



**GENİŞ TEPELİ SAVAK ÜZERİNDEN GEÇEN AKIMIN SAYISAL VE  
DENEYSEL MODELİ**

**Nasir Ahmad GHAZNAWI**



T.C.  
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GENİŞ TEPELİ SAVAK ÜZERİNDEN GEÇEN AKIMIN SAYISAL VE  
DENEYSEL MODELİ**

**Nasir Ahmad GHAZNAWI**

Doç. Dr. Serdar KORKMAZ  
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA-2019

## TEZ ONAYI

Nasir Ahmad GHAZNAWI tarafından hazırlanan "GENİŞ TEPELİ SAVAK ÜZERİNDEN GEÇEN AKIMIN SAYISAL VE DENEYSEL MODELİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Doç. Dr. Serdar KORKMAZ

**Başkan :** Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ  
Bursa Uludağ Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza



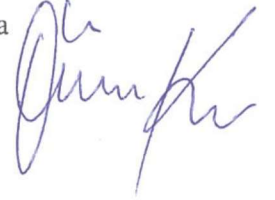
**Üye :** Doç. Dr. Serdar KORKMAZ  
Bursa Uludağ Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi,  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza



**Üye :** Doç. Dr. Veysel Şadan Özgür KIRCA  
İstanbul Teknik Üniversitesi  
İnşaat Fakültesi,  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza



**Yukarıdaki sonucu onaylarım**



**Prof. Dr. Ali BAYRAM**  
Enstitü Müdürü

24.11/2019

**U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

**18/01/2019**

**Nasir Ahmad GHAZNAWI**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GENİŞ TEPELİ SAVAK ÜZERİNDEN GEÇEN AKIMIN SAYISAL VE DENEYSEL  
MODELİ

**Nasir Ahmad GHAZNAWI**

Bursa Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman: Doç.Dr. Serdar KORKMAZ**

Geniş tepeli savaklar, su akımını kontrol etmek ve debi ölçmek için açık kanallara yerleştirilmiş hidrolik yapılardır. Bu çalışmada, açık kanalda geniş tepeli savak üzerinden geçen akım deneysel ve sayısal olarak modellenmiştir. Bu amaç doğrultusunda, altı farklı debi durumu için deneysel ve sayısal modeller oluşturulmuştur. Deneysel çalışmalar, 0.055 m genişliğe ve 1.44 m uzunluğa sahip bir açık kanalda gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar, akım yönündeki hızlar pitot tüp kullanılarak ölçülmüştür. Sayısal model ise SimFlow yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Bu yazılım kullanılarak, hız ve basınç dağılımları sayısal olarak hesaplanmıştır. Sayısal modelden elde edilen su derinlikleri ve akım yönündeki hızlar deneysel ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Genel olarak deneysel ve sayısal sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğu görülmüştür. Hız profillerinde ise yüksek debilerde hataların azaldığı görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Geniş Tepeli Savak, Açık kanal, SimFlow, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

**2019, ix+46 sayfa**

## **ABSTRACT**

MSc Thesis

### **NUMERICAL AND EXPERIMENTAL MODELING OF FLOW OVER A BROAD-CRESTED WEIR**

**Nasir Ahmad GHAZNAWI**

Bursa Uludağ University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Civil Engineering

**Supervisor: Asst.Prof.Dr. Serdar KORKMAZ**

Broad-crested weirs are hydraulic structures installed in open-channels in order to control the flow of water and measure the discharge. In this study, the flow over a broad-crested weir in open-channel was experimentally and numerically modeled. Experiments were carried out in an open channel with a length of 1.44 m and a width of 0.055 m under six different flow rates. In each experiment, velocities in flow direction were measured using a pitot tube. Numerical model was developed using SimFlow software. The velocities and pressure fields were computed numerically. The water depths and velocities in flow direction obtained from the numerical model were compared to experimental values. There is generally a good agreement between experimental and numerical results. Relatively small errors in velocity profiles are observed in higher discharges.

**Keywords:** Broad-crested weir, Open channel, SimFlow, Computational Fluid Dynamics

**2019, ix+ 46 pages**

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca sahip olduğu bilgiyi, tecrübeyi ve desteğini benden esirgemeyen, konu seçimi ile başlayarak bütün çalışma süreci içinde bizzat bulunan, ihtiyaç duyduğum her anda değerli bilgilerini ve zamanını benimle paylaşan tez danışman hocam Sayın Doç. Dr. Serdar KORKMAZ'a saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Değerli katkılarından ötürü jüri üyelerine teşekkür ederim.

Hayatımın her anında yanımda olan bana desteğini hiçbir zaman eksik etmeyen aileme teşekkürlerimi sunarım.

**Nasir Ahmad GHAZNAWI**

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	ix
1. GİRİŞ .....	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI .....	3
2.1. Kaynak Araştırması .....	3
2.2. Savaklar .....	5
2.2.1. Keskin Tepeli Savaklar .....	5
2.2.2. Geniş Tepeli Savaklar .....	7
2.3. Navier-Stokes Denklemleri.....	9
3. MATERYAL ve YÖNTEM .....	12
3.1. Deneysel Çalışmalar .....	12
3.2. SimFlow ile Sayısal Modelleme .....	16
3.2.1 SimFlow paket programının genel özellikleri .....	16
3.2.2. Realizable k- $\epsilon$ türbülans modeli.....	19
3.2.3. Uygulama.....	20
4. BULGULAR ve TARTIŞMA .....	27
4.1. Su yüzey profilleri .....	27
4.2 x-yönündeki hız dağılımları.....	31
4.3 x-yönündeki sayısal basınç dağılımları.....	40
5. SONUÇLAR.....	42
KAYNAKLAR .....	44
ÖZGEÇMİŞ .....	46



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
$C_d$	Debi katsayısı
$C_\mu$	Ortalama gerilme
$F_s$	Serbest yüzeylerde yüzey gerilme kuvveti
$F_{vol}$	Hücredeki akışkan hacmi
$f$	Cisim kuvveti
$g$	Yerçekim ivmesi
$H$	Savak membaındaki akım yüksekliği
$L$	Savak uzunluğu
$k$	Kinetik enerjisi
$n$	Arayüzün normal birim vektörü
$P$	Savak yüksekliği
$S$	Kanal taban eğimi
$S_{ij}$	Şekil değiştirme hızı tensörü
$t$	Zaman
$V$	Hız
$\vec{V}$	Hız vektörü
$y_1$	Memba su yüksekliği
$y_c$	Kritik yüksekliği
$y^+$	Boyutsuz cidar mesafesi
$\gamma$	Akışkan hacim fonksiyonu
$\varepsilon$	Dağılma oranı
$\lambda$	Kütle viskozite katsayısı
$\mu$	Moleküler viskozite
$\tau$	Gerilme tensörü
$\rho$	Yoğunluğu
$\rho_1$	Arayüzün akışkan yoğunluğu
$\rho_2$	Arayüzün akışkan yoğunluğu
$\tilde{\Omega}_{ij}$	Rotasyon tensörünün ortalama oranı
$\omega_k$	Açısal hızı
$V_{cell}$	Hücre hacmi

Kısaltmalar	Açıklama
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
IGS	2D ve 3D Grafik aktarım formatı
LDA	Lazer Doppler Anemometresi
LES	Large Eddy Simulation
OBJ	Lightwave 3D model dosyası
PIV	Particle Image Velocimetry
RANS	Reynolds-averaged Navier–Stokes
RKE	Realizable k- $\varepsilon$ Türbülans modeli

RNG	Renormalization Group k-ε Türbülans modeli
RSM	Reynolds Stress Türbülans modeli
SKE	Standart k-ε Türbülans modeli
SST	Shear Stress Transport k- ω Türbülans modeli
STEP	Standard for the Exchange of Product Data
STL	Stereolithography



## ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Keskin tepeli savak .....	6
Şekil 2.2. Keskin tepeli savakların plaka tipleri (a) Dikdörtgen, (b) üçgen (c) trapez.....	6
Şekil 2.3. Geniş tepeli savak üzerinden geçen akım .....	7
Şekil 2.4. Geniş tepeli savaların sınıflandırılması; a) Uzun tepeli savak, b) Geniş tepeli savak, c) Dar tepeli savak, d) Keskin tepeli savak.....	9
Şekil 3.1. Deneyde kullanılan kanal.....	12
Şekil 3.2. Hidrolik tezgah.....	13
Şekil 3.3. Deneyde kullanılan savak .....	13
Şekil 3.4. Kanalin üzerinde ölçüm alınan kesitler.....	14
Şekil 3.5. Açık kanalda pitot tüpün çalışma prensibi.....	14
Şekil 3.6. (a) Pitot tüp, (b) Pitot tüp ile ölçüm alınırken.....	15
Şekil 3.7. Akışkan hacminin ağ üzerindeki dağılımı .....	17
Şekil 3.8. SimFlow program arayüzü.....	21
Şekil 3.9. Çizilen savağın gösterimi.....	21
Şekil 3.10. Çözüm ağının oluşturulması .....	22
Şekil 3.11. Türbülans modelinin seçilmesi .....	23
Şekil 3.12. Çözüm bölgesi ve sınır koşulları .....	23
Şekil 3.13. SimFlow run sekmesi.....	24
Şekil 3.14. Farklı çözüm ağı yoğunluğuna karşı maksimum basınç.....	25
Şekil 3.15. ParaView Programının arayüzü .....	26
Şekil 4.1. $Q = 0,220$ L/s için deneysel ve sayısal su yüzeyi profilleri .....	28
Şekil 4.2. $Q = 0,277$ L/s için deneysel ve sayısal su yüzeyi profilleri .....	28
Şekil 4.3. $Q = 0,330$ L/s için deneysel ve sayısal su yüzeyi profilleri .....	28
Şekil 4.4. $Q = 0,391$ L/s için deneysel ve sayısal su yüzeyi profilleri .....	29
Şekil 4.5. $Q = 0,456$ L/s için deneysel ve sayısal su yüzeyi profilleri .....	29
Şekil 4.6. $Q = 0,514$ L/s için deneysel ve sayısal su yüzeyi profilleri .....	29
Şekil 4.7. $Q = 0,22$ L/s için x-yönündeki sayısal hız dağılımı .....	31
Şekil 4.8. $Q = 0,277$ L/s için x-yönündeki sayısal hız dağılımı .....	31
Şekil 4.9. $Q = 0,330$ L/s için x-yönündeki sayısal hız dağılımı .....	32
Şekil 4.10. $Q = 0,391$ L/s için x-yönündeki sayısal hız dağılımı .....	32
Şekil 4.11. $Q = 0,456$ L/s için x-yönündeki sayısal hız dağılımı .....	33
Şekil 4.12. $Q = 0,514$ L/s için x-yönündeki sayısal hız dağılımı .....	33
Şekil 4.13. $Q = 0,220$ L/s için deneysel ve sayısal hız profilleri; (a) $x = -0,049$ m, (b) $x = 0,031$ m, (c) $x = 0,041$ m, (d) $x = 0,061$ m.....	34
Şekil 4.14. $Q = 0,277$ L/s için deneysel ve sayısal hız profilleri; (a) $x = -0,049$ m, (b) $x = 0,031$ m, (c) $x = 0,041$ m, (d) $x = 0,061$ m.....	35
Şekil 4.15. $Q = 0,330$ L/s için deneysel ve sayısal hız profilleri; (a) $x = -0,049$ m, (b) $x = 0,031$ m, (c) $x = 0,041$ m, (d) $x = 0,061$ m.....	36
Şekil 4.16. $Q = 0,391$ L/s için deneysel ve sayısal hız profilleri; (a) $x = -0,049$ , (b) $x = 0,031$ , (c) $x = 0,041$ , (d) $x = 0,061$ .....	37

Şekil 4.17. $Q = 0,456$ L/s için deneysel ve sayısal hız profilleri; (a) $x = -0,049$ , (b) $x = 0,031$ , (c) $x = 0,041$ , (d) $x = 0,061$ .....	38
Şekil 4.18. $Q = 0,514$ L/s için deneysel ve sayısal hız profilleri; (a) $x = -0,049$ m, (b) $x = 0,031$ m, (c) $x = 0,041$ m, (d) $x = 0,061$ m.....	39
Şekil 4.19. $Q = 0,220$ L/s için iki boyutlu sayısal basınç dağılımı .....	40
Şekil 4.20. $Q = 0,277$ L/s için iki boyutlu sayısal basınç dağılımı .....	40
Şekil 4.21. $Q = 0,330$ L/s için iki boyutlu sayısal basınç dağılımı .....	41
Şekil 4.22. $Q = 0,391$ L/s için iki boyutlu sayısal basınç dağılımı .....	41
Şekil 4.23. $Q = 0,456$ L/s için iki boyutlu sayısal basınç dağılımı .....	41
Şekil 4.24. $Q = 0,514$ L/s için iki boyutlu sayısal basınç dağılımı .....	41



## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Çizelge 3.1. Sınır şartları.....	24
Çizelge 4.1. Debi değerleri.....	27
Çizelge 4.2. Deneysel ve sayısal modeller ile ilgili parametreler.....	27
Çizelge 4.3. Tüm deneylerdeki su yüzey profilleri için NRMSE değerleri.....	30
Çizelge 4.4. Tüm deneylerdeki hız profilleri için NRMSE değeri .....	40



## 1. GİRİŞ

Su kaynaklarındaki suyu kontrol altına alarak, suyun çeşitli amaçlar için kullanılmasını sağlayan yapılara su yapıları denir. Enerji üretimi, çevresel düzenleme, su temini, taşkın kontrolü su yapılarının başlıca kullanım amaçlarıdır (Berkün 2007).

Savaklar, akarsularda ve açık kanallarda su seviyesini düzenlemek, akımı kontrol etmek ve debi ölçmek için yapılan hidrolik yapılardır. Savaklar farklı geometrik şekillere sahiptir. Genellikle geniş tepeli savaklar ve keskin tepeli savaklar olmak üzere iki gruba ayrılır. Keskin tepeli savakların, dikdörtgen, üçgen ve ikizkenar yamuk şeklinde kesite sahip tipleri mevcuttur.

Akış yönünde sonlu bir tepe uzunluğuna sahip savaklar, geniş tepeli savak olarak adlandırılır. Geniş tepeli debi belirlemek için yapılan kontrol yapıları olarak bilinmektedir. Kanal içine yerleştirilen geniş tepeli savak üzerinden geçen akım, özelliklerini değiştirerek nehir rejimden sel rejimine geçer (Subramanya 2009). Bu akımlar karmaşık akım özelliklerine sahiptir. Akımıyla etkileşim halinde olan geniş tepeli savakların tasarımının iyi bir şekilde yapılabilmesi için; basınç alanı, hız alanı ve akım profilinin doğru bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Geniş tepeli savak yapısıyla etkileşim halinde olan akımların özelliklerinin belirlenmesi, fiziksel model deneyleriyle yapılabilmektedir. Bu konuyla ilgili birçok deneysel çalışma yapılmıştır. Ancak suyun hareket denklemlerinin analitik sonucunu elde etmek, bu denklemlerinin laminar, türbülans ve viskozite ifadeleri içermesi sebebiyle oldukça zordur. Bu sebepten Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ile sayısal çözümler elde edilmektedir.

HAD yöntemlerinin kullanılmaya başlanması ile hesaplamalarda önemli gelişmeler kaydedilmiş, ekonomik, hızlı ve kolay çözümlere imkân sağlanmıştır. Son yıllarda bilgisayarların hesaplama hızları artmış ve problemlerin çözüm süresi oldukça kısalmıştır. Ayrıca 3 boyutlu kompleks problemlerin çözümüne de olanak sağlamıştır. Bu özelliğe sahip olduğu için sayısal yöntemler, laboratuvar deneylerinin yerine önemli bir seçenek haline gelmiştir. Sayısal yöntemler ile diferansiyel formdaki denklemler (Navier-Stokes denklemleri), cebrik forma indirgenip daha sonra bilinen başlangıç ve sınır koşulları kullanılarak, bilgisayar yardımı ile çözülür. Denklemlerin çözümü için farklı

alternatif yöntemler olmakla birlikte bunların arasında sonlu hacimler yöntemi ön plana çıkmıştır. Diğer yandan, serbest yüzeyli akımların modellenmesinde, sıvı-hava arakesitinin belirlenebilmesi için çeşitli yaklaşımlara ihtiyaç vardır. Bunların en bilineni ve en çok kullanılanı Akışkan Hacmi (Volume of Fluid, VOF) yaklaşımıdır.

Bu çalışmada, geniş tepeli savak üzerinden geçen akımın deneysel ve sayısal modeli oluşturulmuştur. Deneysel çalışma, Bursa Uludağ Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hidrolik Laboratuvarı'nda bulunan açık kanalda yapılmıştır. Altı farklı debi için geniş tepeli savak üzerinden geçen akımın su yüzü profilleri çıkartılmış ve hız ölçümleri alınmıştır.

Sayısal çalışmada ise SimFlow programı kullanılarak, akımın üç boyutlu sayısal modeli oluşturulmuştur. Bu program, açık kaynak kodlu OpenFOAM'ın bir arayüzüdür. Daha sonra, deneysel ve sayısal veriler karşılaştırılmıştır.

Tezin ikinci bölümünde; kaynak araştırması, savaklar ile ilgili temel bilgiler ve Navier-Stokes denklemlerine yer verilmiştir. Üçüncü bölümde; deneysel ve sayısal modellemenin detayları verilmiştir. Dördüncü bölümde, çalışmadan elde edilen bulgulara yer verilmiş ve beşinci bölümde ise çalışmadan çıkarılan sonuçlar sunulmuştur.

