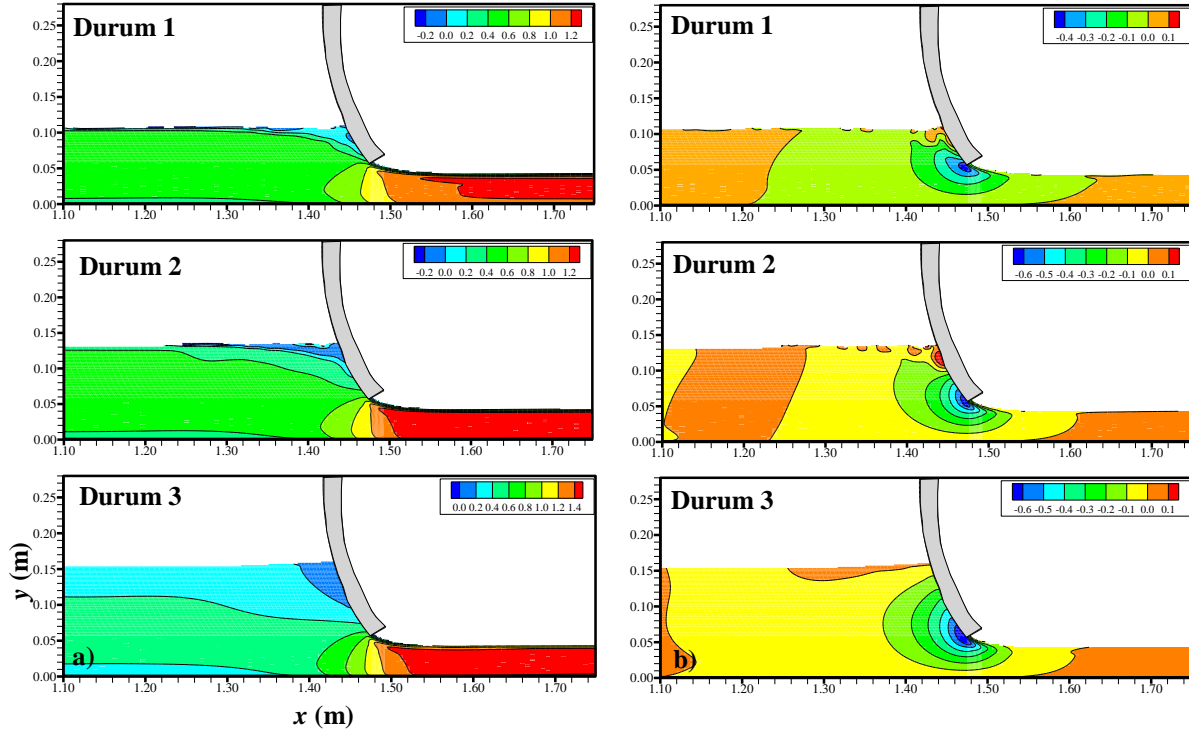
O. ŞİMŞEK, M. PARMAKSIZ, V. GÜMÜŞ



Şekil 7. Durum 3 için SST türbülans modeliyle elde edilen hız profilleri

Durum 1, Durum 2 ve Durum 3 için SST türbülans modeli kullanılarak elde edilen yatay (u) ve düşey (v) hız bileşenlerinin kontörleri Şekil 8'de sunulmuştur. Yatay hız bileşenine ait hız kontörleri incelendiğinde, debinin artmasıyla mansap bölgesinde meydana gelen en büyük hız değerinin oluştuğu nokta radyal kapağa yaklaştığı görülmektedir. Ayrıca, beklenildiği gibi Durum 3 koşullarında ele alınan diğer akım koşullarına kıyasla daha büyük hız değerleri elde edilmiştir. Düşey hız bileşenine ait kontörler incelendiğinde debinin artmasıyla birlikte radyal kapak bölgesinde negatif hız değerlerinin de arttığı görülmektedir. Düşey hız bileşeni negatif maksimum değerine kapak memba bölgesinde, kapak uç noktasında ulaşmaktadır. Debinin artmasıyla birlikte kapak membasında, v hızının negatif olduğu bölgenin büyüklüğü artmaktadır.

