

GENİŞ BAŞLIKLİ SAVAK ETRAFINDAKİ AKIMIN İNCELENMESİ

Mücella İLKENTAPAR (ORCID: 0000-0001-8600-0105)*

Ahmet Alper ÖNER (ORCID: 0000-0001-9473-1864)

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye

Geliş / Received: 10.04.2017

Düzeltilmelerin gelişi / Received in revised form: 22.05.2017

Kabul / Accepted: 22.05.2017

ÖZ

Savaklar hidrolik mühendisleri tarafından debi ölçmek amacıyla kullanılan en eski hidrolik yapılarından. Suyun debisini ölçmek, su akımını kontrol etmek ve su seviyesini düzenlemek amaçları ile açık kanal eksenine dik olarak yerleştirilmiş ve üzerinden su akıtan hidrolik yapılar savak olarak isimlendirilmektedir. Bu çalışmada, bir açık kanal içerisindeki dikdörtgen kesitli geniş başlıklı savak akımı deneysel olarak incelenmiştir. Deneylerde 3 farklı debi durumunda savak memba ve mansabındaki su yüzü profilleri ve hız dağılımları ölçülmüştür. Akım alanı deneylerle aynı koşullar kullanılarak sayısal olarak modellenmiştir. Sayısal modellemede kullanılan ve sonlu hacimler metoduna dayalı olarak hesap yapan FLOW-3D paket programı ile temel denklemler çözülmüştür. Farklı ağ yapılarının da denendiği çalışmada, türbülans viskozitesinin hesaplanmasında Standart k-ε türbülans kapatma modeli kullanılmış, su yüzü profilleri ise AH (Akışkan Hacmi) yöntemi ile belirlenmiştir. Sayısal olarak elde edilen su yüzü profilleri ve hız dağılımları, deneysel olarak ölçülen değerlerle karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Standart k-ε türbülans kapatma modelinin ölçülen verilerle genel olarak uyum içerisinde olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Geniş başlıklı savak, açık kanal, hesaplamalı akışkanlar dinamiği, su yüzü profili, FLOW-3D

INVESTIGATION OF FLOW OVER A BROAD-CRESTED WEIR

ABSTRACT

Weirs are among the oldest hydraulic structures that have been used by hydraulic engineers to determine the discharge of an open-channel flow. They are placed perpendicular to the flow axis and built for purposes of measuring the flow of water, controlling the water flow and regulating the water level. In this study, flow over rectangular-broad crested weir was investigated experimentally in an open channel. In the experiments, water surface and velocity distributions upstream and downstream of the weir faces were measured at three different flow rates. The flow field was modelled numerically by using the same experimental conditions. Basic equations that are used for numerical model are solved by FLOW-3D package program based on finite volume method. Different mesh compositions were also tested in this study. Standard k-ε turbulence closure model is used in the numerical modeling and the flow profile is computed using VOF (Volume of Fluid) method. The free surface and velocity distributions of flow which are obtained numerically are compared with the values measured experimentally. The results obtained using the standard k-ε model is found to be in good agreement with measured data.

Keywords: Broad crested weir, open channel, computational fluid dynamics, water surface profiles, FLOW-3D

*Corresponding author / Sorumlu yazar. Tel.: +90 352 207 6666/7359 ; e-mail / e-posta: mucella@erciyes.edu.tr

1. GİRİŞ

Geniş başlıklı savaklar, açık kanallarda veya akarsularda su akımını kontrol etmek, su seviyesini düzenlemek ve debi ölçümü yapmak amaçlarıyla kullanılan su yapılarındandır. Bu hidrolik yapılar; sulama, yağmur suyu ve atık su sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Akarsu yatağını ya da kanal kesitini kapatacak şekilde tasarlanan geniş başlıklı savakların dikdörtgen, üçgen, trapez ve eğrisel kesite sahip tipleri mevcuttur.

En kesit boyunca yerleştirilen geniş başlıklı savak üzerinde akım özellikleri değişerek kritik altı rejimden kritik üstü rejime geçer. Bu karmaşık bir akım yapısının ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Akım ile etkileşim halinde olan bu yapıların tasarımını doğru bir şekilde gerçekleştirebilmek için akım profili, hız alanı ve basınç alanı doğru bir şekilde tahmin edilebilmelidir. Geniş başlıklı savak yapısı ile etkileşim halinde olan akımların analizi fiziksel model deneyleri ile gerçekleştirilebilmektedir. Bu konuda birçok deneysel çalışma yapılmıştır. Ancak araştırılması son derece pahalı olabilen fiziksel deney verileri üzerinde ölçek hatalarından kaynaklanan hatalar olduğu ve bu hataların sonuçları etkilediği bilinmektedir. Günümüzde su yapı etkileşiminin olduğu serbest yüzeyli akımların teorik olarak çözülmesi Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, HAD, (Computational Fluid Dynamics – CFD) yöntemlerindeki gelişmeler ile kolaylaşmıştır [1-3].