## 2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

### 2.1. Kaynak Araştırması

Chanson ve Montes (1998), dairesel savak üzerinden geçen akımı incelemiştir. Deneysel çalışmada, 8 adet dairesel savak ve 5 akım durumu belirlemiştir. Sonuçta savak üzerinden geçen akım profilinin, memba koşullarından etkilendiğini söylemişlerdir. Şeker (2006), dikdörtgen ve üçgen savaklar arkasındaki akım hızlarını teorik ve deneysel olarak ele almıştır. Deneysel hız alanını, PIV cihazı ile ölçmüş ve elde ettiği deneysel verilerle ANSYS paket programından elde ettiği sayısal verileri kıyaslamıştır. Teorik hesaplamalarda VOF analizi ve potansiyel akım olmak üzere iki ayrı metod kullanmıştır. Elde ettiği su yüzü profillerinin, laboratuvar deneylerinden elde edilen su yüzü profilleriyle uyumlu olduğunu tespit etmiştir. Gonzalez ve Chanson (2007), tam boyutlu geniş-tepeli savak üzerinde bazı deneyler yapmışlardır. Memba ucunda hızlı bir akış dağılım olduğunu ve çıkıntı yapan tepe tasarımının, akış alanını etkileyebileceğini belirtmişlerdir. Kocaman (2007), baraj yıkılması problemini, deneysel, sayısal ve teorik olarak incelemiştir. Sayısal modeli çözmek için VOF yöntemine dayalı FLOW-3D paket programını kullanmıştır. Barajın mansabında değişik şekillere sahip, taban eşikleri kullanmıştır. Daralmalar yaparak, enkesit genişliğindeki ve akarsu yatağındaki değişimlerin taşkın dalgasının yayılmasına etkilerini incelemiştir. Deneysel ve sayısal sonuçları kıyaslamıştır. Şimşek (2011), yaptığı çalışmada, eğrisel geniş tepeli savak üzerinden geçen akımı incelemiştir. ANSYS-FLUENT paket programı ile SKE, SST, RNG, RKE ve RSM türbülans modellerini kullanmıştır. Bir boyutlu Lazer Doppler Anemometresi (LDA) ile akım hızını ölçmüştür. Deneysel ve sayısal sonuçları karşılaştırmış ve RNG  $k-\epsilon$  türbülans modelinin en iyi sonucu verdiğini gözlemlemiştir. Bal (2011), geniş tepeli savak üzerinden geçen akımı incelemiştir. ANSYS-FLUENT paket programı ile SKE, RNG, SST, RKE ve RSM türbülans modellerini kullanmıştır. Bir boyutlu LDA ile akım hızını ölçmüştür. Su yüzü profilini, VOF yöntemi ile belirlemiştir. Çalışmalar sonrasında deneysel ve sayısal sonuçlar karşılaştırmış ve en başarılı sonucu RNG  $k-\epsilon$  türbülans modeli vermiştir.

Bal ve ark. (2011), geniş tepeli savak üzerinden geçen akımı incelemiştir. Bu çalışmada noktasal hız, Lazer Doppler Anemometresi (LDA) ile ölçülmüştür. Sayısal model ANSYS-Fluent paket programı kullanılarak çözülmüştür. Standart  $k-\epsilon$ , RNG  $k-\epsilon$ ,



Realizable  $k-\varepsilon$ , Modified  $k-\omega$ , SST ve RSM türbülans modelleri kullanılarak sayısal hesaplamalar yapılmıştır. Elde edilen sayısal sonuçlar, deneysel sonuçları ile karşılaştırılmış ve en iyi sonucu SST modeli vermiştir.

Felder ve Chanson (2012), geniş tepeli savak üzerindeki su yüzü profilini, hız ve basınç dağılımlarını belirlemek için deneysel çalışmalar yapmışlardır. Üniform olmayan hız dağılımlarını ve hidrostatik olmayan basınç dağılımlarını dikkate alarak savak üzerindeki akış özelliklerini analiz etmişler. Soydan ve ark. (2012), trapez kesitli geniş tepeli savak üzerinden geçen akımı incelemişlerdir. Deneysel olarak su yüzü profilini, farklı akım koşulları için belirlemişlerdir. Aynı deney koşulu için ANSYS-Fluent paket programı ile sayısal modeli oluşturmuşlardır. Standart  $k-\varepsilon$  modelinin, kullanılan diğer modellere göre daha başarılı olduğunu söylemişlerdir.

Hoseini (2013), üçgen geniş-tepeli savak üzerinde akımı deneysel olarak incelemiştir. Debi katsayısını belirlemek için farklı geometriye sahip üçgen geniş-tepeli savak kullanmıştır. Boyut analizi sonucunda, membadaki toplam enerji yüksekliğinin ( $H_1$ ), savak uzunluğuna ( $L$ ) oranının ve Froude sayısının, üçgen geniş-tepeli savakların debi katsayısını belirleyen denklem üzerinde bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

Hamad (2013), birleşik kutu tipi menfez geniş-tepeli savak üzerinden geçen akım karakteristikleriyle ilgili deneysel bir çalışma yapmıştır. Membadaki su yüksekliği, menfezin iç geometrisi, menfez uzunluğu, menfezin iç yarıçapı, savak kret yüksekliği, savak genişliği ve savağın eğim açısı gibi en etkili parametrelerin, yapının performansı üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Sonuçta debi katsayısını bularak, yapının debisini tahmin eden denklemler elde edilmiştir. Ayrıca on iki farklı model ile bir laboratuvar kanalı içinde modellemeler yapmıştır. Qasim (2013), tek basamaklı geniş-tepeli savak üzerindeki deneysel akımı incelemiştir. Çalışmada HEC-RAS yazılımı kullanılarak sayısal modeli çözmüştür. Bu yazılım ile 5m uzunluğunda, 0,45m derinliğinde ve 0,30m genişliğinde yatay bir kanal üzerinde farklı debi durumlarında, su yüzü profili, hidrolik sıçrama konumunu bulmuştur. Castro-Orgaz ve Hager (2014), ayrıntılı iki boyutlu ve integral laminer sınır tabaka çözümlerinden, analitik bir çözüm elde etmişlerdir. Çalışma, küçük yarıçaplı dairesel savakların akım özelliklerini başarıyla tahmin etmiştir. Geliştirilen denklemler, ayırma kabarcığı için bir akım benzetimi kullanılarak geniş tepeli savaklara uygulanmıştır.

İlkentapar (2015), dört farklı geniş tepeli savak üzerinden geçen akımı incelemiştir.  $S=0,001$  kanal taban eğimi ve beş farklı debi durumunda çalışmıştır. Deneysel hız alanı ise Moline cihazı ile ölçülmüştür. FLOW-3D paket programı ile iki denklemlilik  $k-\epsilon$  türbülans modeli kullanılarak çözülmüştür. Modellemeden elde edilen sonuçlarla, deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Üç boyutlu model ile iki boyutlu modelin çözüm sonuçlarının birbirine oldukça yakın çıktığı gözlemlenmiştir. İlkentapar ve ark (2017), geniş tepeli savak üzerinde geçen akımı incelemiştir. Üç farklı debi kullanılarak membada ve mansapta hız dağılımları ve su yüzü profilleri ölçülmüştür. Sayısal model FLOW-3D paket programı ile çözülmüş ve su yüzü profilleri VOF yöntemiyle belirlenmiştir. Sonuç olarak elde edilen deneysel hız dağılımları ve su yüzü profilleri, sayısal sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Genel olarak deneysel ve sayısal sonuçlar birbirlerine yakın çıkmıştır.

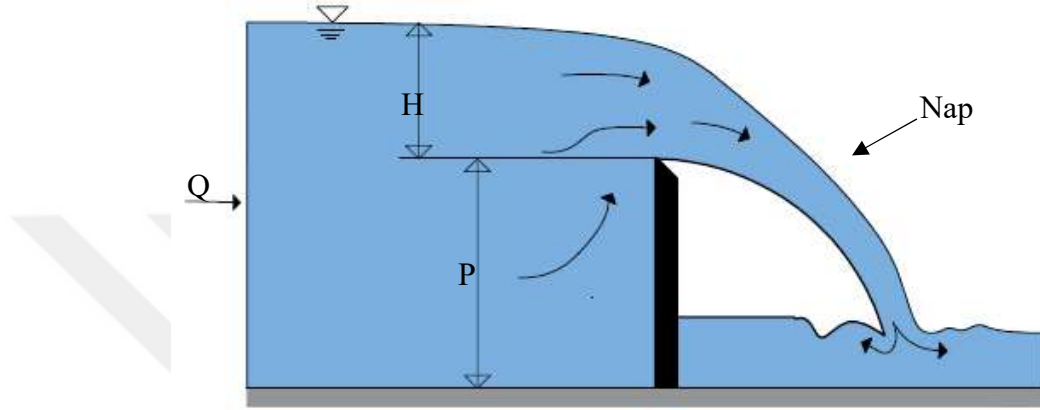
## **2.2. Savaklar**

Savaklar, açık kanallardaki suyun debisini ölçmek için kullanılan en eski yapılardan biridir. Savaklar; debi ölçümünün yanında açık kanalarda ve akarsularda su seviyesini düzenlemek, akımı kontrol etmek ve barajlarda ise taşkın sularını güvenli bir şekilde tahliye etmek için inşa edilen hidrolik yapılardır. Savaklar; açık kanal eksenine dik bir şekilde inşa edilmekte ve genel olarak suların havalandırılmasında, yağmur suyu kanallarında, kanalizasyon sistemlerinde ve sulama sistemlerinde kullanılmaktadır. Savaklar, genel olarak geniş tepeli savaklar ve keskin tepeli savaklar olmak üzere iki ayrı başlık altında sınıflandırılmakta ve öte yandan ogee savaklar ve labirent savak çeşitleri de bu sınıflandırmaya tabi olmaktadır. Ancak en çok kullanılan tipleri, geniş tepeli savaklar ve keskin tepeli savaklardır. Bu bölümde sadece keskin ve geniş tepeli savaklardan bahsedilmiştir. Bu iki savak çeşidinin şekilleri ve tanımları birbirlerine benzeyebilir ama hidrolik davranışları oldukça farklıdır.

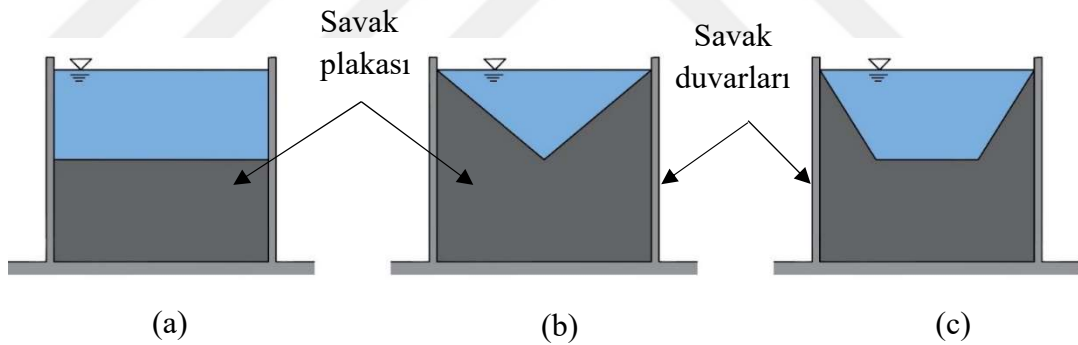
### **2.2.1. Keskin Tepeli Savaklar**

Keskin tepeli savaklar; akım doğrultusuna dik olarak yerleştirilmiş, üst tarafı keskin tepeye sahip, düşey bir plaka olup nap serbest bir jet halinde kretin üzerinden akar (Şekil

2.1). Savağın memba yüzüne yakın akımın düşey bileşeni için, akış bir alt yüzey oluşturup savaktan ayrılarak bir nap oluşturur. Bir miktar hava napın altında, toplanır. Eğer hava toplanması tamamen önlenirse oluşan boşluk, yapı üzerinde basıncın oluşmasına neden olur. Keskin tepeli savakların genellikle; üçgen savaklar, dikdörtgen savaklar ve trapez savaklar şeklinde farklı tipleri vardır (Şekil 2.2) ( Berkün 2015).



Şekil 2.1. Keskin tepeli savak



Şekil 2.2. Keskin tepeli savakların plaka tipleri (a) Dikdörtgen, (b) üçgen (c) trapez

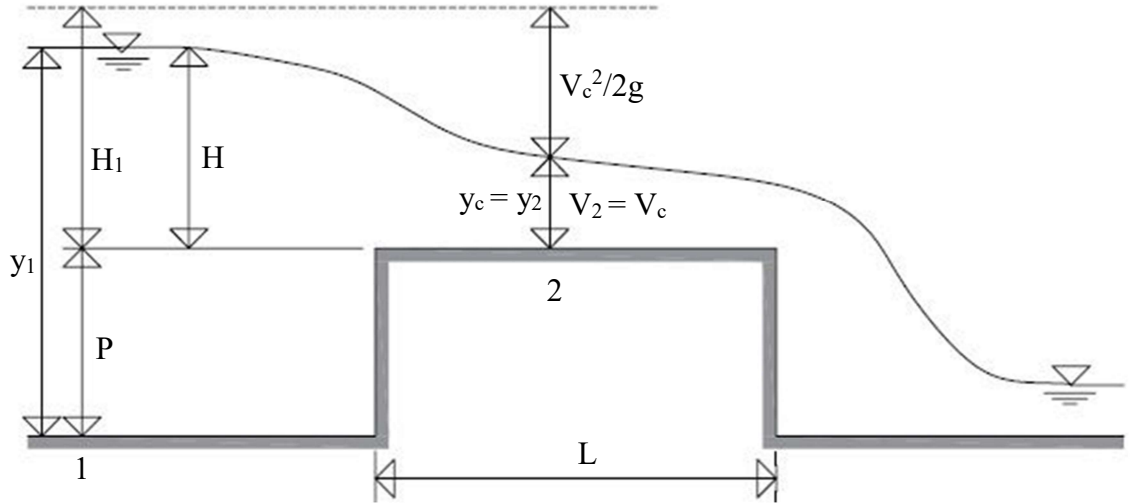
$Q$  debi,  $b$  savağın akıma dik genişliği,  $P$  savak yüksekliği,  $H$  savağın membasındaki akım yüksekliği ve  $C_d$  debi katsayısıdır. Reynold sayısına, savak geometrisine ve Weber sayısına bağlıdır.  $C_d$  kullanılma nedeni, yaklaşım hızı, viskozite, büzülme ve yüzey gerilimdir. Ackers tarafından  $H/P \leq 2$  için şu formülü verilmiştir.

$$Q = C_d \frac{2}{3} \sqrt{2g} b H^{3/2} \quad (2.1)$$

$$C_d = 0.598 + 0.0897 \frac{H}{P} \quad (2.2)$$

### 2.2.2. Geniş Tepeli Savaklar

Geniş tepeli savaklar, yatay bir tepe uzunluğuna sahip olup bunun üzerindeki basıncın hidrostatik olduğu kabul edilir. İyi bir tasarım için bu değerin savaklarda  $0,08 \leq H_1/L \leq 0,5$  aralığında olması istenir. Eğer  $H_1/L$  oranı 0,08'den büyük veya eşit değilse, savak boyunca oluşan enerji kayıpları ihmal edilemez. Diğer tarafından eğer  $H_1/L$  oranı 0,50'den küçük veya eşit değilse, savak üzerinde hidrostatik basınç dağılımı oluşmaz (French 1986). Eğer  $H_1/L$  oranı 0,08'den küçük ise viskozite tesirleri çok önemli olup, savağın üzerinde akım kritik altı rejimdedir. Geniş tepeli savaklar her ne kadar çeşitli tipleri varsa da, hidrolik analiz bakımında genellikle dikdörtgen tipini dikkate alınır. İki nokta arasında enerji kaybı olmadığını varsayarak ve ikincide noktada akış derinliği, kritik kabul edilerek Şekil 2.3'de geniş tepeli savak üzerindeki akım verilmiştir (Subramanya 2009). Burada  $H$  membada savak yüzeyinden su yüksekliği,  $H_1$  membada toplam enerji yüksekliği,  $y_1$  membada su derinliği,  $y_c$  kritik derinlik,  $V_c$  kritik hız ve  $P$  savak yüksekliğidir.



Şekil 2.3. Geniş tepeli savak üzerinden geçen akım

$$H_1 = y_c + \frac{V_c^2}{2g} = \frac{3}{2}y_c \quad (2.3)$$

Kritik hız aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$V_c = \sqrt{gy_c} \quad (2.4)$$

Kritik derinlik aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$y_c = \frac{2}{3}H_1 \quad (2.5)$$

İdeal birim debi aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$q_t = V_c y_c = \frac{2}{3} \sqrt{\left(\frac{2}{3}g\right)} H_1^{3/2} = 1.705 H_1^{3/2} \quad (2.6)$$

Enerji kayıpları ve ikinci noktanın derinliği, kritik derinliğe eşit olmadığı için, birim debi ( $q_t$ ) debi katsayısı ( $C_{d1}$ ) ile çarpılır.

$$q = q_t C_{d1} \quad (2.7a)$$

$$q = 1.705 C_{d1} H_1^{3/2} \quad (2.7b)$$

Denklem (2.7b) toplam enerji ( $H_1$ ) içerdiğinden kullanımı uygun değildir. Bunun yerine alternatif olarak aşağıdaki toplam debi denklemi kullanılır:

$$Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} b H^{3/2} \quad (2.8)$$

Burada  $b$ , savağın akıma dik genişliğidir.