RADYAL KAPAK İLE ETKİLEŞİMDE BULUNAN AÇIK KANAL AKIMININ SAYISAL MODELLENMESİ



Şekil 8. SST ile elde edilen hız kontörleri a) yatay (u) b) düşey hız (v) bileşeni

3.3. Hesaplanan Hız Vektörleri

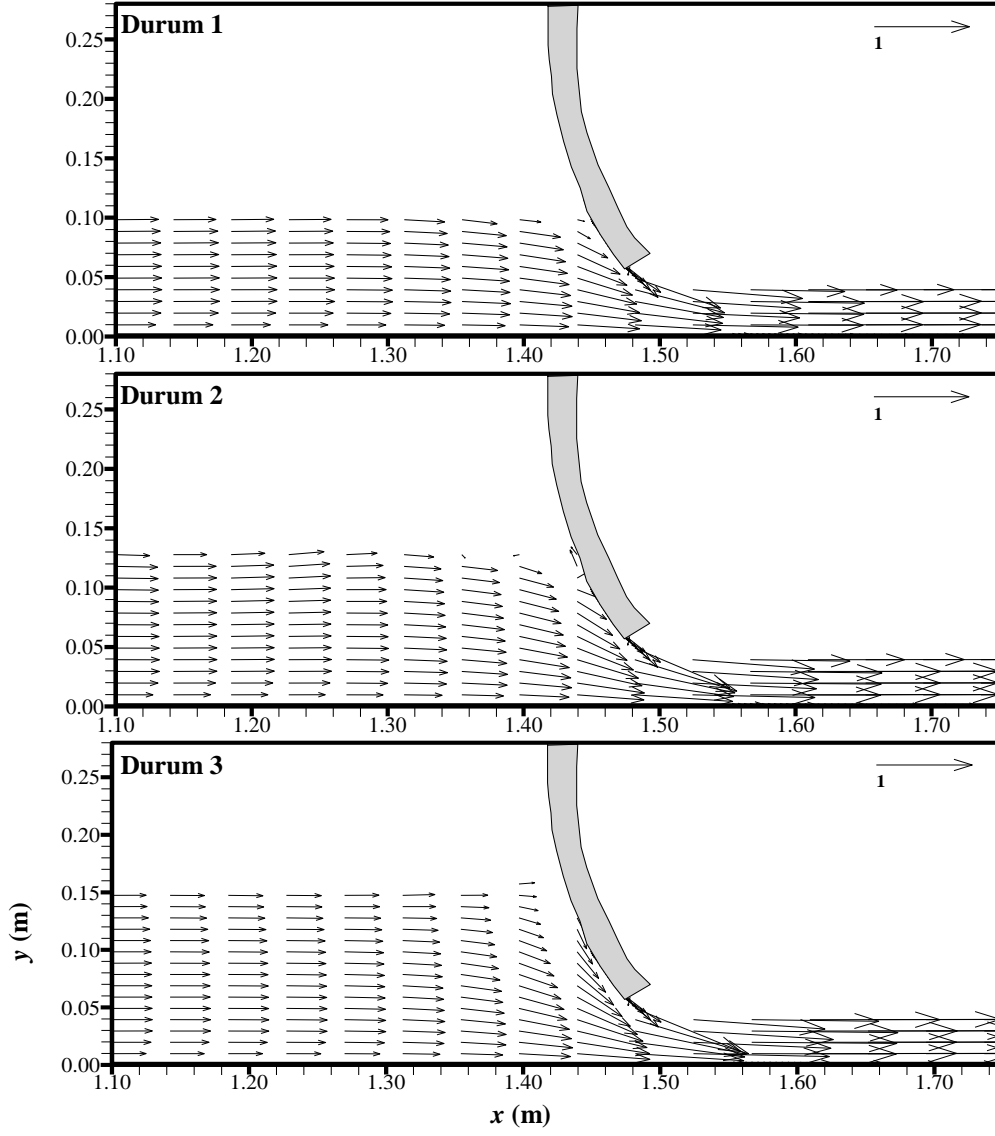
SST türbülans modeli kullanılarak Durum 1, Durum 2 ve Durum 3 için elde edilen akım vektörlerinin deseni Şekil 9'da verilmiştir. Debinin artmasıyla birlikte radyal kapak memba bölgesinde hız vektörlerinin daha fazla eğrisellik gösterdiği şekillerden söylenebilmektedir. Bunun yanı sıra, akım debisinin artmasıyla birlikte radyal kapağın hız alanı üzerindeki etkisinin attığı radyal kapak membasında su yüzüne yakın bölgedeki vektörlerin büyüklüğünden anlaşılmaktadır. Radyal kapak membasında meydana gelen durma noktasının oluşumu şekillerden görülmektedir. Ayrıca, her üç akım durumu içinde radyal kapağın memba bölgesine göre akım hızının daha yüksek olduğu mansap bölgesinde hız vektörleri daha büyük olmakta ve birbirine daha yaklaşmaktadır.