Geniş başlıklı savaklarla etkileşim halindeki açık kanal akımlarının analizi ile ilgili birçok deneysel ve teorik çalışma yapılmıştır. Hager ve Schwalt [4], geniş başlıklı savak üzerinden geçen akımın özelliklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Farklı debilerde çalışmalar yapmış ve bunları sayısal olarak modellemişlerdir. Yaptıkları çalışmalar sonucu savak üzerindeki akımların basınç dağılımlarının birbirleri ile benzer özellikler gösterdiğini tespit etmişlerdir. Yine aynı şekilde hız dağılımlarının da benzer özellik gösterdiğini belirtmişlerdir. Sarker ve Rhodes [5] dikdörtgen geniş başlıklı savak üzerinden geçen akımın su yüzü profilini, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi kullanarak hesaplamışlardır. Su yüzünün hesabında VOF (Volume of Fluid) metodunu kullanmışlardır. Elde ettikleri sayısal bulguların deneysel ölçümlerle uyumlu olduğunu görmüşlerdir. Kırkgöz ve ark [6], dikdörtgen ve üçgen kesitli geniş başlıklı savaklar ile etkileşim halindeki iki-boyutlu açık kanal akımını deneysel ve sayısal olarak analiz etmişlerdir. Temel denklemleri, standart k-ε ve k-ω türbülans kapatma modelleri kullanarak sonlu elemanlar yöntemine dayalı ANSYS-Flotran ile çözmüşlerdir. Su yüzü profilinin hesabında VOF yöntemini kullanmışlardır. Sayısal olarak hesap edilen hız profillerini, PIV (Particle Image Velocimetry) ile ölçmüş oldukları hız profilleri ile karşılaştırmışlar, çalışmada kullandıkları k-ω türbülans kapatma modelinin standart k-ε modeline göre deney verileri ile daha uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Öner ve ark. [7], açık kanal içerisine yerleştirdikleri dikdörtgen geniş başlıklı savak üzerindeki akım alanını teorik ve deneysel olarak incelemişlerdir. PIV hız ölçme tekniği kullanılarak yaptıkları deneylerle savak etrafındaki hız alanını ölçmüşlerdir. Akım alanının sayısal çözümünde, sonlu elemanlar yöntemine dayalı olarak çalışan ANSYS-Flotran paket programı kullanmışlardır. Serbest su yüzünün hesabını ise VOF yöntemi ile gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında, türbülans viskozitesinin hesabı için Standart k-ε, standart k-ω ve SST (Shear Stress Transport k- ω türbülans modeli) türbülans kapama modellerini kullanmışlardır. Hesap edilen akım hızları ve su yüzü profillerini deneysel ölçümlerle karşılaştırmışlar ve standart k-ω türbülans kapatma modeli kullanılarak elde edilen verilerin diğer türbülans modelleri ile bulunan verilere göre deneysel veriler ile daha uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Şimşek [8], eğrisel geniş başlıklı savak akımında hız alanını Lazer Doppler Anemometresi (LDA) ile ölçmüş ve elde ettiği deneysel bulguları sonlu hacimler yöntemine dayalı ANSYS-Fluent paket programından elde ettiği sayısal bulgularla karşılaştırmıştır. SKE (Standart k-ε türbülans modeli), RNG (Renormalization Group k-ε türbülans modeli), RKE (Realizable k-ε türbülans modeli), SST, ve RSM (Reynolds Stress türbülans modeli) türbülans modellerinin kullanıldığı sayısal hesaplamalarda Renormalization Group k-ε türbülans kapatma modeli kullanılarak elde etmiş olduğu verilerin deneysel ölçümlere daha yakın olduğu sonucuna ulaşmıştır. Bal [9], geniş başlıklı savak üzerinden geçen akımın hız alanını, iki farklı akım koşulu altında, bir boyutlu LDA kullanılarak ölçmüştür. Sayısal çözüm için sonlu hacimler yöntemine dayalı ANSYS-FLUENT paket programını kullanmıştır. Standart k-ε, RNG k-ε, Realizable k-ε, SST, Modifiye k-ω ve RSM türbülans kapatma modellerini kullanmıştır. Sayısal sonuçlar üzerinde seçilen ağ yapısının etkisini incelemek için GCI (Grid Convergence Index) yöntemini kullanmış, sayısal ve deneysel verilerin karşılaştırılması sonucunda, RNG k-ε türbülans modelinin daha başarılı sonuç verdiğini belirtmiştir. Felder ve ark. [10], geniş başlıklı savak akımı üzerinde su yüzü profilinin, hız ve basınç dağılımlarının belirlenmesi üzerinde deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Deneyleri Queensland Üniversitesindeki 0,52 m genişliğinde ve 7 metre uzunluğundaki laboratuvar kanalında gerçekleştirmişlerdir. Kret üzerindeki akış özelliklerini üniform olmayan hız dağılımları ve hidrostatik olmayan basınç dağılımlarını dikkate alarak analiz etmişlerdir. Verilerin pürüzsüz türbülans sınır tabaka teorisinden farklı olduğunu ancak bu konuda yapılmış önceki çalışmalar ile uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Salması ve ark. [11], geniş başlıklı savaklar üzerinde debi katsayısı Cd' nin belirlenmesi için yapay sinir ağları (YSA) ve genetik programlama (GP) yöntemini karşılaştırmışlardır Geniş aralıklardaki debiler için on beş farklı dikdörtgen bileşik kesitli geniş başlıklı savak modeli üzerinde yapılan deney verilerini kullanmışlardır. Hesaplanan debi katsayıları için sonuçlar boyutlu analize dayalı çoklu regresyon

GENİŞ BAŞLIKLIL SAVAK ETRAFINDAKİ AKIMIN İNCELENMESİ

denklemleri kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen verileri GP ve YSA ile elde edilen veriler ile karşılaştırmışlar ve debi katsayısının belirlenmesinde YSA'nın GP'ye göre daha düşük başarı sağladığını belirtmişlerdir. Qasim [12], bir basamaklı geniş başlıklı savak modeli üzerindeki akımı deneysel olarak incelemiştir. Deney verilerini HEC-RAS programı ile modellemiştir. Program ile 5m uzunluğundaki kanal üzerinde oluşturduğu beş farklı akım durumunda, kanal boyunca su yüzü profillerini, hidrolik sıçramanın yerini ve savak üzerindeki anahtar eğrisi debi-yükseklik ilişkisini belirlemiştir. Program sonucu elde edilen su yüzü profillerinin ölçüm değerleri ile uyumlu olduğunu, hidrolik sıçramanın yerinin ve debi-yükseklik ilişkisinin modelleme ile kolay bir şekilde ve oldukça hassas hesaplandığını bildirmiştir. Hoseini ve ark. [13], geniş başlıklı savak üzerinde kritik altı akım şartlarında deneysel bir çalışma yapmışlardır. Deneyle on beş farklı debi durumunda ve iki farklı başlık üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda debi katsayısının savak genişliği, memba bölgesinde kret üzerindeki toplam enerji yükü ve kanal genişliği ile ilgili olduğunu belirtmişlerdir. Ölçülmüş debi katsayısı ile tahmini denklem ile hesaplanan debi katsayısının uyumlu olduğunu belirterek, kritik altı akım şartlarında ve dikdörtgen geniş başlıklı savaklarda debi katsayısının hesabı için bir denklem sunmuşlardır.

Bu çalışmada, laboratuvar kanalına yerleştirilmiş geniş başlıklı dikdörtgen savak üzerinde hız ve su yüzü ölçümleri yapılmıştır. Deneyle kanala su veren vana ayarlanarak debi ölçerden okunan üç farklı debi durumunda, kanal taban eğiminin $S=0,001$ değerinde gerçekleştirilmiştir. Dikdörtgen kesitli geniş başlıklı savak ile etkileşim halinde bulunan açık kanal akımının hareketini idare eden denklemler, sonlu hacimler yöntemine dayalı FLOW-3D paket programı yardımıyla sayısal olarak çözülmüştür. Standart $k-\epsilon$ türbülans kapatma modelinin kullanıldığı sayısal modellemede, su yüzü profili VOF yöntemi kullanılarak hesaplanmış ve çözümler üç boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal olarak elde edilen su yüzü profilleri ile deneysel ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT**2.1. Deneyle**