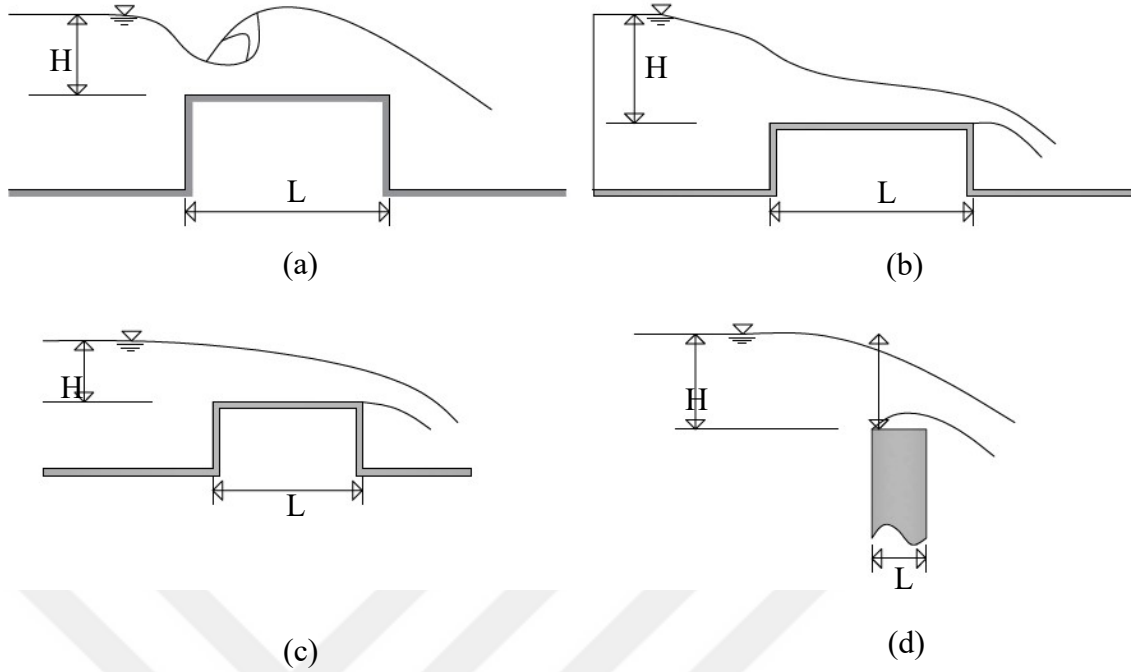
Geniş tepeli savaklarda  $C_d$  debi katsayısı bu bağıntıdan elde edilir (2.9).

$$C_d = \frac{Q}{\frac{2}{3} \sqrt{2g} b H^{3/2}} \quad (2.9)$$

### Geniş tepeli savakların sınıflandırılması:

Geniş tepeli savaklar  $H/L$  değerine göre aşağıdaki gibi sınıflandırılır (Şekil 2.4) (Subramanya 2009).

- $H/L \leq 0.1$ : Bu aralıkta ise kritik akış kontrolü savağın mansabında olup, savak yüzeyinin direnci,  $C_d$  değerinin belirlenmesinde önemli rol oynamakta ve uzun tepeli savak olarak isimlendirilir.
- $0.1 \leq H/L \leq 0.35$ : Bu aralıkta ise kritik akış kontrolü savağın membasında olup debi katsayısı bu aralıkta yavaşça değişir ve geniş tepeli savak olarak isimlendirilir.
- $0.35 \leq H/L \leq 1.5$ : Bu aralıkta ise su yüzey profili eğrisel olarak tüm savak üzerinde olacaktır. Akış kontrolü membada olup ve dar tepeli savak olarak isimlendirilir.
- $H/L > 1.5$ : Bu durumda ise akış memba köşesinden ayrılarak savak üzerinden akar. Akış yüzeyi son derece eğridir ve keskin tepeli savak olarak isimlendirilir.



**Şekil 2.4.** Geniş tepeli savaların sınıflandırılması; a) Uzun tepeli savak, b) Geniş tepeli savak, c) Dar tepeli savak, d) Keskin tepeli savak

### 2.3. Navier-Stokes Denklemleri

Navier-Stokes denklemleri hareket ve süreklilik denklemlerinden oluşup, akışkan mekaniğinin temel denklemleridir. Newton'un ikinci kanunun ( Newton's 2nd law) sonsuz küçük bir kontrol hacmine uygulanması ile Newtonyen bir akışkan için aşağıdaki Navier-Stokes denklemleri elde edilebilir.

Süreklilik denklemi, korunum formunda (conservation) aşağıdaki gibi ifade edilir (Wendt 2009).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (2.10)$$

Denklem (2.10) süreklilik denklemi olup,  $\rho$  yoğunluğu,  $\vec{V}$  hız vektörünü ve  $t$  zamanı göstermektedir. Akım sıkıştırılmaz ise yoğunluk sabittir ( $\rho$  sabit ).Bu durumda:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (2.11)$$

Newton'un ikinci kanunu, hareketli akışkan elemanına uygulandığında, akışkan eleman üzerindeki net kuvvet, kütle ile ivmenin çarpımından elde edilir. Akış elemanına etki eden iki faktör vardır. Bunlar; cisim kuvveti ve yüzeysel kuvvetlerir.

1. Cisim kuvveti ( $f$ ): Akış elemanının volümetrik kütesine doğrudan etki eden kuvvettir. Örneğin;  $z$  yönünde yerçekimi kuvveti.
2. Yüzey kuvveti: Akış elemanının yüzeyine doğrudan etki eden kuvvettir ve sadece iki sebebi vardır. Bunlar; yüzeye etki eden basınç dağılımı ve yüzeye etki eden kesme ve normal stres dağılımlarıdır (Wendt 2009).

$x$ - yönündeki momentum denklemi aşağıda verilmiştir:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (2.12)$$

Denklem (2.12);  $x$ -yönündeki momentum denklemini,  $P$  basıncı,  $\tau$  gerilme tensörünü ve  $f$  cisim kuvvetini temsil etmektedir.

(2.12) denkleminin sol tarafı aşağıdaki formda yazılabilir:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{V}) \quad (2.13)$$

Denklem (2.13), denklem (2.12)'de yerine konulursa aşağıdaki biçimi alır.

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (2.14)$$

$$\tau_{xx} = \lambda \nabla \cdot \vec{V} + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.15)$$

$$\tau_{xy} = \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (2.16)$$

$$\tau_{xz} = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (2.17)$$

Burada,  $\lambda$  kütle viskozite katsayısını,  $\tau$  gerilme tensörünü,  $\mu$  moleküler viskozite katsayısını temsil etmektedir.

Süreklilik ve momentum denklemleri daha açık biçimde yazılırsa  $x$  yönündeki Navier-Stokes denklemi aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} \\
& = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \nabla \cdot \vec{V} + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] \\
& \quad + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] + \rho f_x
\end{aligned} \tag{2.18}$$

Akım sıkıştırılmaz ve Newtonyen ise momentum denklemleri aşağıdaki gibi gösterilir.

x-yönündeki denklem:

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho f_x \tag{2.19}$$

y-yönündeki denklem:

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho f_y \tag{2.20}$$

z-yönündeki denklem:

$$\begin{aligned}
& \rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\
& = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho f_z
\end{aligned} \tag{2.21}$$

Yukarıdaki denklem sistemine bakıldığında zaman bilinmeyen sayısı dört adettir.  $P$  (basınç) değerini ve  $u$ ,  $v$ ,  $w$  hız vektörünün 3 bileşenini göstermektedir. Bununla birlikte sistemde 3 tane lineer momentum denklemi ve bir tane süreklilik olmak üzere toplamda 4 tane denklem olup, denklem sayısı sistemin bilinmeyen sayısına eşittir. Buna karşın sıkışmayan, sabit viskoziteli akışkanlar için geçerli olan bu denklem sisteminin genel bir çözümü yoktur. Ancak uygun başlangıç ve sınır koşulları altında sayısal metotlar ile çözülebilir. Bunun için yoğunluk, viskozite ve kütleli kuvvetlerin bilinmesi gerekmektedir.

Sonuçta denklem (2.19), (2.20) ve (2.21)'den oluşan hareket denklemleri aşağıdaki gibi kapalı formda yazılabilir.

$$\rho \frac{d\vec{V}}{dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} + \rho \vec{f} \tag{2.22}$$



### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1. Deneysel Çalışmalar

Deneyler; Bursa Uludağ Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hidrolik Laboratuvarı'nda bulunan, genişliği 0.055 m, yüksekliği 0.15 m ve uzunluğu 1.44 m olan Tecquipment H17 model açık kanal düzeneğinde yapılmıştır. Kanalın eğimi sıfır olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu kanalın tabanı pürüzsüz çelikten ve yan duvarlar cam malzemeden yapılmıştır (Şekil 3.1). Suyu düzenli bir şekilde kanala verebilmek için su deposundan pompa vasıtası ile suyun devir daimi sağlanmıştır. Akımı kontrol edebilmek için OAG 100 B Hidrolik tezgah kullanılmıştır (Şekil 3.2).



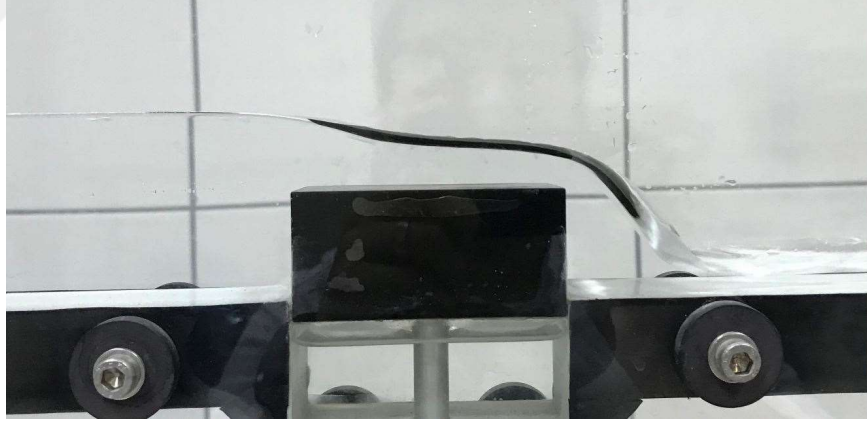
Şekil 3.1. Deneyde kullanılan kanal

Bu hidrolik tezgahta değişken devirli bir santrifüj pompa kullanılmıştır. Pompa debisi, sıcaklık ve basınç farkı gibi değerler dijital ekranda gösterilmektedir. Kanalın sonunda akım serbest olarak depoya boşalmaktadır. Bu depoya akan debinin ölçülmesi için kronometre kullanılmıştır.



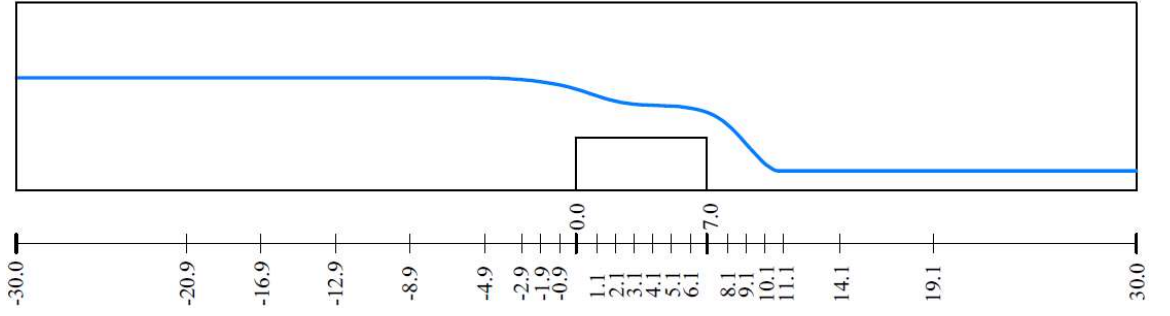
**Şekil 3.2.** Hidrolik tezgah

Deneyde, genişliği 0.055 m, derinliği 0.028m ve uzunluğu 0.07 m olan geniş tepeli savak kullanılmıştır (Şekil 3.3).



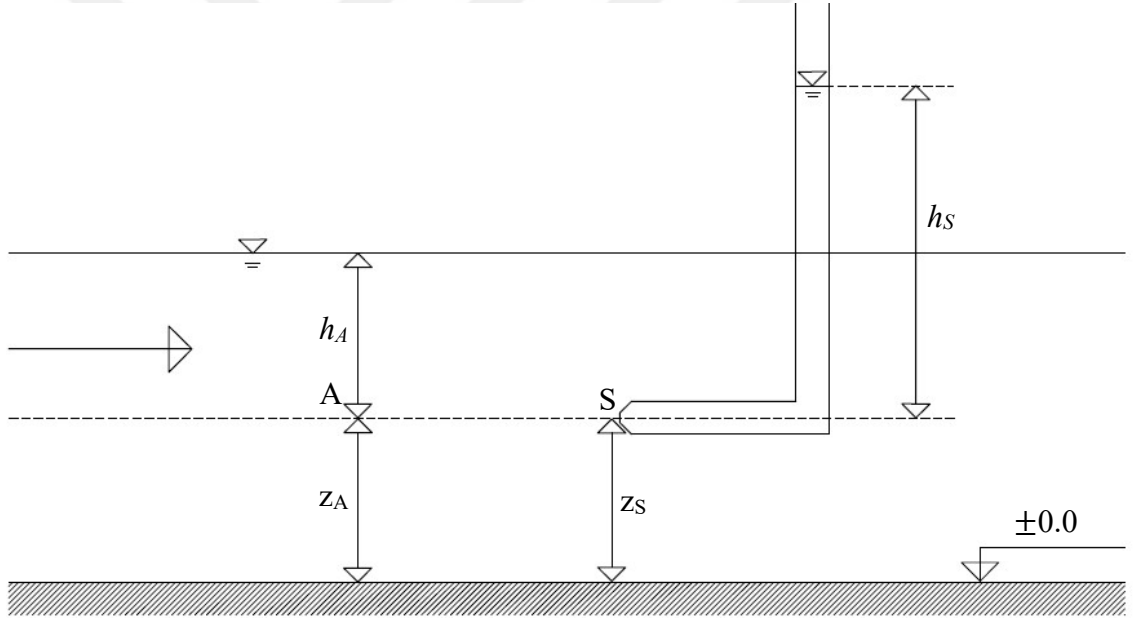
**Şekil 3.3.** Deneyde kullanılan savak

Savak kanal başından itibaren 0,49. metreye yerleştirilmiştir. Akım yönündeki hız bileşeni ( $U_x$ ), pitot tüp ile ölçülmüştür. Tüm deneylerde  $x=-20,9$  ile  $19,1$  m arasında belirli kesitlerde ve her bir kesitte farklı derinliklerde hız ölçümleri alınmıştır. Şekil 3.4'de hız ölçümü alınan kesitler şematik olarak gösterilmiştir.



**Şekil 3.4.** Kanalın üzerinde ölçüm alınan kesitler

Pitot tüp, 1732 yılında Henri Pitot tarafından icat edilmiştir. Pitot tüp, akışın kinetik enerjisini potansiyel enerjiye dönüştürerek noktasal olarak akışkanın hızını ölçer. Pitot tüpün açık kanalda çalışma prensibi Şekil 3.5’de verilmiştir.



**Şekil 3.5.** Açık kanalda pitot tüpün çalışma prensibi

$$H_A = H_S \text{ ve } V_S = 0 \quad (3.1)$$

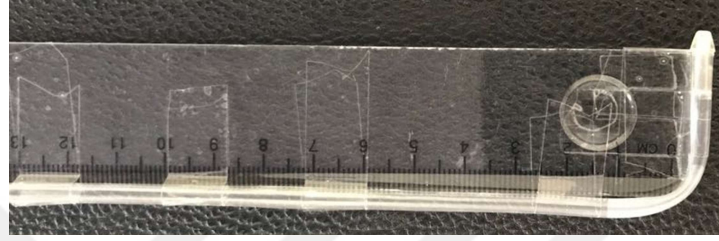
$$Z_A + h_A + \frac{V_A^2}{2g} = z_S + h_S \text{ ve } z_A = z_S \quad (3.2)$$

$$h_A + \frac{V_A^2}{2g} = h_S \quad (3.3a)$$

$$\frac{V_A^2}{2g} = h_S - h_A \quad (3.3b)$$

$$V_A = \sqrt{2g(h_S - h_A)} \quad (3.3c)$$

Pitot tp, bir cetvel ve bir medikal infüzyon seti kullanılarak yapılmıştır. Bu pitot tüp ile llen hızlardaki hata payı  $\pm 0,1$  m/s olarak belirlenmiştir ( Şekil 3.6).



(a)



(b)

**Şekil 3.6.** (a) Pitot tp, (b) Pitot tüp ile lm alınırken

Su yüzü ölçümleri, kanal tabanı referans alınarak yapılmıştır. Bu ölçümler, akım kararlı hale geldikten sonra kanalın orta noktasından alınmıştır.

### **3.2. SimFlow ile Sayısal Modelleme**

Hidrolik problemlerinin çözümünde farklı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımları kullanılmakta olup bu yazılımlar su yapılarının tasarımında önemli kolaylıklar sağlamaktadır. Su ile yapı etkileşiminin fiziksel modeller ile laboratuvar ortamında test edilmesi, öngörülen performans ölçülerinin sağlanıp sağlanmadığı hakkında önemli bilgiler vermektedir. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği kapsamında FLOW-3D, FLUENT, STAR CFD, XFlow, Flotran, ANSYS, SimFlow gibi birçok paket program geliştirilmiştir. Bu çalışmada, sayısal model SimFlow paket programı ile oluşturulmuştur.