3.4. Sayısal Basınç Dağılımları

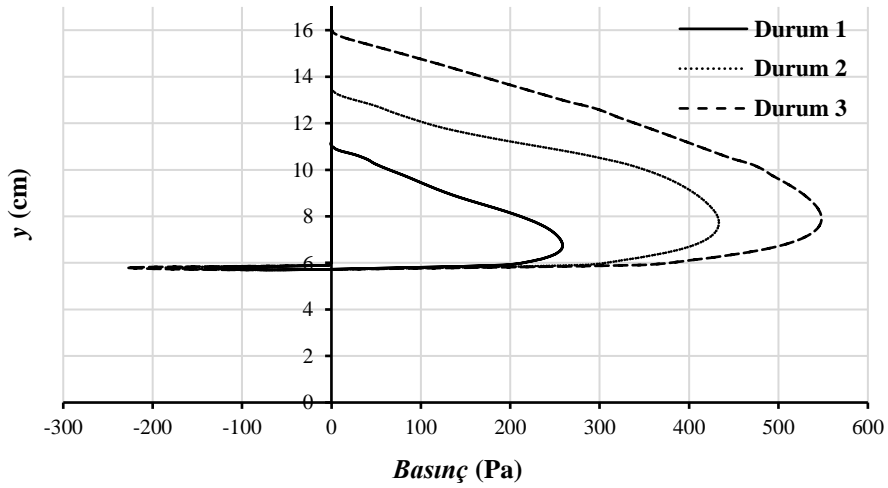
SST türbülans modeli kullanılarak Durum 1, Durum 2 ve Durum 3 için radyal kapak üzerindeki basınç dağılımları Şekil 10'da sunulmuştur. Debinin diğer akım koşullarına göre daha büyük olduğu Durum 3'de memba su derinliğinin büyük olmasından dolayı radyal kapak üzerinde daha büyük basınç elde edilmiştir. Basınç dağılımları incelendiğinde hidrostatik basınç dağılımdan farklı olduğu açıkça söylenebilir. Bu dağılımın, Şekil 5, 6 ve 7'de $x=147,5$ cm kesitinde elde edilen hız profilleri de uyumlu olduğu anlaşılmaktadır. Radyal kapak uç noktasında ise negatif basınçların olduğu görülmektedir. Radyal kapak üzerinde elde edilen basınçların maksimum ve minimum değerleri Tablo 4'te verilmiştir. Tablodaki değerler incelendiğinde kapak üzerindeki basınç maksimum ve minimum değerlerinin en büyük değerlerine Durum 3 akım koşulunda sahip olduğu görülmektedir. Durum 1 ve Durum 3 koşulları kıyaslandığında, akım derinliğinin (Durum 1 için 11 cm, Durum 3 için 16 cm) yaklaşık olarak 5 cm artmasına karşılık maksimum basınç değeri 2 katından daha fazla artış olmuştur. Kapak üzerine gelen basınçlar kapak tasarımında en önemli parametredir. Kapak yapısının tasarımının ve mesnet noktasının dizayn edilmesinde hayati öneme sahiptir. Dolusavak tasarım debilerinin doğru belirlenerek, kapak üzerindeki kuvvetlerin doğru olarak belirlenmesi sonrasında telafi edilemeyecek hatalarının önüne geçmeyi sağlayacak ve yapılan yatırımların etkinliğini arttıracaktır.