Deneyle, Şekil 1'de verilen Erciyes Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hidrolik Laboratuvarında bulunan $0,6 \times 0,6 \times 9,5$ m boyutlarındaki açık kanal düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Taban ve yan duvarlar cam malzemeden yapılmıştır, böylece deneysel ölçümler için pürüzsüz ve saydam bir yüzey elde edilmiştir. Deneylede, $0,6 \times 0,2 \times 0,10$ m ölçülerine sahip plexiglassdan imal edilmiş savak kullanılmıştır. Deneyle $Q_1=0,00622$ m³/s, $Q_2=0,01906$ m³/s ve $Q_3=0,03022$ m³/s olacak şekilde üç farklı akım koşulu için gerçekleştirilmiştir. Kanaldaki akımın debisi Şekil 2a'da görünen kanala su veren sabit seviyeli haznenin girişindeki 15 cm çaplı çelik boru üzerinde bulunan TEKSAN marka daldırma tip elektromanyetik debimetre ile ölçülmüştür. Debimetrenin 0,5-50,0 L/s arasındaki debileri %1 hassasiyetle ölçtüğü bildirilmektedir. Deneyle başında, pompa çıkışı ve depo sonrası vanalar ayarlanarak depodaki su seviyesi sabit hale getirilmiştir. Kanal tabanının eğimi ayarlanabilmekte olup ölçümler $S=0,001$ eğim değerinde gerçekleştirilmiştir. Akım hızları kanal üzerinde 3 doğrultuda hareket edebilen bir sehpaye yerleştirilen Moline (Low Speed Propeller Probe) ile ölçülmüştür. Moline ile ölçülen değerler, probun bağlı olduğu Şekil 2b'de verilen Nixon marka Streamflo Velocity Meter 400 ile okunmuştur. Savak, kanal başından itibaren 5,5 metre uzaklığa yerleştirilmiştir. Kanalın başından itibaren 4,5 metre uzaklıkta (savak membaında) yarı en kesit üzerinde düşeyde 6 farklı noktada derinlik boyunca hız ölçümü alınmıştır. Su yüzü ölçümleri 3 doğrultuda hareket edebilen bir sehpaye yerleştirilen ve Şekil 2c'de verilen limnimeter ile gerçekleştirilmiştir. Su yüzü ölçümü için kanal başlangıcından 4,5 metreye kadar 50 cm aralıklarla, 4,5 metre-5,5 metre aralığında 10 cm aralıklarla, 5,5 metre-6,5 metre aralığında 5 cm aralıklarla, 6,5 metre-7,5 metre aralığında 10 cm aralıklarla ve 7,5 metre sonrasında kanal sonuna kadar 50 cm aralıklarla kanal orta noktasında ölçüm alınmıştır.

2.2. Temel Denklemler

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

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

M. İLKENTAPAR, A.A. ÖNER

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial (\tau_{ij} + \partial \tau'_{ij})}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (2)$$

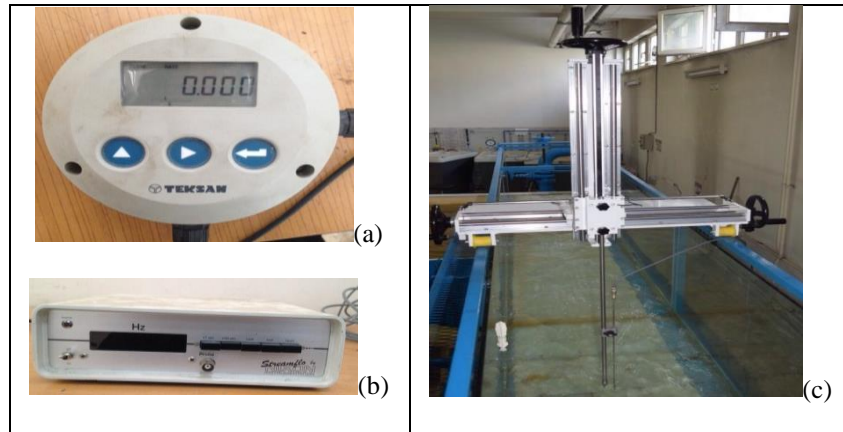
Burada üç boyutlu akımlar için $i, j=1, 2, 3$ değerlerini alır ve sırasıyla x, y, z doğrultularındaki akım bileşenlerini temsil etmektedir. (1) ve (2) denklemlerinde u_i, x_i doğrultusundaki hız bileşeni g_i yer çekimi ivmesi, p basınç, ρ akışkan yoğunluğu, τ_{ij} türbülans gerilmeleridir. 3 boyutlu akım alanında yukarıdaki denklem 10 adet bilinmeyen içermektedir. Böylece bilinmeyenler açısından denklemin kapatılabilmesi için türbülans gerilmelerinin tanımlanması gerekmektedir. 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 türbülans kayma gerilmesi bünye denklemi ile, sıkışmayan akımlar için, aşağıdaki gibi verilmiştir:

$$\tau'_{ij} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

Burada μ_t türbülans viskozitesini göstermektedir ve dinamik viskozite gibi akışkanın fiziksel bir özelliği değildir. μ_t akımdaki hız çalkantılarına bağlıdır. Başka bir ifade ile aynı akışkan için farklı akım koşullarında değişik değerler almaktadır. Dolayısıyla zamana bağlı RANS (Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes) denklemlerinin çözülebilmesi için türbülans viskozitesinin değerinin hesaplanması gereklidir. Bu da farklı türbülans kapatma modelleri yardımıyla gerçekleştirilir.



Şekil 1. Deney kanalının görünümü



Şekil 2. (a) Limnometre, (b) Streamflo Velocity Meter 400, (c) TEKSAN marka elektromanyetik debimetre

GENİŞ BAŞLIKLIL SAVAK ETRAFINDAKİ AKIMIN İNCELENMESİ

2.3. Standart k-ε Türbülans Kapatma Modeli (SKE)

Yapılan çalışmada, savak üzerinden geçen akımın 3 boyutlu modellemesi RANS denklemleri ile gerçekleştirilmiştir. Türbülans modeli olarak yaygın kullanıma sahip olan ve doğruluğu denenmiş modellerden biri olan iki denklemlilik k-ε türbülans kapatma modeli kullanılmıştır. Bu modelde kinetik enerji, k ve sönümlenme oranı (dissipation rate), ε için ayrı taşınım denklemleri yazılır. Genellikle iki denklemlilik olarak bilinen k-ε modelinde Reynolds gerilmesini veren türbülans viskozitesi

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

ifadesi ile elde edilir. Türbülans kinetik enerji, k ve sönümlenme oranı ε, için türbülans denklemleri aşağıdaki eşitlikler ile verilmektedir.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (5)$$

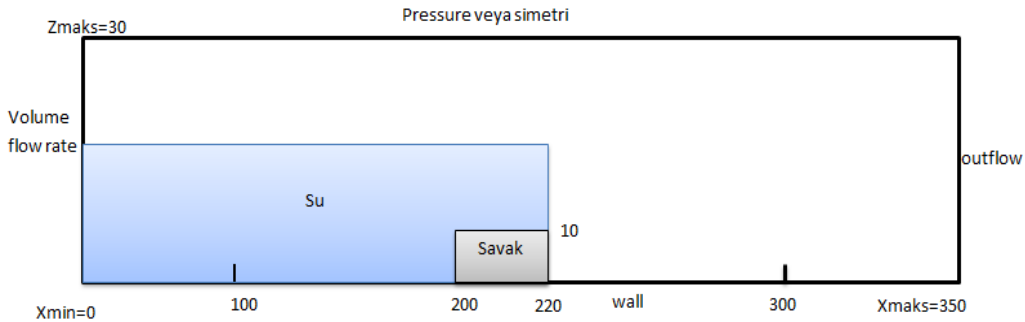
$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (6)$$

