

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**AÇIK KANALLARDA GENİŞ BAŞLIKLİ SAVAKLAR
ÜZERİNDEKİ AKIMIN DENEYSEL VE SAYISAL
MODELLENMESİ**

**Hazırlayan
Mücella İLKENTAPAR**

**Danışman
Prof. Dr. Mehmet ARDIÇLIOĞLU**

Yüksek Lisans Tezi

**Ağustos 2015
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**AÇIK KANALLARDA GENİŞ BAŞLIKLİ SAVAKLAR
ÜZERİNDEKİ AKIMIN DENEYSEL VE SAYISAL
MODELLENMESİ**

(Yüksek Lisans Tezi)

**Hazırlayan
Mücella İLKENTAPAR**

**Danışman
Prof. Dr. Mehmet ARDIÇLIOĞLU**

**Bu çalışma; Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi
Tarafından FYL-2015-5736 kodlu proje ile desteklenmiştir.**

**Ağustos 2015
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.



Mücella İLKENTAPAR

YÖNERGEYE UYGUNLUK

“Açık Kanallarda Geniş Başlıklı Savaklar Üzerindeki Akımın Deneysel ve Sayısal Modellenmesi” adlı Yüksek Lisans tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ne uygun olarak hazırlanmıştır.



Tezi Hazırlayan

Mücella İLKENTAPAR



Danışman

Prof. Dr. Mehmet ARDIÇLIOĞLU



İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı Başkanı

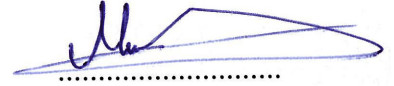
Prof. Dr. Fatih ALTUN

Prof. Dr. Mehmet ARDIÇLIOĞLU danışmanlığında **Mücella İLKENTAPAR** tarafından hazırlanan “**Açık Kanallarda Geniş Başlıklı Savaklar Üzerindeki Akımın Deneysel ve Sayısal Modellenmesi**” adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

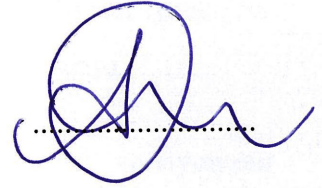
14/08/ 2015

JÜRİ:

Danışman : Prof. Dr. Mehmet ARDIÇLIOĞLU



Üye : Doç. Dr. A. Alper ÖNER.....



Üye : Yrd. Doç. Dr. Selahattin KOCAMAN..



ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 18/08/2015 tarih ve 2015/34-04 sayılı kararı ile onaylanmıştır.



Prof. Dr. Kâzım KEŞLIOĞLU

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ/TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans öğrenim hayatım boyunca yakın ilgilerini ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Mehmet ARDIÇLIOĞLU'na en içten teşekkürlerimi sunmak isterim.

Tez çalışmam süresince her türlü desteğini ve ilgisini, bilgi ve deneyimlerini benden esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Selahattin KOCAMAN'a ve Doç. Dr. A. Alper ÖNER'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Lisans ve yüksek lisans eğitimim süresince bana emeği geçen Erciyes Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde görev yapan değerli hocalarıma teşekkür ederim.

Yüksek lisans çalışmama, maddi destek veren Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (Proje no: FYL-2015-5736) içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın sayısal analiz kısmında FLOW-3D programının demo versiyonunu kullanmamız için destek olan ve yardımlarını esirgemeyen İog Mühendislik yetkili ve çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Azimle ve gayretle çalışmama sahip çıkarak emek veren Hidrolik Laboratuvarında çalışan öğrencilere çok teşekkür ederim.

Ayrıca tüm öğrenim hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen anne ve babama ve eşim Serhan İLKENTAPAR'a sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Mücella İLKENTAPAR

Ağustos 2015, KAYSERİ

AÇIK KANALLARDA GENİŞ BAŞLIKLİ SAVAKLAR ÜZERİNDEKİ AKIMIN DENEYSEL VE SAYISAL MODELLENMESİ

Mücella İLKENTAPAR

**Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Ağustos 2015
Danışman: Prof. Dr. Mehmet ARDIÇLIOĞLU**

ÖZET

Bu çalışmada dört farklı geniş başlıklı savak üzerinden geçen akımın su yüzü profilleri ve hızları deneysel ve FLOW-3D paket programı ile belirlenmiştir. Su yüzü profilleri kanal üzerinde üç doğrultuda hareket edebilen sehpaye yerleştirilen bir limnometre ile kanal orta kesiti boyunca tüm akım durumlarında ölçülmüştür. Akım hızları ise Moline (Low Speed Propeller Probe) ile kanalın başından $x=4.5$ metrede ve her bir savak için orta kesitinde ($L/2$) yarı enkesit boyunca altı düşeyde ölçülmüştür. Deneyler kanala su veren vanalar ayarlanarak debi ölçerden okunan 5 farklı kararlı akım ve debi durumunda, kanal taban eğiminin $S=0.001$ değerinde gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada sayısal çözüm için sonlu hacimler yöntemine dayalı FLOW-3D bilgisayar programı kullanılmıştır. FLOW- 3D ile 3 boyutlu sayısal modelleme yapılmıştır. Modelleme esnasında iki denklemlili $k-\epsilon$ türbülans modeli kullanılmıştır. Modelleme sonucu hesaplanan su yüzü profilleri ile hız değerleri deneysel ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Ele alınan debiler için 60cm uzunluğundaki savakta 2 boyutlu modelleme yapılarak, elde edilen sonuçlar 3 boyutlu model sonuçları ile karşılaştırılmıştır. 3 boyutlu model ile 2 boyutlu çözümün sonuçlarının birbirine çok yakın değerler verdiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Geniş Başlıklı Savak, Açık kanal, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği - HAD, Su yüzü Profili, Hız dağılımı

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSES OF OPEN CHANNEL FLOWS OVER A BROAD-CRESTED WEIR

Mücella İLKENTAPAR

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

M.Sc. Thesis, August 2015

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet ARDIÇLIOĞLU

ABSTRACT

In this study, the water surface profiles and velocity distributions over four different broad crested weirs have been determined experimentally and by using software package FLOW-3D. The water surface profiles in the middle section along channel for all types of flow situations have been measured with a limnimeter which is mounted to a tripod that move in three dimensions. The velocity distributions from the beginning of channel at $x=4.5$ m and in the middle section along half cross-section in six vertical have been also measured with a Moline (Low Speed Propeller Probe). The experiments were conducted with the value of bed slope $S=0.001$ and by setting the channel inlet valves with five different steady flow and discharge conditions.

In this study, FLOW-3D software based on the finite volume method has been performed for numerical solutions. Three dimensional numerical modeling has been done using the FLOW-3D. Two equation ($k-\epsilon$) turbulence models are used for modeling. After modeling, the obtained numerical results of the water surface profiles and velocity distributions are compared with the experimental results. The results of three dimensional model are also compared with the results obtained by modeling in two dimensions that is performed for 60 cm length of weir for all discharges. The results of three dimensional models and two dimensional models are very close to each other.

Key Words: Broad Crested Weir, Open Channel, Computational Fluid Dynamics –CFD, Water Surface Profiles, Velocity Distribution

İÇİNDEKİLER

AÇIK KANALLARDA GENİŞ BAŞLIKLİ SAVAKLAR ÜZERİNDEKİ AKIMIN DENEYSEL VE SAYISAL MODELLENMESİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK	i
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	ii
KABUL ONAY	iii
ÖNSÖZ/TEŞEKKÜR	iv
ÖZET.....	v
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR VE SEMBOLLER LİSTESİ	x
TABLÖLER LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiv
GİRİŞ	1

1. BÖLÜM

GENEL KAVRAMLAR VE İLGİLİ LİTERATÜR ÖZETİ

1.1. Savaklar ve Savakların Karakteristik Özellikleri.....	4
1.1.1. Keskin Kenarlı Savaklar.....	4
1.1.2. Geniş Başlıklı Savaklar	8
1.2. Literatür Özeti.....	11

2. BÖLÜM

MATERYAL ve YÖNTEM

2.1. Giriş	18
------------------	----

2.2. Navier-Stokes Denklemleri	18
2.3. Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) Denklemleri	21
2.3.1. Sıkışmayan Türbülanslı Akımda Hareket Denklemleri	22
2.4. FLOW-3D Programının Genel Özellikleri	26
2.4.1. k-ϵ Türbülans Modeli	30
2.5. Savak Akımının FLOW-3D ile Modellenmesi	31
2.5.1. Model Setup	33
2.5.2. Sınır Şartların Tanımlanması	37
2.6. Deney Düzeneği	39

3. BÖLÜM

BULGULAR

3.1. Giriş	46
3.2. 0,6x0,6x0,1 m Ölçülerindeki Savakta Su Yüzü Profilleri ve Hız Dağılımları ...	48
3.3. 0,6x0,3x0,1 m Ölçülerindeki Savakta Su Yüzü Profilleri ve Hız Dağılımları ...	56
3.4. 0,6x0,2x0,1 m Ölçülerindeki Savakta Su Yüzü Profilleri ve Hız Dağılımları ...	64
3.5. 0,6x0,15x0,1 m Ölçülerindeki Savakta Su Yüzü Profilleri ve Hız Dağılımları ...	72
3.6. 0,6x0,6x0,1 m Ölçülerindeki Savakta 2D-3D Analiz İçin Su Yüzü Ölçümleri .	81
3.7. 0,6x0,6x0,1 m Ölçülerindeki Savakta 2D-3D Analiz İçin x=4,5m Hız Ölçümleri	86
3.8. 0,6x0,6x0,1 m Ölçülerindeki Savakta 2D-3D Analiz İçin Savak Orta Noktası Hız Ölçümleri	89
3.9. 0,6x0,6x0,1 m Ölçülerindeki Savakta Q=32,76 l/s için x=4,5m Hız Ölçümleri	92
3.10. 0,6x0,6x0,1 m Ölçülerindeki Savakta Q=32,76 l/s için x=5,8m Hız Ölçümleri	96

4. BÖLÜM**SONUÇLAR VE ÖNERİLER**

4.1. Sonuçlar ve Öneriler	100
KAYNAKLAR	103
EKLER.....	107
ÖZGEÇMİŞ.....	111

KISALTMALAR VE SEMBOLLER LİSTESİ

<u>Sembol</u>	<u>Anlamı</u>
A	: Alan
A_i	: Alan
a	: Türbülans Modeline Bağlı Olan Bir Sabit
b	: Savak Genişliği
C_d	: Debi Katsayısı
C_v	: Hız Katsayısı
C_s	: Savak Katsayısı
CFD	: Computational Fluid Dynamics
e_{ij}	: Ortalama Gerilme-Oranı Tansörü
F	: Akışkan Hacmi
f_i	: Reynolds Gerilmesi
g	: Yer çekimi İvmesi
GCI	: Grid Convergence Index
GP	: Genetik Programlama
h	: Savak Membaındaki Akım Yüksekliği
H	: Enerji Yüksekliği
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
k	: Türbülans kinetik enerjisi
k_s	: Kanal Pürüzlülüğü
L	: Savak Boyu
LDA	: Lazer Doppler Anemometresi
LES	: Large-Eddy Simulation
MKW	: Modified k- ω türbülans modeli
p	: Basınç
Q	: Debi
Re	: Reynolds sayısı
RANS	: Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes
RKE	: Realizable k- ϵ 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
t	: zaman
u	: Hız vektörünün x Bileşeni
u*	: Kayma Hızı
u ₀	: Teğetsel Hız
V	: Hız Vektörü
v	: Hız vektörünün y Bileşeni
VOF	: Volume of Fluid
V _F	: Hacim
w	: Hız vektörünün z Bileşeni
ws _i	: Duvar Kayma Gerilmesi
y ₀	: u ₀ ın Engelden Olan Uzaklığı
YSA	: Yapay Sinir Ağları
α	: Kinetik enerji düzeltme katsayısı
ω	: Özgül kayıp oranı
ϵ	: Kinetik enerji kayıp oranı
ρ	: Yoğunluk
τ	: Gerilme tansörü
τ_{ij}	: Laminer Viskozite Gerilmesi
τ_{ij}	: Gerilme Hızı Tansörü
μ	: Dinamik Viskozite Katsayısı
μ_t	: Türbülans Viskozitesi
κ	: Von Karman Sabiti

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 3.1.	Savak Geometirileri ve Ölçülen Debi Değerleri.....	46
Tablo 3.2.	Ölçüm Yapılan Savaklara Ait H/L Oranları	47
Tablo 3.3.	0,6 m Uzunluğundaki Savakta Su Yüzü Ölçümlerinin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçları.....	53
Tablo 3.4.	0,6 m Uzunluğundaki Savakta Ölçüm ve Sayısal Analiz Su Yüzü Değerlerin Farkları.....	55
Tablo 3.5.	0,3 m Uzunluğundaki Savakta Su Yüzü Ölçümlerinin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçları.....	61
Tablo 3.6.	0,3 m Uzunluğundaki Savakta Ölçüm ve Sayısal Analiz Su Yüzü Değerlerin Farkları.....	63
Tablo 3.7.	0,2 m Uzunluğundaki Savakta Su Yüzü Ölçümlerinin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçları.....	69
Tablo 3.8.	0,2 m Uzunluğundaki Savakta Ölçüm ve Sayısal Analiz Su Yüzü Değerlerin Farkları.....	71
Tablo 3.9.	0,15 m Uzunluğundaki Savakta Su Yüzü Ölçümlerinin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçları.....	77
Tablo 3.10.	0,15 m Uzunluğundaki Savakta Ölçüm ve Sayısal Analiz Su Yüzü Değerlerin Farkları.....	79
Tablo 3.11.	Bütün Savaklar İçin Ölçüm ve Sayısal Analiz Su Yüzü Değerlerin Farkları.....	80
Tablo 3.12.	0, 6 m Uzunluğundaki Savakta Su Yüzü Ölçümlerinin 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Analiz Sonuçları.....	83
Tablo 3.13.	0, 6 m Uzunluğundaki Savakta 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Analiz Su Yüzü Farkları	85
Tablo 3.14.	Q=32,76 l/s x=4,5 m’de Ölçülmüş Hız Değerleri.....	92
Tablo 3.15.	Q=32,76 l/s x=4,5 m FLOW-3D Hız Verileri	93
Tablo 3.16.	Q=32,76 l/s x=4,5 m Deney-FLOW-3D Hız Değerlerinin Farkları	93
Tablo 3.17.	Q=32,76 l/s x=5,8 m Hız Okumaları	96

Tablo 3.18	$Q=32,76$ l/s $x=5,8$ m FLOW-3D Hız Verileri	96
Tablo 3.19.	$Q=32,76$ l/s $x=5,8$ m Deney-FLOW-3D Hız Değerlerinin Farkları	96

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Keskin Kenarlı Savak.....	5
Şekil 1.2.	Keskin Kenarlı Dikdörtgen Savak ve Üzerindeki Akım	6
Şekil 1.3.	Keskin Kenarlı Üçgen Savak ve Üzerindeki Akış	7
Şekil 1.4.	Cipolletti Savağının Şekli ve Üstten Görünüşü.....	8
Şekil 1.5.	Geniş Başlıklı Savak	9
Şekil 2.1.	Bir Hesaplama Hücrelerine Etkiyen Değişkenlerin Gösterimi	26
Şekil 2.2.	Akışkan Hacminin Ağ Üzerindeki Dağılımı.....	28
Şekil 2.3.	FLOW-3D Program Ara Yüzü.....	32
Şekil 2.4.	FLOW-3D Model Setup General Sekmesi.....	33
Şekil 2.5.	Türbülans Modelinin Seçilmesi	34
Şekil 2.6.	Yerçekimi İvmesinin Kanal Eğimi Dikkate Alınarak Girilmesi.....	35
Şekil 2.7.	60 cm’lik Savak İçin Kanal Geometrisi ve Koordinatların Gösterimi	35
Şekil 2.8.	60 cm’lik Savak için Kanal Geometrisi ve Çözüm Bölgesinin FLOW-3D Programında Görünümü	36
Şekil 2.9.	Toplam Hücre Sayısının Gösterimi.....	36
Şekil 2.10.	Mesh Yapısının Tüm Kanalda ve Savak Kesiti Üzerinde Gösterimi.....	37
Şekil 2.11.	Sınır Şartların Tanımlanması İçin Gerekli Pencere.....	37
Şekil 2.12.	Model Üzerinde Sınır Şartların Görünümü	38
Şekil 2.13.	Analyze Sekmesi Genel Görünümü	39
Şekil 2.14.	Deney Kanalının Görünümü	40
Şekil 2.15.	Deneyde Kullanılan Savak Geometrileri.....	40
Şekil 2.16.	60 cm lik Savak Kesitinin Kanal İçerisinde Yerleşimi Ve Su Yüzü Ölçümü Alınan Noktalar	41
Şekil 2.17.	Savak Üzerinde ve 4,5 inci Metrede Enkesit Üzerinde Ölçüm Yapılan Noktalar	41
Şekil 2.18.	Debimetre	42
Şekil 2.19.	Streamflo Velocity Meter 400.....	43

Şekil 2.20. Moline (Low Speed Propeller Probe).....	43
Şekil 2.21. Sehpaya Yerleştirilen Moline ve Streamflo Kullanılarak Hız Ölçümü Yapılması	44
Şekil 2.22. Eğim Göstergesi	44
Şekil 2.23. Su Yüzü Ölçümü Alınması	45
Şekil 3.1. $Q=6,45$ l/s için Su Yüzü Profillerinin Deneysel ve Sayısal Karşılaştırılması ve Hız Dağılımlarının 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Gösterimi.....	48
Şekil 3.2. $Q=13,22$ l/s için Su Yüzü Profillerinin Deneysel ve Sayısal Karşılaştırılması ve Hız Dağılımlarının 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Gösterimi.....	49
Şekil 3.3. $Q=19,18$ l/s için Su Yüzü Profillerinin Deneysel ve Sayısal Karşılaştırılması ve Hız Dağılımlarının 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Gösterimi.....	50
Şekil 3.4. $Q=24,80$ l/s için Su Yüzü Profillerinin Deneysel ve Sayısal Karşılaştırılması ve Hız Dağılımlarının 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Gösterimi.....	51
Şekil 3.5. $Q=32,76$ l/s için Su Yüzü Profillerinin Deneysel ve Sayısal Karşılaştırılması ve Hız Dağılımlarının 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Gösterimi.....	52
Şekil 3.6. $Q=6,41$ l/s için Su Yüzü Profillerinin Deneysel ve Sayısal Karşılaştırılması ve Hız Dağılımlarının 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Gösterimi.....	56
Şekil 3.7. $Q=12,90$ l/s için Su Yüzü Profillerinin Deneysel ve Sayısal Karşılaştırılması ve Hız Dağılımlarının 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Gösterimi.....	57
Şekil 3.8. $Q=18,82$ l/s için Su Yüzü Profillerinin Deneysel ve Sayısal Karşılaştırılması ve Hız Dağılımlarının 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Gösterimi.....	58

Şekil 3.9. $Q=23,90$ l/s için Su Yüzü Profillerinin Deneysel ve Sayısal Karşılaştırılması ve Hız Dağılımlarının 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Gösterimi	59
Şekil 3.10. $Q=30,12$ l/s için Su Yüzü Profillerinin Deneysel ve Sayısal Karşılaştırılması ve Hız Dağılımlarının 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Gösterimi	60
Şekil 3.11. $Q=6,22$ l/s için Su Yüzü Profillerinin Deneysel ve Sayısal Karşılaştırılması ve Hız Dağılımlarının 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Gösterimi	64
Şekil 3.12. $Q=13,08$ l/s için Su Yüzü Profillerinin Deneysel ve Sayısal Karşılaştırılması ve Hız Dağılımlarının 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Gösterimi	65
Şekil 3.13. $Q=19,06$ l/s için Su Yüzü Profillerinin Deneysel ve Sayısal Karşılaştırılması ve Hız Dağılımlarının 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Gösterimi	66
Şekil 3.14. $Q=24,06$ l/s için Su Yüzü Profillerinin Deneysel ve Sayısal Karşılaştırılması ve Hız Dağılımlarının 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Gösterimi	67
Şekil 3.15. $Q=30,22$ l/s için Su Yüzü Profillerinin Deneysel ve Sayısal Karşılaştırılması ve Hız Dağılımlarının 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Gösterimi	68
Şekil 3.16. $Q=6,33$ l/s için Su Yüzü Profillerinin Deneysel ve Sayısal Karşılaştırılması ve Hız Dağılımlarının 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Gösterimi	72
Şekil 3.17. $Q=12,30$ l/s için Su Yüzü Profillerinin Deneysel ve Sayısal Karşılaştırılması ve Hız Dağılımlarının 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Gösterimi	73
Şekil 3.18. $Q=19,16$ l/s için Su Yüzü Profillerinin Deneysel ve Sayısal Karşılaştırılması ve Hız Dağılımlarının 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Gösterimi	74

Şekil 3.19. $Q=24,32$ l/s için Su Yüzü Profillerinin Deneysel ve Sayısal Karşılaştırılması ve Hız Dağılımlarının 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Gösterimi	75
Şekil 3.20. $Q=30,18$ l/s için Su Yüzü Profillerinin Deneysel ve Sayısal Karşılaştırılması ve Hız Dağılımlarının 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Gösterimi	76
Şekil 3.21. (a) $Q=6,45$ l/s (b) $Q=13,22$ l/s (c) $Q=19,18$ l/s (d) $Q=24,80$ l/s (e) $Q=32,76$ l/s için 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Sayısal Çözüm Verileri ile Deneysel Su Yüzü Ölçümlerinin Karşılaştırılması	82
Şekil 3.22. $x=4,5$ m $y=0$ (orta nokta) da (a) $Q=6,45$ l/s (b) $Q=13,22$ l/s (c) $Q=19,18$ l/s (d) $Q=24,80$ l/s (e) $Q=32,76$ l/s için 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Sayısal Çözüm Verileri ile Deneysel Hız Profillerinin Karşılaştırılması	88
Şekil 3.23. $x=5,8$ m $y=0$ (orta nokta) da (a) $Q=6,45$ l/s (b) $Q=13,22$ l/s (c) $Q=19,18$ l/s (d) $Q=24,80$ l/s (e) $Q=32,76$ l/s için 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Sayısal Çözüm Verileri ile Deneysel Hız Profillerinin Karşılaştırılması	91
Şekil 3.24. $Q=32,76$ l/s $x=4,5$ m Sayısal ve Deneysel Hız Profillerinin Karşılaştırılması	95
Şekil 3.25. $Q=32,76$ l/s $x=5,8$ m Sayısal ve Deneysel Hız Profillerinin Karşılaştırılması	99

GİRİŞ

Su yapıları, su kaynaklarındaki suyu kontrol altına alarak, suyun çeşitli maksatlar için kullanılmasını sağlayan yapılardır. Su temini, enerji üretimi, taşkın kontrolü, çevresel düzenleme, rekreasyon uygulamaları su yapılarının başlıca kullanım amaçlarındandır.

Savaklar, debi ölçmek amacıyla kullanılan en eski su yapılarından biridir. 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 hidrolik yapılar; sulama, yağmur suyu ve atık su sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Farklı geometrik şekillerde uygulanabilen savaklar genellikle keskin kenarlı savaklar ve geniş başlıklı savaklar olmak üzere iki ayrı başlık altında sınıflandırılır.

Akarsu yatağını ya da kanal kesitini kapatacak şekilde tasarlanan geniş başlıklı savakların dikdörtgen, üçgen, trapez ve eğrisel kesite sahip tipleri mevcuttur. Enkesit 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 deney verileri üzerinde ölçek hatalarından kaynaklanan hatalar olduğu ve bu hataların sonuçları etkilediği bilinmektedir. Bunun yansıması suyun hareket denklemlerinin analitik çözümünü elde etmek hareket denklemlerinin viskozite ve türbülans ifadelerini içermesi sebebi ile güç olmaktadır. Günümüzde su yapı etkileşiminin olduğu serbest yüzeyli akımların teorik olarak çözülmesi Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, HAD , (Computational Fluid Dynamics – CFD) yöntemlerindeki gelişmeler ile kolaylaşmıştır [1,2,3].

CFD yöntemlerinin kullanım alanının artmış olması açık kanal problemlerinin daha hızlı, ekonomik ve kolay olarak çözülmesine olanak sağlamıştır. Son yıllarda bilgisayarların hesaplama güçlerinin ve hızlarının artması problemlerin çözüm süresini kısaltmış bunun yanı sıra üç boyutlu problemlerin çözümü olanaklı hale gelmiştir. Sayısal yöntemler ile ölçülmesi zor olan hız, basınç gibi parametrelerin tamamı kolaylıkla elde edilebilmektedir. Analiz ve tasarım işlemlerinin hızlı bir şekilde elde ediliyor oluşu farklı akım koşulları için analizlerin tekrarlanmasını kolaylaştırmakta ve problem için en doğru çözümün elde edilmesine imkân sağlamaktadır. Bu özelliği ile sayısal yöntemler laboratuvar deneylerinin yerine önemli bir alternatif haline gelmiştir.

Sayısal yöntemler ile diferansiyel formdaki denklemler (Navier-Stokes denklemleri) cebrik forma indirildikten sonra bilinen başlangıç ve sınır şartları ile bilgisayar yardımı ile çözülür. Denklemlerin çözümü için çok sayıda yöntem bulunmakla birlikte sonlu hacimler yöntemi ön plana çıkmıştır. Bu yazılımlar Navier-Stokes denklemlerine dayandığından, serbest yüzeyli akımların modellenmesinde serbest yüzeyin belirlenebilmesi için çeşitli yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bunlardan en bilineni ve en çok kullanılanı akışkan hacmi (Volume of Fluid, VOF) yaklaşımıdır [4].

Bu çalışmada laboratuvar kanalına yerleştirilmiş farklı uzunluktaki (L) 4 geniş başlıklı savak üzerinde hız ve su yüzü ölçümleri yapılmıştır. Akım hızları kanal üzerinde 3 doğrultuda hareket edebilen sehpaye yerleştirilen Moline (Low Speed Propeller Probe) ile ölçülmüştür. Kanal başından itibaren 5,5m ye sonrası ile 0,6x0,6x0,10 m, 0,6x0,3x0,10 m, 0,6x0,2x0,10 m, 0,6x0,15x0,10 m boyutlarında plexiglassdan imal edilmiş savak yerleştirilmiştir. Deneyler kanala su veren vana ayarlanarak debi ölçerden okunan 5 farklı debi durumunda, kanal taban eğiminin $S=0,001$ değerinde gerçekleştirilmiştir.

Kanalın $x= 4,5'$ inci metresinde yarı en kesit üzerinde 6 farklı düşeyde derinlik boyunca hız ölçümü alınmıştır. Ayrıca savak orta noktasında yarı en kesit üzerinde 6 farklı düşeyde derinlik boyunca hız ölçümü alınmıştır. Her bir debi durumunda su yüzü ölçümleri, sehpaye yerleştirilen ölçüm çubuğu ile sehpanın 3 doğrultuda hareket edebilmesinden faydalanılarak gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada sayısal çözüm için FLOW-3D bilgisayar programı kullanılmıştır. Sayısal çözüm için kullanılan FLOW -3D paket programı Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes

(RANS) denklemlerini sonlu hacim tekniği ile çözmektedir. Serbest su yüzeyi akışkan hacmi (VOF) tekniği ile belirlenmektedir. FLOW- 3D bilgisayar programı vasıtasıyla 3 boyutlu sayısal modelleme yapılmıştır. Farklı türbülans modellerinin duyarlılığı çalışma konusu olmadığından modelleme esnasında iki denklemlili k- ϵ türbülans modeli kullanılmıştır. Modelleme sonucu bulunan sayısal sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. 0,6x0,6x0,10m ölçülerindeki savak için ayrıca 2 boyutlu modelleme yapılarak, elde edilen sonuçlar 3 boyutlu modelleme sonucu ile karşılaştırılmıştır.