#### **3.2.1 SimFlow paket programının genel özellikleri**

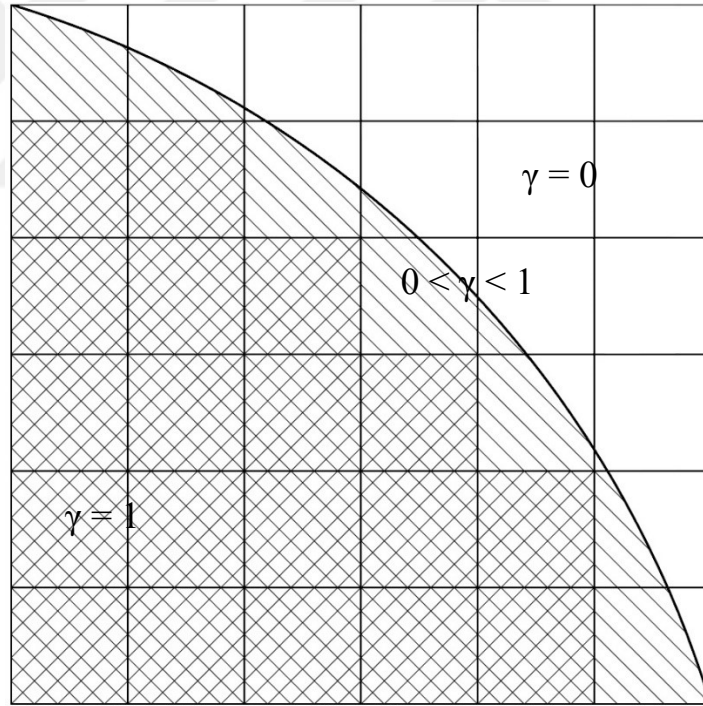
SimFlow programı, genel amaçlı HAD yazılımıdır (Anonim 2004, Anonim 2012). Bu yazılım açık kaynak kodlu OpenFOAM'un bir arayüzüdür. OpenFOAM ücretsiz olup 2004 yılında OpenCFD şirketi tarafından çıkarılmış ve geliştirilmiştir. Mühendislik ve bilim alanlarında geniş bir kullanıcı ağına sahiptir. OpenFOAM; kimyasal reaksiyonlar, türbülans ve ısı transferi, akustik, katı mekaniği ve elektromanyetik konularını içeren karmaşık problemleri çözmek için çeşitli özelliklere sahiptir. SimFlow programı ile çözüm ağı oluşturma veya aktarma (import), sınır koşullarını tanımlama, paralel işlemci ile hesaplama yapmak mümkündür. Sonuçlar, ParaView programıyla görünmektedir. SimFlow, genel haldeki süreklilik, momentum ve enerji temel denklemlerini kullanılarak, her türlü akışkanlar mekaniği problemini çözebilmektedir. Örneğin; sıkıştırılabilir ve sıkıştırılmaz sıvı akışları, türbülanslı akışlar, ısı transferi, çok fazlı akışlar, kavitasyon, kimyasal reaksiyonlar bu problemlerden bazılarıdır. Öte yandan aerodinamikte çok çeşitli uygulamalarda harici ve dâhili akışları simüle etme imkânı sunar. Örneğin karayolu taşıtları, uçak, trenler, binalar, endüstriyel tesisler gibi.

Su-hava arakesitine sahip serbest yüzeylerin belirlenmesi için yazılımda VOF yöntemi kullanılmaktadır. VOF yönteminde hücrelerin boş, tamamen suyla dolu veya kısmen suyla dolu olduğu belirlenir. Bu yöntemde bir hücre içinde akışkanın hacim oranı  $\gamma$  ile

tanımlanır. Eğer bir hücre tamamen akışkan ile dolu ise  $\gamma = 1$ , tamamen boş ise  $\gamma = 0$  veya kısmen dolu ise hücrede akışkanın kapladığı yüzde değerini alır (Şekil 3.7). Serbest yüzey, bir eğime sahip ise bir hücredeki yüzeyin yerini ve eğimini belirlemek için kendisini çevreleyen hücreleri dikkate alan bir algoritma kullanılmaktadır.

VOF yöntemiyle serbest yüzeyin belirlenmesi 3 kısımdan oluşur. Önce serbest yüzeyin yeri bulunur ve daha sonra bu yüzey, su ve hava arasında keskin bir arakesit olarak belirlenir. Son olarak bu arakesitin sınır şartları uygulanır. Arakesit üzerinde sıfır kayma gerilmesi ve sabit basınç sınır koşulları uygulanmaktadır. Akışkan hacmi fonksiyonu  $\gamma$ 'nın değişimi aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + u \frac{\partial \gamma}{\partial x} + v \frac{\partial \gamma}{\partial y} + w \frac{\partial \gamma}{\partial z} = 0 \quad (3.4)$$



**Şekil 3.7.** Akışkan hacminin ağ üzerindeki dağılımı

VOF yönteminde bir momentum denklemi ve bir süreklilik denklemi çözülmektedir (Hemida 2008). Denklem 2.22 aşağıdaki gibi yazılır:

$$\rho \frac{d\vec{V}}{dt} = -\nabla p + u\nabla^2\vec{V} + \rho\vec{f} - F_s \quad (3.5)$$

Burada  $F_s$ , serbest yüzeylerde yüzey gerilme kuvvetidir. Sıkıştırılmaz akım için süreklilik denklemi;

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (3.6)$$

şeklinde ifade edilir. Hücredeki akışkan hacmi aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$F_{vol} = \gamma V_{cell} \quad (3.7)$$

Burada  $F_{vol}$  hücredeki akışkan hacmi olup,  $\gamma$  bir hücrede akışkan fraksiyonu olarak 0-1 arasında değer alır.  $\gamma$  skalar fonksiyonu aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma \vec{V}) = 0 \quad (3.8)$$

OpenFOAM'da, VOF denklemi aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma \vec{V}) + \nabla \cdot (\gamma(1-\gamma)\vec{V}_r) = 0 \quad (3.9)$$

Burada  $\vec{V}_r$ , ara yüzü sıkıştırmak için uygun bir hız alanını göstermektedir. Bu yapay terim,  $\gamma(1-\gamma)$  teriminden dolayı sadece arayüzde aktiftir.

$$\rho = \gamma\rho_1 + (1-\gamma)\rho_2 \quad (3.10)$$

Burada  $\rho_1$  ve  $\rho_2$  ara yüzünün iki tarafından akışkanların yoğunluğudur. Yüzey gerilme kuvveti aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$F_s = \sigma\kappa(x)\vec{n} \quad (3.11)$$

Burada  $\vec{n}$ , arayüze normal bir birim vektördür ve  $\kappa$  arayüzün eğriliğini temsil etmektedir.

Bunlar, aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\vec{n} = \frac{\nabla\gamma}{|\nabla\gamma|} \quad (3.12)$$

$$\kappa(x) = \nabla \cdot \vec{n} \quad (3.13)$$

### 3.2.2. Realizable k-ε türbülans modeli

SimFlow paket programın içinde mevcut birkaç farklı türbülans modeli vardır. Bunlar Laminar, Reynold's Averaged Navier-Stokes (RANS), ve Large Eddy Simulation (LES) modelleridir. RANS modeli içinde  $k$ - $\varepsilon$ , Renormalization Group RNG  $k$ - $\varepsilon$ , Realizable  $k$ - $\varepsilon$ , Spallart-Allmaras,  $k$ - $\omega$ ,  $k$ - $\omega$  SST ve  $k$ - $kI$ - $\omega$  modelleri mevcuttur. Bu çalışmada Realizable  $k$ - $\varepsilon$  türbülanslı modeli kullanılmıştır (Shih ve ark 1995, Cable 2009). Bu modelde türbülans kinetik enerjisi  $k$  ile ve dağılma oranı (dissipation rate)  $\varepsilon$  ile gösterilmektedir.

Türbülans kinetik enerji denklemi;

$$\frac{D}{Dt}(\rho k) = \nabla \cdot (\rho D_k \nabla k) + \rho G - \frac{2}{3} \rho (\nabla \cdot \vec{V}) k - \rho \varepsilon + S_k \quad (3.14)$$

Dağılma oranı denklemi;

$$\frac{D}{Dt}(\rho \varepsilon) = \nabla \cdot (\rho D_\varepsilon \nabla \varepsilon) + C_1 \rho |S| \varepsilon - C_2 \rho \left( \frac{\varepsilon^2}{k + (v\varepsilon)^{0.5}} \right) + S_\varepsilon \quad (3.15)$$

Türbülans viskozitesi aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$\nu_\mu = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.16)$$

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^{(*)}}{\varepsilon}} \quad (3.17)$$

şeklinde ifade edilir.  $C_\mu$ ; ortalama gerilme, döner sistemin açışal hızı ve türbülanslı kinetik enerji, dağılma oranı ve dönme hızlarının bir fonksiyonudur. Denklem (3.17)'de bulunan terimler;

$$U^{(*)} = \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}} \quad (3.18)$$

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k, \quad \Omega_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk}\omega_k$$

$$A_s = \sqrt{6} \cos \phi, \quad \phi = \frac{1}{3} \arccos(\sqrt{6}W)$$

$$W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\tilde{S}^3}, \quad \tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (3.19)$$

$$A_0=4$$



Burada  $\tilde{\Omega}_{ij}$  rotasyon tensörünün ortalama oranı,  $\omega_k$  açısız hızı ve  $S_{ij}$  şekil değıştirme hızı tensörüdür. Denklem (3.15)'deki katsayılar aşğıdaki gibi hesaplanır;

$$C_1 = maks \left\{ 0.43; \frac{\eta}{5 + \eta} \right\}$$

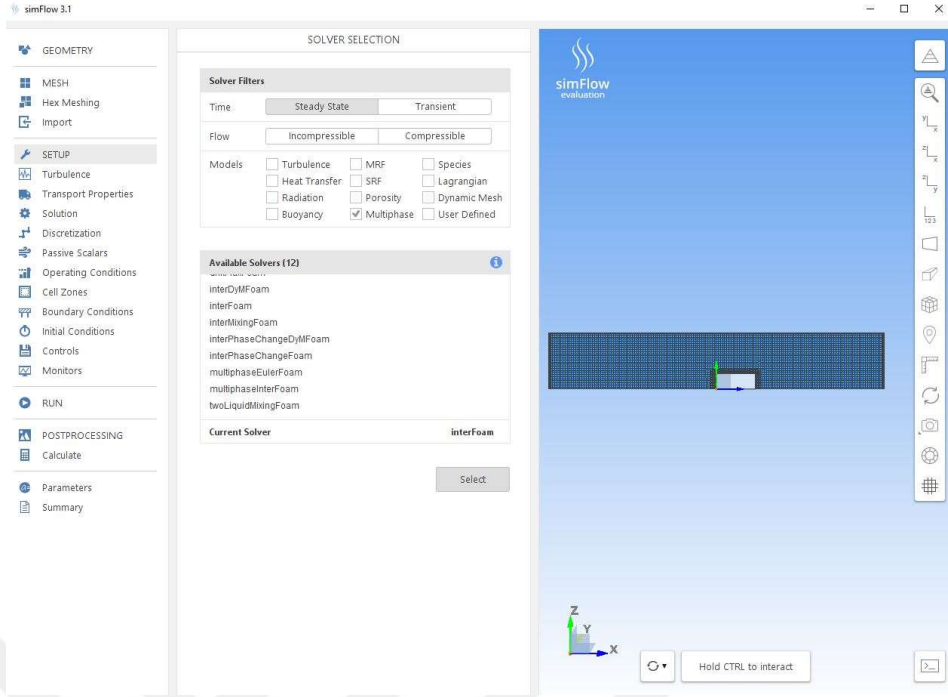
$$\eta = \frac{Sk}{\varepsilon}, \quad S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (3.20)$$

$$C_2=1,9$$

Realizable k- $\varepsilon$  modelinin geliştirilmiş biçimi ile yüksek Reynolds sayısına sahip ve türbölanslı akışlar için uygun olduğu ifade edilmiştir (Shih ve ark 1995). Ayrıca, Realizable k- $\varepsilon$  modeli; standart duvar fonksiyonu kullanır ve boyutsuz duvar mesafesi dikkatli seçilmelidir ( $30 < y^+ < \sim 100$ ).

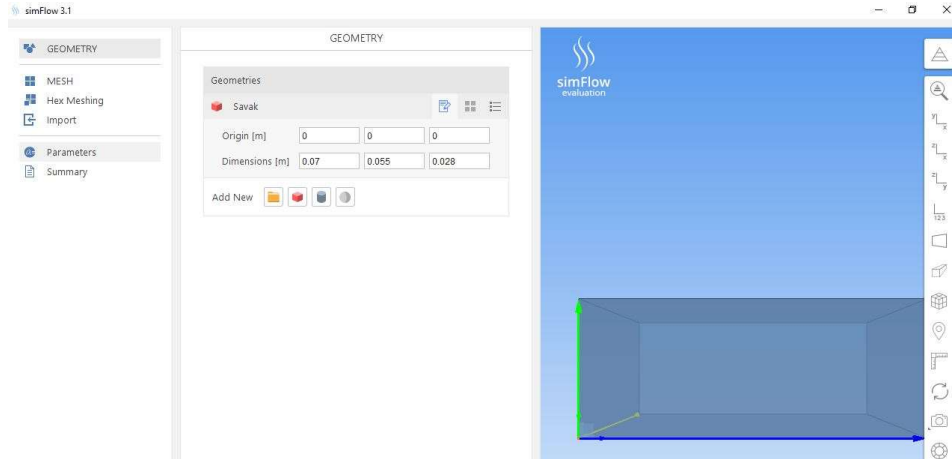
### 3.2.3. Uygulama

SimFlow ile yapılacak çözümlerde gerekli olan, akım alanında bulunan katı cismin nasıl modellendiğidir. Ancak ele alınacak modele göre programın içinde hazır bulunan elemanlar kullanılabilir veya AutoCAD-3D, Sketch Up, 3D max, Solidworks gibi modelleme yapan programlar yardımıyla STL, STEP, IGES, IGS, BREP ve OBJ dosyası oluşturularak programa aktarılır. Bu çalışmada savak geometrisi SimFlow programının içinde bulunan elemanlar yardımı ile çizilmiştir. SimFlow programıyla bir hidrolik modeli çözmek için gerekli adımlar; modelin çizimi (Geometry), çözüm ağının oluşturulması (Hex Meshing), çözücünün seçilmesi (Setup), sınır koşullarının girilmesi, başlangıç koşulunun girilmesi, hesaplama (Run) ve analiz sonucun görüntülenmesi (Postprocessing) şeklinde olmaktadır. Şekil 3.8'de SimFlow programının arayüzü verilmiştir.



**Şekil 3.8.** SimFlow program arayüzü

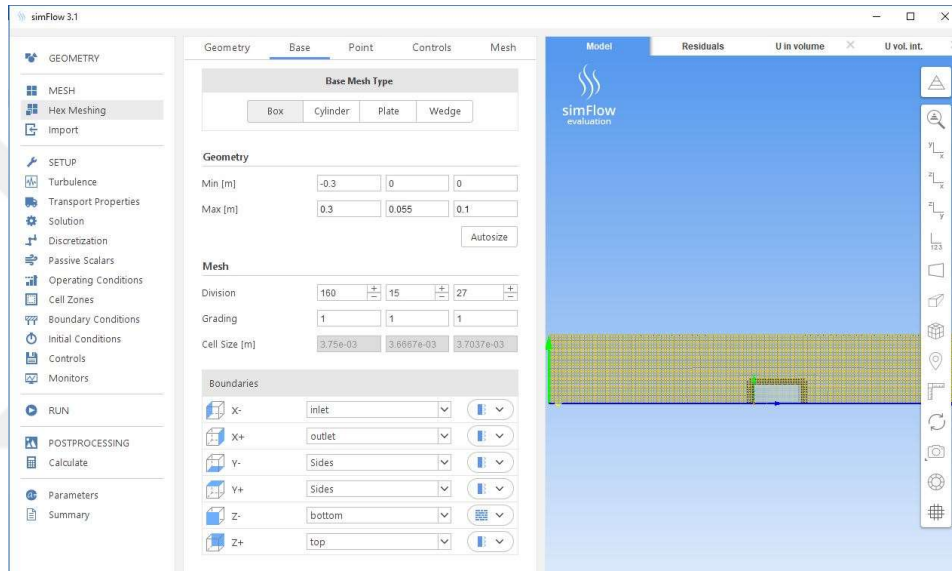
Şekil 3.8 de görülen sekmeler sırası ile takip edilerek çözüm yapılır. Geometri sekmesi kullanılarak, akım alanıyla ilgili şekiller çizilir veya başka programlar ile çizilmiş şekiller açılır (Şekil 3.9).