2.4. FLOW-3D

Çalışma kapsamındaki sayısal uygulamalar, FLOW-3D demo versiyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yazılım en genel haldeki süreklilik, momentum ve enerji temel kanunlarına dayandığından hemen her tür akışkanlar mekaniği problemlerine uygulanabilmektedir. Su-hava arakesitine sahip serbest yüzeylerin belirlenmesi için yazılımda akışkan hacmi (Volume Of Fluid; VOF) yöntemi kullanılmaktadır. Bu yaklaşımda, tüm akışkanlar için sadece bir denklem seti çözülürken, fazlar arası ara yüzey için ayrı bir denklem çözülür ve tüm sayısal çözüm ağı içerisinde fazların hacimsel doluluk oranları ayrı-ayrı izlenir. Böylece, VOF metodunda tanımlanan her faz için hacimsel doluluk oranı kontrol hacmi içerisinde bir değişken olarak belirir ve her bir kontrol hacmi içerisinde fazların hacimsel doluluk oranları toplamı birdir.

2.5. Sınır Şartları

Şekil 3'de dikdörtgen geniş başlıklı savak üzerinden geçen açık kanal akımın sayısal modeli için kullanılan çözüm bölgesi ve sınır şartları gösterilmektedir. Modelleme üç boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Sınır şartlarının tanımlanmasında kanal girişinde; debi tanımlanıp değeri girilirken, kanal tabanında ve yan duvarlarda; duvar tanımlaması yapılmıştır. Kanal çıkışı için sınır şartı olarak su çıkışı tanımlanırken ve kanal üst bölgesi için simetri tanımlanmıştır. Deneyle uyumlu olarak deneyde ölçülen debi değerleri giriş şartı olarak atanmış ayrıca hesap hızını artırabilmek amacıyla deneyde ölçülen su yüksekliği debi ile birlikte başlangıç şartı olarak girilmiştir.



Şekil 3. Sayısal çözüm bölgesi ve sınır şartları

2.6. Hesaplama Ağının Tasarımı

Modelde çözüm bölgesi tek parça olarak düşünülmüş ve tüm çözüm bölgesinde aynı ağ sıklığı kullanılmıştır. Hesaplama ağ aralığının çözüm üzerindeki etkisinin incelenmesi için $Q_1=0,00622 \text{ m}^3/\text{s}$ debi değeri için 2 cm, 1 cm ve 0,5 cm olmak üzere üç farklı ağ aralığı kullanılarak çözüm yapılmıştır. Farklı ağ yoğunlukları için yapılan çözümlerden elde edilen su yüzü ile deneysel olarak ölçülen su yüzü karşılaştırılarak Denklem (7) bağıntısı ile ortalama karesel hataları (OKH) hesaplanmıştır. OKH değerleri 2 cm'lik ağ aralığı için 0,000148, 1 cm'lik ağ aralığı için 0,0000639, 0,5 cm'lik ağ aralığı için ise 0,000145 olarak bulunmuştur. OKH değerleri incelendiğinde en uygun ağ aralığı 1 cm olarak bulunduğu ve 1 cm aralık için çözüm süresi 0,5 cm aralık için çözüm süresine göre oldukça kısa olduğundan bütün debiler için 1cm ağ aralıklı ağ yapısı kullanılarak çözümler gerçekleştirilmiştir. 1 cm aralıklı ağ yapısı kullanıldığında çözüm bölgesindeki toplam hücre sayısı 698300 olmuştur.

$$OKH = \sum_{i=1}^n \frac{(H_{i\text{ölçüm}} - H_{i\text{FLOW-3D}})^2}{n} \quad (7)$$

3. BULGULARI VE TARTIŞMA

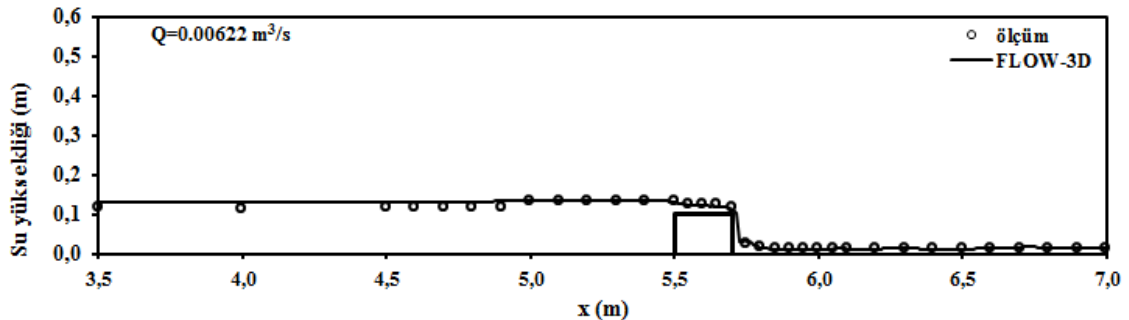
3.1. Deneysel ve Sayısal Su Yüzü Profilleri

Üç farklı debi durumunda k-ε türbülans modeli kullanılarak VOF yöntemi ile hesaplanan su yüzü profilleri ile deneysel profiller karşılaştırılmıştır. Şekil 4'te deney esnasında oluşan su yüzü profiline ait bir fotoğraf bulunmaktadır. Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7'de su yüzü profillerinin karşılaştırılması verilmiştir. Ayrıca Denklem (8) kullanılarak bağıl hatalar hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 1'de görülmektedir. Tablo 1'de 5,5-5,7 m aralığı savağın bulunduğu bölgeyi göstermektedir.

$$\varepsilon (\%) = \left| \frac{H_{\text{ölçüm}} - H_{\text{FLOW-3D}}}{H_{\text{ölçüm}}} \right| * 100 \quad (8)$$