Radyal kapak için elde edilen debi katsayısı değerleri Durum 1, Durum 2 ve Durum 3 için sırasıyla 0,595, 0,611 ve 0,631 olarak hesaplanmıştır. Değerlerden de anlaşılacağı üzere debinin artmasıyla birlikte radyal kapağa ait debi katsayısı değerleri artmaktadır.

O. ŞİMŞEK, M. PARMAKSIZ, V. GÜMÜŞ



Şekil 9. SST türbülans modeliyle kullanılarak elde akım çizgilerinin deseni



Şekil 10. SST türbülans modeliyle kullanılarak radyal kapak üzerindeki basınç dağılımları

*RADYAL KAPAK İLE ETKİLEŞİMDE BULUNAN AÇIK KANAL AKIMININ SAYISAL MODELLENMESİ***Tablo 4.** Radyal kapak üzerinde hesaplanan minimum ve maksimum basınç değerleri (Pa)

	Durum 1	Durum 2	Durum 3
Mak. Basınç	258,53	433,20	548,21
Min. Basınç	-138,22	-184,90	-228,20

3.5. Tartışma

Yapılan çalışmada radyal kapak kontrollü açık kanal akımının modellenmesinde en başarılı türbülans modelinin belirlenmesi için deneysel su yüzü profilleri, sayısal olarak elde edilmiş profiller ile karşılaştırılmıştır. Türbülans modelinin model performansının belirlenmesinde su yüzü profilleri farklı çalışmalarda da kullanılmaktadır [25-27]. Performans kriteri olarak OKH ve OMGH değerlerine göre en başarılı türbülans modelinin SST modeli olarak belirlenmiştir. Akoz ve ark. [28], çalışmalarında, farklı oranlarda gömülü ve farklı giriş şartlarına silindir etrafındaki akımın modellenmesinde SST modeli başarılı bulunmuştur. Buna göre, radyal kapak gibi eğrisel bir akım etkisinin bulunduğu durumlarda SST modeli başarılı olmaktadır. Bu çalışmada elde edilen bulguların bu anlamda literatür ile uyumlu olduğu görülmüştür. Sayısal olarak en başarılı türbülans modeli olan SST sonuçlarına göre, mansap bölgesinde akım geliştikçe akım derinliğinin azaldığı ve buna bağlı olarak akım hızının arttığı görülmüştür. Diğer durumlarda da benzer bir durum meydana gelmiştir. Yine sayısal bulgulara göre, radyal kapağın altından geçen akımda ($x=147,5$ cm) eğri yörüngeli bir akım profili meydana gelmiştir. Bundan dolayı, SST modelinin eğri yörüngeli akımı da modellemede başarılı olduğu söylenebilir. Ele alınan üç farklı durum için debinin artmasıyla birlikte radyal kapağa ait debi katsayıları ve kapağa gelen basın kuvvetlerinin de beklendiği gibi arttığı görülmüştür.