**Şekil 3.9.** Çizilen savağın gösterimi

### Çözüm ağının oluşturulması:

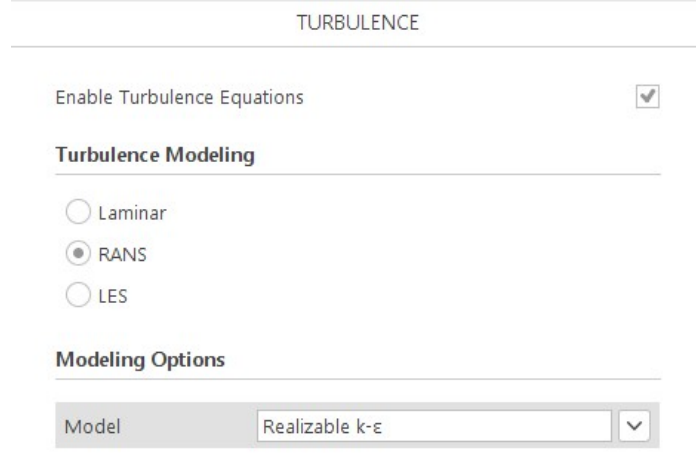
Hex Meshing sekmesi çizilen geometriye çözüm ağı uydurmaya yarayan sekmedir. Sekme kendi içersinde Geometry, Base, Point, Controls, Mesh ve Boundaries olarak alt sekmelere ayrılmaktadır. Tüm modellemeler için hücre aralığı 0.375 cm olarak belirlenmiştir. Çözüm ağı,  $x$  doğrultusunda 160,  $y$  doğrultusunda 15,  $z$  doğrultusunda 27 parçaya ayrılmış ve savak kısmında hücre boyutları kademeli olarak 4 kat küçültülmüştür. Sıklaştırma yapıldığı için kanal geometrisinde toplamda 83054 hücre oluşturulmuştur (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Çözüm ağının oluşturulması

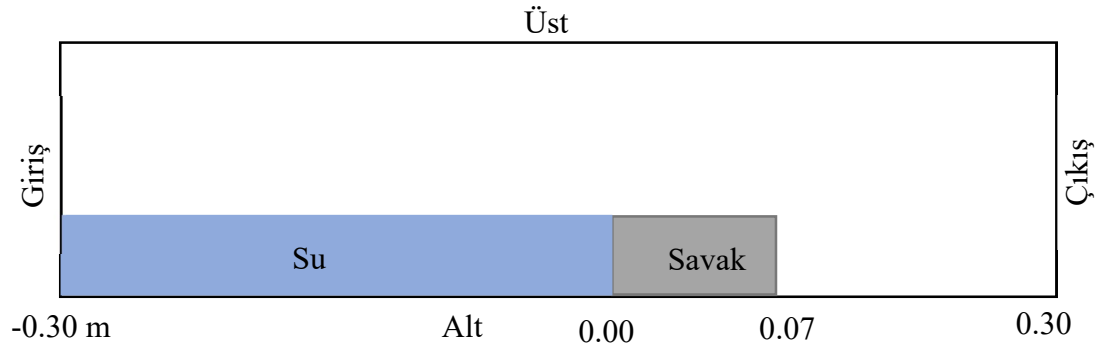
### Ayarlar:

Setup sekmesinde, çok fazlı akımlar çözmeye yaran interfoam çözücü seçilmiştir. Turbulence kısmında; kullanılacak türbülans modeli (Turbulence Modeling) RANS-Realizable  $k$ - $\epsilon$  olarak seçilmiştir (Şekil 3.11).



**Şekil 3.11.** Türbülans modelinin seçilmesi

Şekil 3.12 'de geniş tepeli savak üzerinden geçen açık kanal akımının sayısal modeli için kullanılan çözüm bölgesi ve sınır koşulları gösterilmektedir. Modelleme üç boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Sınır koşullarının tanımlanmasında, kanal girişinde debi değeri girilmektedir. Kanal tabanı ve yan duvarları, duvar (wall) olarak tanımlanmıştır. Duvar sınırları için, standart duvar fonksiyon opsiyonu kullanılmıştır. Pürüzlülük yüksekliği 0 m ve pürüzlülük sabiti 0,5 olarak belirtilmiştir. Sınır şartları Çizelge 3.1'de verilmiştir.



**Şekil 3.12.** Çözüm bölgesi ve sınır koşulları

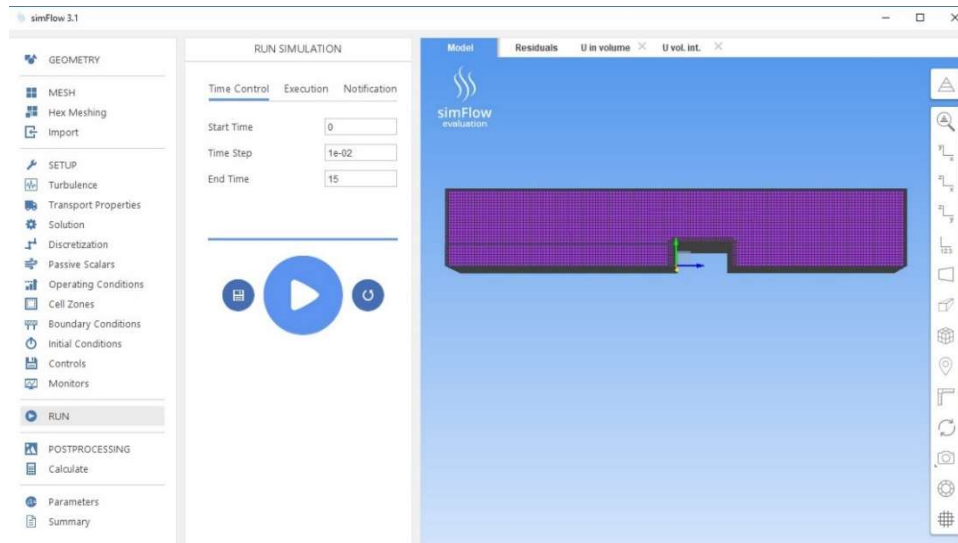
**Çizelge 3.1. Sınır şartları\***

	<b>Basınç</b>	<b>Hız</b>
Üst	0	ZG
Alt	FFP	NS
Giriş	FFP	VHI
Çıkış	FFP	IO
Sol Duvar	FFP	NS
Sağ Duvar	FFP	NS

- \* FFP (Fixed Flux Pressure), Sabit Akı Basıncı: Bu sınır koşulu, basınç grandyantını öyle bir değere ayarlar ki sınırdaki akı, hız sınırı koşulu ile belirtilen değerdir.
- ZG (Zero Gradient), Sıfır Gradyant: Bu sınır koşulu, sınır iç alanından sınır yüzeylerine sıfır gradyant durumu uygular.
- NS (No-Slip), Kaymama Koşulu: Bu sınır koşulu, duvarlarda hızı sıfıra sabitler.
- VHI (Variable Height Inlet), Değişken Yükseklikte Giriş: Bu sınır koşulunda debi girilir.
- IO (Inlet-Outlet), Giriş-Çıkış: Bu sınır koşulu çıkış sınırına uygulandığından, bu sınırdan giren akım hızı belirlenir. Bu uygulamada giriş hızı sıfır olarak girilmiştir.

### **Programın çalıştırması:**

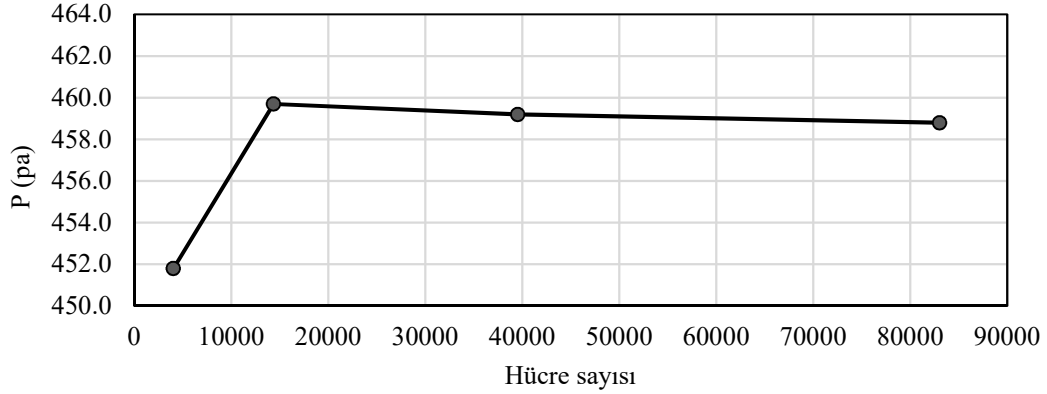
Run, analiz sekmesidir. Problem, kararlı akım problemi olduğu için akım yaklaşık 8 saniye sonunda kararlı hale gelmektedir, bu nedenle çözüm süresi kısmına 15 saniye girilmiştir (Şekil 3.13). Durma kriteri olarak, hız bileşenlerindeki ve basınçtaki değişimin 0.001'den küçük olması belirlenmiştir.



**Şekil 3.13. SimFlow run sekmesi**

### Çözüm ağı yakınsama çalışması:

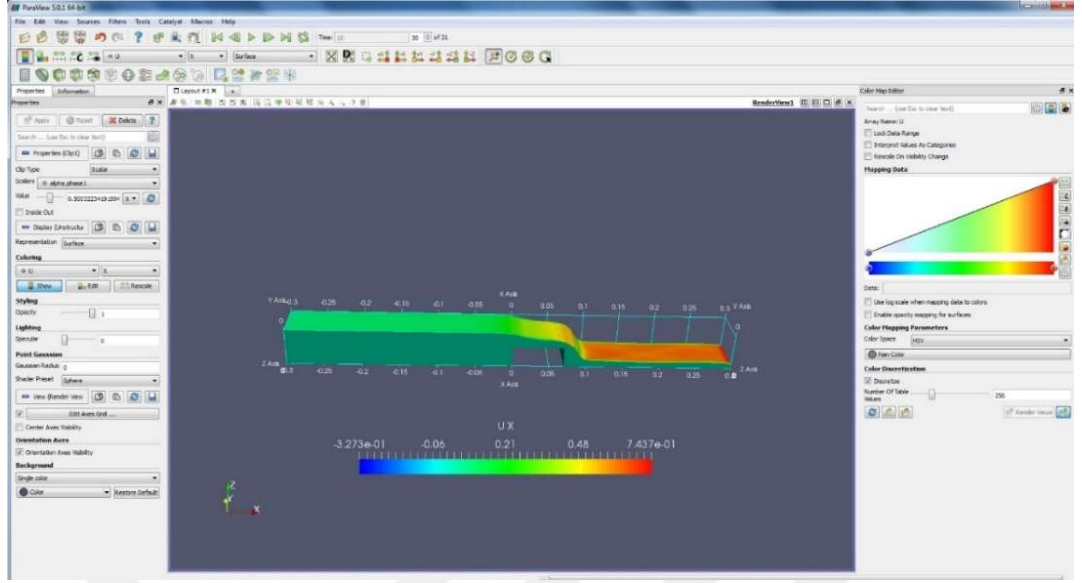
Öncelikle, modelin birkaç kez farklı sayıda hücre ile çalıştırılmasıyla bir çözüm ağı yakınsama çalışması gerçekleştirilmiştir. Her çalışmadan sonra maksimum basınçtaki değişim gözlemlenmiştir. 83054 hücreli çözüm ağında bu değer %0,1'in altına düşmüş ve dolayısıyla çözüm ağı yakınsama gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. Farklı çözüm ağı yoğunluğuna karşı maksimum basınç

### Sonuçları görüntüleme:

Analiz bittikten sonra, sonuçları görüntülemek için ParaView yazılımı kullanılmaktadır (Şekil.3.15). ParaView yazılımı, bir açık kaynak kodlu, Multi-Platform veri analizi ve görselleştirme uygulamasıdır.



Şekil 3.15. ParaView Programının arayüzü

#### 4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Çizelge 4.1’de deneylerde ölçülen debi değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.1. Debi değerleri

1.Deney (L/s)	2.Deney (L/s)	3.Deney (L/s)	4.Deney (L/s)	5.Deney (L/s)	6.Deney (L/s)
0,220	0,277	0,330	0,391	0,456	0,514

İkinci bölümde iyi bir tasarım için  $H_1 / L$  oranının  $0.08 \leq H_1/L \leq 0.5$  aralığında olması tavsiye edilmiştir. Bu bölümde  $H_1/L$  oranının kontrolü yapılmıştır.  $Fr_{up}$  mambadaki froude sayısı,  $y^+$  boyutsuz cidar mesafesi,  $H$  mambada savak yüzeyinden su yüksekliği,  $Q$  debi,  $C_d$  debi katsayısı ve  $L$  savağın uzunluğudur. Çizelge 4.2’de deneysel ve sayısal modeller ile ilgili parametreleri verilmiştir.

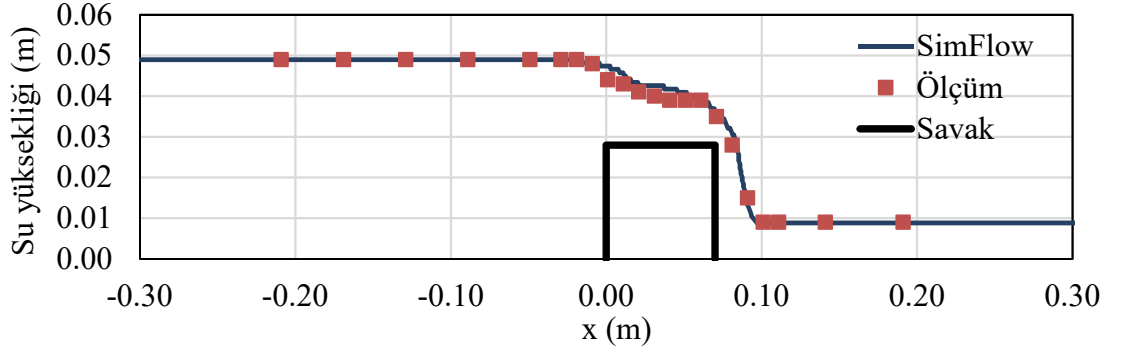
Çizelge 4.2. Deneysel ve sayısal modeller ile ilgili parametreler

Deney. no	$Q$ (L/s)	$C_d$	$Fr_{up}$	$y^+$	$H$ (cm)	$H_1$ (cm)	$H_1/L$	Kontrol
1	0,220	0,45	0,12	67,18	2,1	2,13	0,30	$0.08 \leq H_1/L \leq 0.5$
2	0,277	0,45	0,13	71,21	2,4	2,45	0,35	
3	0,330	0,46	0,15	75,23	2,7	2,76	0,39	
4	0,391	0,51	0,17	79,25	2,8	2,88	0,41	
5	0,456	0,51	0,18	80,24	3,1	3,20	0,46	
6	0,514	0,53	0,20	81,22	3,3	3,40	0,48	

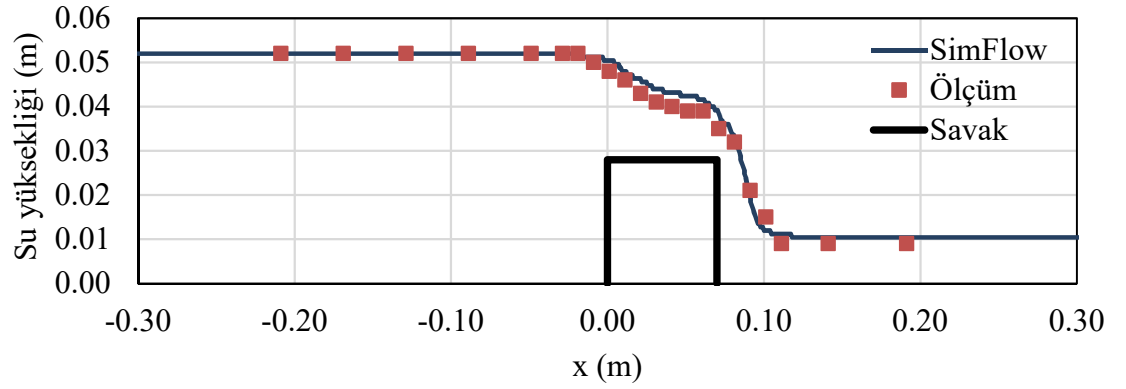
##### 4.1. Su yüzey profilleri

Deneysel verilerin sayısal olarak modellenmesi SimFlow paket programıyla gerçekleştirilmiştir. Programa ait özellikler ve veri girişi 3. bölümde bahsedilmiştir. Bu bölümde programdan elde edilen su yüzü profilleri ile deneysel olarak elde edilen sonuçlar grafiksel olarak verilmiştir (Şekil 4.1-4.6). Sayısal modellemeler üç boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir.