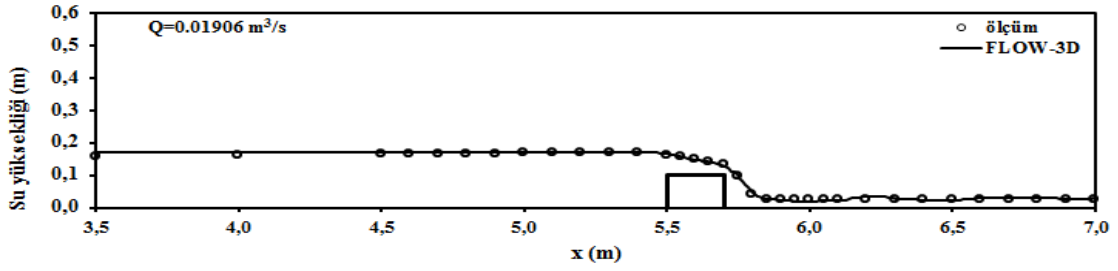


Şekil 4. $Q_1=0,001906 \text{ m}^3/\text{s}$ için deneysel su yüzü profili

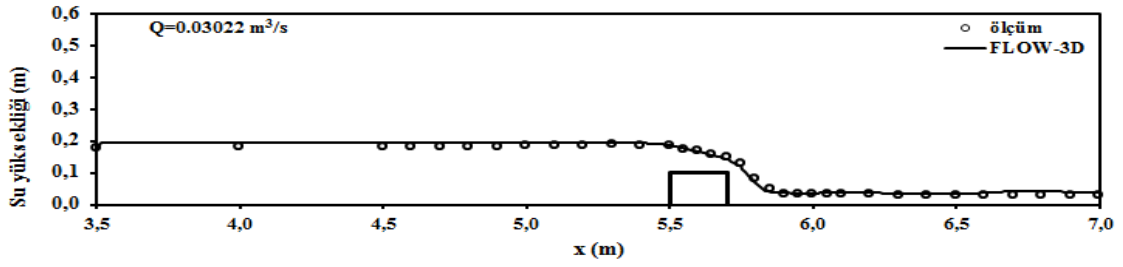


Şekil 5. $Q_1=0,00622 \text{ m}^3/\text{s}$ için deneysel ve sayısal su yüzü profillerinin karşılaştırılması

GENİŞ BAŞLIKLIL SAVAK ETRAFINDAKİ AKIMIN İNCELENMESİ



Şekil 6. $Q_2=0,01906 \text{ m}^3/\text{s}$ için deneysel ve sayısal su yüzü profillerinin karşılaştırılması



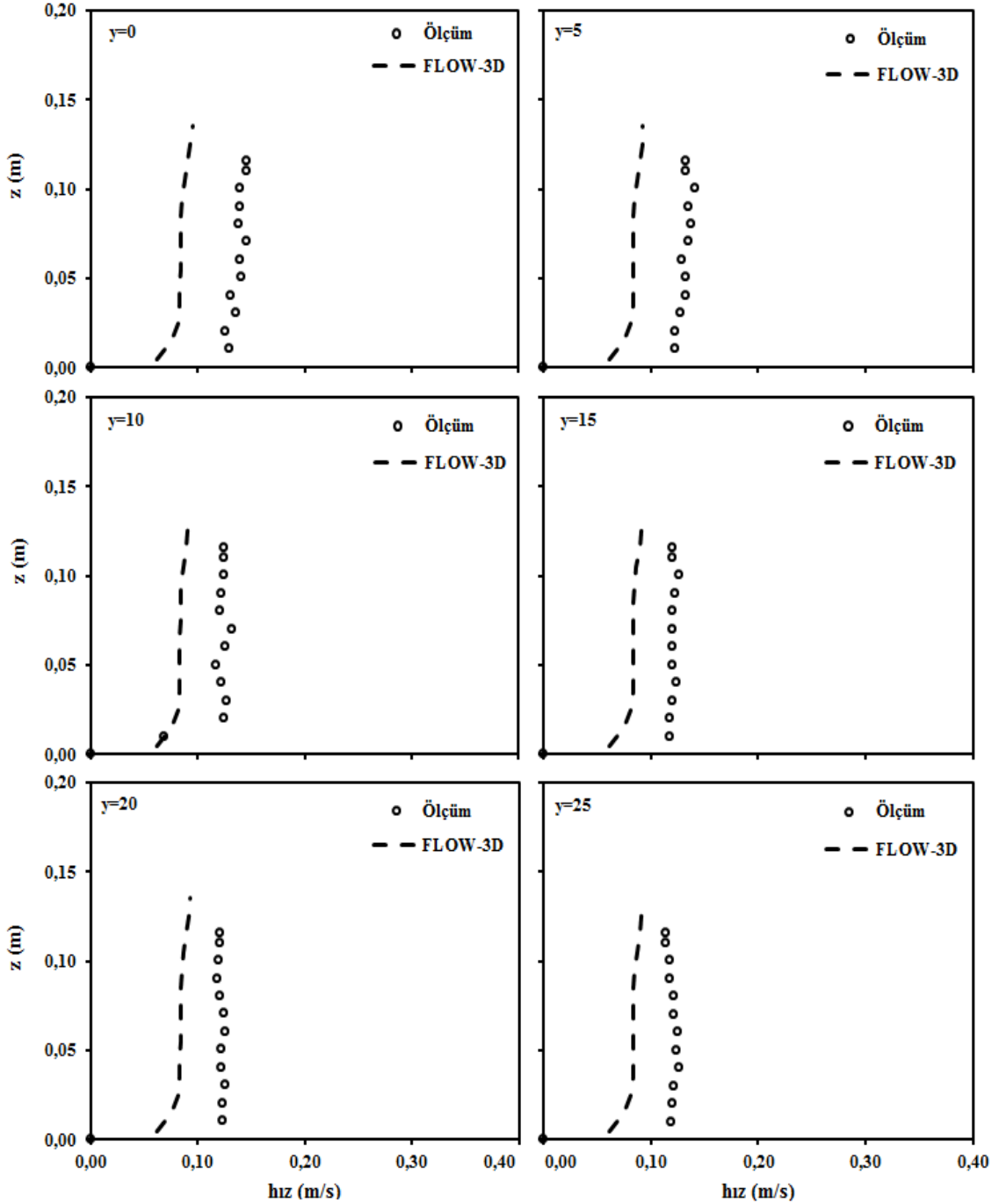
Şekil 7. $Q_1=0,03022 \text{ m}^3/\text{s}$ için deneysel ve sayısal su yüzü profillerinin karşılaştırılması

Tablo 1. Deneysel ve sayısal su yüzü profilleri arasındaki bağıl hata sonuçları

x (m)	ϵ (%)		
	Q= 0,00622	Q=0,01906	Q=0,03022
3.50	12.7	9.8	3.6
4.00	15.7	5.6	8.5
4.50	14.8	3.4	7.2
4.60	14.7	3.4	6.8
4.70	14.6	3.5	6.6
4.80	14.7	3.6	6.6
4.90	15.1	3.6	6.7
5.00	0.3	1.9	4.4
5.10	0.2	2.0	4.5
5.20	0.0	2.1	4.6
5.30	0.0	2.1	3.9
5.40	0.3	1.9	3.9
5.50	1.4	2.5	0.3
5.55	0.4	0.9	2.2
5.60	2.5	0.6	1.3
5.65	3.4	0.3	1.2
5.70	2.1	1.4	4.1
5.75	42.4	5.8	7.5
5.80	4.0	23.1	10.0
5.85	3.5	7.7	10.4
5.90	6.8	10.6	9.2
5.95	3.7	22.9	3.1
6.00	0.3	30.9	4.9
6.05	8.5	22.0	7.1
6.10	10.2	15.4	8.5
6.15	4.9	26.9	8.8
6.20	18.3	16.6	16.4
6.25	1.3	9.6	12.4
6.30	2.5	11.2	13.9
6.35	19.6	16.9	22.1
6.40	43.4	15.5	36.7
6.45	35.1	18.7	38.6
6.50	28.0	4.8	29.1
6.60	22.9	8.4	22.4
Genel Ortalama	10,8	9,3	9,9