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, ANSYS- Fluent paket programı yardımıyla radyal kapak kontrollü açık kanal akımının hareketini idare eden temel denklemler, sonlu hacimler yöntemiyle çözülmüştür. Akımın yapısından dolayı sayısal modellemeler iki boyutlu yapılmış ve akım profilinin sayısal olarak belirlenmesinde akışkan hacimleri yöntemi kullanılmıştır. Farklı akım durumlarına ait deneysel su yüzü profilleri ile RNG, SST ve RSM türbülans modelleri kullanılarak elde edilen su yüzü profillerinin karşılaştırılmasından, SST türbülans modelinin diğer modellere kıyasla deneysel ölçümlere daha yakın tahminde bulunduğu görülmüştür. Radyal kapağın akımı etkilediği bölgede, elde edilen sayısal hız profillerinden akımın debisinin artmasına paralel olarak hız profillerindeki eğrisellik etkisinin de arttığı belirlenmiştir. Sayısal olarak elde edilen x ve y doğrultudaki hız bileşenlerine ait kontörlerden u hızının pozitif maksimum değerine kapak mansap bölgesinde ve v hızının ise maksimum negatif değerine radyal kapak memba uç noktasında ulaştığı tespit edilmiştir. Radyal kapak üzerinde elde edilen basınç değerlerinden su derinliğinin az miktarda artmasına karşılık kontrol kapağı üzerindeki basınç değerindeki artışın çok büyük olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, radyal kapak membasında kapağa yakın bölgede akım çizgilerinin ve hız vektörlerinin radyal kapak yapısına uyarlanmış eğrisellik gösterdiği belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan, deneysel ölçümlere göre daha ekonomik ve zaman açısından daha az masrafsız olan sayısal modelleme yöntemlerinin radyal kapak kontrollü açık kanal akımı gibi yapı-akım etkileşimi problemlerinde güvenle kullanılabileceği görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] TELKIRAN, M.N., AKÖZ, M.S., ŞİMŞEK, O., SOYDAN, N. G., “Dolusavak Üzerinden Geçen Akımın Sayısal Analizi: Mersin Dereyurt Göleti Dolusavak Örneği”, Ç. Ü. Mühendislik Fakültesi Dergisi, 34(1), 155-167, 2019.
- [2] ŞİMŞEK, O., “Enerji Kırıcı Yapı Üzerindeki Akımın Sayısal ve Deneysel Analizi”, Ç. Ü. Doktora Tezi, Adana, 247, 2017.
- [3] GÜMÜŞ, V., “Dolusavak Akımının Sayısal Modellemesi”, Ç. Ü. Doktora Tezi, Adana, 129, 2014.
- [4] BERKÜN, M., “Su Yapıları”, Birsen Yayınevi, İstanbul, Türkiye, 2007.
- [5] ALI, A.M., MOHAMED, Y.A., “Effect of Stilling Basin Shape on The Hydraulic Characteristics of The Flow Downstream Radial Gates”, Alexandria Engineering Journal, 49(4), 393-400, 2010.