Tezin takip eden ilk bölümünde savaklar ile ilgili genel bilgilendirmeler verilmiş ve ilgili literatür için kapsamlı bir özet yapılmıştır.

Tezin ikinci bölümünde; temel denklemler ve kullanılan türbülans modeli açıklanmış, program ve programa veri girişı hakkında bilgiler verilmiş, deney düzeneği ve uygulanılan yöntemden bahsedilmiştir.

Tezin üçüncü bölümünde; deneysel çalışmadan elde edilen veriler ile sayısal model sonuçları grafiksel olarak karşılaştırılmıştır.

Tezin dördüncü bölümünde; edinilen bulgulara dayanılarak sonuçlar ve öneriler sunulmuştur.

1. BÖLÜM

GENEL KAVRAMLAR VE İLGİLİ LİTERATÜR ÖZETİ

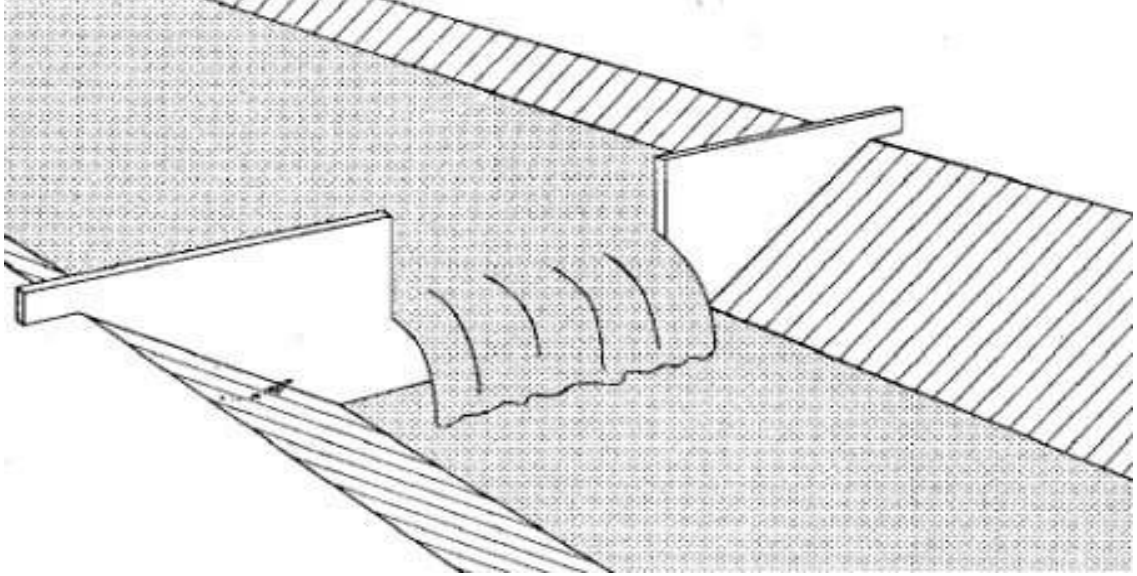
1.1. Savaklar ve Savakların Karakteristik Özellikleri

Savaklar, açık kanallarda suyun debisini ölçmek için kullanılan en eski hidrolik yapılardan biridir [5]. Savaklar debi ölçümünün yanı sıra akım derinliğini ve su seviyesini düzenlemek, su almak, enerji sönmölemek ve diğör birçok amaçlarla kullanılmaktadır. Savaklar açık bir kanal eksenine dik olarak yerleştirilmekte ve sulama sistemlerinde, yağmur suyu kanallarında, suların havalandırılmasında, kanalizasyon sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Savaklar genel olarak keskin kenarlı savaklar ve geniş başlıklı savaklar olmak üzere iki ayrı başlıkta sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırmaya labirent savaklar, ogee savaklar gibi savak türleri de dahildir. Ancak en çok kullanılan türler keskin kenarlı ve geniş başlıklı savaklar olduğundan bu bölümde sadece bu savaklar ele alınmıştır. Ayrıca bu sınıfların her biri savağın geometrisine göre alt sınıflara ayrılmaktadır. Savak şekilleri ve tanımları benzer olmasına karşın hidrolik davranışları oldukça farklıdır.

1.1.1. Keskin Kenarlı Savaklar

Akım doğrultusuna dik olarak yerleştirilmiş, düzlemsel ve suyun üzerinden serbestçe döküldüğü, dökölme kenarı keskin olan plaklara keskin kenarlı savak adı verilir. Böyle bir savağın debisinin belirlenebilmesi için enkesitin bütün noktalarında basıncın atmosfer basıncına eşit alınabileceğı yaklaşımı yapılır. Bu savaklar büzölmeli ve büzölmesiz olarak ayrılmaktadır. Büzölmesiz savaklar, genişliğı kanal genişliğine eşit olan savaklardır. Pratikte, küçük debilerin ölçölmesinde yanal büzölmeli savak türleri kullanılır. Keskin kenarlı savaklar genellikle; keskin kenarlı dikdörtgen savaklar, keskin

kenarlı üçgen savaklar ve Cipolletti savağı olmak üzere üç ana grupta toplanmaktadır [6].



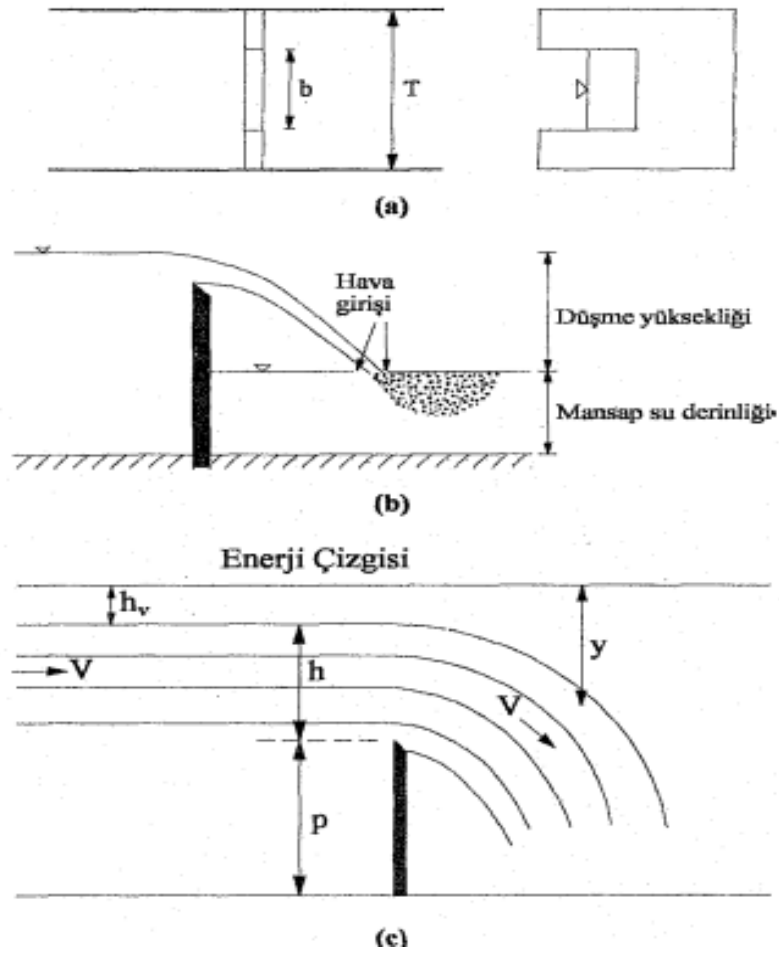
Şekil 1.1. Keskin Kenarlı Savak

Keskin kenarlı dikdörtgen savaklarda küçük debiler için ölçüm yapıldığında problemler yaşanmaktadır. Bu sebeple küçük debilerin ölçümünde keskin kenarlı üçgen savaklar kullanılmaktadır. Sonuçlar daha hassas olmaktadır. Taban açısına göre 30°, 45°, 60°, 90° olabilmektedir. Üçgen savaklarda üçgen açıklığın her iki tarafı dışa yontuk olmalıdır. Cipolletti savağı ise trapez savağın değişik bir şeklidir.

Keskin kenarlı dikdörtgen savaklarda debi formülü (1.1) de verildiği gibidir.

$$Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} h^{3/2} \quad (1.1)$$

Burada C_d debi katsayısını ifade etmektedir. Yapılan deneysel çalışmalarda daralma ve enerji kaybı sebebi ile %62, 2 lik bir kayıp meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu durumda $Q = 0,622 Q_1$ olarak ifade edilebilir. Burada Q_1 kayıpların ihmal edildiği debiyi Q ise kayıpların dikkate alındığı debiyi ifade etmektedir. Keskin kenarlı dikdörtgen savaklar büzülmeli ve büzülmesiz olarak iki gruba ayrılmaktadır. Şekil 1.2 de keskin kenarlı dikdörtgen savak ve üzerindeki akış verilmiştir.

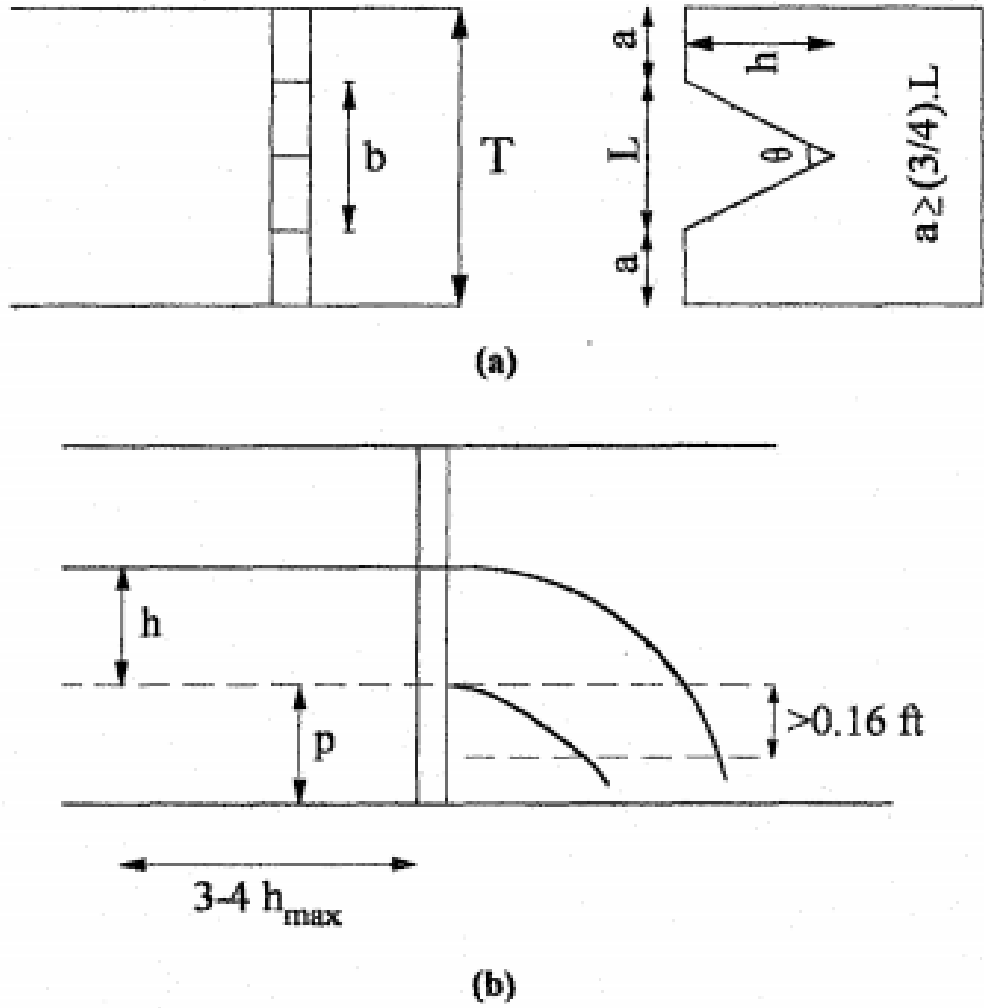


Şekil 1.2. Keskin Kenarlı Dikdörtgen Savak ve Üzerindeki Akım [8]

Keskin kenarlı üçgen savaklar yukarıda belirtildiği gibi küçük debilerin ölçümünde daha hassas sonuçlar vermektedir. Taban açısına göre çeşitli üçgen savaklar vardır bunlar 30° , 45° , 60° , 90° dir. Keskin kenarlı üçgen savaklarda h yüksekliği taban açısının bulunduğu noktadan ölçülür. Keskin kenarlı üçgen savaklarda debi formülü (1.2) de verildiği şeklide olmaktadır.

$$Q = C_d \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) h^{5/2} \quad (1.2)$$

Burada h suyun savak üzerindeki yüksekliği θ taban açısını ifade etmektedir. Keskin kenarlı üçgen savaklar kısmi büzülmeli ve tam büzülmeli olarak ikiye ayrılmaktadır. Keskin kenarlı üçgen savak ve üzerindeki akış şekil 1.3 de verilmiştir.

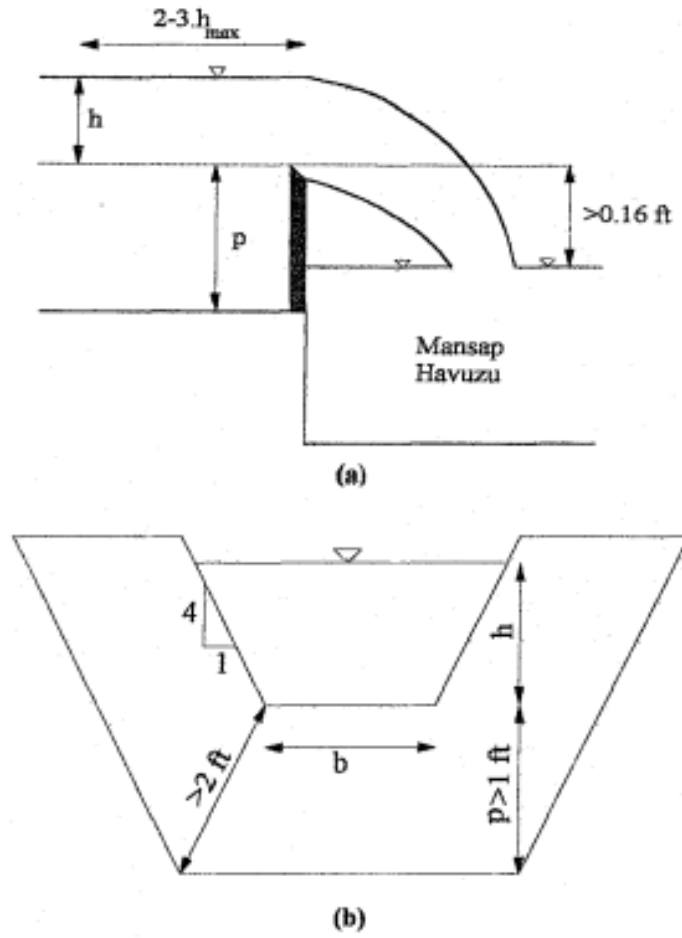


Şekil 1.3. Keskin Kenarlı Üçgen Savak ve Üzerindeki Akış [8]

Cipolletti savağı tam büzülmeli, keskin kenarlı trapez savağın değişik bir şeklidir. Savakta trapez bir kontrol kısmı mevcuttur. Savak eğimi 4:1 şeklindedir. Cipolletti savağında debi formülü (1.3) de verildiği şekildedir.

$$Q = 3,367 b h^{3/2} \quad (1.3)$$

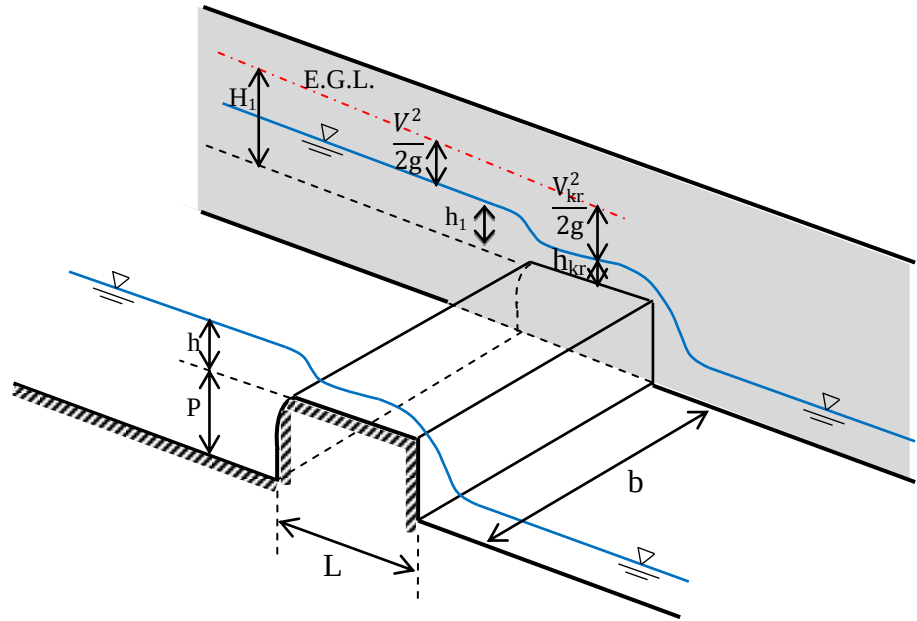
Burada savak genişliğini b savak üzerindeki su yüksekliğini ifade etmektedir. Cipolletti savağı şekil 1.4 de verilmiştir.



Şekil 1.4. Cipolletti Savağının Şekli ve Üstten Görünüşü [8]

1.1.2. Geniş Başlıklı Savaklar

Geniş başlıklı savaklar açık kanallarda su akımını kontrol etmek, su seviyesini düzenlemek ve debi ölçümü için kullanılırlar. Kanal kesitini tamamen kapatacak şekilde kanala yerleştirilirler. Geniş başlıklı savaklar dikdörtgen, üçgen, trapez ve eğrisel kesitte inşa edilirler. Enkesit boyunca yerleştirilen bu yapılar üzerinde akım özellikleri değişerek kritik altı rejimden kritik üstü rejime geçer. Geniş başlıklı savakla akım doğrultusunca yeterli uzunlukta düz bir yüksekliğe sahiptir ve akım derinliği kontrol edilir. Akım çizgileri hemen hemen düz ve paralel durumdadır. Bu durumun bozulmaması için Şekil 1.5 de gösterilen memba tarafındaki toplam enerji yüksekliğinin (H), savak uzunluğuna oranı (L), $0,07 \leq H/L \leq 0,5$ arasında olması tavsiye edilmektedir.



Şekil 1.5. Geniş Başlıklı Savak

$H/L < 0,07$ olması durumunda savak üzerindeki enerji kayıpları ihmal edilemez ve savak üzerinde dalgalanmalar oluşur. $H/L > 0,5$ olması durumunda ise savak üzerindeki akım çizgilerinde eğrilik oluşur ve hidrostatik basınç dağılımı gözlenir [7] .

Şekil 1.5’de geniş başlıklı savak üzerindeki akım verilmiştir. Geniş başlıklı savakların teorik analizi Bernoulli eşitliği ile yapılabilir. Memba kesiti ve blok üzerinde herhangi bir kesit dikkate alınarak Bernoulli eşitliği yazılırsa,

$$H_1 = h_1 + \alpha \frac{V_1^2}{2g} \quad (1.4)$$

Burada hız,

$$V = \sqrt{\frac{1}{\alpha} \sqrt{2g(H_1 - h_1)}} \quad (1.5)$$

olmaktadır. H_1 Şekil 1.5 de görüldüğü gibi savak kreti üzerindeki toplam memba enerji yüküne eşittir. (1.5) formülü $\alpha = 1$ alınarak $Q = V * A$ eşitliğinde yerine yazılırsa

$$Q = A \sqrt{2g(H_1 - h_1)} \quad (1.6)$$

Kontrol kesitinde kritik akım şartlarında $h=h_{kr}$ ve $A=A_{kr}$ olur. Bu durumda debi denklemi (1.7) de olduğu gibi yazılır.

$$Q = A_{kr} \sqrt{2g(H_1 - h_{kr})} \quad (1.7)$$

Dikdörtgen kesitte kritik akım için $A_{kr}=b_{kr} h_{kr}$, $A_{kr}/b_{kr} = h_{kr}$ ve $V^2/2g=1/2h_{kr}$ yazılması durumunda

$$h_{kr} = \frac{2}{3}H = \frac{2}{3}H_1 \quad (1.8)$$

(1.8) deki eşitlik ve $A_{kr}=b_{kr} h_{kr}$ eşitliği (1.7) de yerine yazılırsa;

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{3}g} b_{kr} H_1^{1.50} \quad (1.9)$$

Membra ve mansap kesitleri arasındaki ivmelenen akım bölgesi dikkate alındığında, viskoz etkilerin varlığı ve artan türbülansa bağlı olarak üniform hız dağılımına bağlı hız (α : kinetik enerji) düzeltme katsayısı ihmal edilir. Fakat gerçekte bu etki C_d debi katsayısı ile dikkate alınmalıdır. C_d debi katsayısı ölçüm yapısının şekli ve türüne bağlı olarak değişiklik gösterir. Debi katsayısı dikkate alındığında debi formülü (1.10) daki gibi yazılır.

$$Q = C_d \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{3}g} b_c H_1^{1.5} \quad (1.10)$$

Enerji yüksekliği H_1 in doğrudan ölçümü mümkün olmadığından membada savak üstü su yüksekliği h_1 enerji yüksekliği yerine kullanılır. Bu durumda debi formülü (1.11) deki gibi yazılır.

$$Q = C_d C_v \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{3}g} b_c h_1^{1.5} \quad (1.11)$$

Burada C_v hız katsayısıdır. Hız katsayısı yaklaşım kanalının şekline ve h_1 e bağlıdır. Sonuç olarak (1.11) denklemi düzenlenip değerler yerine konulduğunda geniş başlıklı savaklar için nihai debi denklemi (1.12) deki gibi elde edilir.

$$Q = C_s 1,7 b h^{1.5} \quad (1.12)$$

Burada; Q : savak üstünden geçen debi, C_s : savak katsayısı, b : savak genişliği ve h : savağın membaındaki akım yüksekliğidir.

1.2. Literatür Özeti

Geçmişte, su ile yapı etkileşiminin söz konusu olduğu savak akımlarının analizi ile ilgili çok sayıda deneysel ve teorik çalışma yapılmış olup aşağıda bunlardan bazıları özetlenmiştir.

Ramamurthy ve ark. [9], keskin kenarlı savak üzerinden geçen akımın özelliklerini iki boyutlu olarak incelemek için deneysel çalışmalar yapmışlar ve kret bölgesine yakın yerlerde hız ve basınç dağılımlarını incelemişlerdir. Elde ettikleri deneysel bulgulardan, C_d debi katsayısının h/P boyutsuz büyüklüğüne bağlı olduğunu göstermişlerdir. Burada h , memba tarafındaki savak üzeri su yüksekliğini, P ise savak yüksekliğini ifade etmektedir.

Faltas ve ark. [10], trapez kesitli geniş başlıklı savak üzerinden geçen akım özelliklerini teorik olarak incelemişlerdir. Farklı taban şekillerinde ve farklı Froude sayıları için elde ettikleri bulguları, deneysel çalışmadan elde edilen bulgularla karşılaştırmışlardır. Akım karakteristikleri üzerinde Froude sayısının ve memba su derinliğinin etkilerini ortaya koymuşlardır.

Hager ve Schwalt [11], 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.

Wen ve ark. [12], karmaşık geometrili, iki boyutlu, düzenli ve sıkışmayan serbest yüzeyli akımlar üzerinde deneysel ve teorik çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Karmaşık geometriye sahip akım bölgesi için geliştirdikleri sınır integral yönteminden buldukları sonuçları, deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. Serbest akım yüzeyinin profilini inceleyerek sonuçların deneysel verilerle yakınlık gösterdiğini belirtmişlerdir.

Montes [13], sürtünmesiz akım kabulü ile düzlemsel kapak altından geçen akım için sayısal bir çözüm yöntemi geliştirmiş, deneysel ve sayısal daralma katsayıları arasındaki farklılıkları incelemiştir. Sayısal su yüzü profili ile akım alanının farklı kesitlerinde hesap edilen hız ve basınç dağılımlarının, deneysel ölçümlerle büyük ölçüde uyum sağladığını ifade etmişlerdir.

Chanson ve Montes [14], dairesel savak üzerinden geçen akım ile ilgili yapmış oldukları deneysel çalışmada, savak yarıçapı ve yüksekliği gibi yapısal özellikler ile memba su derinliğinin akım karakteristikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Sonuçta savak üzerinden geçen akım profilinin memba koşullarından etkilendiğini belirtmişlerdir.

Choi ve Kim [15], Ogee profilili savak üzerinden geçen akımın debisini, savak üzerindeki hız ve basınç dağılımlarını ve buna ilave olarak akım profillerini sonlu elemanlar yöntemi kullanarak sayısal olarak hesap etmişlerdir. Çalışmalarını çevrintisiz ve sıkışmayan akım kabulü ile yapmışlardır. Hesaplamalardan elde ettikleri bulguları, USACE (U.S Army Corps of Engineers) test sonuçları ile karşılaştırmışlar, deneysel ve sayısal bulguların birbirleriyle oldukça uyumlu olduğunu ifade etmişlerdir.

Assy [16], savak üzerine yerleştirilmiş bir kapak aracılığı ile oluşturulan kontrollü ve kontrolsüz savak akımının sayısal analizi için sonlu farklar yöntemine dayalı bir çözüm yöntemi üzerinde çalışmıştır. Çevrintisiz akım kabulü yaparak geliştirdiği sayısal yöntemde, akım alanının tüm hesap noktalarında akım fonksiyonunu hesaplamış ve buna bağlı olarak hız alanını belirlemiştir. Bunun yanı sıra su yüzü profili, debi katsayısı ve basınç alanlarını da sayısal olarak elde etmiştir.

Chen ve ark. [17], basamaklı dolu savak üzerindeki akım profilini sayısal olarak modellemişler ve elde ettikleri sayısal verileri deneysel ölçümlerle karşılaştırmışlardır. Akımı idare eden temel denklemleri standart $k-\varepsilon$ türbülans modeli kullanarak çözmüşlerdir. Su yüzünün teorik olarak belirlenmesinde ise VOF yöntemini kullanmışlardır. Deneysel ve sayısal akım profillerinin oldukça uyumlu olduğunu ancak düşüm bölgesinde çok az farklılıkların görüldüğünü belirlemişlerdir.

Sarker ve Rhodes [18], laboratuvar kanalında dikdörtgen kesitli geniş başlıklı savak ile etkileşim halindeki serbest yüzeyli akımın özelliklerini deneysel ve teorik olarak

araştırmışlardır. Bir CFD yazılımı olan, sonlu hacimler yöntemine dayalı Fluent paket programı ile modelleme yapmışlardır. Türbülans viskozitesinin hesabında standart k- ϵ türbülans modeli kullanmışlardır. Sayısal su yüzü profilleri ile deneysel verileri karşılaştırmış ve sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğunu belirtmişlerdir.