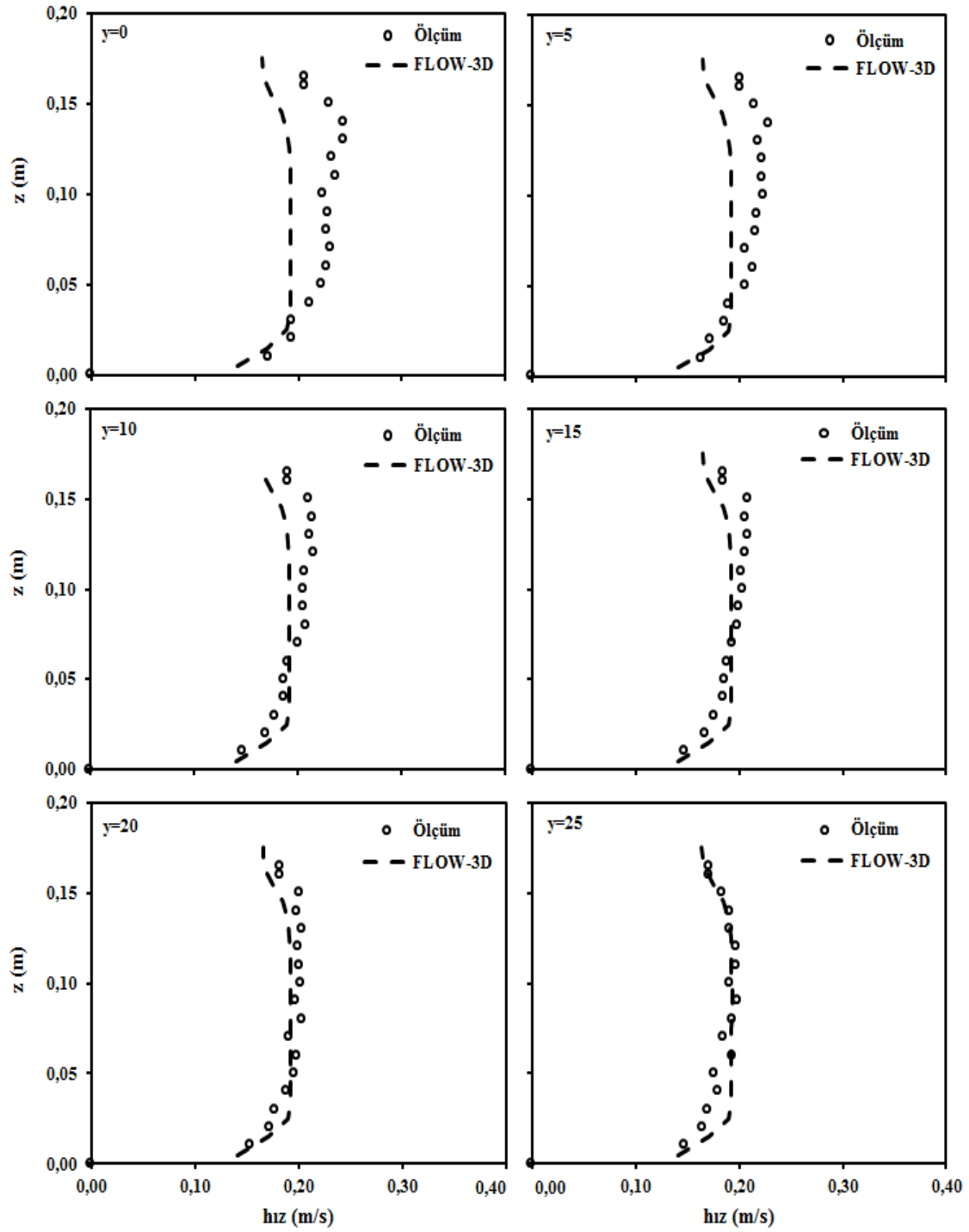
3.2. Deneysel ve Sayısal Hız Dağılımları

Üç farklı debi için savak membında ($x=4,5$ m) kanal orta kesitinden başlanarak cidara kadar 5'er cm aralıklarla 6 farklı kesitte, düşeyde ise muline 1 cm yükseltilerek su yüzüne kadar farklı kesitlerde hız ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Hesaplanan hızlar ile deney ölçümleri karşılaştırılmış ve dağılımlar Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10'da verilmiştir. Şekillerdeki $y=0$ kanal orta kesitini ifade etmektedir. Ayrıca deneysel ve sayısal hız dağılımlarının OKH değerleri de hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 2'de verilmiştir. Tablo 2'den de görüleceği üzere, üç boyutlu olarak tanımlanan çözüm alanında deneysel ve sayısal hız dağılımları arasında genel bir uyum olduğu söylenebilir.



Şekil 8. $Q=0,00622$ m³/s debi için deneysel ve sayısal hız dağılımlarının karşılaştırılması