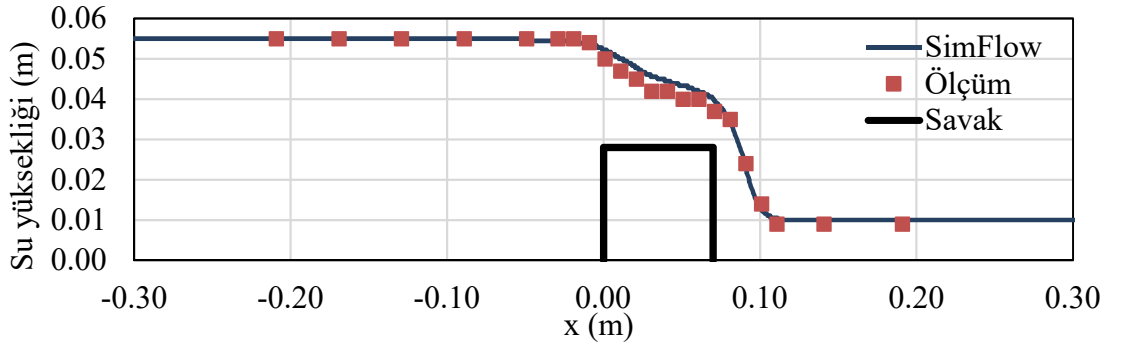




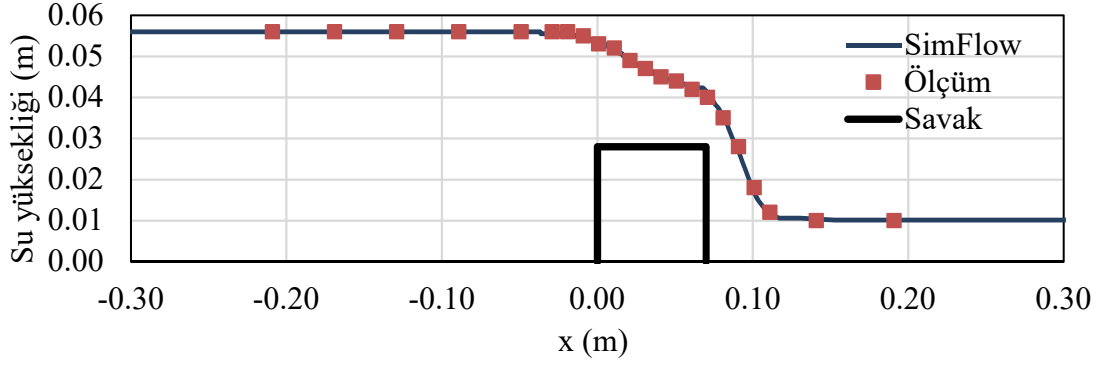
Şekil 4.1. Q = 0,220 L/s için deneysel ve sayısal su yüzeyi profilleri



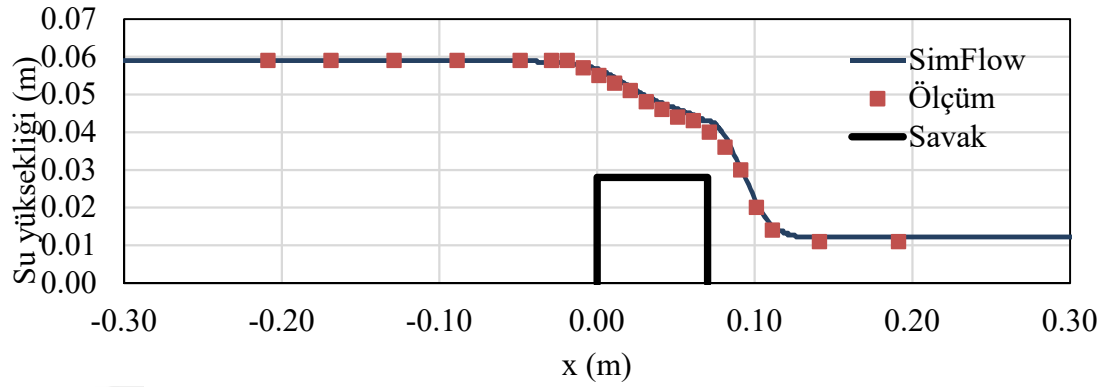
Şekil 4.2. Q = 0,277 L/s için deneysel ve sayısal su yüzeyi profilleri



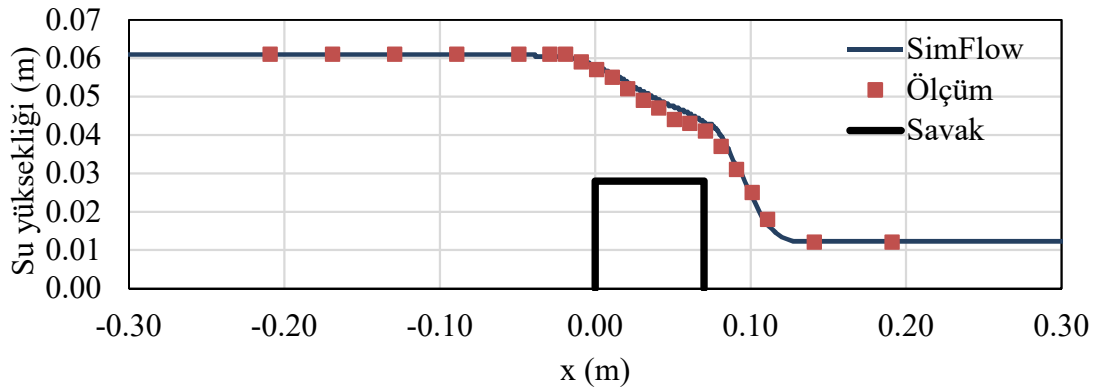
Şekil 4.3. Q = 0,330 L/s için deneysel ve sayısal su yüzeyi profilleri



Şekil 4.4.  $Q = 0,391$  L/s için deneysel ve sayısal su yüzeyi profilleri



Şekil 4.5.  $Q = 0,456$  L/s için deneysel ve sayısal su yüzeyi profilleri



Şekil 4.6.  $Q = 0,514$  L/s için deneysel ve sayısal su yüzeyi profilleri

Şekil 4.1'den başlayarak Şekil 4.6'a kadar olan tüm şekillerde altı farklı debi durumu için su yüzey profilleri ile sayısal modelin sonuçlarının karşılaştırılması verilmiştir. Su yüzey profillerinin incelenmesi sonucu, deneysel ve sayısal sonuçlar arasında genel bir uyumun mevcut olduğu, bu uyumun  $Q = 0,391$  L/s ve büyük debilerde daha da arttığı belirlenmiştir. Su yüzü profillerinin hataları Denklem (4.1)'de verilen RMSE (ortalama hata kareleri kökü) ile hesaplanmıştır.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (H_{ölçüm} - H_{SimFlow})^2}{N}} \quad (4.1)$$

NRMSE ( Normalize edilmiş ortalama hata kareleri kökü) hatasını hesaplamak için denklem (4.2) kullanılmış ve sonuçlar Çizelge 4.3’de verilmiştir. Normalizasyon, membadaki su derinliğine göre yapılmıştır.

$$NRMSE = \frac{RMSE}{H + P} \quad (4.2)$$

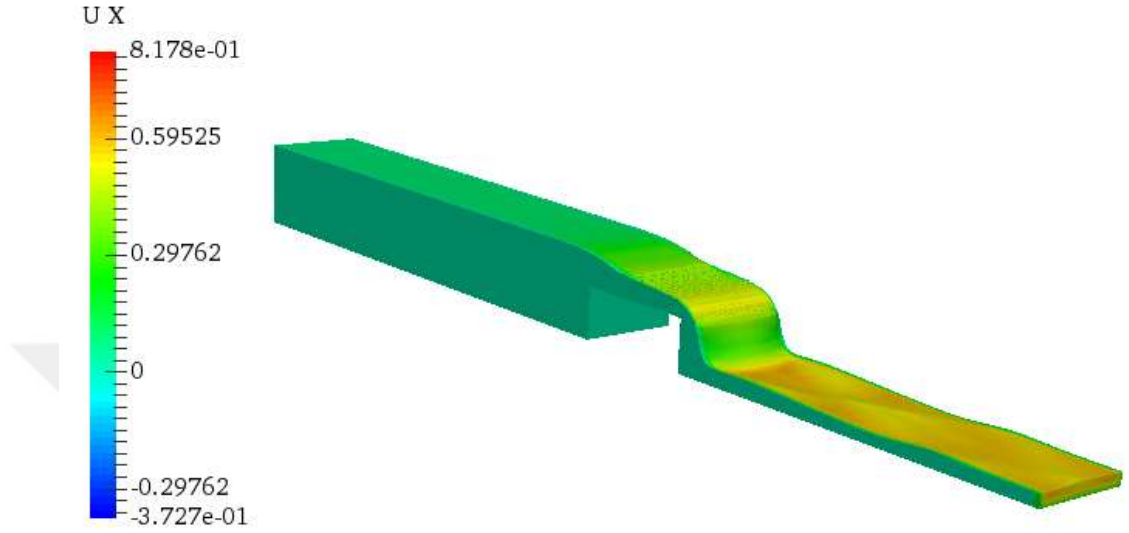
**Çizelge 4.3.** Tüm deneylerdeki su yüzey profilleri için NRMSE değerleri

1.Deney	2.Deney	3.Deney	4.Deney	5.Deney	6.Deney
0,0243	0,0325	0,0284	0,0107	0,0120	0,0117

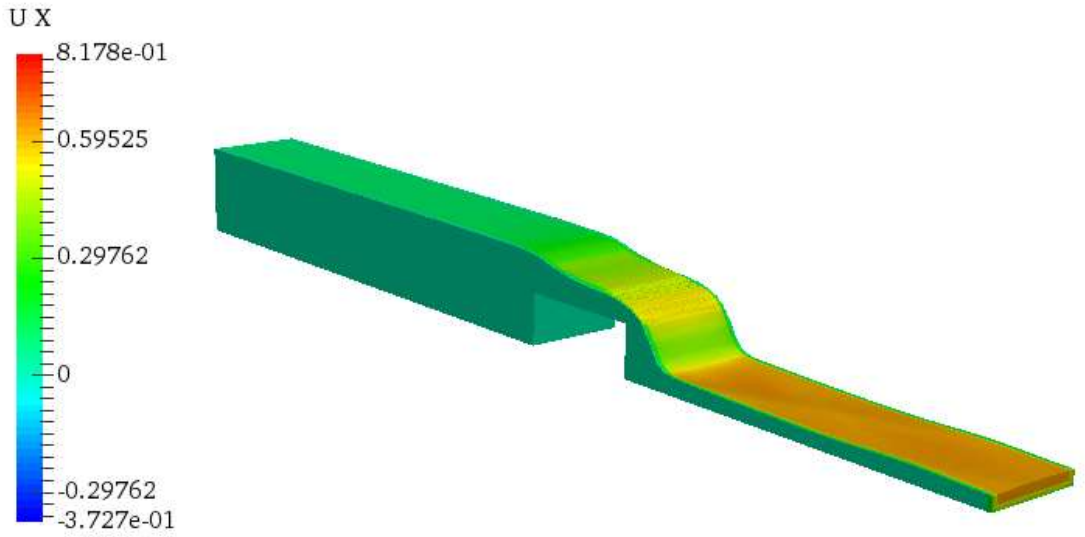
Çizelge 4.3’de görüldüğü gibi en küçük hata 4 numaralı deneyde görülmüştür.

## 4.2 x-yönündeki hız dağılımları

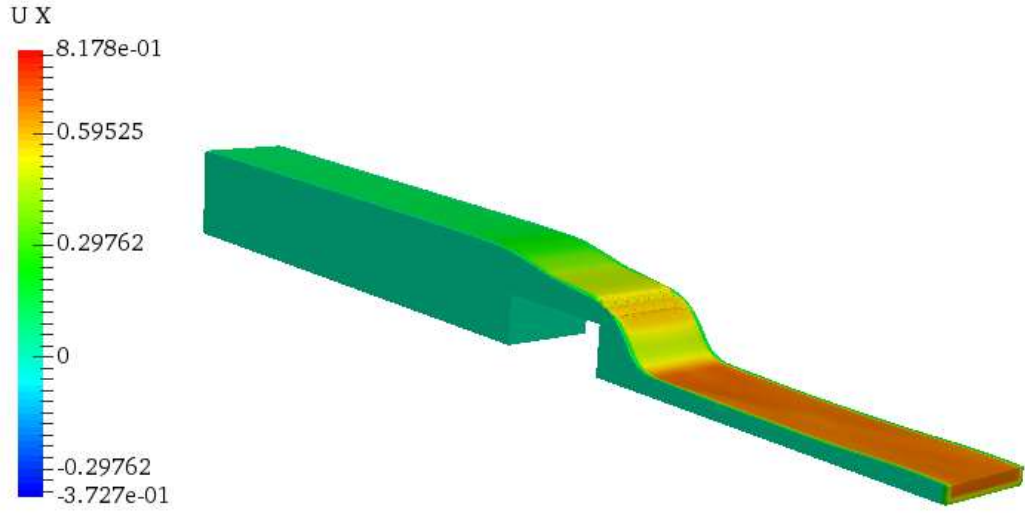
Şekil 4.7-4.12’de tüm deneyler için, sayısal hız dağılımları üç boyutlu olarak verilmiştir.



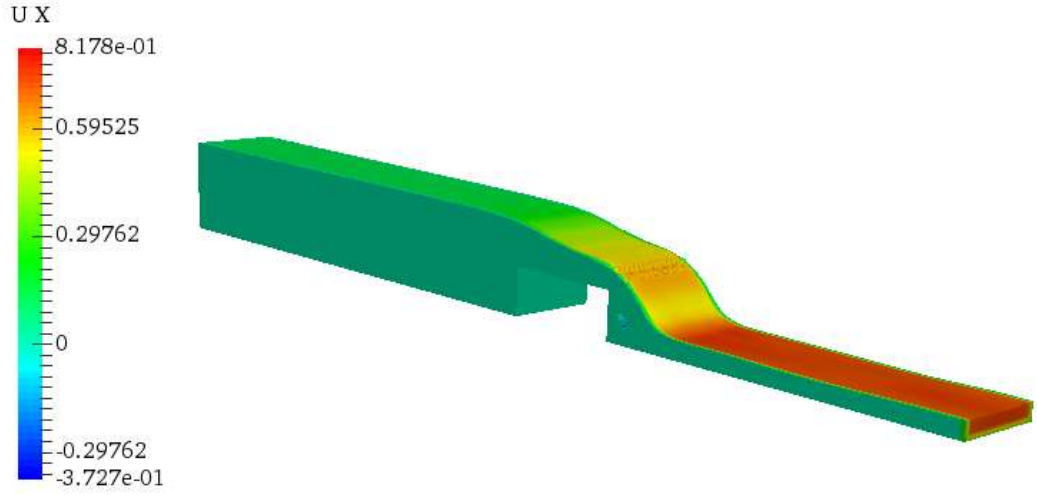
Şekil 4.7.  $Q = 0,22$  L/s için x-yönündeki sayısal hız dağılımı



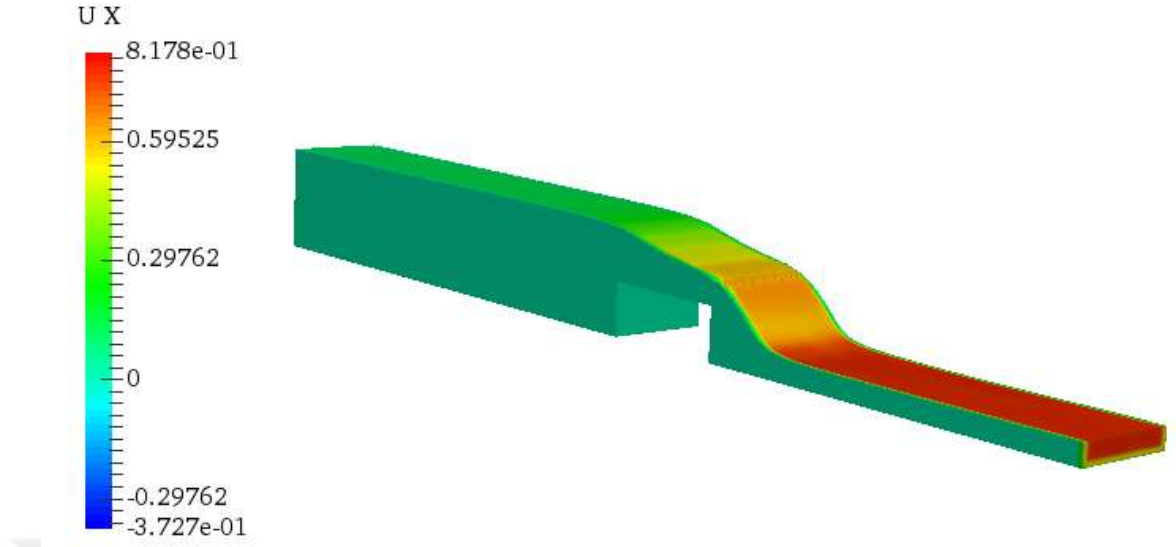
Şekil 4.8.  $Q = 0,277$  L/s için x-yönündeki sayısal hız dağılımı



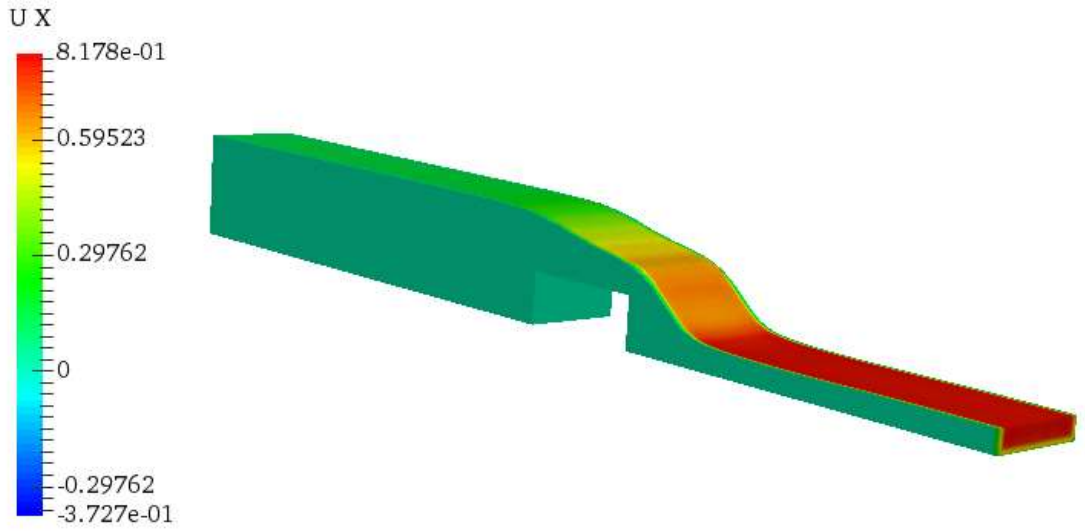
Şekil 4.9.  $Q = 0,330$  L/s için x-yönündeki sayısal hız dağılımı



Şekil 4.10.  $Q = 0,391$  L/s için x-yönündeki sayısal hız dağılımı

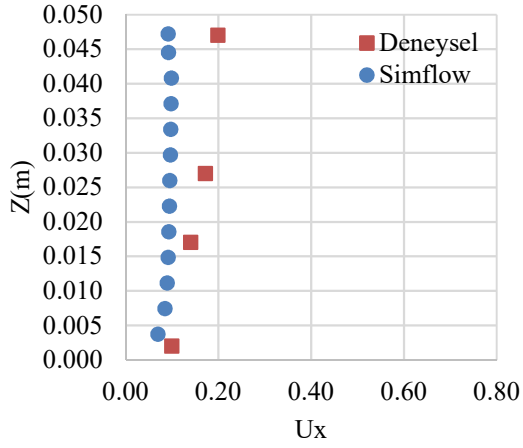


Şekil 4.11.  $Q = 0,456$  L/s için x-yönündeki sayısal hız dağılımı

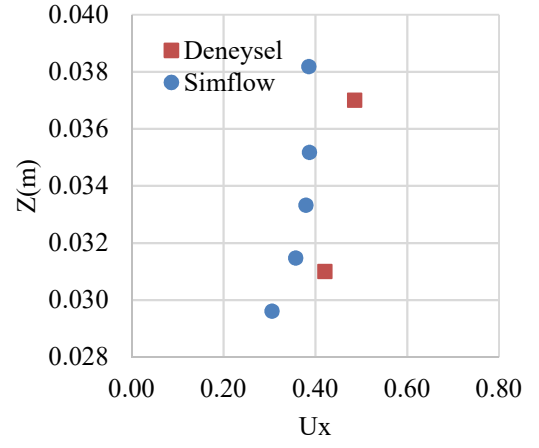


Şekil 4.12.  $Q = 0,514$  L/s için x-yönündeki sayısal hız dağılımı

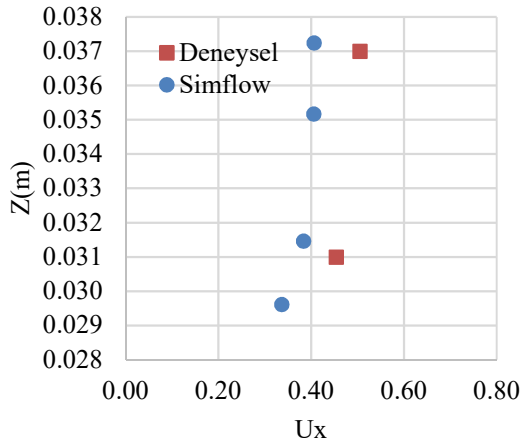
Şekil 4.13-4.15’de tüm deneyler için, x-yönündeki hız profilleri deneysel ve sayısal olarak verilmiştir.