Ashgriz ve ark. [19], açık kanal içine yerleştirilen yarım silindirik bir yapı üzerinden geçen akımın sayısal modellemesi üzerinde çalışmışlardır. Sayısal çözümleri, sonlu elemanlar yöntemine dayalı ANSYS programını kullanarak elde etmişlerdir. Su yüzü profillerinin hesabı için VOF metodunu kullanmışlardır. Akım alanındaki teorik basınç ve hız dağılımlarını elde ederek grafiksel olarak sunmuşlardır.

Nguyen ve Nestmann [20], Rhine nehrinin profilini, deneysel ve VOF yöntemini kullanarak hesaplamışlardır. Türbülanslı akımın hareketini idare eden denklemleri standart k- ϵ modeli kullanarak sayısal olarak çözmüşlerdir. Çalışma sonucunda sayısal olarak hesaplanan hız alanı değerlerinin deneysel sonuçlarla uyumluluk içinde olduğunu bildirmişlerdir.

Chatila ve Tabbara [21], Ogee profilli savakların hidrolik özelliklerini deneysel ve teorik olarak incelemişlerdir. Sonlu elemanlar yöntemine dayalı çözüm yapan ADINA paket programı kullanılarak elde edilen sayısal su yüzü profilleri ile laboratuvarla ölçülen su yüzü profilleri karşılaştırmışlar ve deneysel veriler ile program çıktılarının uyum içinde olduğunu belirtmişlerdir.

Şeker [22], üçgen savak arkasındaki akım hızlarını deneysel ve teorik olarak karşılaştırmak üzerine bir çalışma yapmıştır. Hızı, parçacık görüntülemeli hız ölçümü (PIV) tekniği ile ölçmüş ve elde edilen deneysel veriler ile sonlu elemanlar yöntemine dayalı ANSYS paket programından elde ettiği sayısal verileri karşılaştırmıştır. Serbest su yüzünün hesabında VOF yöntemini kullanmıştır. Yapmış olduğu karşılaştırmaların sonucunda, deneysel ve sayısal akım hızları ile su yüzü profillerinin birbirleri ile uyumlu olduğunu belirtmiştir.

Kırkgöz ve ark [23], 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 modelleri kullanarak sonlu elemanlar

yöntemine dayalı ANSYS-Flotran ile çözmüşlerdir. Su yüzü profilinin hesabında VOF yöntemini kullanmışlardır. Sayısal olarak hesap edilen hız profillerini, PIV ile ölçmüş oldukları hız profilleri ile karşılaştırmışlar, $k-\omega$ türbülans modelini standart $k-\epsilon$ modeline göre deney verileri ile daha çok uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, ağ yapısının yoğunluğunu sayısal sonuçlar üzerindeki etkisini farklı yoğunlukta ağlar ile çözüm yaparak incelemişlerdir.

Öner ve ark. [24], açık kanal içerisine yerleştirdikleri dikdörtgen geniş başlıklı savak üzerinde teorik ve deneysel olarak çalışma yapmışlardır. Hız alanını deneysel olarak PIV hız ölçme tekniği kullanılarak ölçmüşlerdir. Hareket denklemlerinin sayısal çözümlerini, sonlu elemanlar yöntemine dayalı ANSYS-Flotran ile elde etmişler, serbest su yüzünün hesabını VOF yöntemi ile gerçekleştirmişlerdir. Sayısal modellemede türbülans viskozitesinin hesabı için Standart $k-\epsilon$, standart $k-\omega$ ve SST türbülans kapama modellerini kullanmışlardır. Hesap edilen akım hızları ve su yüzü profillerini deneysel ölçümlerle karşılaştırmışlar ve standart $k-\omega$ türbülans modeli kullanılarak elde edilen verilerin diğer türbülans modelleri ile bulunan verilere göre deneysel veriler ile daha uyumlu olduğunu belirtmişlerdir.

Aköz ve ark. [25], düşey bir kapak altından geçen iki-boyutlu açık kanal akımında hız alanını, standart $k-\epsilon$ ve standart $k-\omega$ türbülans modellerini kullanarak ANSYS-Flotran ile çözüm yaparak sayısal olarak elde etmişlerdir. Su yüzü profilini hesap etmek için VOF yöntemini kullanmışlardır. Sekiz farklı ağ yapısı kullanarak ağ yoğunluğunun sayısal çözümler üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Sayısal bulgularla karşılaştırmak amacıyla kapak arkasındaki akımın hız alanını, PIV yöntemi ile deneysel olarak ölçmüşlerdir. Elde ettikleri sayısal ve deneysel sonuçlar, standart $k-\epsilon$ türbülans modeli ile bulunan verilerin, diğer türbülans modelleri ile bulunan verilere göre deney sonuçlara daha yakın olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Kırkgöz ve ark. [26], açık kanal içerisinde katı sınıra yakın dairesel silindir ile etkileşim halindeki iki-boyutlu türbülanslı akımın özelliklerini deneysel ve teorik olarak irdelemişlerdir. Silindir etrafındaki akımın hız alanı PIV tekniği ile deneysel olarak ölçmüşlerdir. Standart $k-\epsilon$, standart $k-\omega$ ve SST (Shear Stress Transport) türbülans modellerini kullanarak üç farklı ağ yapısı için sayısal çözümleri elde etmişlerdir. Deneysel ve sayısal verilerin karşılaştırmalarından, standart $k-\omega$ ve SST türbülans

modellerinin kullanıldığı modellemeden elde edilen sayısal verilerin diğer türbülans modellerine göre deney verilerine daha yakın sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Doğan [8], savaklarda kret şeklinin debi katsayısına etkisi deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada dört adet farklı geometrik yapıya sahip savak kret şekli için bir dizi deneysel çalışma yapmıştır. Savaklar üzerinden geçen debi ve akım hızları belirlemiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde savak kret şeklinin debi katsayısı üzerinde etkili bir parametre olduğunu belirtmiştir. $\frac{1}{4}$ yuvarlatılmış kret şekline sahip doğrusal savağın en büyük debi katsayısı değerlerine sahip olduğunu ifade etmiştir.

Şimşek [1], 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 (Shear Stress Transport k- ω türbülans modeli), ve RSM (Reynolds Stress türbülans modeli) türbülans modellerinin kullanıldığı sayısal hesaplamalarda Renormalization Group k- ϵ türbülans modeli kullanılarak elde etmiş olduğu verilerin deneysel ölçümlere daha yakın olduğu sonucuna ulaşmıştır.

Bal [2], 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 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.

Salmasi ve ark. [27], geniş başlıklı dikdörtgen savaklarda debi ilişkilerinin incelenmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Düşük savak eşiği genişliği ve dikdörtgen bileşik kesitli geniş başlıklı savakların düşüm yüksekliğinin, debi katsayısı (Cd) ve yaklaşım hızı katsayısı değerleri üzerine etkilerinin araştırılması amacıyla bir dizi laboratuvar denemesi gerçekleştirmişlerdir. Bu amaçla geniş aralılardaki debiler için on beş farklı dikdörtgen bileşik kesitli geniş başlıklı savak modeli üzerinde deney yapmışlardır.

Yaklaşım kanalı ve çıkış suyu kanalındaki eşik tabanlı yükleri her deneyde ölçülmüşler model parametreleri üzerindeki debi ve yaklaşım hızı katsayısının etkisini araştırmışlardır. Sonuçlar neticesinde kesit genişliğinin aniden şekil değiştirmesi ve akışın dış bölüme girdiğinde eğimde bir kırılma olmasından dolayı ana debi oranlarında düzensizlik meydana geldiğini belirtmişlerdir. Bileşik geniş başlıklı savak denemelerinden elde edilen Cd değerlerinin, daralma etkilerinden dolayı dikdörtgen kesitli geniş başlıklı savaklarınkinden daha düşük olduğunu ifade etmişlerdir.

Felder ve ark. [28], 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 uniform 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.

Salmasi ve ark. [29], geniş başlıklı savaklar üzerinde debi katsayısı C_d 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 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 [30], bir basamaklı geniş başlıklı savak modeli üzerindeki akımı deneysel olarak incelemiştir. Deney verilerini HEC-RAS programı ile modellemiştir. Program ile 5m uzunluğundaki kanalı 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.

Duru [31], ince kenarlı savaklar ve savak-kapak kombine sistemleri üzerinde daha önce yapılmış deney çalışması için sayısal modelleme yapmıştır. Akıma ait denklemlerin çözümünde sonlu hacimler yöntemine dayalı FLOW-3D paket programını kullanmıştır. Hesaplanan akım debisini deneysel verilerle karşılaştırmıştır. İnce kenarlı savaklar ve savak-kapak kombine sistemler için hesaplanan debi değerinin deney verileri ile makul ölçüde uyum sağladığını belirtmiştir.

Hoseini ve ark. [32], geniş başlıklı savak üzerinde kritik altı akım şartlarında deneysel çalışma yapmışlardır. Deneyleri 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 güvenilir bir denklem sunduklarını belirtmişlerdir.

Al-Khatip ve ark. [33], bileşik geniş başlıklı dikdörtgen savaklar üzerinde debi tahmini üzerine bir çalışma yapmışlardır. Deneysel çalışmalarını düşük seviyeden başlayarak değişen basamak yüksekliklerinde dokuz farklı bileşik geniş başlıklı dikdörtgen savak üzerinde gerçekleştirmişlerdir. C_d debi katsayısı ve C_v hız katsayısının nelere bağlı olduğunu araştırmışlardır. C_d için boyutsuz üç oran R_2 , R_3 , R_4 ve C_v için boyutsuz üç oran R_1 , R_2 , R_4 ü geliştirmişlerdir. C_d ve C_v nin genel denklemler ile hesaplandığı duruma göre; h_1 memba kret üstü su yüksekliği ve boyutsuz oranlara bağlı olarak hesapladıkları değerler ile arasındaki hata oranının %5 den küçük olduğunu belirtmişlerdir.

2. BÖLÜM

MATERYAL ve YÖNTEM

2.1. Giriş

Bu bölümde öncelikle Navier-Stokes ve RANS (Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes) denklemleri anlatılacaktır. Devam eden kısımda *FLOW-3D* yazılımından bahsedilecek ve çalışmada kullanılan $k-\varepsilon$ türbülans modeli açıklanacaktır. Sonrasında ise deney düzeneği, deneyde kullanılan materyallerden bahsedilecektir.

2.2. Navier-Stokes Denklemleri

Navier-Stokes denklemleri süreklilik ve hareket denklemlerinden oluşan akışkanlar mekaniğinin temel denklemleridir. Newton'un ikinci kanununun sonsuz küçük bir kontrol hacmine uygulanmasıyla Newtonien bir akışkan için aşağıdaki Navier-Stokes denklemleri türetilir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (2.1)$$

$$\rho \frac{d\mathbf{V}}{dt} = -\nabla p + \nabla \tau + \rho \mathbf{g} \quad (2.2)$$

Denklem (2.1) kütle korunumunu, denklem (2.2) momentumun korunumu temsil etmektedir. Burada $\mathbf{V}$ hız vektörünü, τ gerilme tansörünü, ρ yoğunluğu, $\mathbf{g}$ yerçekimini, t zamanı, p basıncı göstermektedir. Su sıkışmaz kabul edildiğinden yoğunluk sabittir. Bu nedenle;

$$\frac{d\rho}{dt} = 0 \quad (2.3)$$

Böylelikle süreklilik ve momentum denklemi aşağıdaki forma indirgenir.

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (2.4)$$

$$\rho \frac{d\mathbf{V}}{dt} = \rho \left(\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} \right) = -\nabla p + \nabla \tau + \rho \mathbf{g} \quad (2.5)$$

Yukarıdaki ifadeler ayrıca tansör formatında aşağıdaki gibi ifade edilebilirler.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.6)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (2.7)$$

Burada üç boyutlu akımlar için $i, j=1,2,3$ değerlerini alır ve sırasıyla x, y, z doğrultularındaki akım bileşenlerini temsil etmektedir. Yapılan çalışmada akışkan sıkışmaz ve Newtonien kabul edildiğinden gerilme tansörü, dinamik viskozite katsayısı μ ve şekil değiştirme hızları ile orantılıdır:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.8)$$

Bu ifade denklem (2.7) de yerine konulursa momentum denklemi aşağıdaki biçimi alır.

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \rho g_i \quad (2.9)$$

Süreklilik ve momentum denklemleri kartezyen koordinatlarda daha açık biçimde yazılırsa Navier-Stokes denklemleri aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.10)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \quad (2.11)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \quad (2.12)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g_z \quad (2.13)$$

Serbest yüzeyli akımlarda bu ifadelerde etki eden tek kütleli kuvvet yerçekimi kuvvetidir. Dolayısıyla ifadelerdeki g_x ve g_y terimleri sıfıra eşittir.

Bu denklem sistemine bakıldığında bilinmeyenler basınç p ve hız vektörünün üç bileşeni u , v , w olmak üzere dört adettir. Bununla birlikte sistemde bir süreklilik ve üç adet lineer momentum denklemi olmak üzere toplam dört adet denklem bulunmaktadır. Görüldüğü gibi sistemin bilinmeyen sayısı denklem sayısına eşittir. Buna karşın sıkışmayan, sabit viskoziteli akışkanlar için geçerli olan bu denklem sisteminin genel bir çözümü yoktur. Ancak uygun başlangıç ve sınır şartları altında sayısal yöntemler ile çözülebilirler. Bunun için yoğunluk, viskozite ve yerçekiminin bilinmesi gereklidir. Sonuç olarak denklem (2.11), (2.12), (2.13) ten oluşan hareket denklemleri aşağıdaki gibi kapalı formda da yazılabilir.

$$\rho \frac{dV}{dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 V + \rho g \quad (2.14)$$

Denklem (2.14) ün fiziksel anlamı: yoğunluk* ivme= birim hacim başına basınç kuvveti+ birim hacim başına viskoz kuvvet+ birim hacim başına kütleli kuvvet şeklindedir.

Navier-Stokes denklemlerinde viskozite içeren terimler ihmal edildiğinde, aşağıdaki Euler denklemleri elde edilir.

$$\rho \frac{dV}{dt} = -\nabla p + \rho g \quad (2.15)$$

Bu denklemlerde viskozite terimlerinin bulunmamasının yanında sınır koşulları da farklılıklar gösterir. Viskoz bir akışkanın katı bir sınırdaki hız vektörü sıfırdır. Bu da akışkanın katı madde sınırını ne geçebileceği ne de bu sınır üzerinde kayabileceği anlamına gelmektedir.

2.3. Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) Denklemleri

Gerçek akışkanların hareketinde, akımın durumu Reynolds sayısına bağlı olarak laminar veya türbülanslı olabilmektedir.

$$R_e = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (2.16)$$

Burada V ortalama hızı, L ise karakteristik boyu, ρ yoğunluğu, μ ise dinamik viskozite katsayısını göstermektedir. Reynolds sayısının büyümesi akımın çalkantıya karşı duyarlılığını gösterir ve açık kanal akımlarında laminar akımdan türbülanslı akıma geçiş için kritik Reynolds sayısı 500 olmaktadır. Birçok mühendislik problemi gibi savak üstü akım da oldukça türbülanslı bir yapıya sahiptir. Bununla birlikte çok karmaşık olan türbülanslı akımın yapısı matematiksel olarak tam çözülememiştir.

Türbülanslı akım alanında herhangi bir noktada hız ve basınç gibi akım büyüklüklerinin şiddeti ve yönü zamana bağlı olarak gelişigüzel değişebilmektedir. Buna göre hız ve basıncın herhangi bir andaki değeri ortalama ve anlık sapmaların toplamı şeklinde yazılabilir:

$$u = \bar{u} + u', \quad v = \bar{v} + v', \quad w = \bar{w} + w', \quad p = \bar{p} + p' \quad (2.17)$$

Burada $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}, \bar{p}$ hız ve basınca ait ortalama değerleri, u', v', w', p' ise bunlara ait anlık sapmaları temsil etmektedir. Denklem (2.17) de verilen u, v, w değerleri denklem (2.10) da verilen süreklilik denkleminde yerine yazılacak olursa;

$$\frac{\partial}{\partial x}(\bar{u} + u') + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{v} + v') + \frac{\partial}{\partial z}(\bar{w} + w') = 0 \quad (2.18)$$

Bir Δt intervali için süreklilik denkleminin ortalaması alınır;

$$\overline{\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (2.19)$$

ifadesi bulunur. Denklem (2.19) daki ifade (2.18) den çıkarılırsa;

$$\frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y} + \frac{\partial w'}{\partial z} = 0 \quad (2.20)$$

denklemini elde edilir ki ortalama hız bileşenleri türbülans ve hız sapmalarının aynı süreklilik denklemini sağladığı görülmektedir.

2.3.1. Sıkışmayan Türbülanslı Akımda Hareket Denklemleri

Navier-Stokes denklemlerinin x bileşeni ele alınıp denklem (2.17) deki ifadeler denklem (2.11) de yerine koyulursa;

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial(\bar{u} + u')}{\partial t} + (\bar{u} + u') \frac{\partial(\bar{u} + u')}{\partial x} + (\bar{v} + v') \frac{\partial(\bar{u} + u')}{\partial y} + (\bar{w} + w') \frac{\partial(\bar{u} + u')}{\partial z} \right) \\ &= -\frac{\partial(\bar{p} + p')}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2(\bar{u} + u')}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(\bar{u} + u')}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(\bar{u} + u')}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \end{aligned} \quad (2.21)$$

Formülü elde edilir. Denklem (2.21) de her bir terimin zamana göre ortalaması alınırsa $u' = 0$ olur Böylece x doğrultusu için;

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{u} \bar{u}'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u} \bar{v}'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u} \bar{w}'}{\partial z} \right) \\ &= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \end{aligned} \quad (2.22)$$

denklemini elde edilir. Çalkantı ifadeleri eşitliğin sağ tarafına alınırsa

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) \\ &= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \right) - \rho \left(\frac{\partial \bar{u} \bar{u}'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u} \bar{v}'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u} \bar{w}'}{\partial z} \right) + \rho g_x \end{aligned} \quad (2.23)$$

(2.23) denklemini y ve z doğrultuları için de benzer şekilde yazılabilir.

$$\begin{aligned}
& \rho \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) \\
& = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial z^2} \right) - \rho \left(\frac{\partial \overline{v'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \right) + \rho g_y
\end{aligned} \tag{2.24}$$

$$\begin{aligned}
& \rho \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) \\
& = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial z^2} \right) - \rho \left(\frac{\partial \overline{w'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{w'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'w'}}{\partial z} \right) + \rho g_z
\end{aligned} \tag{2.25}$$

Elde edilen bu RANS denklemleri tansör notasyonu ile aşağıdaki biçimde gösterilebilir.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{2.26}$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \frac{\partial (\overline{u_i u_j})}{\partial x_j} + \rho g_i \tag{2.27}$$

(2.27) denklemi, denklem (2.9)'da verilen Navier-Stokes denklemleri ile karşılaştırıldığında ilave olarak $\partial(\overline{u_i u_j})/\partial x_j$ ifadesini içerdiği görülmektedir. Bu ifade türbülansın dolaylı oluşan çalkantı gerilmelerini ya da literatürdeki ismiyle Reynolds gerilmelerini temsil etmektedir. Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemleri olarak bilinen bu denklemlerde akım büyüklükleri hız ve basınç ortalama değerler ile ifade edilmektedir.

Laminer akım durumunda Navier-Stokes denklemlerinde dört bilinmeyen ve dört denklem olmasına karşılık türbülanslı akım denklemlerinde (RANS) u', v', w' terimlerinin eklenmesiyle bilinmeyen sayısının artması yeni denklemlerin kullanılmasını gerektirmektedir. Bu yeni denklemler türbülans modelleriyle elde edilir. Denklem sayısının bilinmeyen sayısına eşitlenmesine closure (kapatma) işlemi denilmektedir. Kapatma işleminin nasıl yapılacağı konusunda henüz bir fikir birliği oluşmadığından değişik türbülans modelleri kullanılmaktadır.

Bu denklemlerdeki türbülans gerilme terimleri, μ ile ölçülen moleküler viskoziteye benzer şekilde μ_t katsayısı ile ölçülen ve türbülans (eddy) viskozitesi olarak adlandırılan yeni bir viskoziteden kaynaklanmış gibi düşünülebilirler.

Bu amaçla $\tau'_{ij} = -\rho \overline{(u'_i u'_j)}$ türbülans gerilmelerini (Reynolds gerilmeleri) ve denklem (2.8)'deki τ_{ij} laminar viskozite gerilmelerini göstermek üzere, denklem (2.27) gerilmeler cinsinden yeniden yazılacak olursa;

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau'_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (2.28)$$

eşitliği elde edilir. Gerilme ifadeleri $\partial / \partial x_i$ parantezine alınırsa

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial (\tau_{ij} + \tau'_{ij})}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (2.29)$$

denklemini ortaya çıkar. Görüldüğü gibi RANS (Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes) denklemlerinde toplam gerilme laminar ve türbülans gerilmelerinin toplamı şeklinde yazılabilir ($\tau_T = \tau + \tau'$). Genellikle ele alınan türbülans modellerinde Reynolds gerilmeleri, τ'_{ij} , için denklemlerdeki diğer terimlerin bir fonksiyonu olarak ele alınan ampirik ifadeler kullanılmaktadır. Bu modellerden Boussinesq hipotezi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu hipoteze göre Reynolds gerilmeleri viskoz gerilmelere benzer biçimde ortalama hız gradyanlarıyla ilişkilendirilir.

$$\tau'_{ij} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.30)$$

Burada μ_t türbülans viskozitesini göstermektedir ve dinamik viskozite μ 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 μ_t türbülans viskozitesinin değerinin hesaplanması gereklidir. Bu da farklı türbülans modelleri yardımıyla gerçekleştirilir.

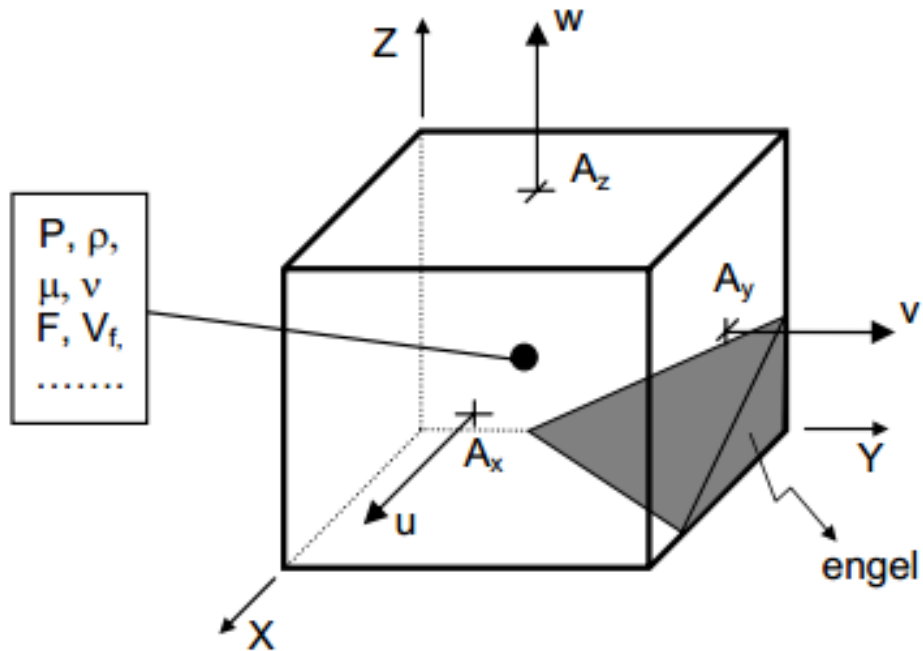
Türbülanslı akışlar, kontrol hacmindeki cidarların (duvarların) varlığından önemli ölçüde etkilenirler. Bir cidar bölgesinde (viskoz alt tabaka) toplam kayma gerilmesi neredeyse sabittir ve toplam kayma gerilmesi cidar kayma gerilmesine eşittir. Toplam kayma gerilmesi, τ_T , sadece cidar yakınında ince bir bölgede sabittir ve cıdardan uzaklaştıkça azalır. Cidar üzerinde ortalama hız bileşenleri ve bunlara ait çalkantı hızları sıfır değerini alırlar. Ayrıca çalkantı hızları cidar yakınında da son derece küçüktürler. Bu nedenle cidara yaklaştıkça türbülans kayma gerilmesi ortadan kaybolur ve viskoz kayma gerilmesi cidar kayma gerilmesine eşit olur. Bu bölgede akım, laminar akım karakterini gösterdiğinden, laminar ya da viskoz alt tabaka olarak adlandırılır. Akım, bu tabakanın üzerinde türbülans karakterini gösterir ve çalkantılar görülür. Laminar viskozite ile birlikte türbülans viskozitesi de etkisini gösterir ve viskoz alt tabakadan uzaklaştıkça etkisini artırır. Dolayısıyla cıdardan uzaklaştıkça viskoz kayma gerilmesi düşerken türbülans kayma gerilmesi yükselir. Belli bir yükseklikten sonra viskoz gerilmesi türbülans gerilmesi ile karşılaştırıldığında çok küçük bir değerde kalacağı için ihmal edilebilir. Bu nedenle cidara yakın bölgelerin sayısal olarak yeterli hassasiyette çözümlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bunun için bu bölgede ağ aralıklarının oldukça sık seçilmesi gereklidir fakat özellikle üç boyutlu ve büyük ölçekli problemlerde bu durum bilgisayar gücüne duyulan gereksinimi arttırır. Diğer bir alternatif de cidar bölgesindeki akım için hız dağılımı bilinen bir duvar fonksiyonu (wall function) kullanmaktır.

Sonuç olarak türbülanslı akımda hareket denklemleri, sınır tabakası içinde veya dışında, denklem sayısından daha fazla sayıda bilinmeyen (Reynolds gerilmeleri) içerdiği için denklemlerin çözümü ancak Reynolds gerilmelerinin bir başka yoldan bulunup bu denklemlere yerleştirilmeleri ile mümkündür. Reynolds gerilmelerinin elde edilmesi için Boussinesq, Prandtl ve Von Karman'ın geliştirmiş olduğu ve çok az hesaplama gerektiren basit ampirik kanunların yanında, sayısal yöntemler yardımıyla günümüzde daha karmaşık türbülans modelleri kullanılmaktadır [34].

Yapılan çalışmada, savak üzerinden geçen akımın 2 ve 3 boyutlu modellemesi için RANS (Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes) denklemleri kullanılmıştır. Türbülans modeli olarak yaygın kullanıma sahip olan ve doğruluğu denenmiş modellerden biri olan k- ϵ türbülans modeli kullanılmıştır [35]. Bu modelin detayları ilerleyen kısımlarda anlatılacaktır.