GENİŞ BAŞLIKLİ SAVAK ETRAFINDAKİ AKIMIN İNCELENMESİ

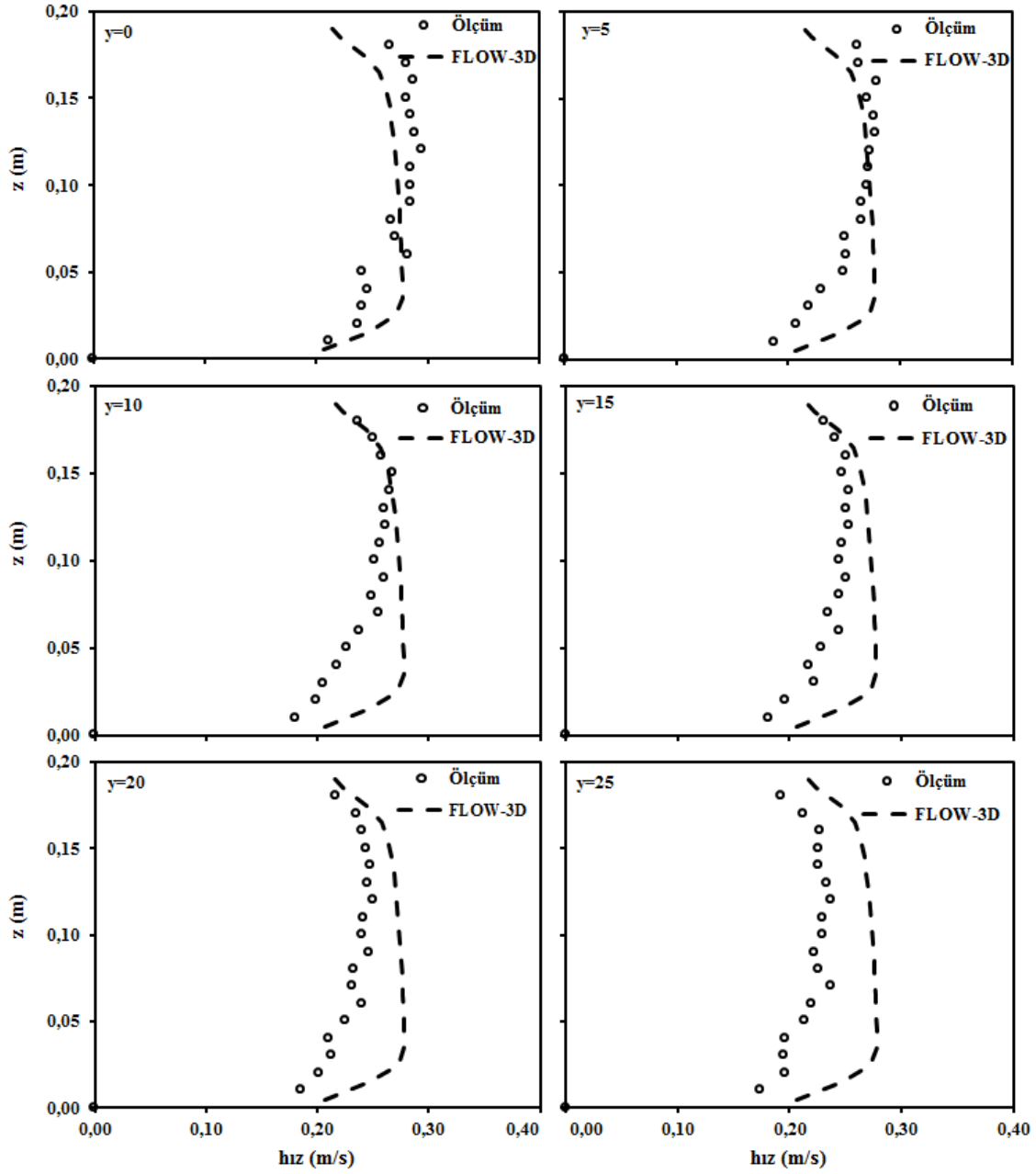


Şekil 9. Q=0,01906 m³/s debi için deneysel ve sayısal hız dağılımlarının karşılaştırılması

Tablo 2. Deneysel ve sayısal hız dağılımı değerlerinin OKH sonuçları

Debi	y=0	y=5	y=10	y=15	y=20	y=25
Q= 0,00622	0,003236	0,002570	0,001599	0,001620	0,001736	0,001585
Q=0,01906	0,001386	0,000621	0,000264	0,000142	0,000090	0,000066
Q=0,03022	0,000480	0,000614	0,000922	0,001007	0,001331	0,002508

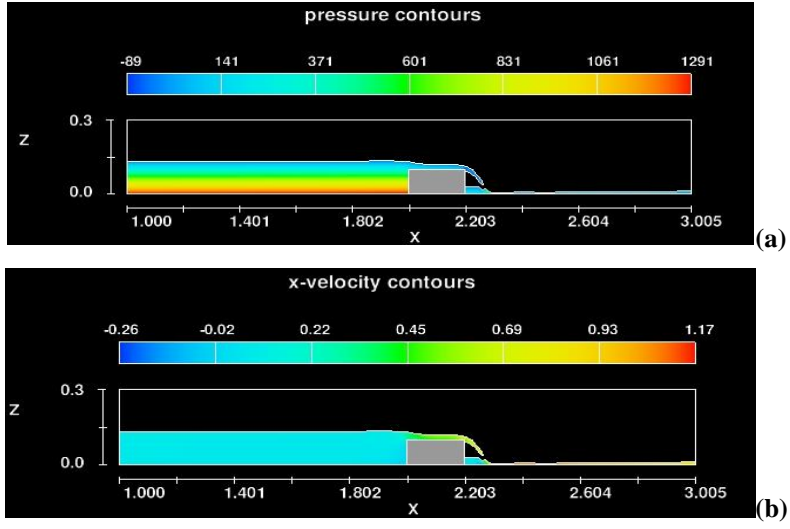
M. İLKENTAPAR, A.A. ÖNER

Şekil 10. $Q=0,03022 \text{ m}^3/\text{s}$ debi için deneysel ve sayısal hız dağılımlarının karşılaştırılması

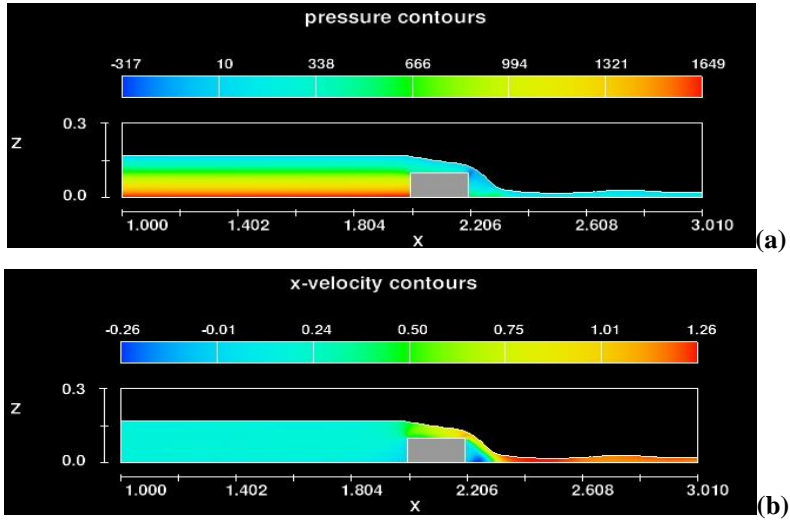
3.3. Basınç ve Hız Alanı

Her bir debi değeri için sayısal model bulgularından elde edilen basınç ve hız alanları Şekil 11, Şekil 12, Şekil 13'te verilmiştir. Ayrıca Tablo 3'te her bir debi için memba ve mansapta hesaplanan Froude sayıları görülmektedir. Tablo 3'ten de görüldüğü üzere her üç debi değerinde de akım membadan mansaba geçerken nehir rejiminden sel rejimine geçmektedir. Şekillerden de görüleceği üzere; geniş başlıklı savak membasın da nehir rejiminde yüksek basınç alanları oluşurken mansapta akım hızlanmasıyla birlikte sel rejimine geçen akım alanında basınç azalmaktadır. Sayısal çözümden elde edilen sonuçlara göre $0,00622 \text{ m}^3/\text{s}$ debi değeri için maksimum basınç $x=2 \text{ m}$ 'de $1290,53 \text{ Pa}$, maksimum hız ise $x=2,31 \text{ m}$ 'de $1,17 \text{ m/s}$ olarak bulunmuştur. Benzer şekilde, $0,01906 \text{ m}^3/\text{s}$ debi değeri için maksimum basınç $x=2 \text{ m}$ 'de $1649,03 \text{ Pa}$, maksimum hız $x=2,49 \text{ m}$ 'de $1,26 \text{ m/s}$ olarak bulunurken, $0,03022 \text{ m}^3/\text{s}$ debi değeri için maksimum basınç yine $x=2 \text{ m}$ 'de $1882,10 \text{ Pa}$, maksimum hız $x=2,43 \text{ m}$ 'de $1,49 \text{ m/s}$ olarak bulunmuştur.