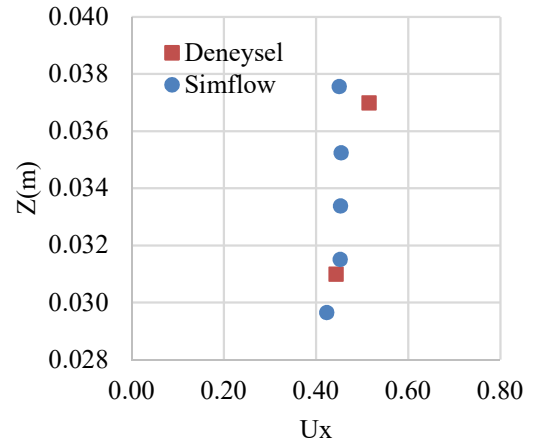
(a)



(b)

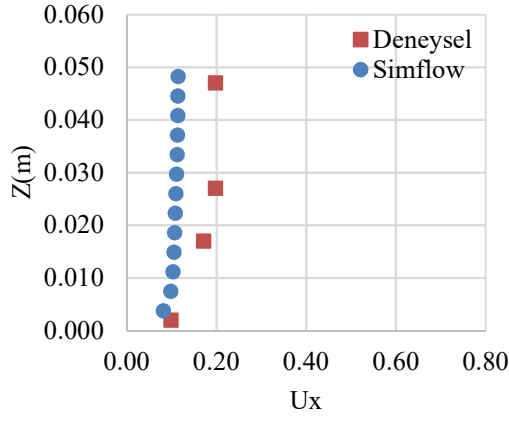


(c)

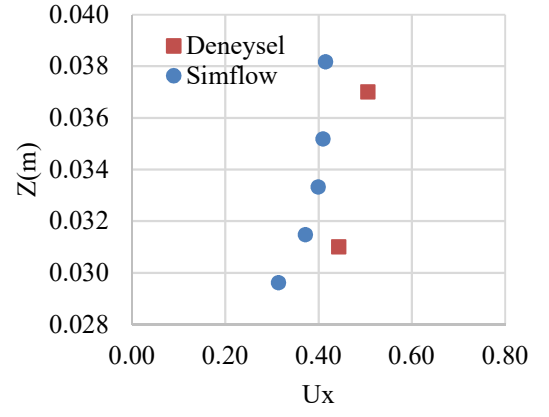


(d)

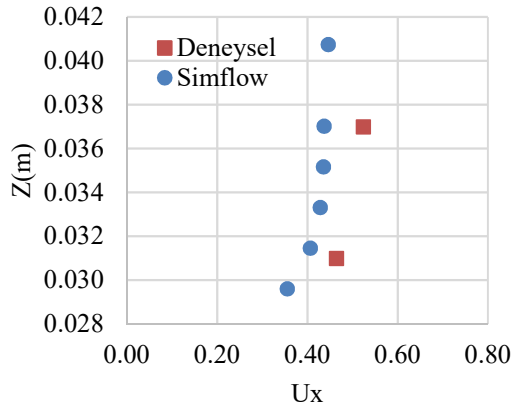
Şekil 4.13.  $Q = 0,220$  L/s için deneysel ve sayısal hız profilleri; (a)  $x = -0,049$  m, (b)  $x = 0,031$  m, (c)  $x = 0,041$  m, (d)  $x = 0,061$  m.



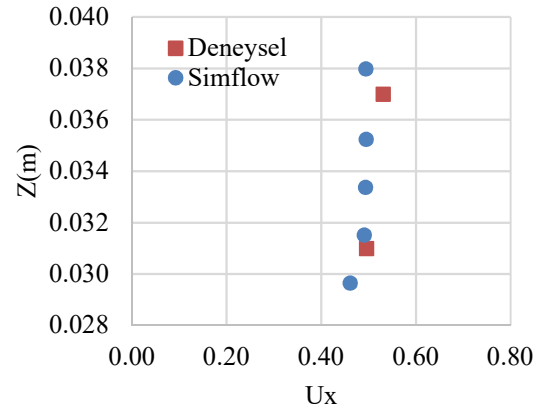
(a)



(b)



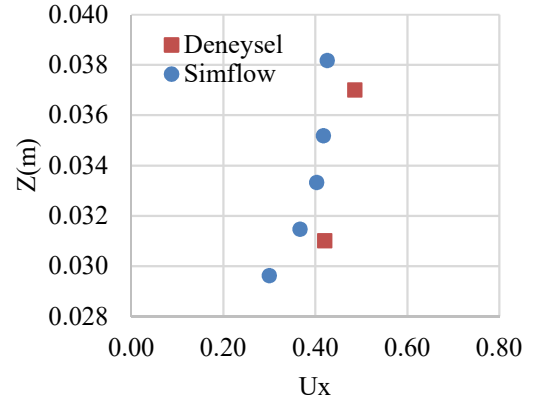
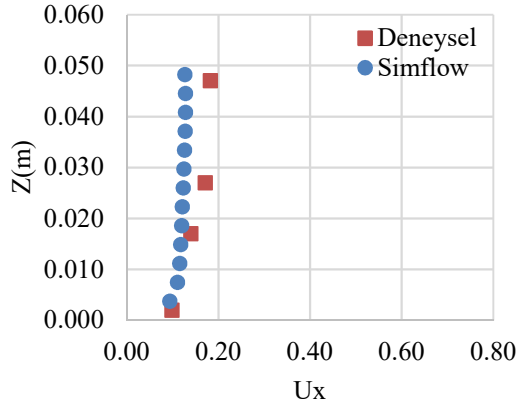
(c)



(d)

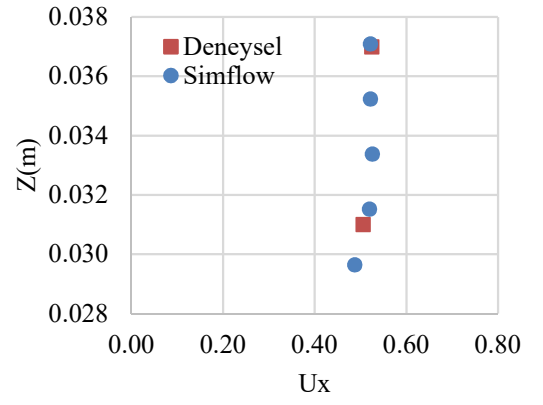
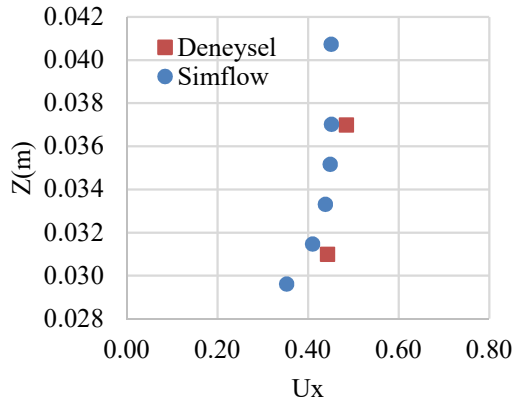
**Şekil 4.14.**  $Q = 0,277$  L/s için deneysel ve sayısal hız profilleri; (a)  $x = -0,049$  m, (b)  $x = 0,031$  m, (c)  $x = 0,041$  m, (d)  $x = 0,061$  m





(a)

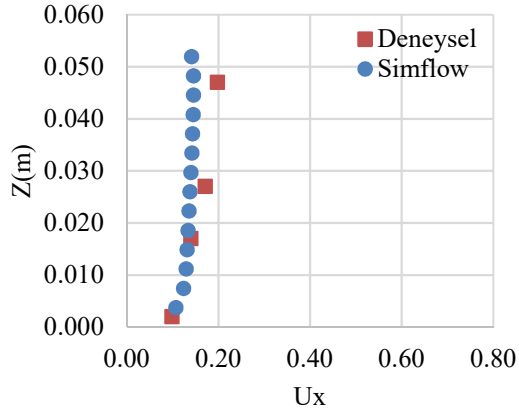
(b)



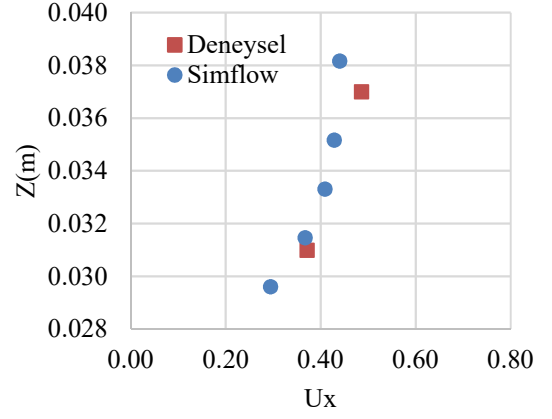
(c)

(d)

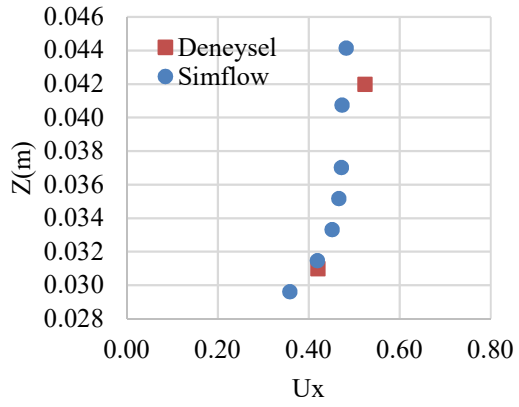
**Şekil 4.15.**  $Q = 0,330$  L/s için deneysel ve sayısal hız profilleri; (a)  $x = -0,049$  m, (b)  $x = 0,031$  m, (c)  $x = 0,041$  m, (d)  $x = 0,061$  m



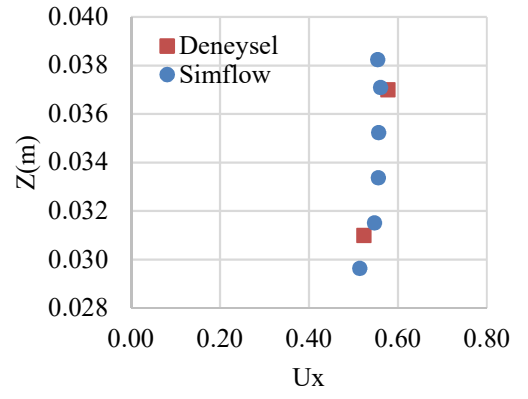
(a)



(b)

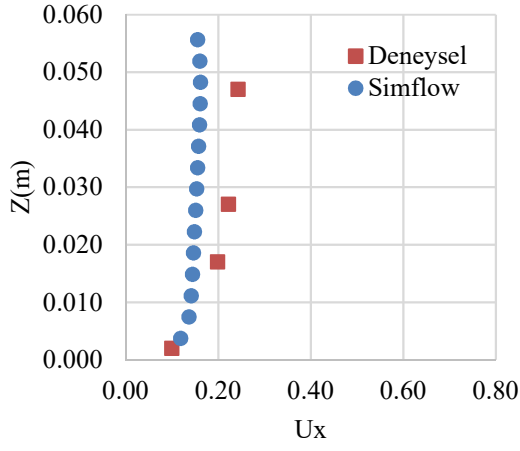


(c)

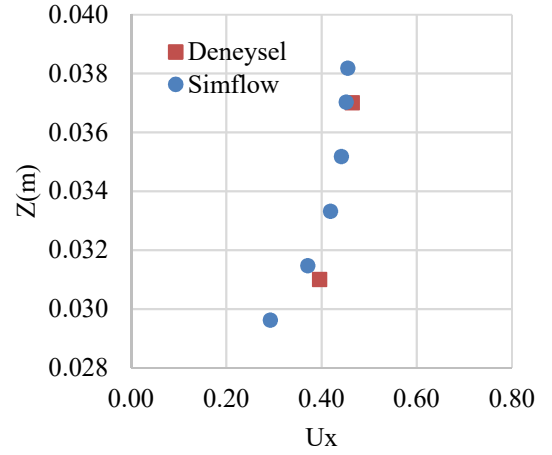


(d)

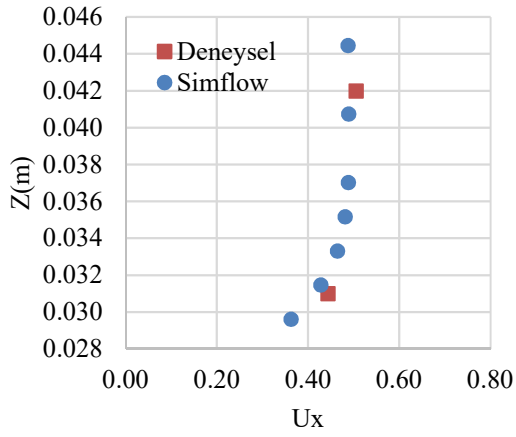
Şekil 4.16.  $Q = 0,391$  L/s için deneysel ve sayısal hız profilleri; (a)  $x = -0,049$ , (b)  $x = 0,031$ , (c)  $x = 0,041$ , (d)  $x = 0,061$



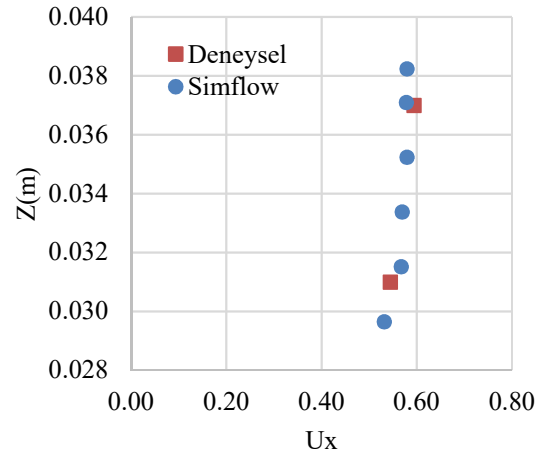
(a)



(b)

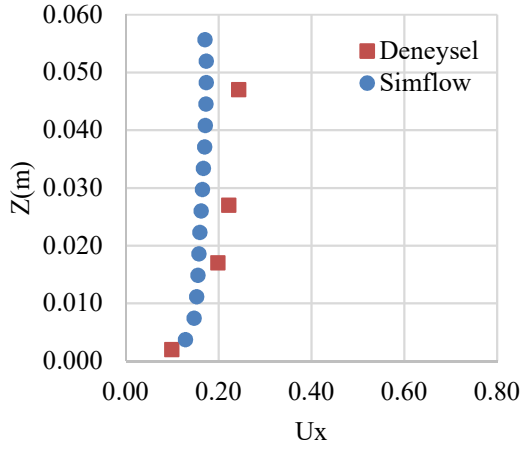


(c)

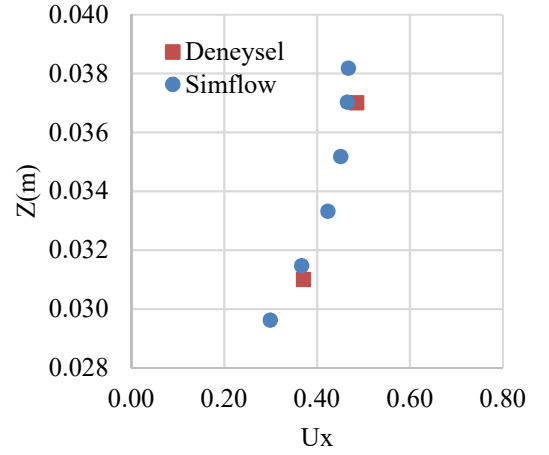


(d)

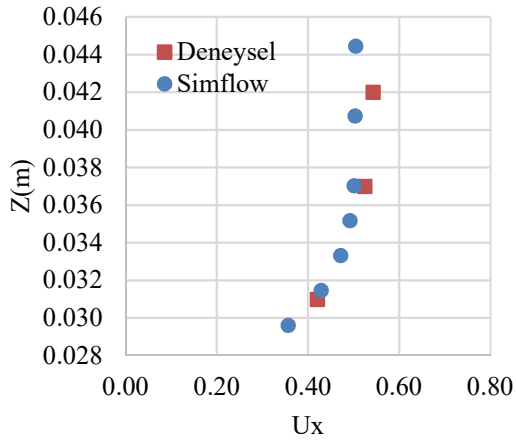
Şekil 4.17.  $Q = 0,456$  L/s için deneysel ve sayısal hız profilleri; (a)  $x = -0,049$ , (b)  $x = 0,031$ , (c)  $x = 0,041$ , (d)  $x = 0,061$



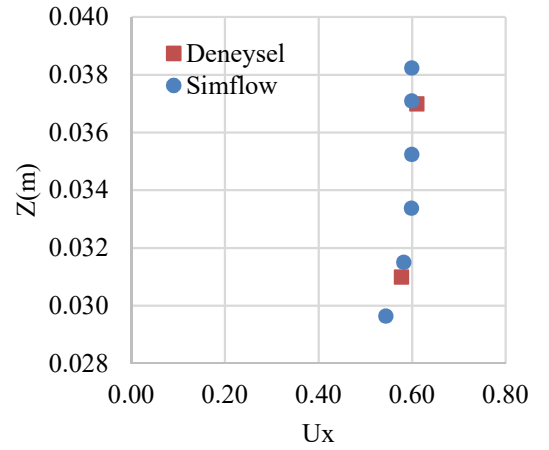
(a)



(b)



(c)



(d)

**Şekil 4.18.**  $Q = 0,514$  L/s için deneysel ve sayısal hız profilleri; (a)  $x = -0,049$  m, (b)  $x = 0,031$  m, (c)  $x = 0,041$  m, (d)  $x = 0,061$  m

Hız profillerinin incelenmesi sonucu, deneysel ve sayısal sonuçlar arasında genel bir uyumun mevcut olduğu ve bu uyumun büyük debilerde daha da arttığı belirlenmiştir. Tüm deneylerdeki hız profilleri için NRMSE ( Normalize edilmiş ortalama hata kareleri kökü) değerleri Çizelge 4.4’de verilmiştir. Normalizasyon, membadaki ortalama hıza göre yapılmıştır.