2.4. FLOW-3D Programının Genel Özellikleri

Tez kapsamındaki sayısal uygulamalar, ticari FLOW-3D yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yazılım en genel haldeki süreklilik, momentum ve enerji temel kanunlarına dayandığından hemen her tür akışkanlar mekaniği problemlerine uygulanabilmektedir. Bununla birlikte, yazılım özellikle açık kanal problemlerinin çözümünde oldukça başarılıdır ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Programda üç boyutlu süreklilik ve hareket RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes) denklemlerinden oluşan diferansiyel denklem sisteminin çözümü için sonlu hacimler yöntemi kullanılmaktadır. Hesaplamalar, dikdörtgen hücrelerden oluşan üniform olmayan bir çözüm ağı üzerinde yapılmaktadır. Akışkana ait basınç, yoğunluk, viskozite gibi skaler büyüklükler kontrol hacminin (hücre) merkezinde yer alırken sadece hızlar (u, v, w) kontrol hacminin yüzeyinde hesaba katılmaktadır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Bir Hesaplama Hücresine Etkiyen Değişkenlerin Gösterimi [4]

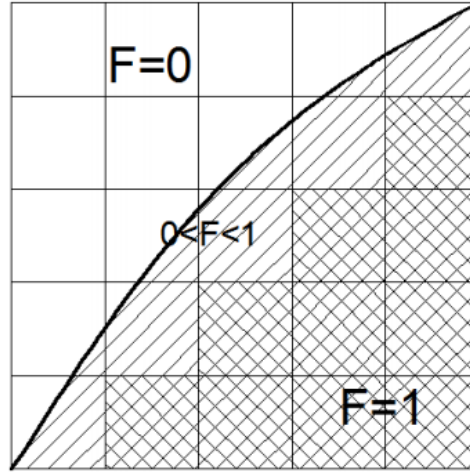
Problem geometrisi, benzer yazılımların aksine çözüm ağı üzerinde bazı hücrelerin engellerle kapatılmasıyla elde edilmektedir. FAVOR (Fractional Area/Volume Obstacle Representation) adı verilen bu yöntemde kontrol hacmi içerisinde bulunan bir engelin kontrol hacminin ne kadarını kapladığı (volume fraction) ve bu engelin kontrol

hacminin her bir yüzeyinde ne kadar alanı kapattığı hesaplanarak bu iki değer oranlanır. Bu yöntem aslında engelleri tanımlamak için kullanılan bir boşluk tekniğidir. Kontrol hacmi tamamen engel ile dolu ise bu değer sıfır, tamamen boş ise 1 değerini alır. Eğer bir hücre kısmen engel ile dolu ise bu değer hücrede kapladığı hacim yüzdesine bağlı olarak sıfır ile 1 arasında bir değer alır. Bu durum aslında her bir hücredeki yüzeylerin akıma açık olduğu alanları dolayısıyla bu hücrede ne kadar akışkan bulunduğunu ifade etmektedir. Bu yöntem ile karmaşık şekle sahip sınırlarda kaba ağ aralıkları kullanılsa bile engel geometrisi iyi tanımlanabilmektedir ve sınırlarda sayısal çözüm hassasiyeti artmaktadır. Modelleme sırasında, daha küçük ağ aralıklarının kullanılması, çözüm alanı içerisindeki engel sınırlarının daha yumuşak (düzgün) tanımlanmasını sağlamaktadır.

Su-hava arakesitine sahip serbest yüzeylerin belirlenmesi için yazılımda akışkan hacmi Volume Of Fluid (VOF) yöntemi kullanılmaktadır [36]. VOF yöntemi ile FAVOR yöntemi gibi; hücrelerin boş, tam veya kısmen suyla dolu olduğu belirlenir. Bu yöntemde hesaplama alanı üzerinde bir akışkan hacmi (F) tanımlanır. Şayet bir hücre tamamen akışkan ile dolu ise bir (1) değeri, tamamen boş ise sıfır (0) değeri ve kısmen dolu ise hücrede kapladığı yüzde değerini alır (Şekil 2.2). Serbest yüzey, bir eğime sahip ise bir hücredeki yüzeyin yerini ve eğimini belirlemek için kendisini çevreleyen hücreleri dikkate alan bir algoritma kullanılmaktadır. VOF yöntemi ile serbest yüzeyin izlenmesi üç kısımdan oluşur. Öncelikle serbest yüzeyin yeri bulunur. Daha sonra bu yüzey, su ve hava arasında keskin bir arakesit olarak belirlenir. Son olarak bu arakesite sınır şartları uygulanır. Arakesit üzerinde sıfır kayma gerilmesi ve sabit basınç sınır koşulları uygulanmaktadır. Akışkan hacmi fonksiyonu F'nin değişimi aşağıdaki diferansiyel denklem ile verilmektedir.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \quad (2.31)$$

bu denklem ile F değeri akışkan ile birlikte hareket etmektedir.



Şekil 2.2. Akışkan Hacminin Ağ Üzerindeki Dağılımı [1]

Bu program; iki denklemlili $k-\varepsilon$, Prandtl karışma boyu, türbülans enerji, RNG (Renormalized Group) ve LES (Large-Eddy Simulation) gibi farklı türbülans modellerini kullanarak çözüm yapmaktadır. LES genellikle 3 boyutlu problemlerin çözümünde kullanılmakla birlikte bu çalışmada en çok kullanılan iki denklemlili $k-\varepsilon$ modeli kullanılmıştır.

Çözüm ağı sınırlarında; simetri, duvar, bağlayıcı, periyodik basınç, hız, çıkan akım (outflow) gibi farklı sınır şartları tanımlama imkanı sağlamaktadır.

Yazılımda üç boyutlu süreklilik ve hareket denklemleri eş zamanlı olarak çözülebilmektedir. Sıkışmayan akım için kullanılan kartezyen koordinatlardaki süreklilik ve hareket denklemleri sırasıyla aşağıdaki gibidir;

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(u_i A_i) = 0 \quad (2.32)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u_j A_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + g_i + f_i \quad (2.33)$$

burada u_i i doğrultusundaki akım hızını, P basıncı, A_i i doğrultusunda her bir hücredeki akışkanın sahip olduğu alanı, V_F her bir hücredeki akışkanın sahip olduğu hacmi, g_i yer

çekimini, f_i herhangi bir türbülans modeli için Reynolds gerilmelerini ifade etmektedir. Bir akışkan hacmi için Reynolds gerilmeleri f_i aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmektedir.

$$f_i = \frac{1}{\rho V_F} \left[ws_i - \frac{\partial}{\partial x_j} (A_j \tau_{ij}) \right] \quad (2.34)$$

burada ws_i duvar kayma gerilmesi, τ_{ij} ise gerilme hızı tansörünü ifade etmektedir.

Duvar kayma gerilmeleri ise,

$$\tau_{ii} = -2\mu_T \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] \text{ ve } \tau_{ij} = -\mu_T \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (2.35)$$

Burada μ_T türbülans etkilerini ifade eden çalkantı gerilmelerini de içeren toplam dinamik viskozitedir $\mu_T = (\mu + \mu_t)$.

Duvar sınır koşulları, seçilen türbülans modeline göre farklı değerlendirilmektedir. Taşınımlı türbülans modellerinin şemalarının çözümünde (k-ε gibi) sınır tabakası içerisindeki hız dağılımını veren bir duvar fonksiyonundan yararlanılmaktadır. Programda kayma hızı (u_*)'ı çözmek için pürüzlü ve pürüzsüz bir duvar yüzeyi için genelleştirilmiş olan aşağıdaki logaritmik duvar fonksiyonu kullanılmaktadır [37].

$$u_0 = u_* \left[\frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{\rho u_* y_0}{\mu + \rho a u_* k_s} \right) + 5,5 \right] \quad (2.36)$$

burada κ Von Karman sabiti, a türbülans modeline bağlı olan bir sabiti (k-ε için bu değer 0,247), k_s kanal pürüzlülüğü, y_0 herhangi bir noktadaki (u_0) teğetsel hızının engelden olan uzaklığıdır. Denklem (2.36) da parantez içindeki ifadenin paydası, pürüzlü sınırın etkisinden dolayı oluşan etkili viskozitedir ($\mu_{eff} + \rho a u_* k_s$). Eğer hücre laminar alt tabakaysa ($R_* = \rho u_* y_0 / \mu \leq 5$), kayma hızının çözümü için (2.37) eşitliği kullanılır.

$$u_* = \sqrt{\frac{\mu u_0}{\rho y_0}} \quad (2.37)$$

Kayma hızı (u_*) için elde edilen çözüm, türbülans taşınım denklemlerinde (denklem (2.46)) sınır şartı olarak kullanılır. Pürüzlülük etkileri daha sonra toplam dinamik viskozite (μ_T) ve doğrudan duvar kayma gerilmesi ws_i , aracılığıyla çözüme dahil edilir.

$$ws_i = \sum_j \frac{2\rho |u_{*i}| u_{*i}}{\Delta x_j} \quad (2.38)$$

Laminer akımlar ve taşınımsız türbülans modelleri için duvar kayma gerilmesi (ws_i)

$$ws_i = \frac{(\mu + \rho a u_0 k_s) u_0}{y_0} \quad (2.39)$$

ifadesi ile verilmektedir. Hesaplanan duvar kayma gerilmesi (ws_i), daha sonra doğrudan denklem (2.34) aracılığıyla momentum denkleminin çözümüne dahil edilmektedir.

2.4.1. k-ε Türbülans Modeli

FLOW-3D mevcut birkaç farklı türbülans modeli içermektedir. Bunlar: bir denklemlilik türbülans enerji (k), iki denklemlilik (k - ϵ), “Renormalization Group” (RNG), “Large Eddy Simulation” (LES) ve Prandtl karışma boyu modelidir. Bu çalışmada, en yaygın şekilde tercih edilen ve en çok doğrulanmış olan k - ϵ türbülans modeli kullanılmıştır. Bu model özellikle yüksek Reynolds sayısına sahip akışlarda daha uygun sonuçlar vermektedir ve sınır tabakası dışında geçerlidir. 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 verecek türbülans viskozitesi

$$\mu_t = \frac{\rho C_\mu k^2}{\epsilon} \quad (2.40)$$

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

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (2.41)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (2.42)$$

Bu problemde kullanılan kapatma sayıları ve yardımcı ilişkiler aşağıda verilmiştir.

$$C_{\varepsilon 1} = 1,44 \quad C_{\varepsilon 2} = 1,92 \quad C_\mu = 0,09 \quad \sigma_\varepsilon = 1,3 \quad \sigma_k = 1$$

$$\omega = \frac{\varepsilon}{C_\mu k} \quad \text{ve} \quad \ell = \frac{C_\mu k^{3/2}}{\varepsilon} \quad (2.43)$$

burada Reynolds gerilme tansörü τ_{ij} ve ortalama gerilme oranı tansörü e_{ij} sırasıyla aşağıdaki gibidir.

$$\tau_{ij} = 2\nu_i e_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (2.44)$$

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.45)$$

denklem (2.46) da k ve ε için verilen sınır koşulları denklem (2.36) ve (2.37) de verilen logaritmik duvar fonksiyonları kullanılarak hesaplanmaktadır.

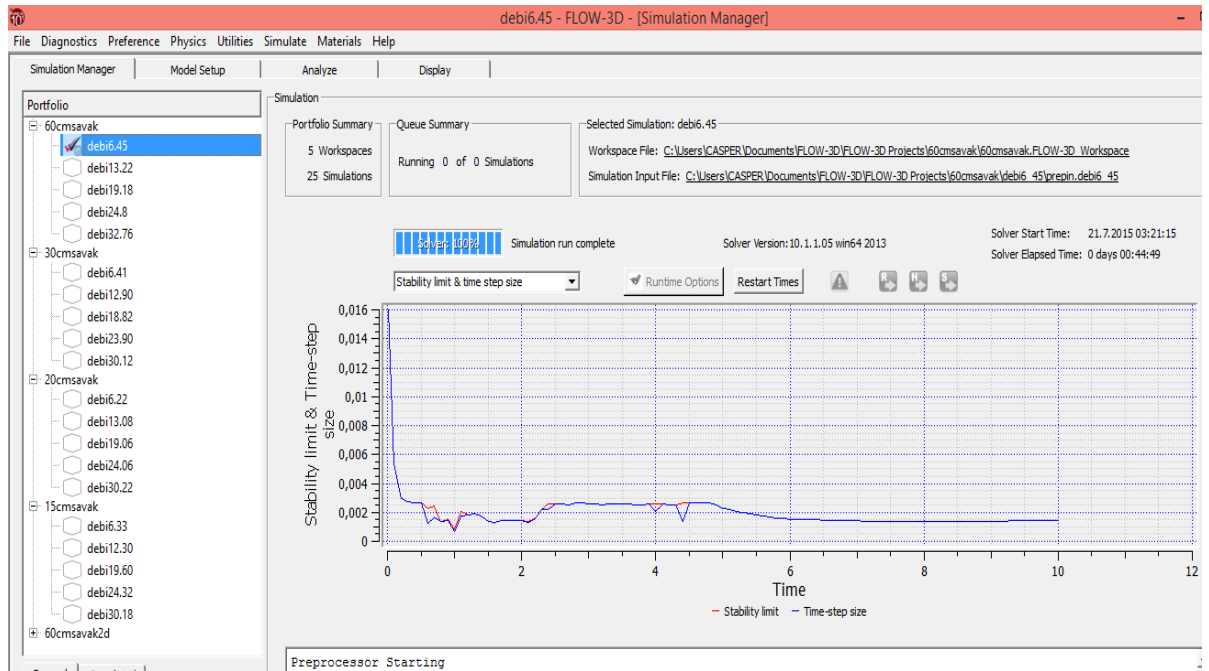
$$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad \varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa y_0} \quad (2.46)$$

2.5. Savak Akımının FLOW-3D ile Modellenmesi

Son yıllarda İnşaat Mühendisliği kapsamında yer alan birçok su yapısının tasarımının yapılmasında, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemlerine bağlantılı ticari yazılımların kullanılıyor olması önemli kolaylıklar sağlamıştır. Su yapı etkileşiminin fiziksel modeller ile laboratuvar ortamında test edilmesi, öngörülen performans ölçütlerinin sağlanıp sağlanmadığı hakkında önemli bilgilerin edinilmesine yardımcı olmaktadır. Sayısal modelleme ile akımın, kısa sürede ve ekonomik olarak çözülmesi ve tasarım işlemlerinin farklı koşullar için hızlı biçimde tekrarlanması mümkündür. Ancak

HAD modellerinden elde edilen verilerin ne kadar gerçekçi olduğu ve kullanılabilirliği konusunun yanında akım türüne en uygun türbülans modelinin seçimi de güncel tartışma konularından birini oluşturmaktadır. Bu bakımdan, sayısal bulguların deneylerle doğrulanmasına yönelik çalışmaların çoğaltılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği kapsamında Flotran, FLUENT, Cobalt, STAR CFD, FLOW-3D, gibi birçok ticari paket program geliştirilmiştir. Bu çalışmada temel denklemlerin sayısal çözümü için FLOW-3D kullanılmıştır.

FLOW 3D ile yapılacak çözümlerde gerekli olan katı cisim modellemek problemin başlangıç noktasıdır. Bu noktada ele alınacak modele göre ya programın kendi içinde bulunan elemanlar kullanılır ya da 3DS max, Solidworks, Rhinoceres, AutoCAD-3D gibi modelleme yapan programlar yardımı ile STL dosyası oluşturularak programa tanıtılır. Bu çalışmada savak geometrisi programın içinde bulunan elemanlar yardımıyla kullanılmaya hazır hale getirilmiştir FLOW-3D programı ile bir hidrolik modelin oluşturulmasında gerekli üç adım sırasıyla; geometrik veri girişi (model setup), akım verisi-sınır şartlarının girilmesi ve hidrolik hesaplama (analyze) şeklinde olmaktadır. Şekil 2.3 de programın ara yüzü verilmiştir.



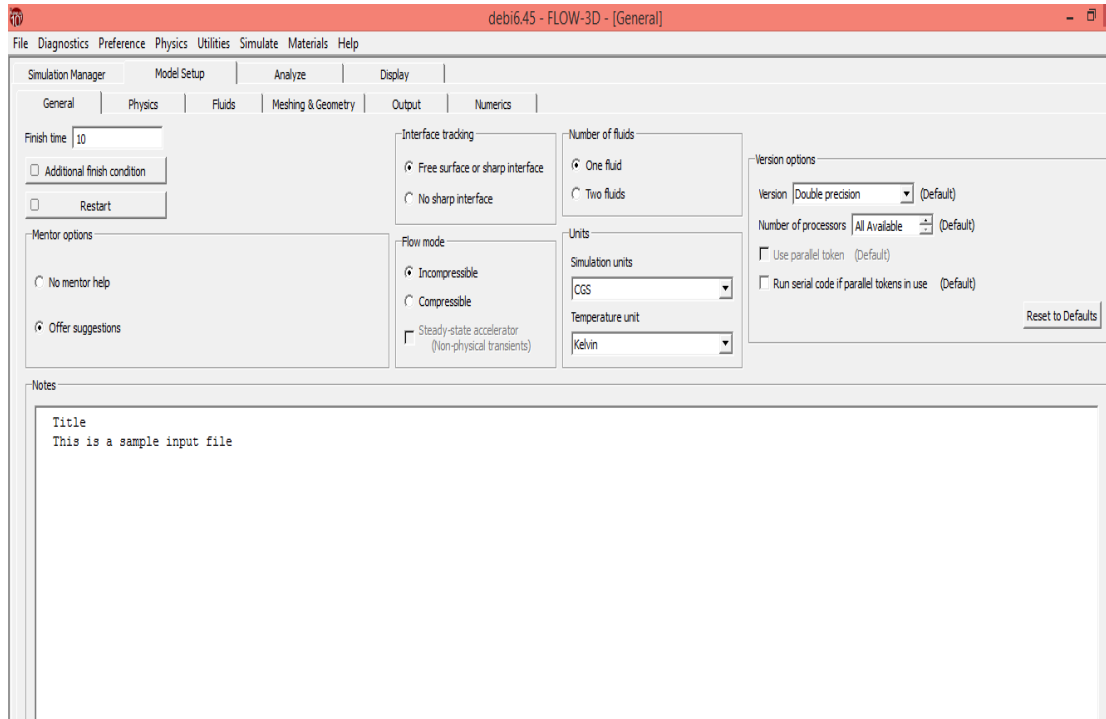
Şekil 2.3. FLOW-3D Program Ara Yüzü

Şekil 2.3 de görülen sekmeler sırası ile takip edilerek çözüm yapılır. Simulation manager sekmesi yeni çalışma alanı ve bu alanda çalışılacak yeni simülasyonu tanımlamak için kullanılan sekmedir. Yine bu sekmeden önce kaydedilmiş çalışmalar programa dahil edilebilir veya programın kendi içinde bulunan örnekler, üzerinde çalışmak için seçilebilir.

2.5.1. Model Setup

Model Setup simülasyon için gerekli tüm ayarların yapıldığı sekmedir. Sekme kendi içerisinde General, Physics, Fluids, Meshin&Geometry, Output ve Numerics olarak alt sekmelere ayrılmaktadır. Geometrik veri girişi ve sınır şartlarının tanımlanması bu bölümde yapılmaktadır.

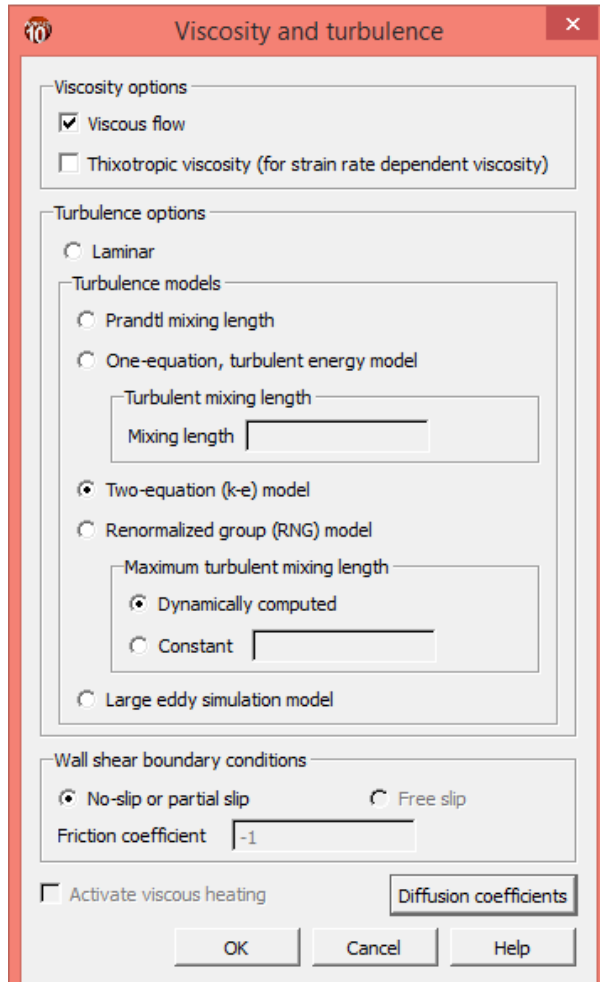
Problemimiz düzenli akım problemi olduğundan akım yaklaşık 5 saniye sonunda kararlı hale gelmektedir. Bu sebeple çözüm süresi (Finish Time) kısmına 10 saniye değeri girilmiştir (Şekil 2.4)



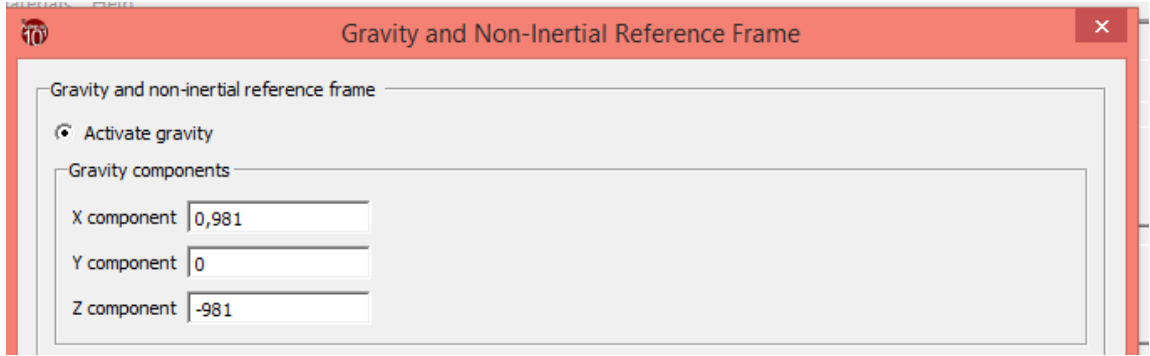
Şekil 2.4 FLOW-3D Model Setup General Sekmesi

Physics kısmında; yerçekimi ivmesi (gravity) girilmiş ve kullanılacak türbülans modeli (Viscosity and turbulence) seçilmiştir. Problem verilerini girerken ağ yapısının

oluşturulmasında kolaylık olması açısından CGS birim sistemi kullanılmıştır. Türbülans modeli iki denklemlili k-ε modeli seçilmiştir. Yine bu bölümde cidarda hız sıfır olduğundan kaymama sınır koşulu olarak ‘no-slip’ şartı seçilmiştir (Şekil 2.5). Kanalımız 0,001’lik bir eğime sahiptir. Ana kanala eğim verilmesi durumunda verilerin alınması daha zor olacağından, yerçekimi ivmesi yatay ve düşey bileşenlere ayrılarak eğim etkisi dikkate alınmıştır. 0,001’lik eğim durumunda $\alpha=0,0573^0$ ’lik bir açığa karşılık gelmektedir. Bu durumda yerçekimi ivmesinin düşey bileşeni $g_z=-981*\sin \alpha= -981 \text{ cm/sn}^2$ ve yatay bileşeni $g_x=981*\cos \alpha= 0,981 \text{ cm/sn}^2$ çıkmaktadır. Bu değerler gravitiy kısmında ilgili yerlere girilmiştir (Şekil 2.6).



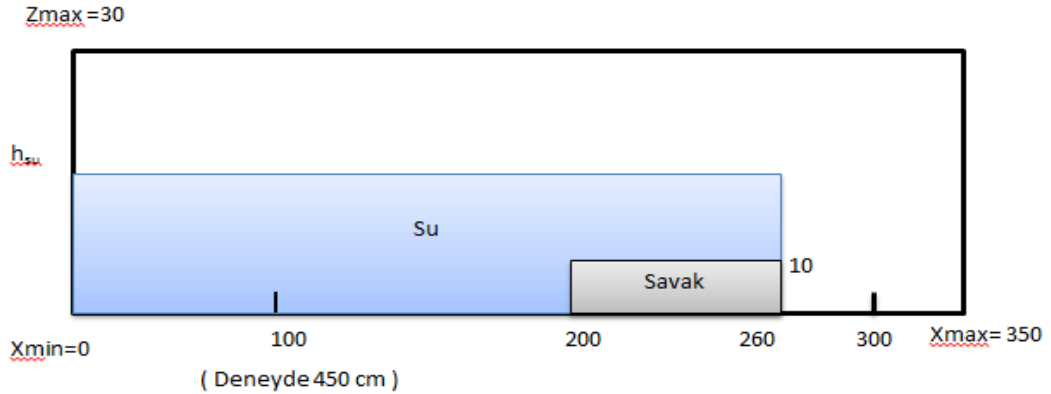
Şekil 2.5. Türbülans Modelinin Seçilmesi



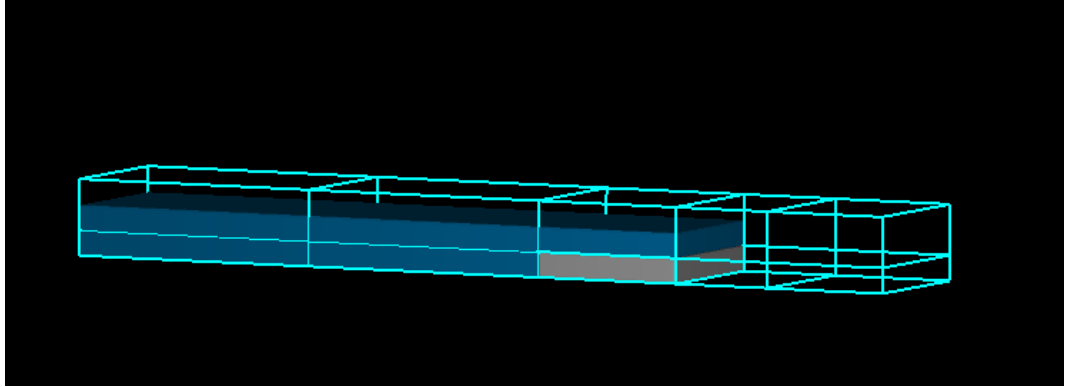
Şekil 2.6. Yerçekimi İvmesinin Kanal Eğimi Dikkate Alınarak Girilmesi

Materials sekmesinin Fluids Database kısmından akışkan tipi olarak su (Water at 293K) seçilmiştir. Bu seçim ile program yoğunluk, viskozite gibi özellikleri otomatik olarak atamaktadır.

Meshing&Geometry kısmında öncelikli olarak x, y ve z eksenlerinde mesh plane ile geometrik koordinatlar girilmiştir. Bu işlemin kolay yapılabilmesi açısından kanal geometrisi çizilerek belirlenmiştir (Şekil 2.7). Daha hızlı çözüm yapabilmek için deneyden elde edilen verilere göre su yüksekliği girilmiştir. Ayrıca yine çözüm süresini kısaltmak için savak üstünde savak uç noktasına kadar su ile dolu olduğu düşünülerek akışkan bölgesi tanımlanmıştır (Şekil 2.8).