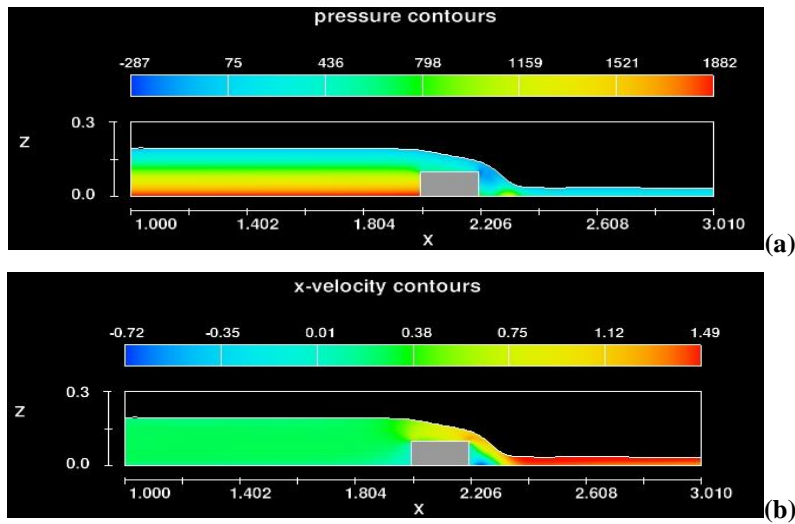
GENİŞ BAŞLIKLIL SAVAK ETRAFINDAKİ AKIMIN İNCELENMESİ



Şekil 11. $Q=0,00622 \text{ m}^3/\text{s}$ debi için (a) basınç ve (b) hız alanı



Şekil 12. $Q=0,01906 \text{ m}^3/\text{s}$ debi için (a) basınç ve (b) hız alanı



Şekil 13. $Q=0,03022 \text{ m}^3/\text{s}$ debi için (a) basınç ve (b) hız alanı

Tablo 3. Froude sayıları

	0,00622 m³/s	0,01906 m³/s	0,03022 m³/s
Memba Bölgesi	0,07	0,14	0,18
Mansap bölgesi	2,50	2,38	2,25

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, dikdörtgen geniş başlıklı savak üzerindeki akım alanı üç farklı debi için deneysel olarak incelenmiştir. Dikdörtgen kesitli geniş başlıklı savak ile etkileşim halinde bulunan açık kanal akımının hareketini idare eden denklemler, sonlu hacimler yöntemine dayalı FLOW-3D paket programı yardımıyla sayısal olarak çözülmüştür. Standart k-ε türbülans kapatma modeli kullanılarak yapılan sayısal hesaplamalarda serbest su yüzü profili, VOF yöntemi ile belirlenmiştir. Sayısal ve deneysel bulguların niceliksel olarak karşılaştırılmasından memba kısmında ve savak üstünde farkların oldukça küçük olduğu, mansap kısmında ise farkların nispeten arttığı görülmüştür. Savak sonunda serbest düşme ve akımın sel rejimine geçmesiyle birlikte daha da karmaşık hale gelen akımın yapısı nedeniyle deneysel ölçümler hesap sonuçlarından bir miktar farklı olmuştur. Bu çalışmadan kullanılan SKE türbülans kapatma modelinin akım profillerinin tahmin edilmesinde başarılı bir şekilde kullanılabileceği tespit edilmiştir. Hız profillerinin incelenmesi sonucu, sayısal ve deneysel sonuçlar arasında genel bir uyumun mevcut olduğu, bu uyumun yüksek debilerde daha da arttığı belirlenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma FYL-2015-5736 nolu proje ile Erciyes Üniversitesi, Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir, teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- [1] ŞİMŞEK, O., Eğrisel Geniş Başlıklı Savak Üzerinden Geçen Açık Kanal Akımının Deneysel ve Teorik Analizi. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana, Türkiye, 2011.
- [2] BAL, H., Geniş Başlıklı Savak İçeren Açık Kanal Akımının Sayısal Modellenmesi. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana, Türkiye, 2011.
- [3] SOYDAN, N.G., AKÖZ, M.S., ŞİMŞEK, O., GÜMÜŞ, V., “Trapez Kesitli Geniş Başlıklı Savak Akımının k-ε Tabanlı Türbülans Modelleri ile Sayısal Modellenmesi”, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 27(2), 47-58, 2012.
- [4] HAGER, M.W.H., CHWALT, M., “Broad Crested Weir”, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 43-85, 1994.
- [5] SARKER, M.A., RHODES, D.G., “Calculation of Free-Surface Profile Over a Rectangular Broad-Crested Weir”, Flow Measurement and Instrumentation 15, 215–219, 2004.
- [6] KIRKGÖZ, M.S., ÖNER, A.A., “Yatay Bir Dairesel Silindirik Etrafındaki Akımda Hız Alanının Deneysel ve Teorik İncelenmesi”, Ç.Ü. Mühendislik- Mimarlık Fakültesi Dergisi, 21, 85-98, 2006.
- [7] ÖNER, A.A., KIRKGÖZ, M.S., AKÖZ, M.S., “Geniş Başlıklı Savak Akımının Deneysel ve Sayısal Yöntemle İncelenmesi”, III. Ulusal Su Mühendisliği Sempozyumu, 3-12, İzmir, Türkiye, 2007.
- [8] ŞİMŞEK, O., Eğrisel Geniş Başlıklı Savak Üzerinden Geçen Açık Kanal Akımının Deneysel ve Teorik Analizi. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana, Türkiye, 2011
- [9] BAL, H., Geniş Başlıklı Savak İçeren Açık Kanal Akımının Sayısal Modellenmesi. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana, Türkiye, 2011.
- [10] FELDER, S., CHANSON, H. “Free-surface Profiles, Velocity and Pressure Distributions on a Broad-Crested Weir: a Physical study”, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 138, 1068–1074, 2012.
- [11] SALMASI, F., YILDIRIM, G., MASOODI, A., PARSAMEHR, P. “Predicting Discharge Coefficient of Compound Broad-Crested Weir by using Genetic Programming (GP) and artificial neural network (ANN) Techniques” Arabian Journal of Geosciences, 6(7), 2709-2717, 2013.
- [12] QASIM J.M., “Laboratory and HEC-RAS Simulations of a Single-Step Weir”, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 8(12), 1005-1011, 2013.
- [13] HOSEINI, S.H., AFSHAR, H., “Flow over a Broad-Crested Weir in Subcritical Flow Conditions, Physical Study”, Journal of River Engineering, 2(1), 1005-1012, 2014.