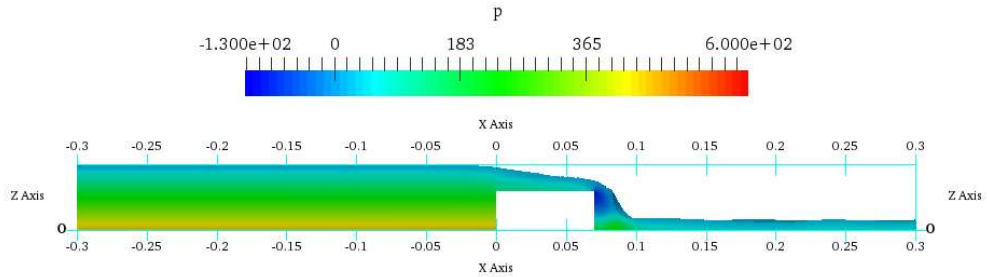
**Çizelge 4.4.** Tüm deneylerdeki hız profilleri için NRMSE değeri

x(m)	1.Deney	2.Deney	3.Deney	4.Deney	5.Deney	6.Deney
-0.049	0,868	0,732	0,350	0,246	0,437	0,338
0.031	1,012	0,861	0,516	0,252	0,141	0,095
0.041	1.043	0,784	0,308	0,235	0,110	0,174
0.061	0,586	0,275	0,093	0,128	0,086	0,050

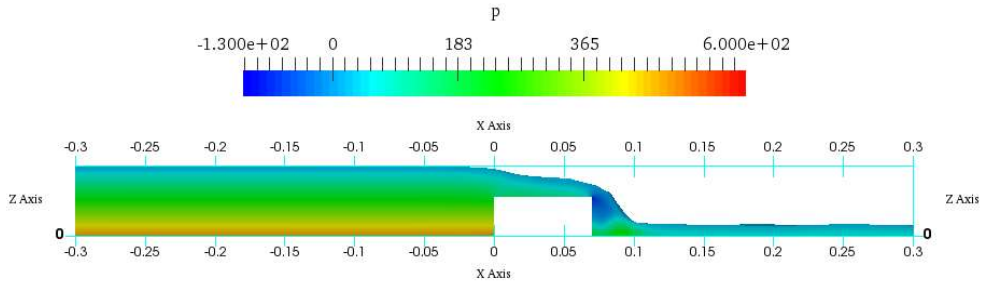
Çizelge 4.4’de görüldüğü gibi debi artıkça hatalar azalmaktadır. Bunun nedeninin yüzey gerilimi gibi ölçek etkileri olduğu düşünülmektedir(Castro-Orgaz 2014)

### 4.3 x-yönündeki sayısal basınç dağılımları

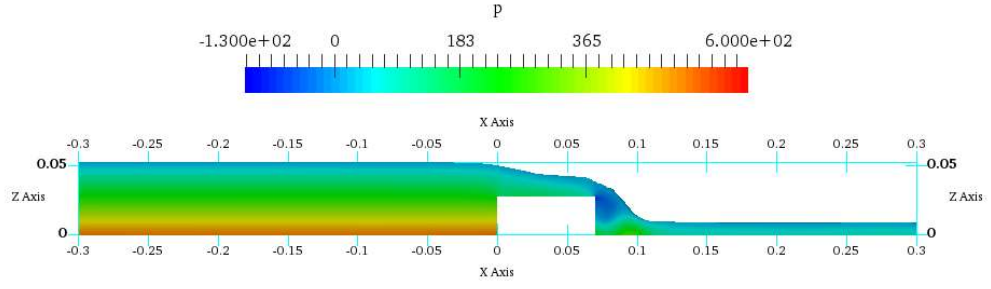
Şekil 4.19-4.24’da sayısal olarak hesaplanan basınç dağılımları verilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi, en yüksek basınçlar memba kısmındaki kanal tabanında görülmüş, napın altında ise negatif basınçlar elde edilmiştir. Debi artıkça kanalın tabanındaki basınçlar da yükselmektedir ve bununla birlikte napın altındaki negatif basınçlar azalmaktadır.



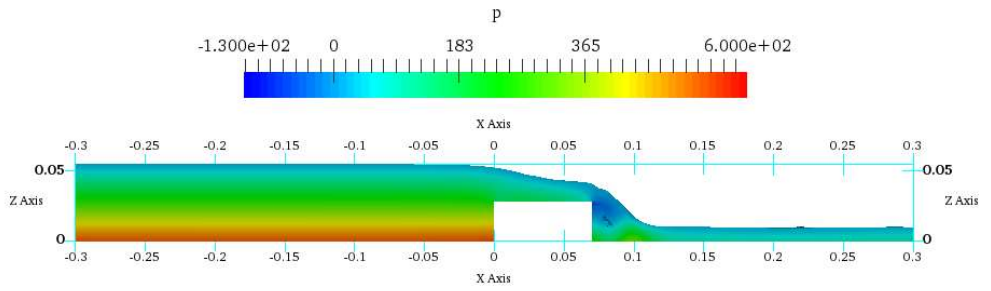
**Şekil 4.19.** Q = 0, 220 L/s için iki boyutlu sayısal basınç dağılımı



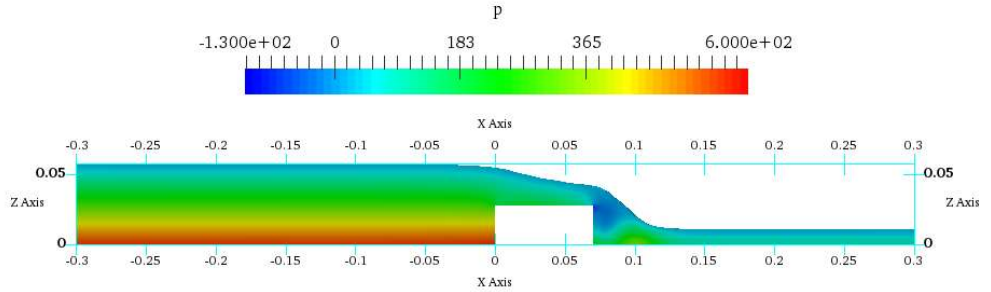
**Şekil 4.20.** Q = 0,277 L/s için iki boyutlu sayısal basınç dağılımı



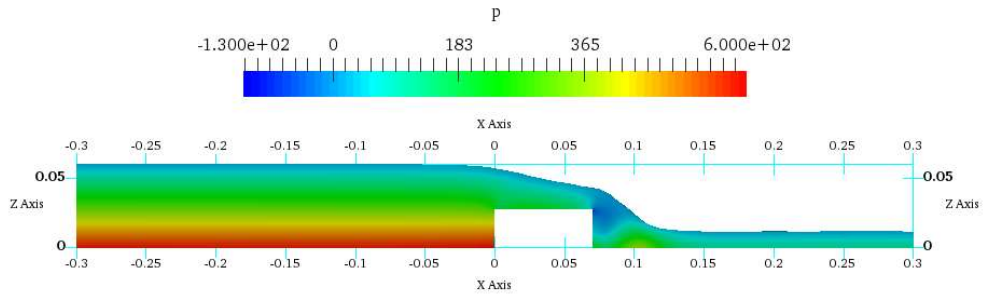
Şekil 4.21.  $Q = 0,330 \text{ L/s}$  için iki boyutlu sayısal basınç dağılımı



Şekil 4.22.  $Q = 0,391 \text{ L/s}$  için iki boyutlu sayısal basınç dağılımı



Şekil 4.23.  $Q = 0,456 \text{ L/s}$  için iki boyutlu sayısal basınç dağılımı



Şekil 4.24.  $Q = 0,514 \text{ L/s}$  için iki boyutlu sayısal basınç dağılımı

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, geniş tepeli savak üzerinden geçen akım deneysel ve sayısal olarak modellenmiştir. Deneysel çalışma, Uludağ Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hidrolik Laboratuvarı'nda bulunan 0.055x0.055x1.44 m boyutlarındaki Tecquipment H17 model açık kanal düzeneğinde yapılmıştır. Sayısal model SimFlow yazılımı ile oluşturulmuştur. Bu yazılım, açık kaynak kodlu OpenFOAM'ın bir arayüzüdür. Sayısal çözümlerde Realizable  $k-\varepsilon$  türbülans modeli kullanılmış ve su yüzeyi profili VOF yöntemi ile belirlenmiştir. Altı farklı debi için sayısal ve deneysel su yüzey profilleri ve hız profilleri karşılaştırılmıştır.

Geniş tepeli savaklarda iyi bir tasarım için  $H_1/L$  oranının 0.08 - 0.5 aralığında olması tavsiye edilmiştir. Bu çalışmada yapılan tüm deneyler için hesaplanan  $H_1/L$  oranlarının bu koşulu sağladığı görülmüştür.

Su yüzeyi profilleri incelendiğinde, deneysel ve sayısal yolla elde edilen sonuçlar arasında genel bir uyumun mevcut olduğu ve bu uyumun büyük debilerde daha da arttığı belirlenmiştir. NRMSE sonuçlarına bakıldığında, 4.deneyde hatanın %1,07'e kadar düştüğü görülmüştür. Hız profilleri incelendiğinde, memba tarafında yapılan ölçümlerde su yüzüne yakın bölgelerde deneysel ve sayısal sonuçlar arasında farklar görülmüştür. NRMSE sonuçlarına bakıldığında, bu farkların büyük debilerde azaldığı görülmektedir. Savak üstünde alınan hız ölçümleri incelendiğinde, deneysel ve sayısal sonuçların memba tarafındakilere göre daha uyumlu olduğu görülmüştür. Basınç dağılımları incelendiğinde, en yüksek basınçlar, derinlikten dolayı memba kısmındaki kanalın tabanında tespit edilmiştir. Napın altında ise negatif basınçlar görülmüştür. Debi arttıkça kanal tabanındaki basınçlar da artmakta ve napın altındaki negatif basınçlar azalmaktadır.

Bu çalışmada SimFlow programı genel olarak başarılı bir performans göstermiştir. SimFlow arayüzü, OpenFOAM'da bulunan çözücülerin ve sınır koşullarının çoğunu desteklemektedir. Bu sebepten SimFlow diğer HAD yazılımlarıyla karşılaştırılabilecek düzeydedir.

Geniş tepeli savak ¼zerinden geçen akımın daha b¼y¼k kanallarda gerçekleştirilmesi ¼lek etkisini azaltacağı d¼ř¼n¼lmektedir. Bununla beraber, daha y¼ksek öz¼n¼rl¼kl¼ öz¼m ağları kullanarak sayısal modelleme yapmak sonuçları daha da iyileştirilecektir.





## KAYNAKLAR

- Anonim, 2004.** The open source CFD toolbox. <https://www.openfoam.com>.05.04.2018
- Anonim, 2012.** Simflow. <https://sim-flow.com/cfd-software>. 05.04.2018
- Bal, H. kırkgöz, M.S. ve Gümüş, V. 2011.** Geniş Başlıklı Savak Akımının Deneysel Ve Sayısal Modellenmesi, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 26(2), ss. 33-45
- Bal, H. 2011.** Geniş başlıklı savak içeren açık kanal akımın sayısal modellenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, ÇÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana.
- Berkün, M. 2007.** Su yapıları. Birsen yayınevi, İstanbul, 667 s.
- Berkün, M. 2015.** Akışkanlar mekaniği ve hidrolik. Literatür, İstanbul, 501 s.
- Cable, M. 2009.** An Evaluation of turbulence models for the numerical study of forced and natural convective flow in atria. *Yüksek Lisans Tezi*, Department of Mechanical and Materials Engineering, Canada.
- Castro-Organ, C., Hager, W.H. 2014.** Scale effects of round-crested weir flow, *Journal of Hydraulic Research*, 52:5, 653-665.
- Chanson, H., Montes, J.S. 1998.** "Overflow Characteristics of Circular Weirs: Effect of Inflow Conditions", *Jl of Irrigation and Drainage Engrg*, ASCE, Vol. 124, No. 3, 152-162 (ISSN 0733-9437)
- Felder S., Chanson H. 2012.** Free-Surface Profiles, Velocity and Pressure Distributions on a Broad-Crested Weir. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2012, 138(12): 1068-1074.
- French, R.H. 1986.** Open-channel hydraulics. McGraw-Hill, Singapore, 693 pp.
- Gonzalez, C.A., Chanson, H. 2007.** Experimental measurements of velocity and pressure distributions on a large broad-crested weir. *Flow Measurement and Instrumentation*, 18 (2007) 107–113.
- Hamad, M. 2013.** Investigation of flow characteristics through box shape culvert combined with broad crested weir, *MSc thesis*, University of Gaziantep, The Graduate School of Natural and Applied sciences, Gaziantep.
- Hemida, H. 2008.** OpenFOAM tutorial: Free surface tutorial using interFoam and rasInterFoam, Goteborg, Sweden
- Hoseini, S. H. 2014.** Experimental investigation of flow over a triangular broad-crested weir. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 20, No. 2, 230–237.
- İlkentapar, M. 2015.** Açık kanallarda geniş başlıklı savaklar üzerinden akımın deneysel ve sayısal modellenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri.
- İlkentapar, M. ve Öner, A. A. 2017.** Geniş Başlıklı Savak etrafındaki akımın incelenmesi, *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 6, Sayı 2, (2017), 615-626
- Kocaman, S. 2007.** Baraj yıkılması probleminin deneysel ve teorik olarak incelenmesi. *Doktora Tezi*, ÇÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana.
- Qasim, J.M. 2013.** Laboratory and HEC-RAS simulations of a Single-step Weir. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 8(12), pp.1005-1011.
- Shih, T.T., Liou, W.W., Sahbbir, A., Yang, Z., Zhu, J.J. 1995.** A new k-ε eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows-model development and validation, Institute for Computational Mechanics in Propulsion and Center for Modeling of Turbulence and Transition Lewis Research Center, Cleveland, Ohio ,24 (3), 227-238.

**Soydan, N.G., Aköz, M.S., Şimşek, O., ve Gümüş, V. 2012.** Trapez Kesitli Geniş Başlıklı Savak Akımının k-ε Tabanlı Türbülans Modelleri ile Sayısal Modellenmesi, *Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering and Architecture*, 27(2), 47-58.

**Subramanya, K. 2009.** Flow in open channel. Tata McGraw-Hill, 7 West Patel Nagar, New Delhi, 547pp.

**Şeker, T. 2006.** Kontrol yapıları arkasındaki açık kanal akımlarının sayısal ve deneysel analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, ÇÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana.

**Şimşek, O. 2011.** Eğrisel geniş başlıklı savak üzerinden geçen açık kanal akımının deneysel ve teorik analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, ÇÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana.

**Wendt J.F. (ed) (2009)** Computational fluid dynamics, 3rd edn. Springer, Berlin



## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Nasir Ahmad GHAZNAWI  
Doğum Yeri ve Tarihi : AFGANİSTAN-11.06.1989  
Yabancı Dili : İngilizce, Farsça, Türkçe

### Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lisans : Eskişehir Osmangazi Üniversitesi  
İnşaat Mühendisliği Bölümü (2015)  
Yüksek Lisans : Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri  
Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü (2019)

İletişim (e-posta) : ghaznawinasir@gmail.com

### Yayınlar

**Korkmaz, S., Ghaznawi, N. A. 2019.** NUMERICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF FLOW OVER A BROAD-CRESTED WEIR. *Sakarya University Journal of Science*, 23(2), 1-1.

**Ghaznawi, N. A., Korkmaz, S. 2018.** WATER SURFACE PROFILES OVER A BROAD- CRESTED WEIR. ACE 2018, 12-14 September 2018, Çesme - İzmir, Turkey.