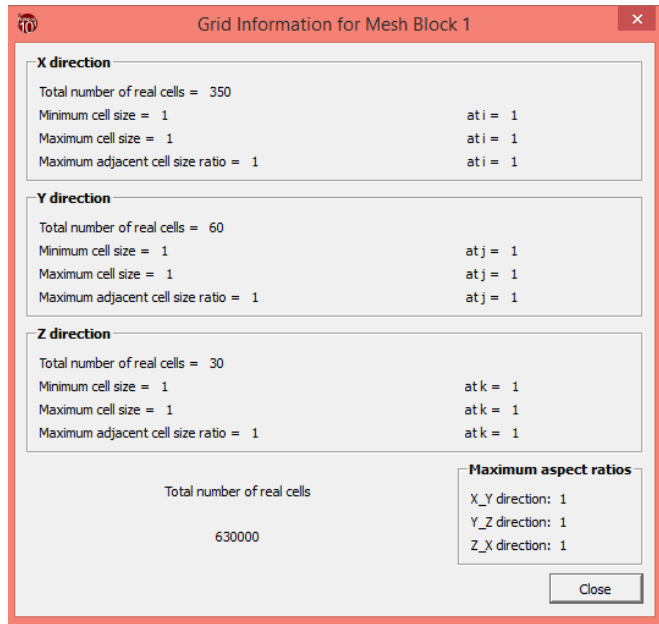


Şekil 2.7. 60 cm'lik Savak için Kanal Geometrisi ve Koordinatların Gösterimi



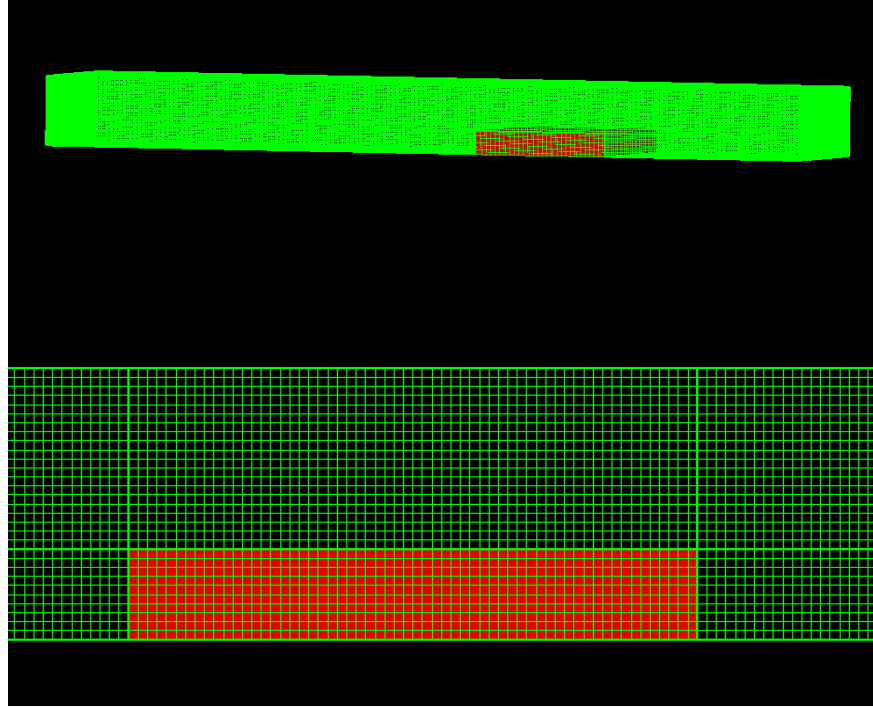
Şekil 2.8. 60 cm lik Savak için Kanal Geometrisi ve Çözüm Bölgesinin *FLOW-3D* Programında Görünümü

4 farklı savak geometrisinde 5 farklı debi durumunda toplamda 20 deney için modelleme yapılmıştır. Tüm modellemeler için hücre (mesh) aralığı 1 cm olarak belirlenmiştir. x doğrultusunda 350, y doğrultusunda 60, z doğrultusunda 30 parçaya ayrılan kanal geometrisinde toplamda 630000 hücre oluşturulmuştur (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Toplam Hücre Sayısının Gösterimi

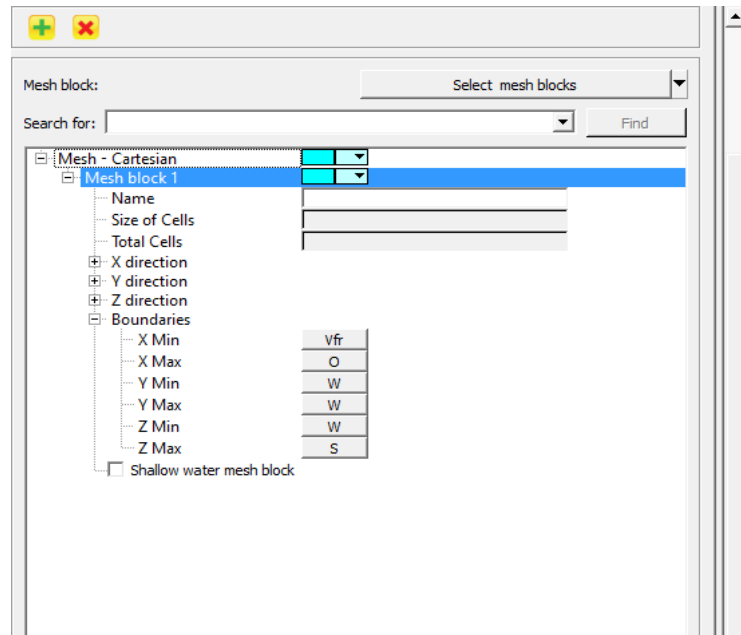
FLOW-3D dikdörtgen veya kare hücre (mesh) yapısı oluşturmaktadır. Farklı sıklıkta ağ yapısı oluşturmak mümkündür. Ancak modelimizde 1 cm lik oluşturulan ağ yapısı yeterli görüldüğünden farklı sıklıkta ağ kullanılmamıştır. Farklı sıklıkta ağ kullanımında dikkat edilmesi gereken nokta Şekil 2.9 da görülen Maximum aspect ratio kısmında oranların 3 ü geçmemesidir. Şekil 2.10 de oluşturulan geometride mesh yapısının görünümü verilmiştir.



Şekil 2.10. Mesh Yapısının Tüm Kanalda ve Savak Kesiti Üzerinde Gösterimi

2.5.2. Sınır Şartların Tanımlanması

Programa hesap debisinin girilmesi ve sınır şartının tanımlanması gerekmektedir. Mesh plane oluşturulan kısımda Boundaries kısmı bulunmaktadır. Gerekli şartların tanımlanması bu bölümde yapılmaktadır (Şekil 2.11).



Şekil 2.11. Sınır Şartların Tanımlanması İçin Gerekli Pencere

Sınır şartları olarak;

$X_{\min}$ Volume of Rate (debi)

$X_{\max}$ Out-Flow (Su çıkışı)

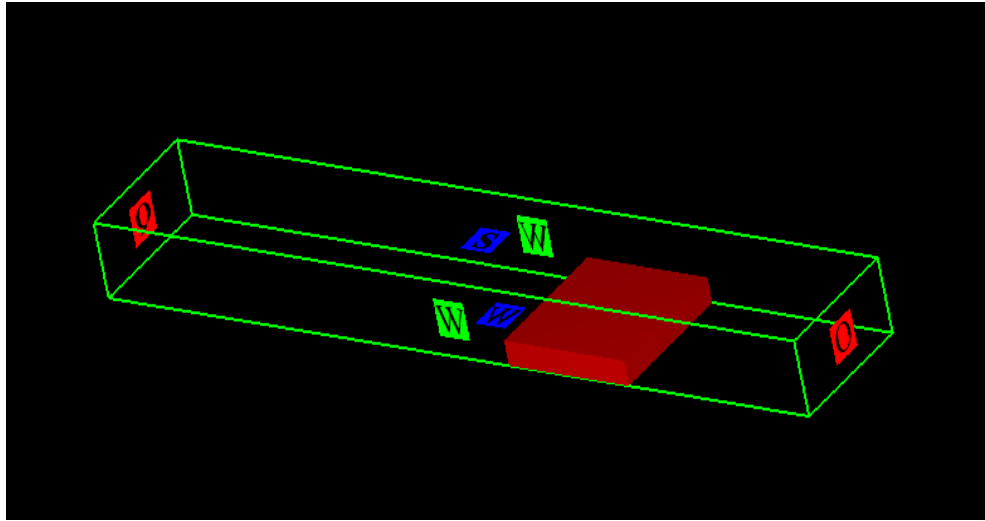
$Z_{\min}$ Wall (duvar)

$Z_{\max}$ Simetry

$Y_{\min}$ Wall

$Y_{\max}$ Wall şeklinde tanımlanmıştır. $Z_{\max}$ simetry seçildiğinde problemimiz

serbest yüzeyli akım olduğu için atmosfer basıncı etki etmektedir. 3 boyutlu çözüm yapılması durumunda debi cm^3/sn olarak girilmiştir. 2 boyutlu çözüm yapılırken debi kanal genişliğine bölünerek $\text{cm}^3/\text{sn}/\text{cm}$ olacak şekilde birim genişlikten geçen debi değeri girilmiştir. Debi girilirken aynı zamanda deneyden elde edilen verilere göre su yüksekliği de girilmiştir. Aksi durumda su tüm kesit boyunca akıyor gibi algılanarak yanlış bir çözüm yapılmaktadır. Kanal tabanı ve yan yüzleri cam olduğu için Wall tanımlanmıştır. Şekil 2.12’de sınır şartların girilmiş hali ile kanal kesiti verilmiştir.

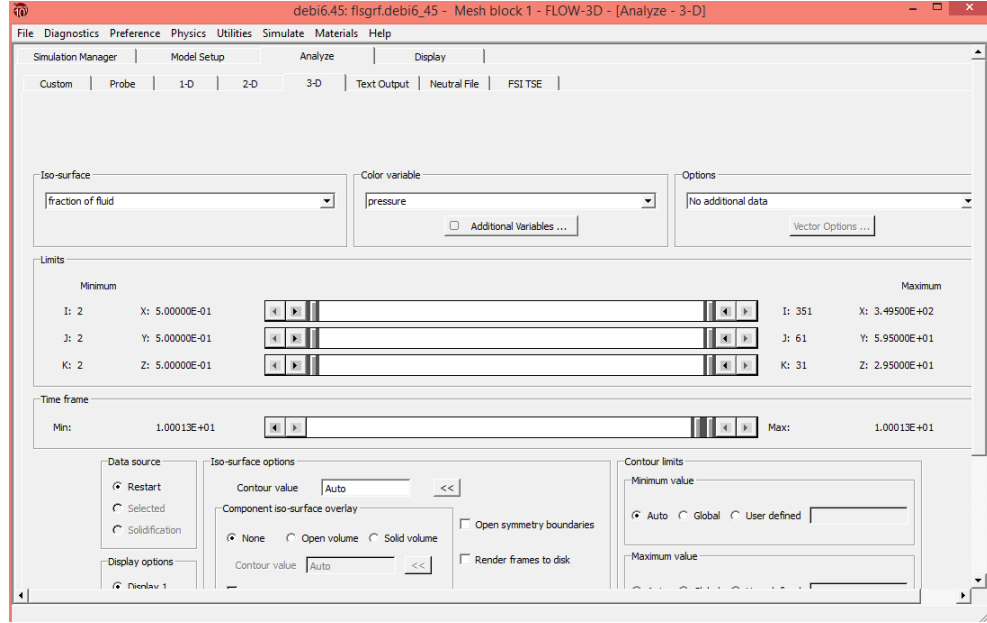


Şekil 2.12. Model Üzerinde Sınır Şartların Görünümü

Programda son olarak output sekmesinde ‘Hydraulic Data’ seçilir ve ‘Restart data interval’ kısmına 0,1 değeri girilir. Bu programın 10 saniyelik çözüm süresi boyunca 0,1 saniyede bir görüntü vereceği anlamına gelmektedir. Bu işlemlerden sonra ‘Run Simulation’ ile analiz başlatılır.

Analyze sekmesi simulate seçeneğinde seçtiğimiz run simulation işlemi bittiğinde çözüme ilişkin 1 boyutlu, 2 boyutlu, 3 boyutlu görsel ve grafiksel sonuçların ne şekilde

gösterileceğine karar verilen sekmedir. Burada yapılan tercihlerin ardından menüde render denilerek display ekranına geçilir (Şekil 2.13).



Şekil 2.13. Analyze Sekmesi Genel Görünümü

2.6. Deney Düzenegi

Deneyler Erciyes Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hidrolik Laboratuvarında bulunan 0,6x0,6x9,5 m boyutlarındaki açık kanal düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Taban ve yan duvarlar cam malzemeden yapılmıştır böylece deneysel ölçümler için pürüzsüz ve saydam bir yüzey elde edilmiştir. Suyun girişteki hazneden uniform olarak çıkmasını sağlamak için, suyun kanala giriş bölgesine akışı düzenlemek için delikli bir ızgara yerleştirilmiştir. Böylece kanal girişinde suyun mümkün olduğu kadar düzenli olarak girmesi sağlanmıştır. Kanal sonuna yerleştirilen depodan su pompa vasıtası ile 15 cm çapında çelik boru yardımıyla memba deposuna pompalanmaktadır, suyun devir daimi bu şekilde sağlanmaktadır. Akım memba ve mansap vanaları ile kontrol edilmekte ve kanalın sonunda akım serbest olarak depoya boşalmaktadır. Şekil 2.14’de kanalın genel görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.14. Deney Kanalının Görünümü

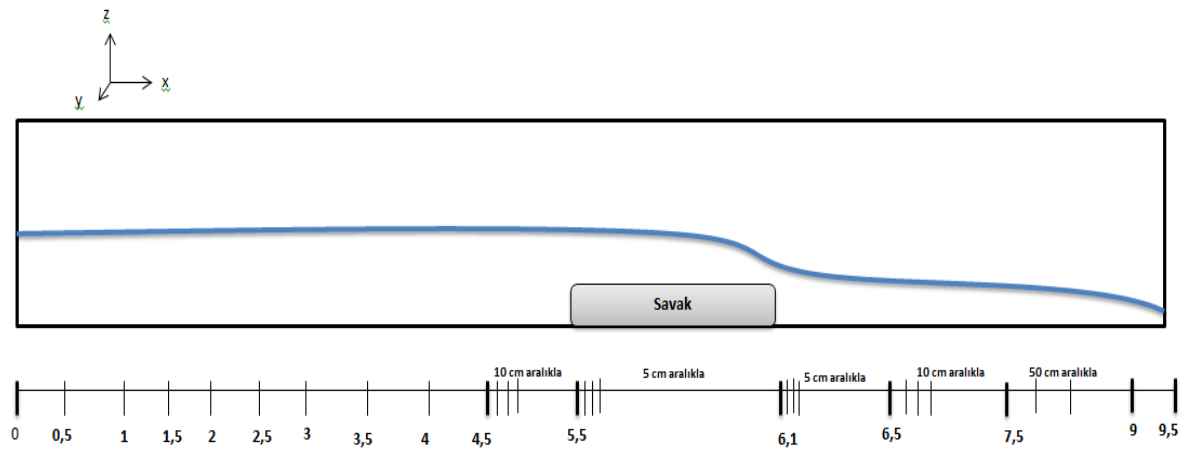
Deneyde $0,6 \times 0,6 \times 0,10$ m, $0,6 \times 0,3 \times 0,10$ m, $0,6 \times 0,2 \times 0,10$ m, $0,6 \times 0,15 \times 0,10$ m ölçülerine sahip 4 farklı Pilexiglassdan imal edilmiş savak kullanılmıştır (Şekil 2.15).



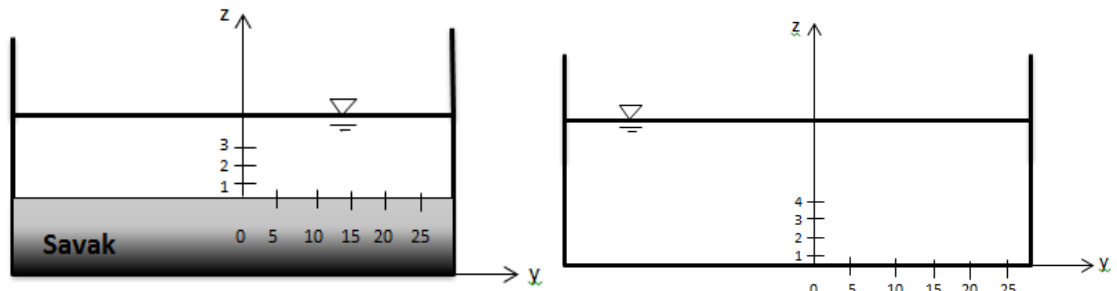
Şekil 2.15. Deneyde Kullanılan Savak Geometrileri

Savaklar kanal başından itibaren 5,5' inci metreye yerleştirilmiştir. Kanalın 4,5' inci metresinde yarı en kesit üzerinde düşeyde 6 farklı noktada derinlik boyunca hız ölçümü alınmıştır. Ayrıca savak orta noktasında da yarı en kesit üzerinde düşeyde 6 farklı noktada derinlik boyunca hız ölçümü alınmıştır. Her bir savak geometrisinde 5 farklı

debi için ölçüm yapılmıştır. Su yüzü ölçümü için başlangıçtan 4,5 inci metreye kadar 50 cm aralıklarla, 4,5-5,5 m aralığında 10 cm aralıklarla, 5,5-6,5 m aralığında 5 cm aralıklarla, 6,5-7,5 m aralığında 10 cm aralıklarla ve 7,5 m'den kanal sonuna kadar 50 cm aralıklarla ölçüm alınmıştır. Şekil 2.16'da savağın kanal içerisine yerleşimi ve ölçüm alınan noktalar ve Şekil 2.17'de hız ölçümü alınan en kesit şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.16. 60 cm'lik Savak Kesitinin Kanal İçerisinde Yerleşimi Ve Su Yüzü Ölçümü Alınan Noktalar



Şekil 2.17. Savak Üzerinde ve 4,5'inci Metrede En kesit Üzerinde Ölçüm Yapılan Noktalar

Kanalda düzenli akım pompa çıkışında ve kanal girişinde bulunan kelebek vanalar yardımı ile memba deposundaki su seviyesi sabit kalacak şekilde ayarlanmıştır. Kanaldaki akımın debisi kanala su veren sabit seviyeli haznenin girişindeki boruya yerleştirilen TEKSAN marka daldırma tip elektromanyetik debimetre ile ölçülmüştür (Şekil 2.18). Debimetre ölçüm sonuçlarını litre/saniye şeklinde vermektedir. Ölçüm boyunca debimetreden 5 okuma alınmış bu debilerin aritmetik ortalaması ölçüm debisi olarak kabul edilmiştir.



Şekil 2.18. Debimetre

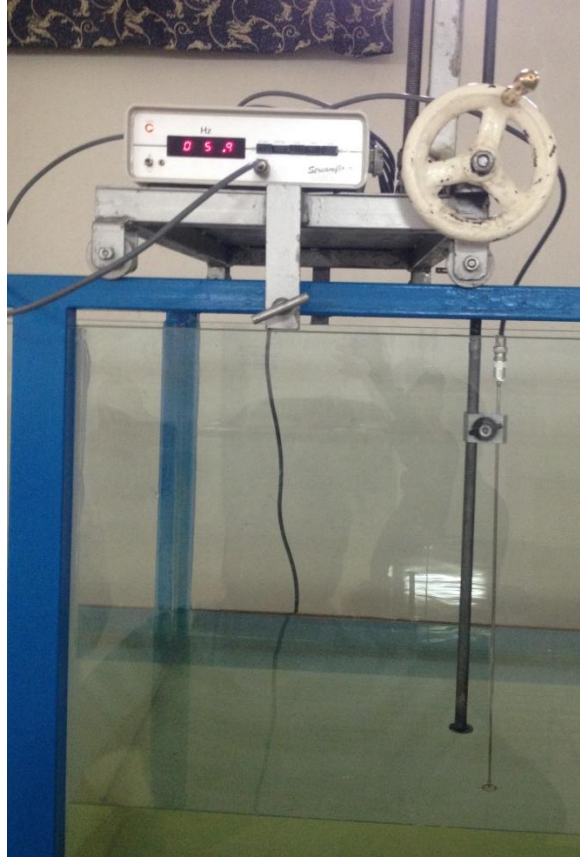
Akım hızları kanal üzerinde 3 doğrultuda hareket edebilen bir sehpa üzerine yerleştirilen Moline (Low Speed Propeller Probe) ile ölçülmüştür. Moline ile ölçülen değerler probun bağlı olduğu Nixon marka Streamflo Velocity Meter 400 ile okunmuştur. Probu suya daldırıldıktan sonra Streamflo üzerinde x10 sec tuşuna basılmıştır. Bu şekilde 10 saniye boyunca ölçüm alan alet 10 saniye sonunda ortalama bir değer vermektedir. Ölçüm alınırken sağlıklı sonuç elde etmek için her noktada 3 değer okunmuş bu değerlerin aritmetik ortalaması o noktadaki hız olarak kabul edilmiştir. Streamflo hızları Hz (hertz) cinsinden vermektedir. Bu değerler prob içerisinde bulunan dönüşüm grafiği kullanılarak $y = 0,7458x + 4,1093$ denklemi ile cm/sn'ye dönüştürülmüştür. Şekil 2.19'da Streamflo ve Şekil 2.20'de moline gösterilmiştir. Şekil 2.21'de ise Streamflo ve moline kullanılarak hız ölçümü yapılması gösterilmiştir.



Şekil 2.19. Streamflo Velocity Meter 400

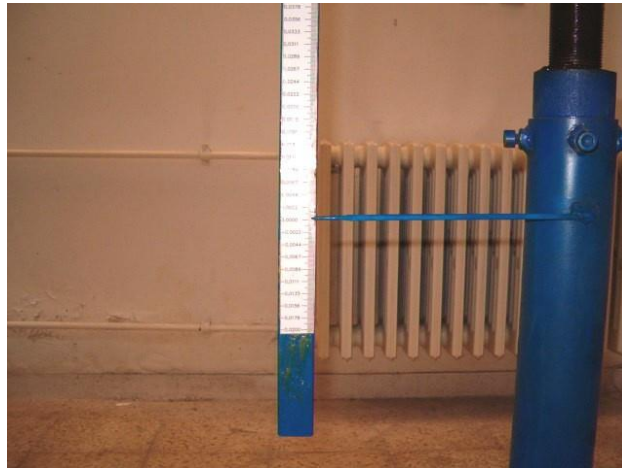


Şekil 2.20. Muline (Low Speed Propeller Probe)



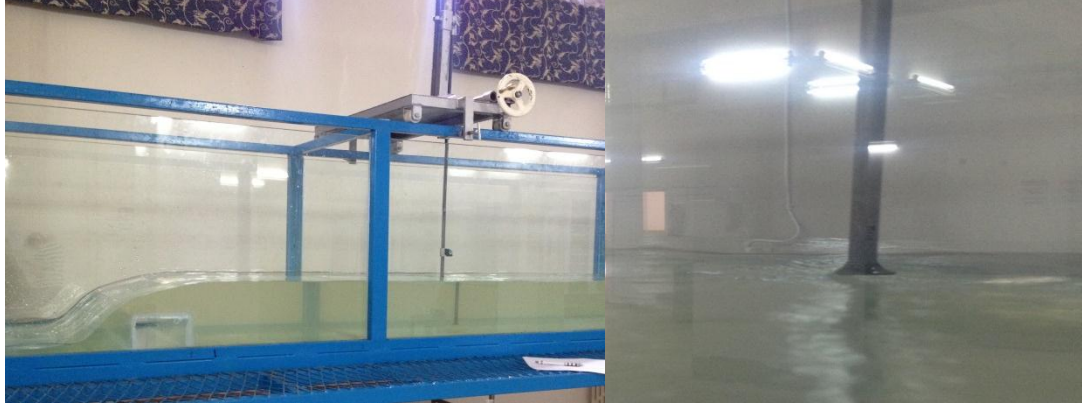
Şekil 2.21. Sehpaya Yerleştirilen Muline ve Streamflo Kullanılarak Hız Ölçümü Yapılması

Kanal taban eğimi elle ayarlanabilmektedir ve değişme aralığı $\pm 0,01$ 'dir. Deney boyunca taban eğiminde herhangi bir değişiklik yapılmamış olup tüm deneyler boyunca kanal eğimi 0,001 olarak ayarlanmıştır. Şekil 2.22'de eğim göstergesi verilmiştir.



Şekil 2.22. Eğim Göstergesi

Su yüzü ölçümleri 3 doğrultuda hareket edebilen bir sehpaye yerleştirilen ölçüm çubuğu ile gerçekleştirilmiştir. Kanal başlangıcında kanal tabanında ölçüm alınarak bu referans alınmış ve geri kalan noktalarda su yüzü ölçülerek aradaki farktan su yükseklikleri belirlenmiştir. Su yüzü ölçümleri akım kararlı hale geldikten sonra kanal orta noktasında gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.19’da su yüzü ölçümü gösterilmiştir.



Şekil 2.23. Su Yüzü Ölçümü Alınması

3. BÖLÜM

BULGULAR

3.1. Giriş

Ölçümler 0,6x0,6x0,10 m, 0,6x0,3x0,10 m, 0,6x0,2x0,10 m, 0,6x0,15x0,10 m ölçülerine sahip 4 farklı pilexiglassdan imal edilmiş savak üzerinde, her bir savakta 5 farklı debi için yapılmıştır. Böylece toplamda 20 adet deneysel veri elde edilmiştir. Her deneyde su yüzü ölçümü yapılmış, kanalın 4,5' inci metresinde ve savak orta noktasında yarı en kesit üzerinde düşeyde 6 farklı noktada derinlik boyunca hız ölçümü alınmıştır. Tablo 3.1'de savak geometrileri ve ölçüm yapılan debi değerleri verilmiştir.

Tablo 3.1. Savak Geometrileri ve Ölçülen Debi Değerleri

Savak Uzunluğu	1. Debi	2. Debi	3. Debi	4. Debi	5. Debi
60 cm	6,45 l/s	13,22 l/s	19,18 l/s	24,80 l/s	32,76 l/s
30 cm	6,41 l/s	12,90 l/s	18,82 l/s	23,90 l/s	30,12 l/s
20 cm	6,22 l/s	13,08 l/s	19,06 l/s	24,06 l/s	30,22 l/s
15 cm	6,33 l/s	12,30 l/s	19,60 l/s	24,32 l/s	30,18 l/s

1. bölümde geniş başlıklı savaklar için H (mamba tarafındaki toplam enerji yüksekliği) ve L (savak uzunluğu) oranının $0,07 \leq H/L \leq 0,5$ aralığında olması durumunun akım çizgilerinin düz ve paralel olması için tavsiye edildiğinden bahsedilmiştir. $H/L > 0,5$ olması durumunda savak üzerindeki akım çizgilerinde eğrilik oluşacağı ve hidrostatik basınç dağılımı gözleneceği yine aynı bölüm içerisinde ele alınmıştır. H toplam enerji yüksekliği h (savak üstü su yüksekliği) ve $V^2/2g$ hız yüksekliğinin toplamıdır. Tablo 3.2 de deney sonuçlarına ait H/L oranları verilmiştir.