O. ŞİMŞEK, M. PARMAKSIZ, V. GÜMÜŞ

- [6] CLEMMENS, A. J., STRELKOFF, T. S., REPLOGLE, J. A., “Calibration of Submerged Radial Gates”, *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(9), 680-687, 2003.
- [7] SHAHROKHANIA, M. A., JAVAN, M., “Dimensionless Stage–Discharge Relationship in Radial Gates”, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 132(2), 180-184, 2006.
- [8] ZHENG, H., LEI, X., SHANG, Y., CAI, S., KONG, L., WANG, H., “Parameter Identification for Discharge Formulas of Radial Gates Based on Measured Data”, *Flow Measurement and Instrumentation*, 58, 62-73, 2017.
- [9] SOYDAN, N. G., ŞİMŞEK, O., AKÖZ, M. S., “Köprü Ayağı Etrafındaki Türbülanslı Akımın Sayısal ve Deneysel Analizi”, *Politeknik Dergisi*, 21(1), 137-147, 2018.
- [10] AKÖZ, M. S., SOYDAN, N. G., ŞİMŞEK, O., “Kritik Üstü Açık Kanal Akımının Detached Eddy ve Large Eddy Simülasyon ile Sayısal Modellenmesi”, *G. Ü. Fen Bilimleri Dergisi Part: C, Tasarım ve Teknoloji*, 4(4), 213-224, 2016.
- [11] ŞİMŞEK, O., SOYDAN, N.G., GÜMÜŞ, V., AKÖZ, M.S., KIRKGÖZ, M.S., “Ani Bir Düşüdeki B-Tipi Hidrolik Sıçramanın Sayısal Modellenmesi”, *İMO Teknik Dergi*, 26(4), 7215-7240, 2015.
- [12] ŞİMŞEK, O., AKÖZ, M.S., SOYDAN, N.G., “Numerical Validation of Open Channel Flow over a Curvilinear Broad-Crested Weir”, *Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal*, 16(6), 364-378, 2016.
- [13] GÜMÜŞ, V., ŞİMŞEK, O., SOYDAN, N. G., AKÖZ, M.S., KIRKGÖZ, M.S., “Numerical Modeling of Submerged Hydraulic Jump from a Sluice Gate”, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(1), 04015037, 2015.
- [14] KIRKGOZ, M. S., AKÖZ, M. S., ÖNER, A.A., “Numerical Modeling of Flow over a Chute Spillway”, *Journal of Hydraulic Research*, 47(6), 790-797, 2009.
- [15] YAKHOT, V., ORSZAG, S. A., “Renormalization-Group Analysis of Turbulence”. *Physical Review Letters*, 57(14), 1722-1724, 1986.
- [16] MENTER, F. R., “Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications”, *AIAA Journal*, 32 (8), 1598–1605, 1994.
- [17] LAUNDER, B.E., SPALDING, D., “Lectures in Mathematical Models of Turbulence”, London. Academic Press, 1972.
- [18] LAUNDER, B.E., REECE, G.J., RODI, W., “Progress in the Development of a Reynolds-Stress Turbulence Closure”, *Journal of Fluid Mechanics*, 68(3), 537–566, 1975.
- [19] HIRT, C.W., NICHOLS, B.D., “Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries”, *Journal of Computational Physics*, 39(1), 201-225, 1981.
- [20] ANSYS, “FLUENT Theory Guide”. USA: ANSYS Inc., 2012.
- [21] ÇELİK, İ.B., GHIA, U., ROACHE, P.J., FREITAS, C.J., “Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty due to Discretization in CFD Applications”, *Journal of Fluids Engineering-Transactions of the ASME*, 130(7), 2008.
- [22] ROACHE, P. J., “Perspective: A Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies”, *Transactions-American Society of Mechanical Engineers Journal of Fluids Engineering*, 116, 405-405, 1994.
- [23] ROACHE, P. J., “Quantification of Uncertainty in Computational Fluid Dynamics”, *Annual review of fluid Mechanics*, 29(1), 123-160, 1997.
- [24] ROACHE, P. J., “Verification of codes and calculations”, *AIAA Journal*, 36(5), 696-702, 1998.
- [25] SOYDAN, N. G., AKÖZ, M. S., ŞİMŞEK, O., GÜMÜŞ, V., “Trapez Kesitli Geniş Başlıklı Savak Akımının k-ε Tabanlı Türbülans Modelleri ile Sayısal Modellenmesi”, *Ç. Ü. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27(2), 47-58, 2012.
- [26] ŞİMŞEK, O., AKÖZ, M.S., GÜMÜŞ, V., “Eğrisel Geniş Başlıklı Savak Üzerinden Geçen Açık Kanal Akımının Deneysel ve Teorik Analizi”, *Ç. Ü. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 26(2), 47-55, 2011.
- [27] GÜMÜŞ, V., ŞİMŞEK, O., “Eğimli Açık Kanal Akımının Farklı Türbülans Modelleri ile Sayısal Modellenmesi”, *Ç. Ü. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30(2), 41-54, 2015.
- [28] AKÖZ, M. S., ŞİMŞEK, O., SOYDAN, N. G., “Numerical Modeling of Interaction of Turbulent Flow with a Buried Circular Cylinder on a Plane Surface”, *Teknik Dergi*, 30(6), 2019.