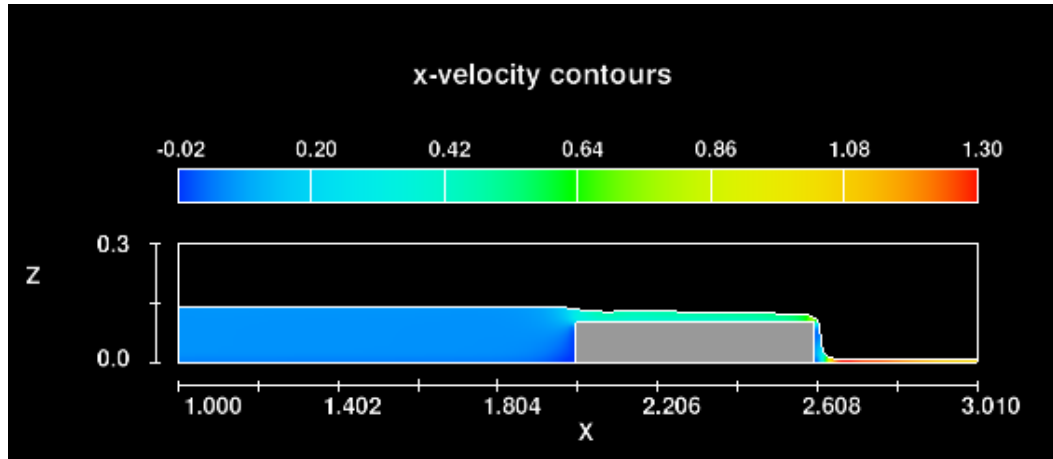
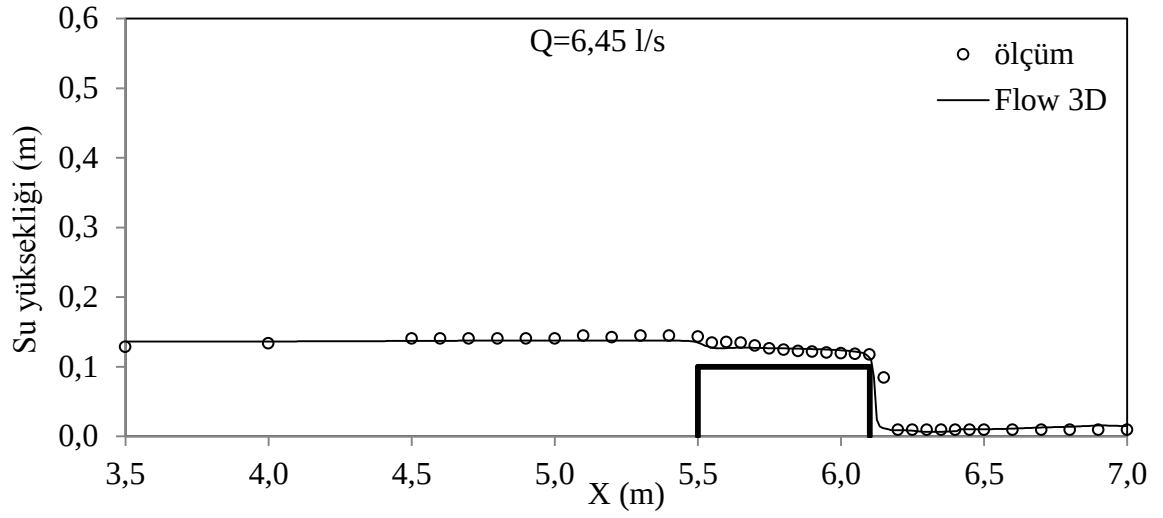
Tablo 3.2. Ölçüm Yapılan Savaklara Ait H/L Oranları

Savak Uzunluğu	Q (l/s)	h (m)	V (m/s)	$V^2/2g$ (m)	H (m)	L (m)	H/L (-)	
60 cm	6,450	0,040	0,104	0,053	0,093	0,600	0,155	$0,07 \leq H/L \leq 0,5$
	13,220	0,055	0,170	0,142	0,197	0,600	0,328	$0,07 \leq H/L \leq 0,5$
	19,180	0,072	0,217	0,231	0,303	0,600	0,505	$0,07 \leq H/L \leq 0,5$
	24,800	0,083	0,249	0,304	0,387	0,600	0,645	$H/L > 0,5$
	32,760	0,099	0,309	0,468	0,567	0,600	0,946	$H/L > 0,5$
30 cm	6,410	0,030	0,117	0,067	0,097	0,300	0,324	$0,07 \leq H/L \leq 0,5$
	12,900	0,049	0,189	0,175	0,224	0,300	0,747	$H/L > 0,5$
	18,820	0,063	0,215	0,227	0,290	0,300	0,966	$H/L > 0,5$
	23,900	0,075	0,242	0,287	0,362	0,300	1,208	$H/L > 0,5$
	30,120	0,089	0,287	0,404	0,493	0,300	1,643	$H/L > 0,5$
20 cm	6,220	0,015	0,146	0,105	0,120	0,200	0,598	$H/L > 0,5$
	13,080	0,049	0,177	0,154	0,203	0,200	1,013	$H/L > 0,5$
	19,060	0,065	0,224	0,246	0,311	0,200	1,556	$H/L > 0,5$
	24,060	0,073	0,239	0,280	0,353	0,200	1,766	$H/L > 0,5$
	30,220	0,082	0,285	0,398	0,480	0,200	2,402	$H/L > 0,5$
15 cm	6,330	0,028	0,128	0,080	0,108	0,150	0,722	$H/L > 0,5$
	12,300	0,046	0,146	0,105	0,151	0,150	1,004	$H/L > 0,5$
	19,600	0,061	0,161	0,127	0,188	0,150	1,254	$H/L > 0,5$
	24,320	0,073	0,173	0,147	0,220	0,150	1,465	$H/L > 0,5$
	30,180	0,081	0,181	0,161	0,242	0,150	1,611	$H/L > 0,5$

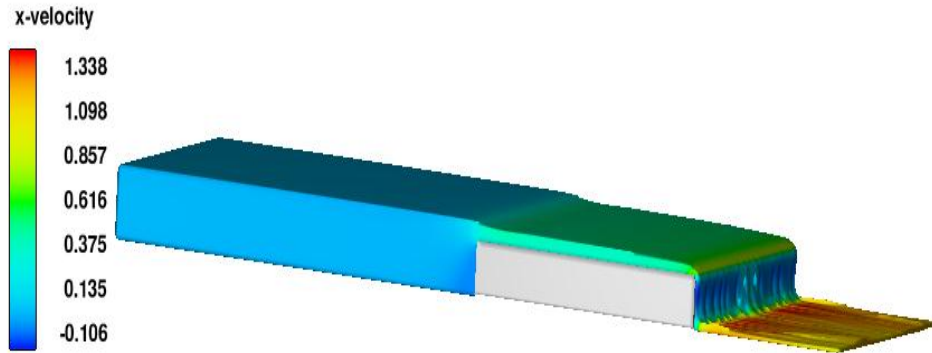
H/L oranları incelendiğinde 0,6 m ölçüsündeki savakta küçük debiler için oranın $0,07 \leq H/L \leq 0,5$ aralığında olduğu görülmektedir. 0,3 m ölçüsündeki savakta en küçük debi için oran $0,07 \leq H/L \leq 0,5$ aralığında kalmış diğer tüm ölçümlerde oran $H/L > 0,5$ olmuştur. Bu durumda kanalda kullanılacak savak ölçüsünün 0,6 m den büyük olması gerektiği anlaşılmaktadır.”

Deneysel verilerin sayısal olarak modellemesi FLOW-3D ile gerçekleştirilmiştir. Programa ait özellikler ve programa veri girişi önceki bölümlerde ele alınmıştır. Bu bölümde programdan elde edilen su yüzü profilleri ile deneysel olarak ölçülen su yüzü profilleri grafiksel olarak verilecektir. Sayısal modellemeler 3 boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Yalnız 0,6x0,6x0,10 m ölçülerindeki savak için ayrıca 2 boyutlu analiz yapılmış olup bu sonuçlar 3 boyutlu analiz ile karşılaştırılmış ve grafikler bu bölüm içerisinde verilmiştir. Ayrıca 0,6x0,6x0,10 m ölçülerindeki savakta 32,76 l/s’lik debi için hız okumaları ve elde edilen hız profilleri bu bölüm içerisinde gösterilmiştir.

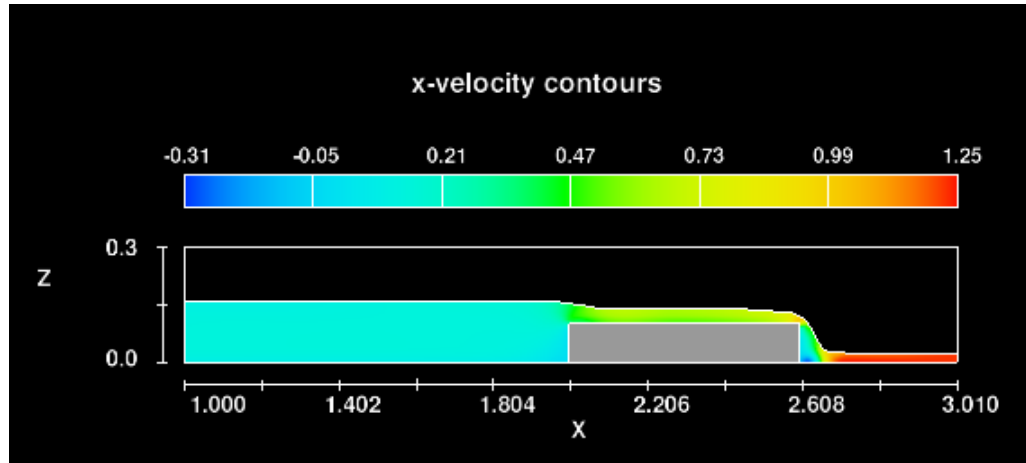
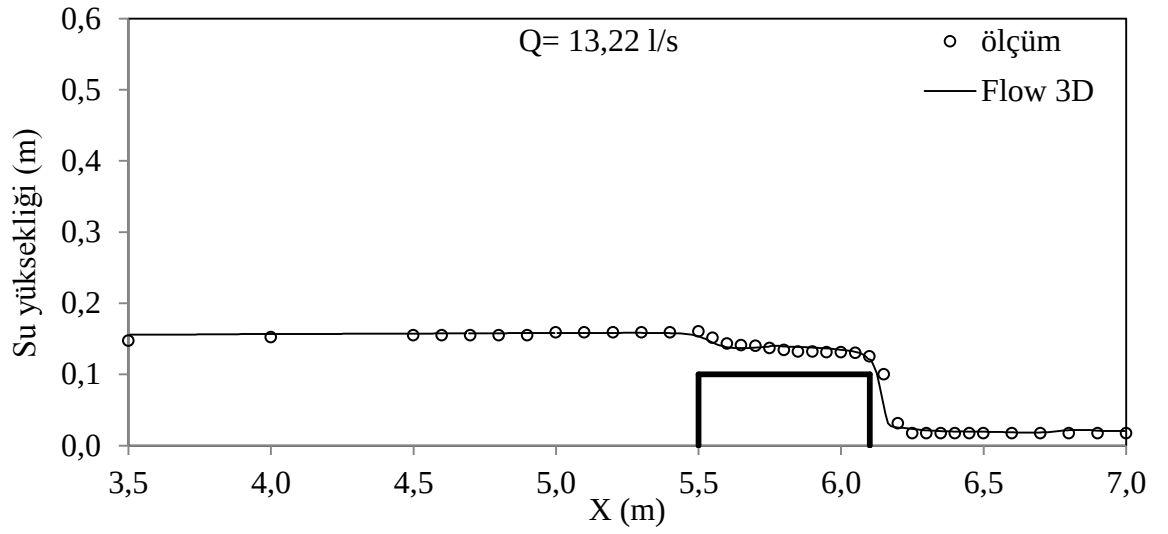
3.2. 0,6x0,6x0,1 m Ölçülerindeki Savakta Su Yüzü Profilleri ve Hız Dağılımları



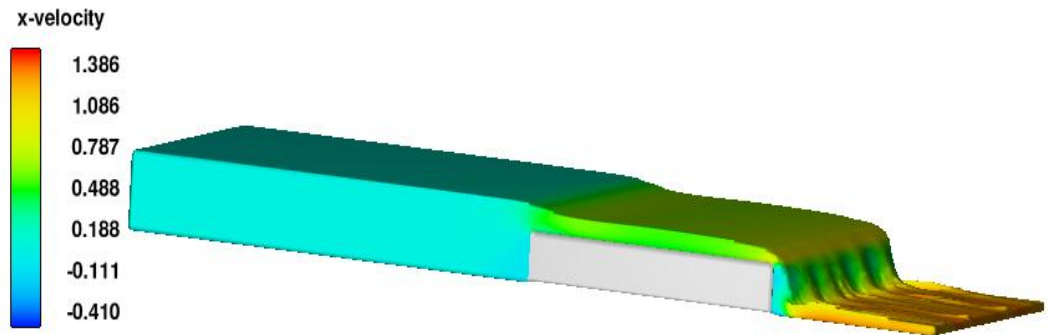
Time Frame: 10.00133



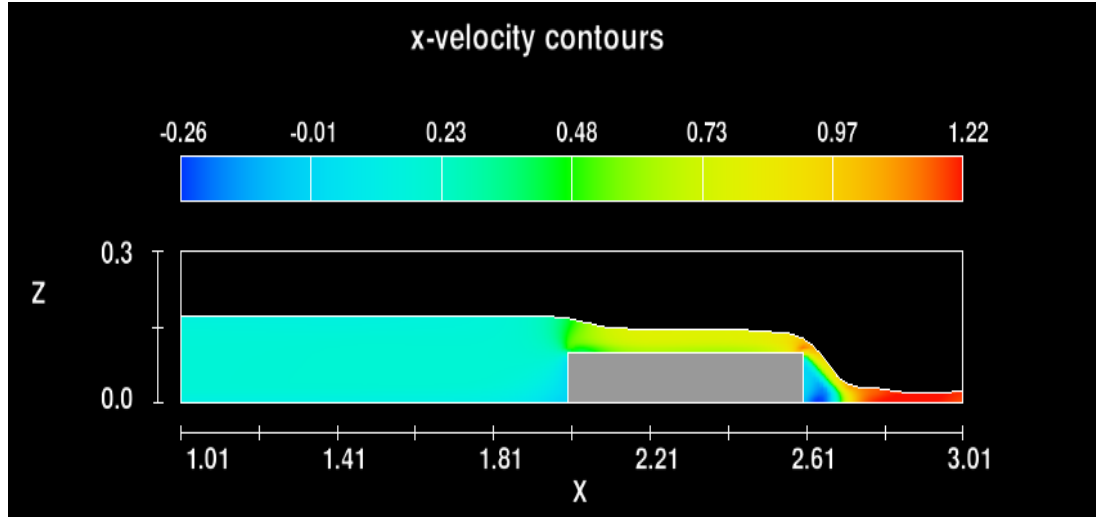
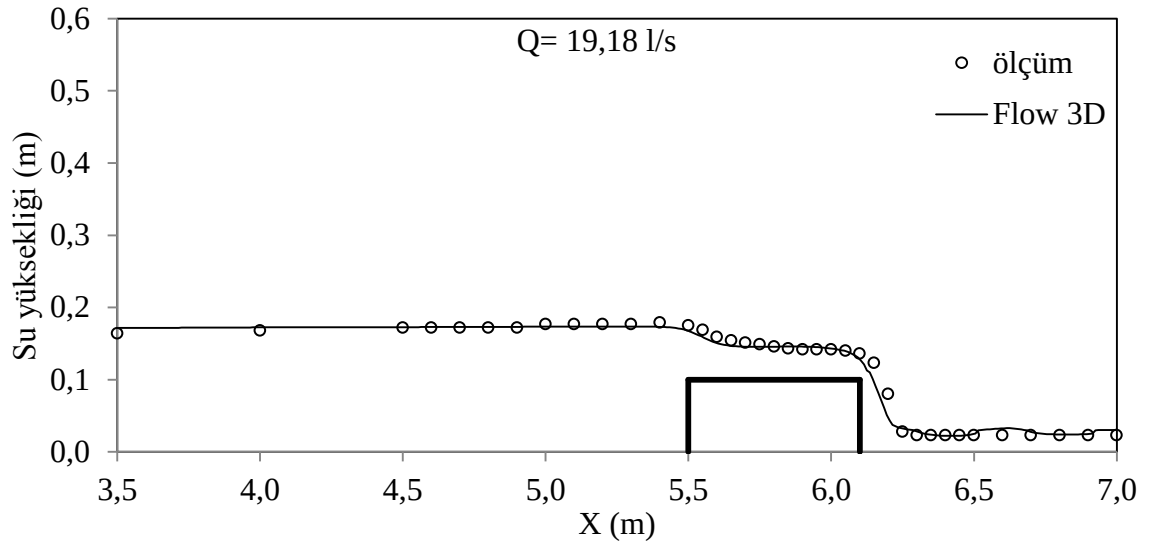
Şekil 3.1. Q=6,45 l/s için Su Yüzü Profillerinin DeneySEL ve Sayısal Karşılaştırılması ve Hız Dağılımlarının 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Gösterimi



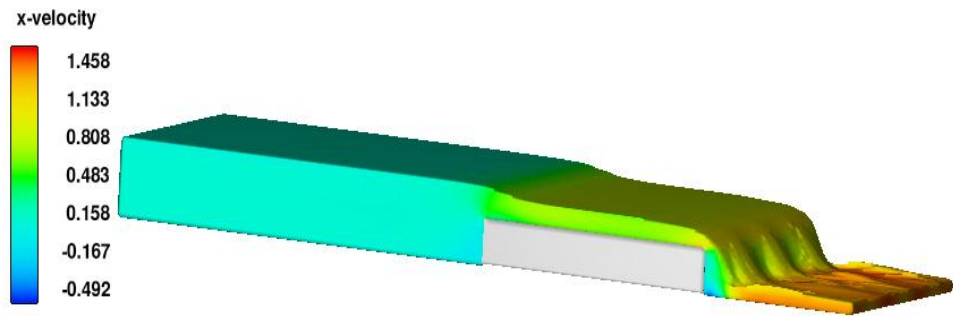
Time Frame: 10.00111



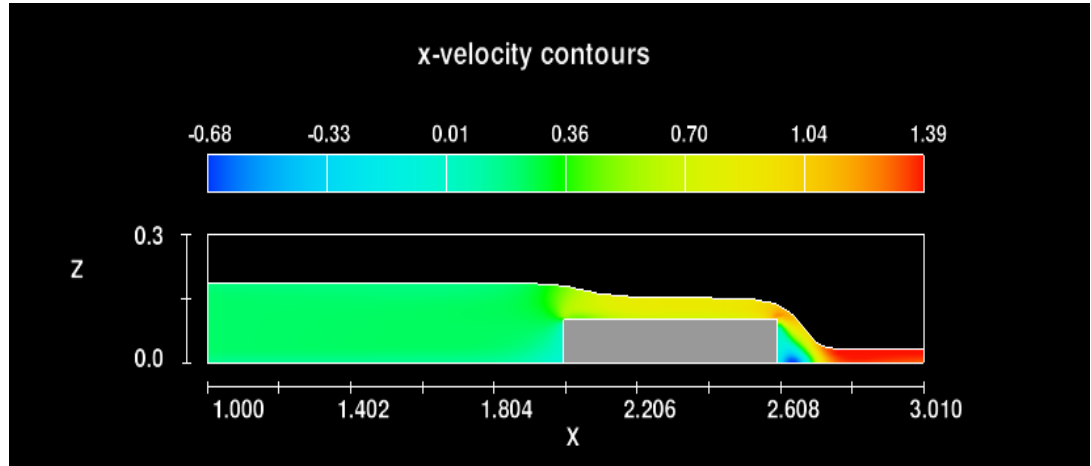
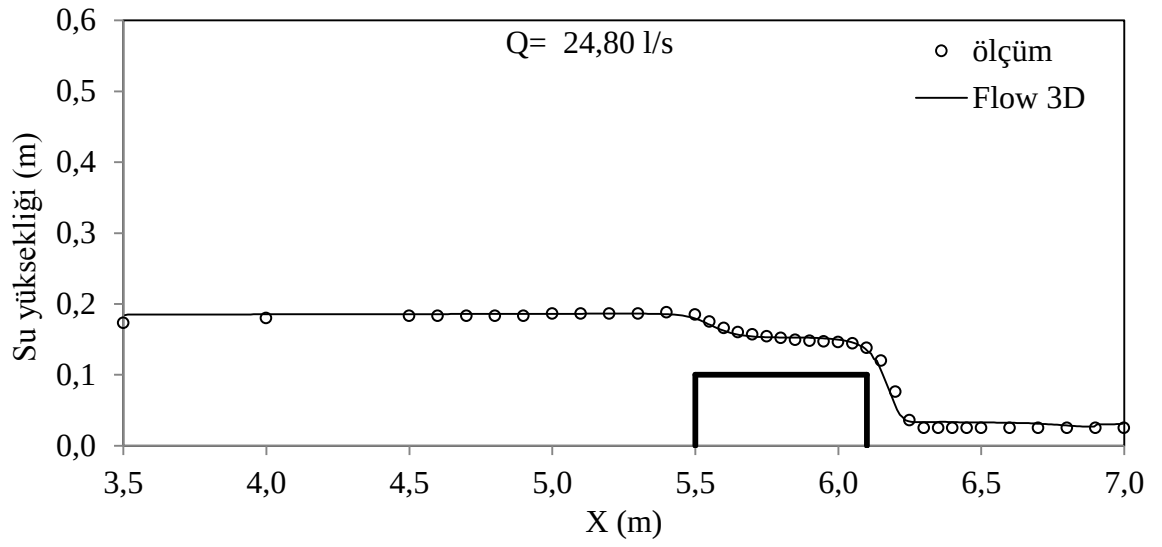
Şekil 3.2. Q=13,22 l/s için Su Yüzü Profillerinin Deneysel ve Sayısal Karşılaştırılması ve Hız Dağılımlarının 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Gösterimi



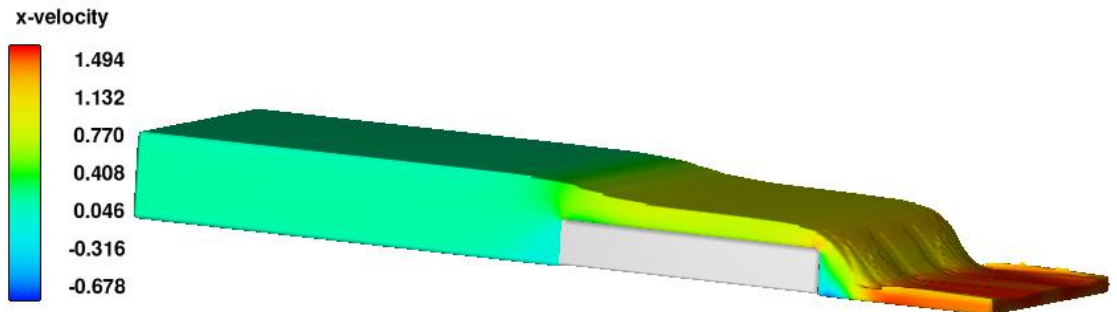
Time Frame: 10.00159



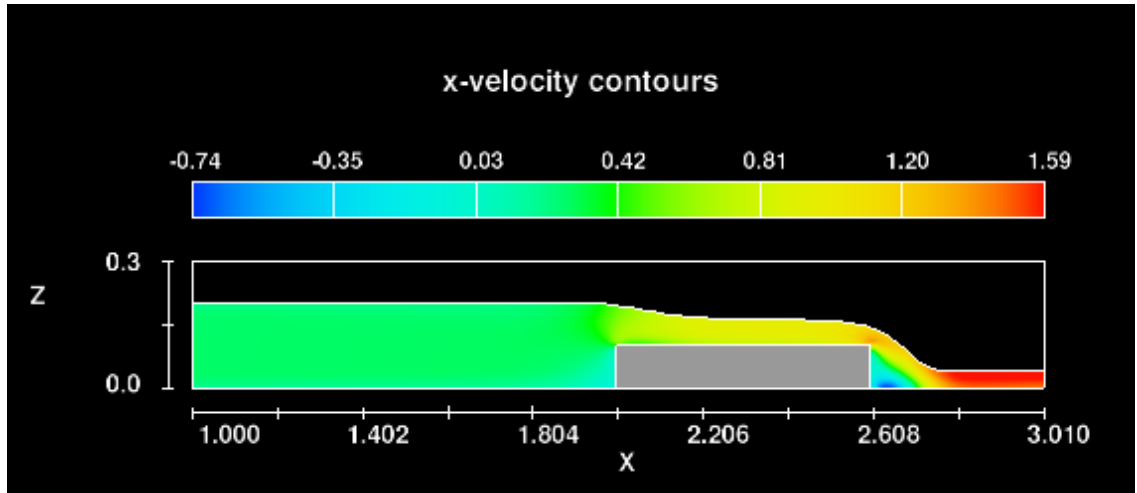
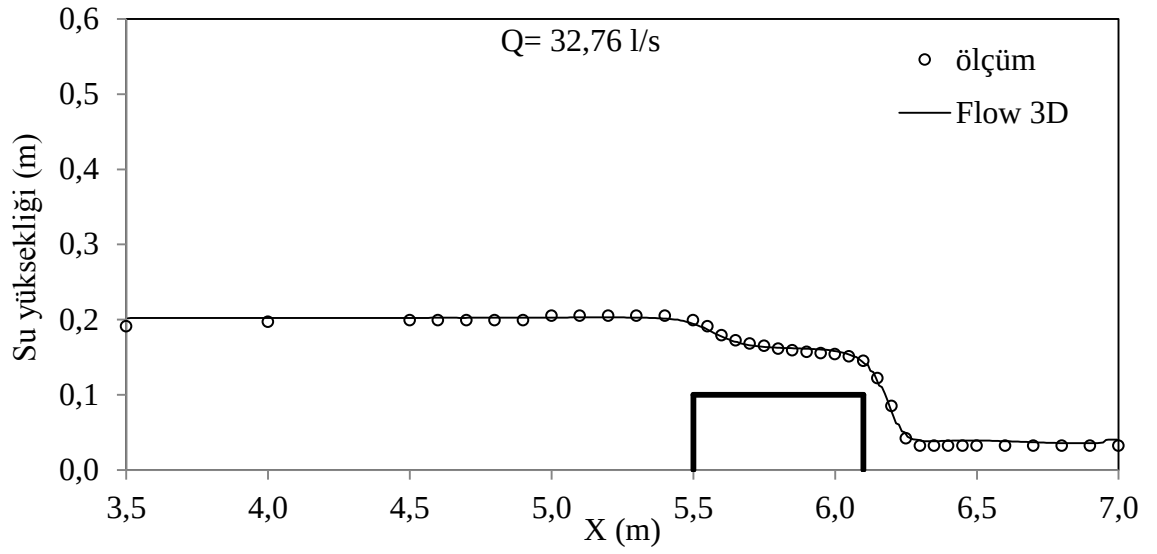
Şekil 3.3. $Q=19,18$ l/s için Su Yüzü Profillerinin Deneysel ve Sayısal Karşılaştırılması ve Hız Dağılımlarının 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Gösterimi



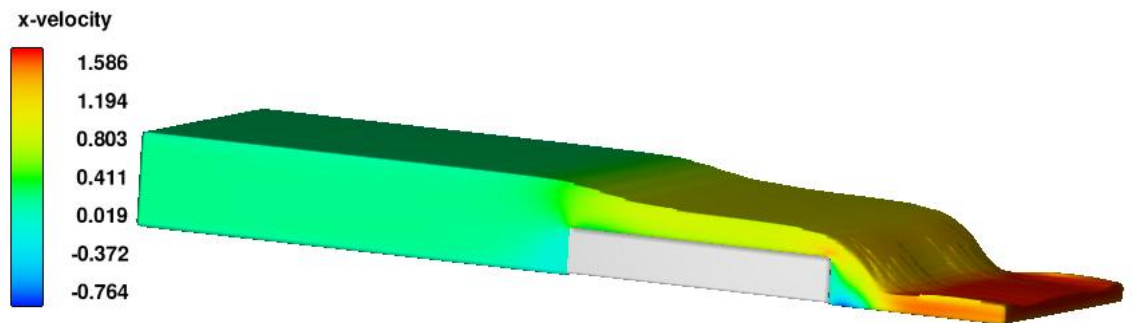
Time Frame: 10.00086



Şekil 3.4. Q=24,80 l/s için Su Yüzü Profillerinin Deneysel ve Sayısal Karşılaştırılması ve Hız Dağılımlarının 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Gösterimi



Time Frame: 10.00227



Şekil 3.5. Q=32,76 l/s için Su Yüzü Profillerinin Deneysel ve Sayısal Karşılaştırılması ve Hız Dağılımlarının 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Gösterimi

Şekil 3.1 ile başlayıp Şekil 3.5 ile biten şekillerde 0,6 m uzunluğundaki savakta 5 debi durumu için su yüzü ölçümleri ile sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırılması ve hız dağılımlarının 2 boyutlu ve 3 boyutlu görünümü bulunmaktadır. Aşağıda Tablo 3.3’de deneysel veriler ile FLOW-3D analiz sonuçlarına göre su yüzü profilinin yükseklik değerleri verilmiştir.

Grafik üzerindeki uyumlu görünen su yüzü profili karşılaştırmasını fark olarak da belirlemek amacıyla denklem (3.1) kullanılarak farklar hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 3.4’de verilmiştir.

$$\varepsilon (\%) = \left| \frac{H_{ölçüm} - H_{FLOW-3D}}{H_{ölçüm}} \right| * 100 \quad (3.1)$$

Burada $H=h+P$ dir. Tablo 3.4 incelendiğinde savak membaında ve savak üstünde farkların %5’den küçük değerler aldığı, savak mansabında ise farkların arttığı görülmektedir. Savak sonunda serbest düşme ve karmaşık akım yapısı nedeniyle deneysel ölçümler hesap sonuçlarından bir miktar farklı olmaktadır. Bu bölümdeki ölçüm ve hesap değerlerine ait ortalama farklarda %17.0-%34.7 arasında değişmektedir. Kanal boyunca su yüzü profillerine ait bu farkların ortalama değerleri de %7.0-%14 arasında değişmektedir. Tüm debiler için farkların ortalamaları incelendiğinde savak öncesi %2, savak üstü %2,6, savak sonu %22,4 ve akımlara ait ortalama hata da %9,2 olarak belirlenmiştir.

Tablo 3.3. 0,6 m Uzunluğundaki Savakta Su Yüzü Ölçümlerinin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçları

Q= 6,45 l/s			Q=13,22 l/s		Q=19,18 l/s		Q=24,80 l/s		Q=32,76 l/s	
x(m)	H _{ölçüm}	H _{Flow3D}	H _{ölçüm}	H _{Flow3D}	H _{ölçüm}	H _{Flow3D}	H _{ölçüm}	H _{Flow3D}	H _{ölçüm}	H _{Flow3D}
3,50	0,128	0,136	0,147	0,156	0,164	0,172	0,173	0,184	0,191	0,202
4,00	0,133	0,136	0,152	0,157	0,168	0,172	0,180	0,185	0,197	0,202
4,50	0,140	0,137	0,155	0,157	0,172	0,173	0,183	0,186	0,199	0,202
4,60	0,140	0,137	0,155	0,158	0,172	0,173	0,183	0,186	0,199	0,203
4,70	0,140	0,137	0,155	0,158	0,172	0,173	0,183	0,186	0,199	0,202
4,80	0,140	0,138	0,155	0,158	0,172	0,173	0,183	0,186	0,199	0,203
4,90	0,140	0,138	0,155	0,158	0,172	0,173	0,183	0,186	0,199	0,203
5,00	0,140	0,138	0,159	0,158	0,177	0,173	0,186	0,186	0,205	0,203

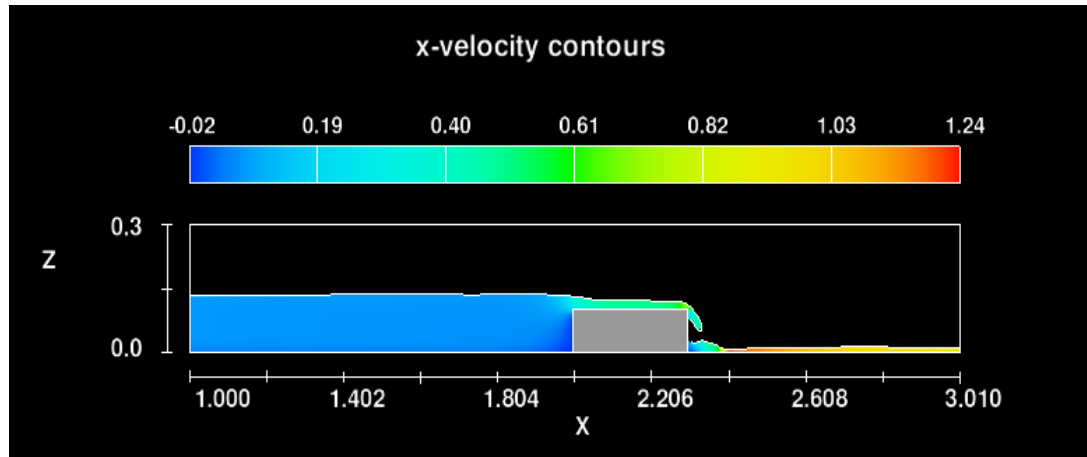
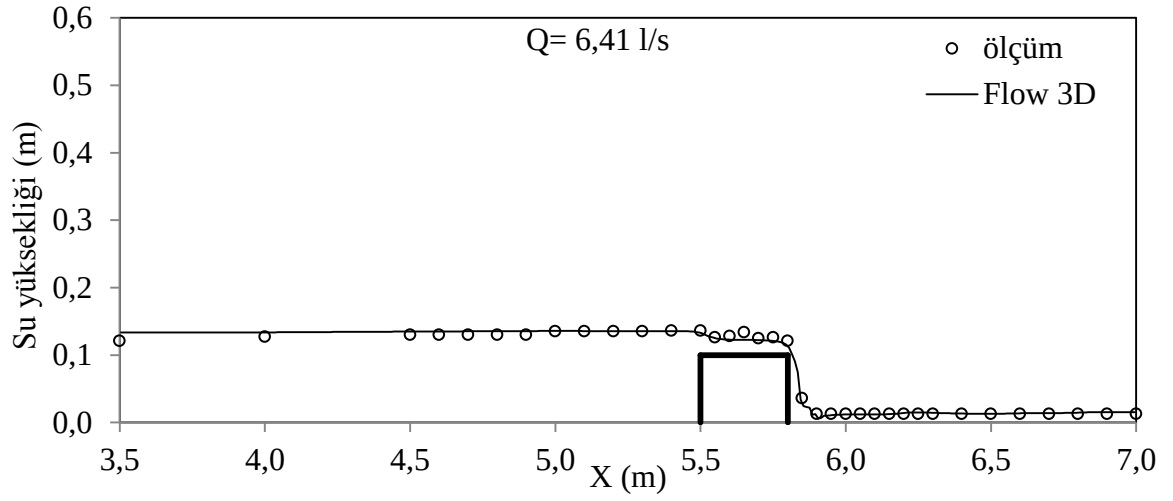
Tablo 3.3'ün devamı

Q= 6,45 l/s			Q=13,22 l/s		Q=19,18 l/s		Q=24,80 l/s		Q=32,76 l/s	
x(m)	H _{ölçüm}	H _{Flow3D}	H _{ölçüm}	H _{Flow3D}	H _{ölçüm}	H _{Flow3D}	H _{ölçüm}	H _{Flow3D}	H _{ölçüm}	H _{Flow3D}
5,10	0,144	0,138	0,159	0,158	0,177	0,174	0,186	0,186	0,205	0,203
5,20	0,142	0,138	0,159	0,158	0,177	0,174	0,186	0,186	0,205	0,203
5,30	0,144	0,138	0,159	0,158	0,177	0,174	0,186	0,186	0,205	0,203
5,40	0,144	0,138	0,159	0,158	0,179	0,173	0,188	0,186	0,205	0,202
5,50	0,143	0,135	0,160	0,154	0,175	0,168	0,185	0,180	0,199	0,195
5,55	0,134	0,128	0,151	0,146	0,169	0,160	0,175	0,172	0,191	0,188
5,60	0,135	0,127	0,143	0,139	0,159	0,152	0,166	0,163	0,179	0,178
5,65	0,134	0,127	0,141	0,137	0,154	0,147	0,160	0,157	0,172	0,171
5,70	0,130	0,127	0,140	0,138	0,151	0,146	0,157	0,154	0,168	0,166
5,75	0,126	0,127	0,137	0,139	0,149	0,145	0,154	0,153	0,165	0,164
5,80	0,124	0,126	0,134	0,139	0,146	0,146	0,152	0,153	0,161	0,163
5,85	0,122	0,126	0,132	0,139	0,143	0,146	0,149	0,153	0,159	0,162
5,90	0,121	0,125	0,132	0,138	0,142	0,146	0,148	0,152	0,157	0,161
5,95	0,120	0,125	0,131	0,137	0,142	0,145	0,147	0,152	0,155	0,160
6,00	0,119	0,124	0,131	0,135	0,142	0,143	0,146	0,150	0,154	0,159
6,05	0,118	0,122	0,130	0,132	0,140	0,140	0,144	0,146	0,151	0,154
6,10	0,117	0,115	0,125	0,122	0,136	0,130	0,138	0,137	0,145	0,144
6,15	0,084	0,012	0,100	0,064	0,123	0,101	0,120	0,111	0,122	0,122
6,20	0,009	0,009	0,031	0,026	0,080	0,051	0,076	0,061	0,085	0,082
6,25	0,009	0,008	0,017	0,024	0,028	0,033	0,036	0,035	0,042	0,050
6,30	0,009	0,006	0,017	0,022	0,023	0,029	0,025	0,033	0,032	0,040
6,35	0,009	0,007	0,017	0,020	0,023	0,024	0,025	0,034	0,032	0,038
6,40	0,009	0,007	0,017	0,020	0,023	0,022	0,025	0,033	0,032	0,039
6,45	0,009	0,010	0,017	0,020	0,023	0,022	0,025	0,033	0,032	0,039
6,50	0,009	0,010	0,017	0,019	0,023	0,024	0,025	0,033	0,032	0,039
6,60	0,009	0,011	0,017	0,019	0,023	0,032	0,025	0,032	0,032	0,038
6,70	0,009	0,013	0,017	0,018	0,023	0,028	0,025	0,031	0,032	0,037
6,80	0,009	0,014	0,017	0,022	0,023	0,024	0,025	0,029	0,032	0,036
6,90	0,009	0,015	0,017	0,021	0,023	0,025	0,025	0,027	0,032	0,036
7,00	0,009	0,015	0,017	0,021	0,023	0,031	0,025	0,031	0,032	0,041

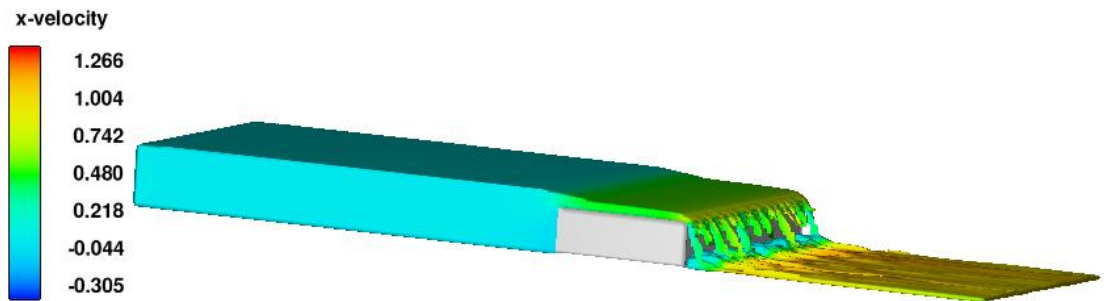
Tablo 3.4. 0,6 m Uzunluğundaki Savakta Ölçüm ve Sayısal Analiz Su Yüzü Değerlerin Farkları

x(m)	ε (%)				
	Q= 6,45 l/s	Q=13,22 l/s	Q=19,18 l/s	Q=24,80 l/	Q=32,76 l/s
3,50	6,4	6,0	4,8	6,4	5,7
4,00	2,5	3,1	2,6	3,0	2,7
4,50	2,1	1,5	0,5	1,4	1,7
4,60	2,0	1,6	0,5	1,5	1,8
4,70	1,9	1,8	0,5	1,5	1,7
4,80	1,8	1,9	0,6	1,5	1,8
4,90	1,7	2,0	0,7	1,5	1,8
5,00	1,6	0,5	2,0	0,0	1,1
5,10	4,4	0,5	1,9	0,1	1,0
5,20	3,1	0,5	1,9	0,2	1,0
5,30	4,5	0,4	1,9	0,2	1,1
5,40	4,5	0,6	3,2	1,3	1,7
5,50	5,6	3,8	3,9	2,7	2,0
5,55	4,5	3,6	5,3	1,9	1,8
5,60	6,3	3,1	4,7	1,9	0,4
5,65	4,9	2,9	4,5	1,9	0,7
5,70	2,2	1,7	3,6	1,7	1,1
5,75	0,5	1,5	2,4	0,6	0,7
5,80	1,9	3,8	0,3	0,5	1,0
5,85	3,2	5,1	2,0	2,4	1,9
5,90	3,7	4,5	2,7	2,9	2,8
5,95	4,0	4,3	2,2	3,1	3,5
6,00	4,0	3,0	1,0	2,8	2,9
6,05	3,3	1,5	0,1	1,5	2,1
6,10	1,6	2,5	4,1	0,8	0,5
6,15	85,5	36,3	17,8	7,8	0,1
6,20	3,4	17,4	36,1	19,8	3,4
6,25	9,5	39,2	17,3	3,2	19,7
6,30	29,2	26,7	25,6	32,8	25,2
6,35	27,5	19,5	4,3	34,0	19,6
6,40	19,8	15,2	2,8	33,6	21,2
6,45	13,9	15,1	2,9	31,3	22,5
6,50	14,7	14,4	6,2	31,3	22,7
6,60	22,1	9,5	41,2	29,1	19,8
6,70	39,9	7,8	21,6	24,9	15,4
6,80	52,7	26,7	5,1	14,3	11,8
6,90	71,5	23,8	7,5	7,5	11,3
7,00	62,1	21,5	32,7	23,3	26,9
Ortalama					
Savak Önü	3,0	1,7	1,8	1,6	1,9
Savak Üstü	3,5	3,2	2,8	1,9	1,6
Savak Sonu	34,7	21,0	17,0	22,5	16,9
Gen. Ort.	14,0	8,8	7,3	8,9	7,0
Gen. Ort.					

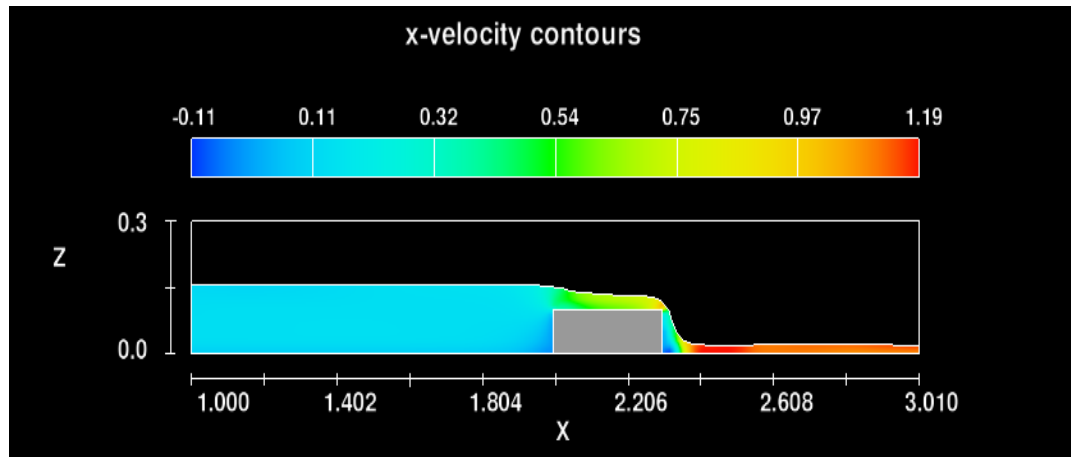
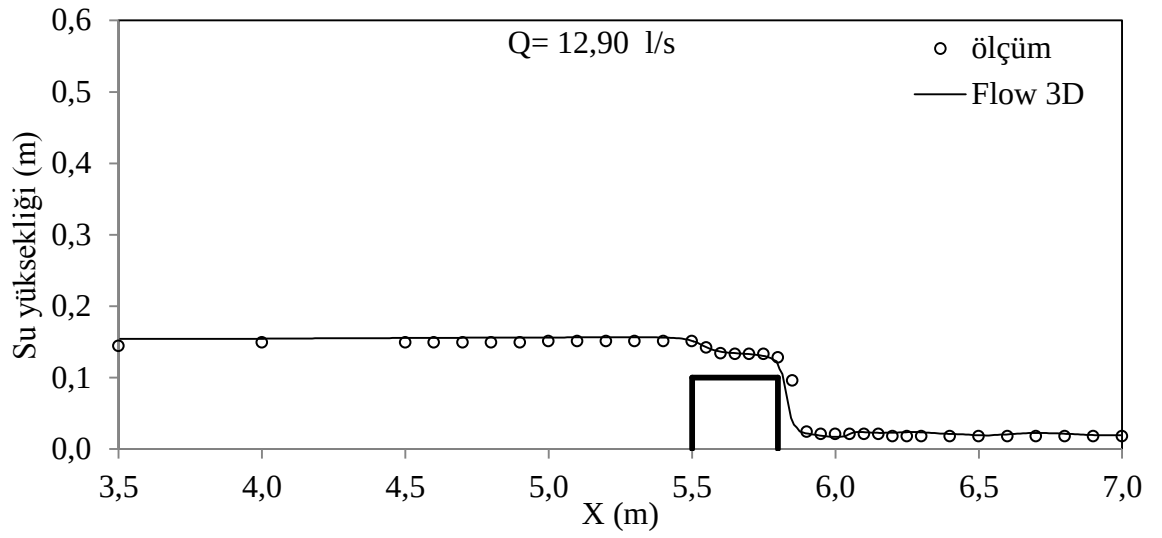
3.3. 0,6x0,3x0,1 m Ölçülerindeki Savakta Su Yüzü Profilleri ve Hız Dağılımları



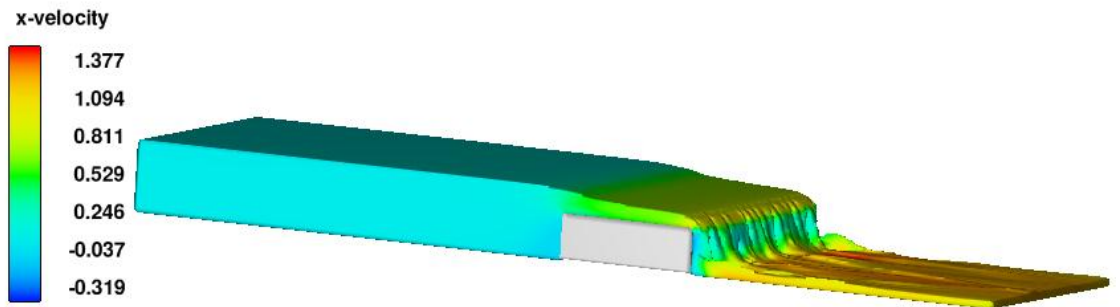
Time Frame: 10.00084



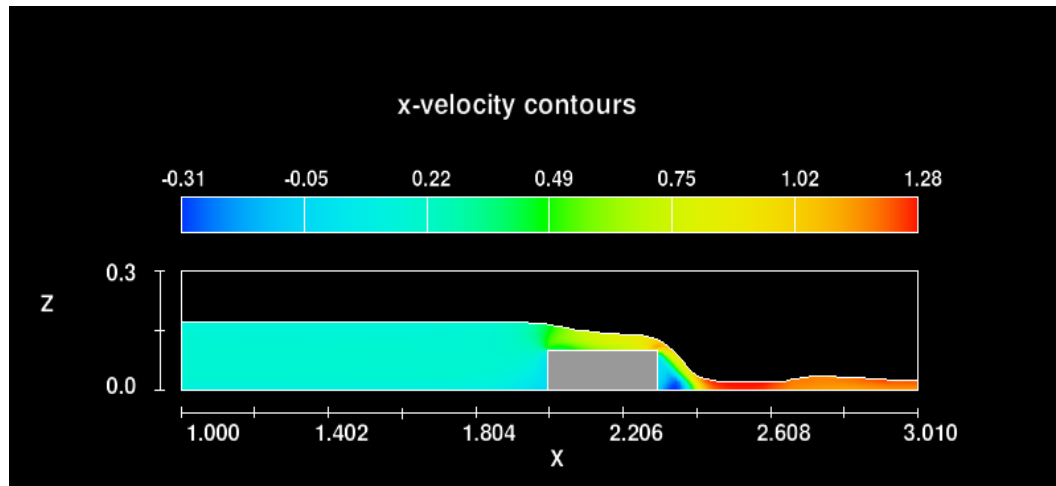
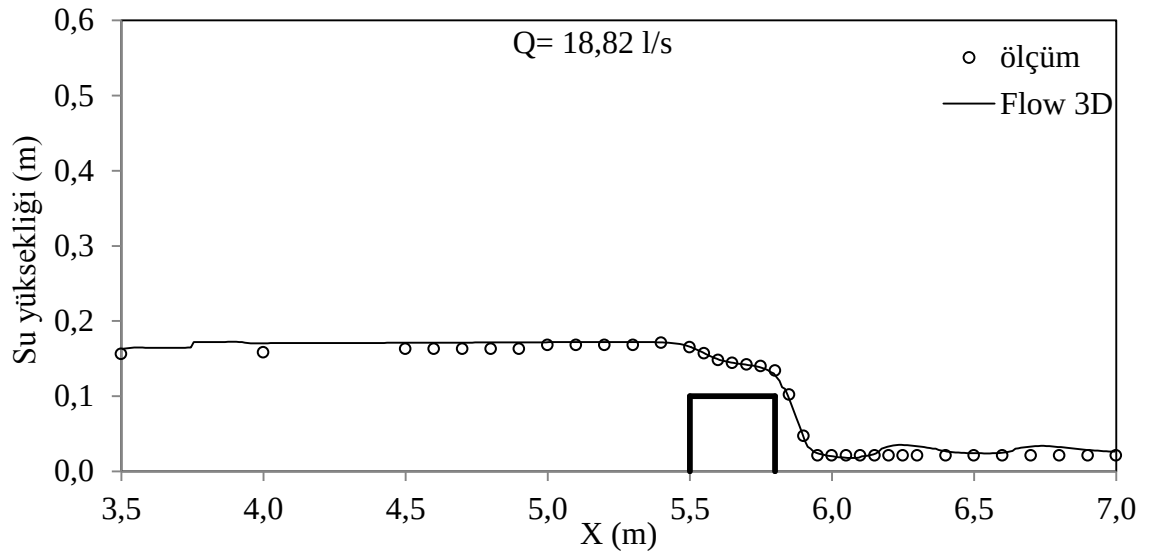
Şekil 3.6. Q=6,41 l/s için Su Yüzü Profillerinin DeneySEL ve Sayısal Karşılaştırılması ve Hız Dağılımlarının 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Gösterimi



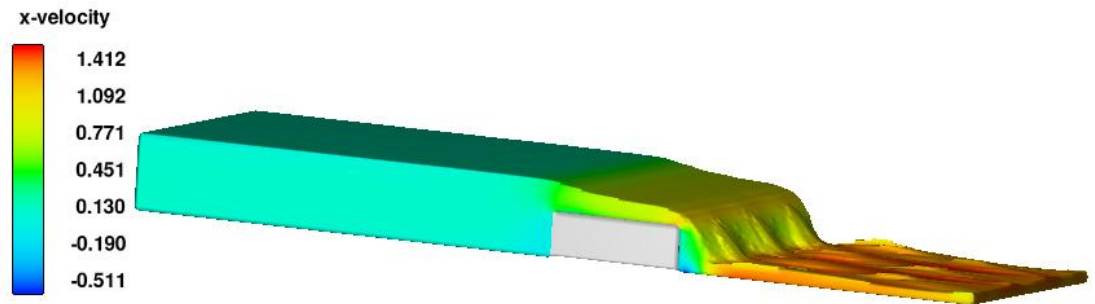
Time Frame: 10.00096



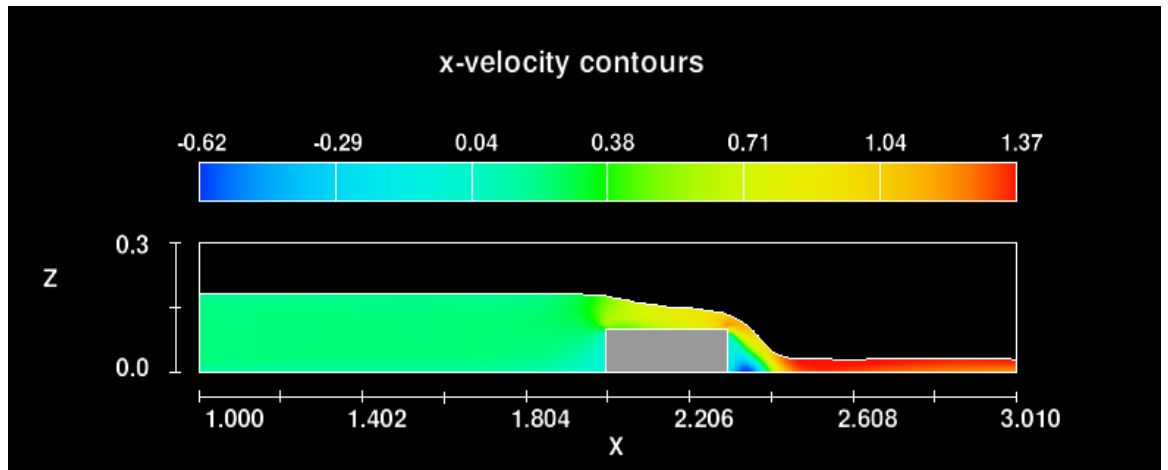
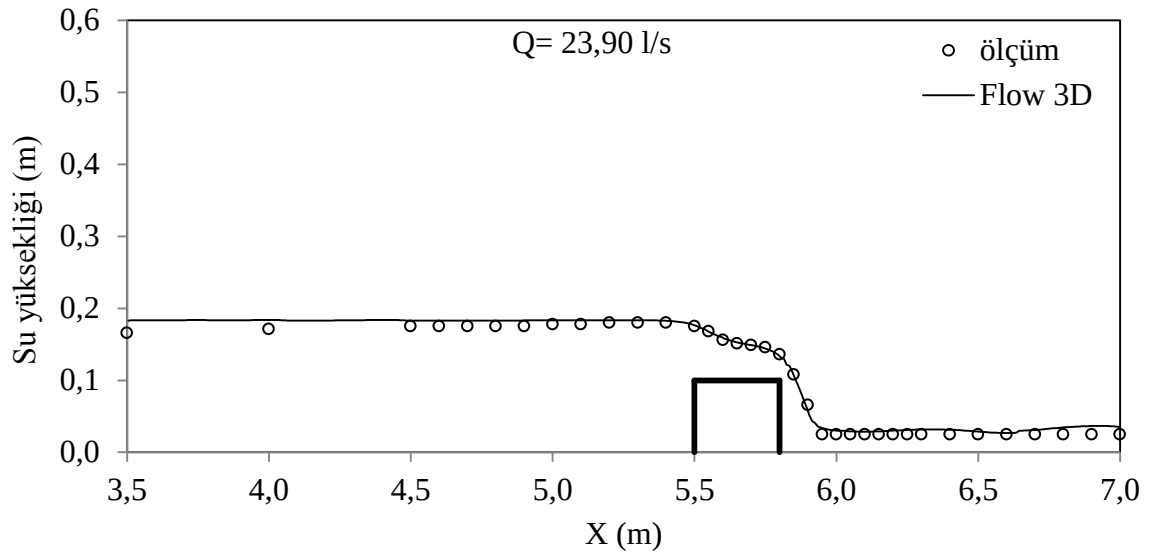
Şekil 3.7. Q=12,90 l/s için Su Yüzü Profillerinin Deneysel ve Sayısal Karşılaştırılması ve Hız Dağılımlarının 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Gösterimi



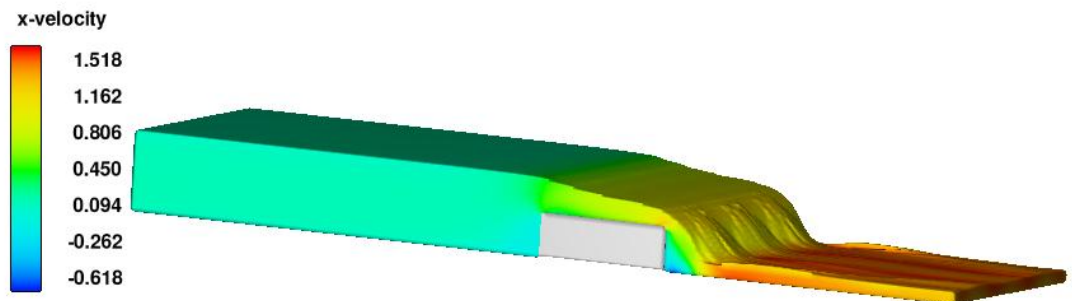
Time Frame: 10.00010



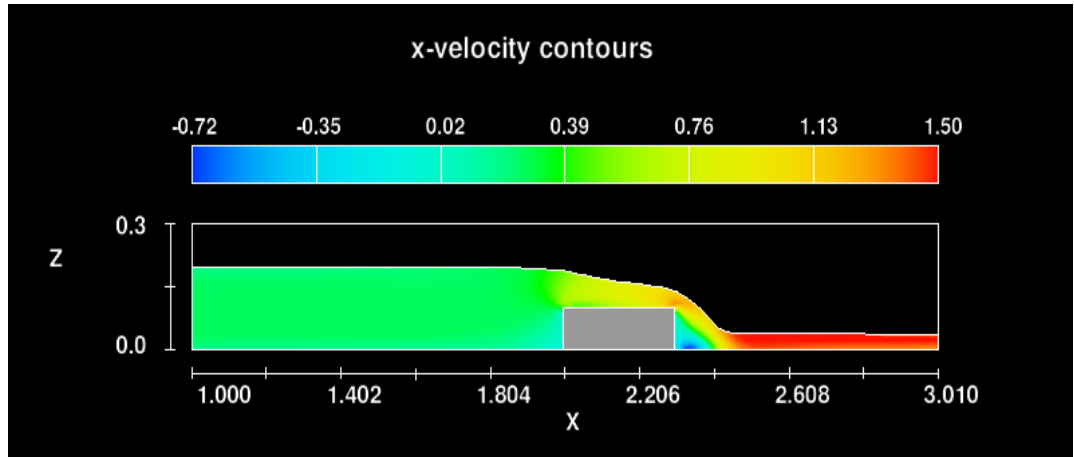
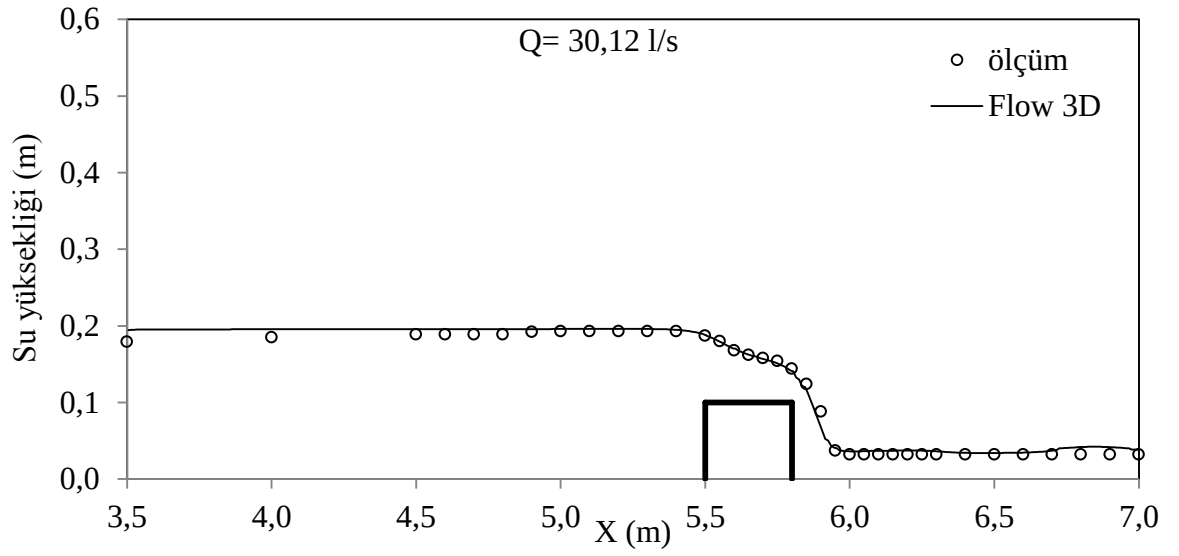
Şekil 3.8. Q=18,82 l/s için Su Yüzü Profillerinin Deneysel ve Sayısal Karşılaştırılması ve Hız Dağılımlarının 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Gösterimi



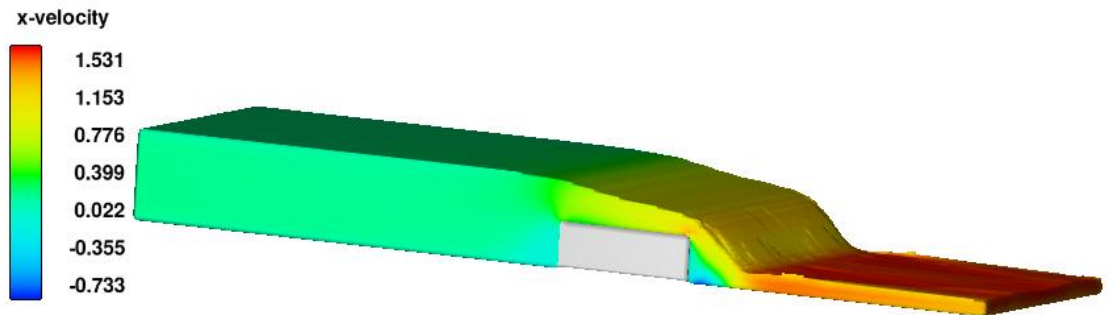
Time Frame: 10.00234



Şekil 3.9. Q=23,90 l/s için Su Yüzü Profillerinin Deneysel ve Sayısal Karşılaştırılması ve Hız Dağılımlarının 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Gösterimi



Time Frame: 10.00224



Şekil 3.10. Q=30,12 l/s için Su Yüzü Profillerinin Deneysel ve Sayısal Karşılaştırılması ve Hız Dağılımlarının 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Gösterimi

Şekil 3.6 ile başlayıp Şekil 3.10 ile biten şekillerde 0,3 m uzunluğundaki savakta 5 debi durumu için su yüzü ölçümleri ile sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırılması ve hız dağılımlarının 2 boyutlu ve 3 boyutlu görünümü bulunmaktadır. Aşağıda Tablo 3.5’de deneysel veriler ile FLOW-3D analiz sonuçlarına göre su yüzü profilinin yükseklik değerleri verilmiştir.

Grafik üzerindeki uyumlu görünen su yüzü profili karşılaştırmasını fark olarak da belirlemek amacıyla denklem (3.1) kullanılarak farklar hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 3.6’da verilmiştir.

Tablo 3.6 incelendiğinde savak önünde ve savak üstünde farkların %5’den küçük değerler aldığı, savak sonrası ise farkların arttığı görülmektedir. Savak sonunda serbest düşme ve karmaşık akım yapısı nedeniyle deneysel ölçümler hesap sonuçlarından bir miktar farklı olmaktadır. Bu bölümdeki ölçüm ve hesap değerlerine ait ortalama farklarda %8,8-%28,4 arasında değişmektedir. Kanal boyunca su yüzü profillerine ait farkların ortalama değerleri de %5,9-%15 arasında değişmektedir. Tüm debiler için farkların ortalamaları incelendiğinde savak öncesi %3,8, savak üstü %1,6, savak sonu %18,5, tüm kanal boyunca 5 farklı debiye ait ortalama fark %10,4 olarak belirlenmiştir.

Tablo 3.5. 0,3 m Uzunluğundaki Savakta Su Yüzü Ölçümlerinin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçları

Q= 6,41 l/s			Q=12,90 l/s		Q=18,88 l/s		Q=23,90 l/s		Q=30,12 l/s	
x(m)	H _{ölçüm} (m)	H _{Flow3D} (m)	H _{ölçüm} (m)	H _{Flow3D} (m)	H _{ölçüm} (m)	H _{Flow3D} (m)	H _{ölçüm} (m)	H _{Flow3D} (m)	H _{ölçüm} (m)	H _{Flow3D} (m)
3,50	0,121	0,134	0,144	0,154	0,156	0,163	0,166	0,183	0,179	0,195
4,00	0,127	0,134	0,149	0,154	0,158	0,170	0,171	0,184	0,185	0,196
4,50	0,130	0,135	0,149	0,156	0,163	0,171	0,175	0,183	0,189	0,196
4,60	0,130	0,135	0,149	0,156	0,163	0,171	0,175	0,183	0,189	0,196
4,70	0,130	0,135	0,149	0,156	0,163	0,171	0,175	0,183	0,189	0,196
4,80	0,130	0,135	0,149	0,156	0,163	0,171	0,175	0,183	0,189	0,196
4,90	0,130	0,136	0,149	0,156	0,163	0,172	0,175	0,183	0,192	0,196
5,00	0,135	0,136	0,151	0,156	0,168	0,172	0,178	0,183	0,193	0,196

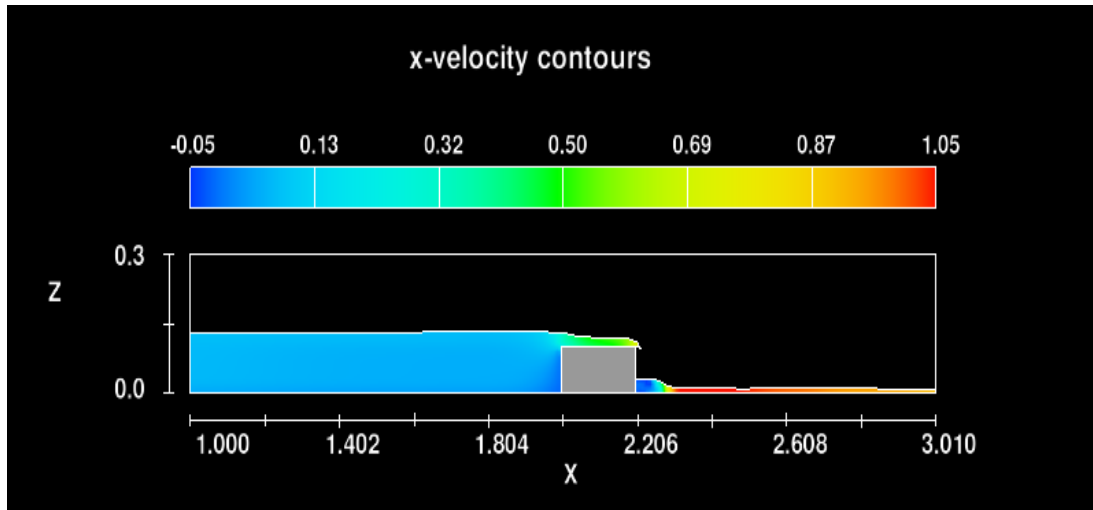
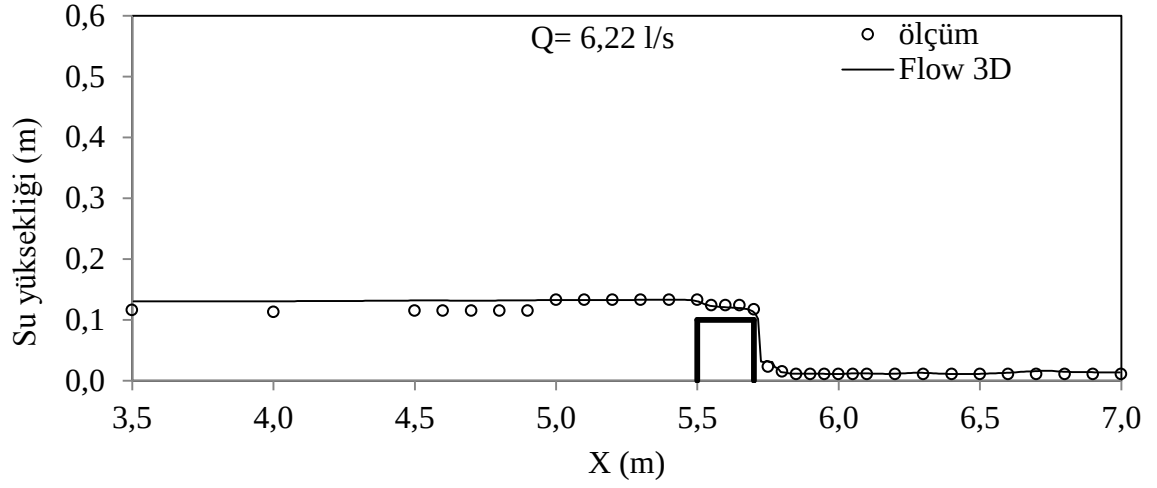
Tablo 3.5'in devamı

Q= 6,41 l/s			Q=12,90 l/s		Q=18,88 l/s		Q=23,90 l/s		Q=30,12 l/s	
x(m)	H _{ölçüm} (m)	H _{Flow3D} (m)	H _{ölçüm} (m)	H _{Flow3D} (m)	H _{ölçüm} (m)	H _{Flow3D} (m)	H _{ölçüm} (m)	H _{Flow3D} (m)	H _{ölçüm} (m)	H _{Flow3D} (m)
5,10	0,135	0,136	0,151	0,156	0,168	0,172	0,178	0,183	0,193	0,196
5,20	0,135	0,136	0,151	0,157	0,168	0,172	0,180	0,184	0,193	0,196
5,30	0,135	0,136	0,151	0,157	0,168	0,172	0,180	0,184	0,193	0,196
5,40	0,136	0,136	0,151	0,156	0,171	0,172	0,180	0,183	0,193	0,195
5,50	0,136	0,133	0,151	0,152	0,165	0,166	0,175	0,177	0,187	0,189
5,55	0,126	0,126	0,142	0,143	0,157	0,158	0,168	0,169	0,180	0,180
5,60	0,128	0,123	0,134	0,137	0,148	0,150	0,156	0,160	0,168	0,171
5,65	0,134	0,123	0,133	0,134	0,144	0,145	0,151	0,153	0,162	0,163
5,70	0,125	0,122	0,133	0,133	0,142	0,142	0,149	0,149	0,158	0,157
5,75	0,126	0,121	0,133	0,131	0,140	0,139	0,146	0,145	0,154	0,152
5,80	0,121	0,115	0,128	0,123	0,134	0,130	0,136	0,135	0,144	0,142
5,85	0,036	0,034	0,096	0,044	0,102	0,101	0,108	0,112	0,124	0,120
5,90	0,013	0,013	0,024	0,022	0,047	0,051	0,066	0,062	0,088	0,072
5,95	0,013	0,011	0,021	0,019	0,021	0,025	0,025	0,034	0,037	0,041
6,00	0,013	0,012	0,021	0,017	0,021	0,020	0,025	0,031	0,032	0,036
6,05	0,013	0,012	0,021	0,020	0,021	0,018	0,025	0,029	0,032	0,036
6,10	0,013	0,012	0,021	0,024	0,021	0,018	0,025	0,029	0,032	0,037
6,15	0,013	0,012	0,021	0,023	0,021	0,023	0,025	0,029	0,032	0,037
6,20	0,013	0,014	0,018	0,023	0,021	0,033	0,025	0,030	0,032	0,037
6,25	0,013	0,015	0,018	0,024	0,021	0,035	0,025	0,031	0,032	0,037
6,30	0,013	0,015	0,018	0,024	0,021	0,034	0,025	0,032	0,032	0,036
6,40	0,013	0,015	0,018	0,021	0,021	0,027	0,025	0,031	0,032	0,034
6,50	0,013	0,013	0,018	0,019	0,021	0,024	0,025	0,029	0,032	0,034
6,60	0,013	0,013	0,018	0,020	0,021	0,025	0,025	0,027	0,032	0,035
6,70	0,013	0,014	0,018	0,022	0,021	0,033	0,025	0,031	0,032	0,037
6,80	0,013	0,014	0,018	0,022	0,021	0,033	0,025	0,034	0,032	0,042
6,90	0,013	0,015	0,018	0,020	0,021	0,029	0,025	0,037	0,032	0,042
7,00	0,013	0,016	0,018	0,019	0,021	0,026	0,025	0,035	0,032	0,038

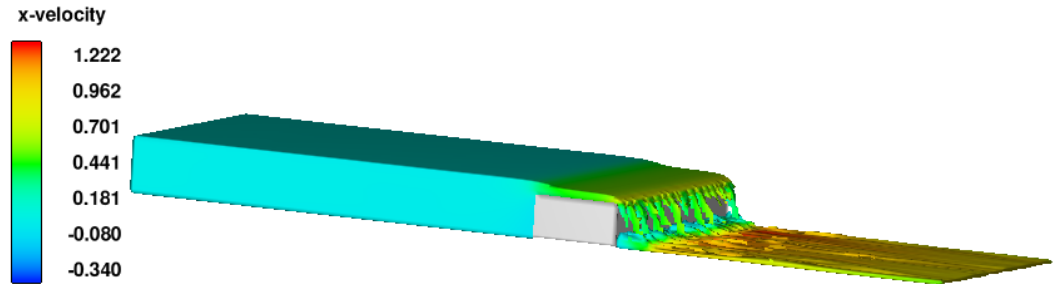
Tablo 3.6. 0,3 m Uzunluğundaki Savakta Ölçüm ve Sayısal Analiz Su Yüzü Değerlerin Farkları

x(m)	ε (%)					
	Q= 6,41	Q=12,90	Q=18,88	Q=23,90	Q=30,12	
3,50	10,4	7,0	4,6	10,4	8,7	
4,00	5,3	3,7	7,9	7,6	5,7	
4,50	3,7	4,4	4,9	4,6	3,4	
4,60	3,9	4,5	5,0	4,5	3,6	
4,70	4,1	4,6	5,1	4,6	3,5	
4,80	4,2	4,7	5,2	4,6	3,5	
4,90	4,3	4,8	5,3	4,7	2,0	
5,00	0,6	3,5	2,3	3,0	1,5	
5,10	0,5	3,6	2,3	3,1	1,6	
5,20	0,5	3,6	2,5	2,0	1,6	
5,30	0,5	3,7	2,5	2,0	1,6	
5,40	0,2	3,5	0,4	1,6	1,0	
5,50	1,9	0,8	0,9	1,2	1,0	
5,55	0,2	1,0	0,8	0,4	0,2	
5,60	3,9	2,1	1,4	2,6	1,6	
5,65	8,5	1,1	0,6	1,6	0,7	
5,70	2,1	0,1	0,0	0,2	0,4	
5,75	3,8	1,7	1,0	0,8	1,5	
5,80	4,7	3,9	2,8	0,4	1,7	
5,85	5,4	54,3	1,1	3,3	3,0	
5,90	2,7	7,2	7,8	6,0	17,8	
5,95	17,8	8,8	17,9	36,9	10,6	
6,00	8,2	18,7	3,4	22,2	13,5	
6,05	6,4	3,9	13,4	16,7	13,7	
6,10	7,2	12,9	14,0	14,9	15,6	
6,15	5,1	8,7	7,7	16,5	16,0	
6,20	7,8	27,5	55,5	20,8	16,5	
6,25	16,2	31,4	67,8	24,1	16,3	
6,30	12,1	30,7	60,0	27,1	13,7	
6,35	12,1	18,3	29,0	25,6	7,3	
6,40	2,6	8,1	15,4	15,7	6,5	
6,45	0,3	13,2	17,5	7,2	8,2	
6,50	5,1	25,0	56,3	23,9	14,9	
6,60	8,2	19,9	54,8	37,6	30,5	
6,70	12,4	9,5	36,4	46,1	30,6	
6,80	20,0	6,9	25,4	41,8	19,0	
Ortalama					Gen Ort.	
Savak Önü	3,2	4,3	4,0	4,4	3,1	3,8
Savak Üstü	3,6	1,5	1,1	1,0	1,0	1,6
Savak Sonu	8,8	17,9	28,4	22,7	14,9	18,5
Gen Ort.	5,9	10,2	15,0	12,4	8,3	10,4

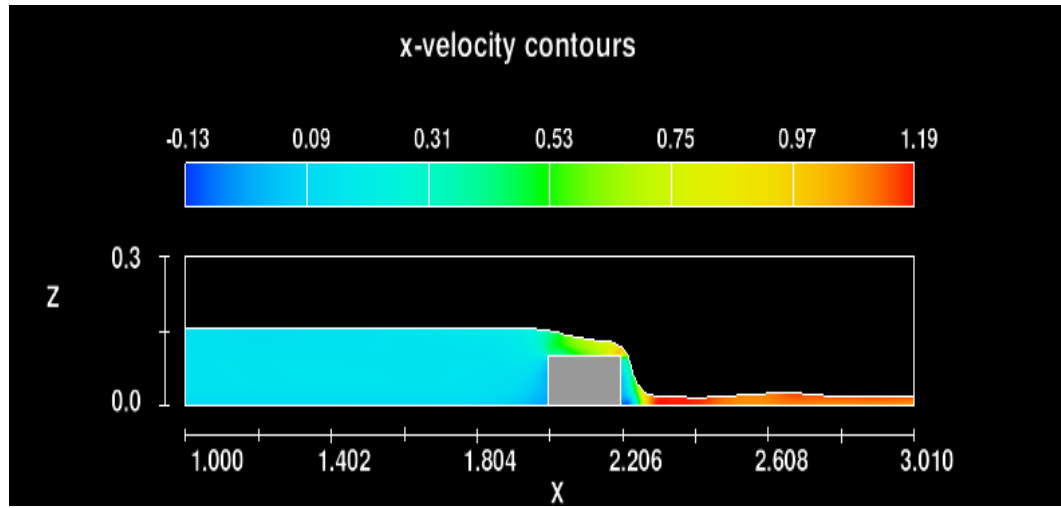
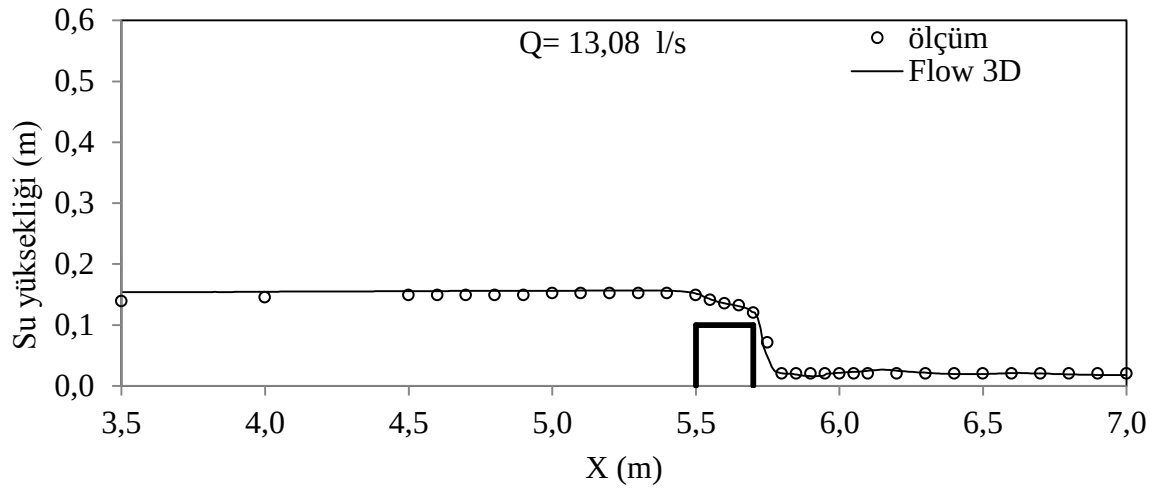
3.4. 0,6x0,2x0,1 m Ölçülerindeki Savakta Su Yüzü Profilleri ve Hız Dağılımları



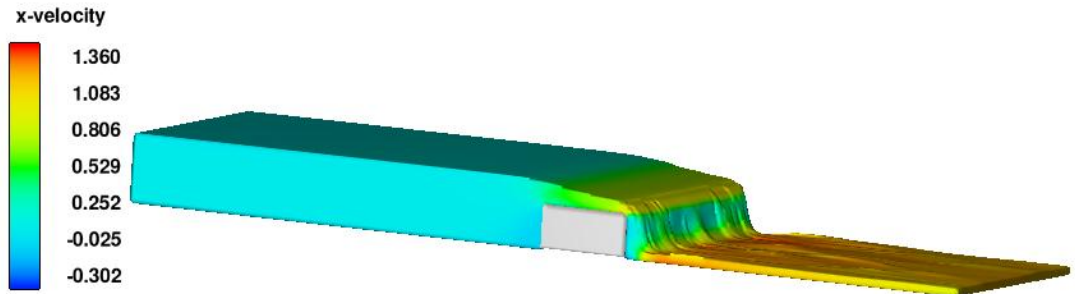
Time Frame: 10.00236



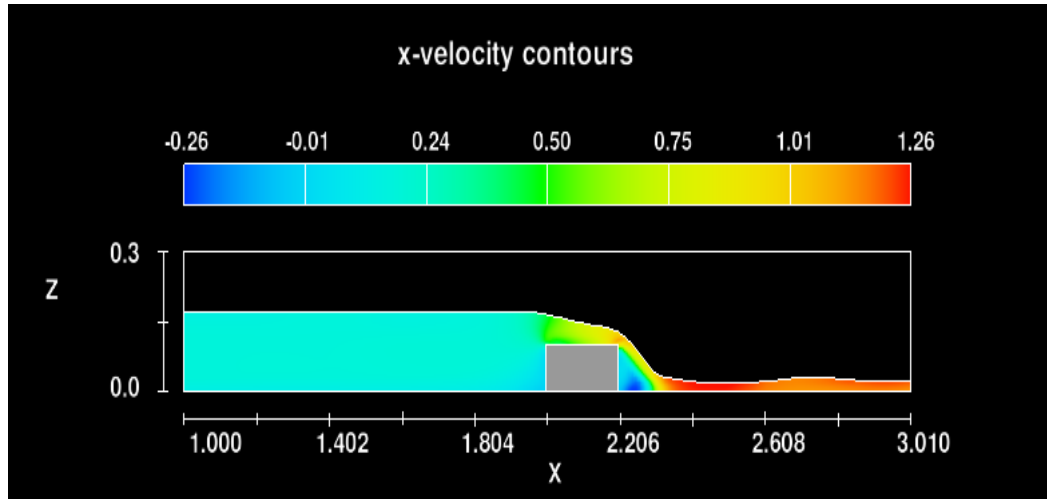
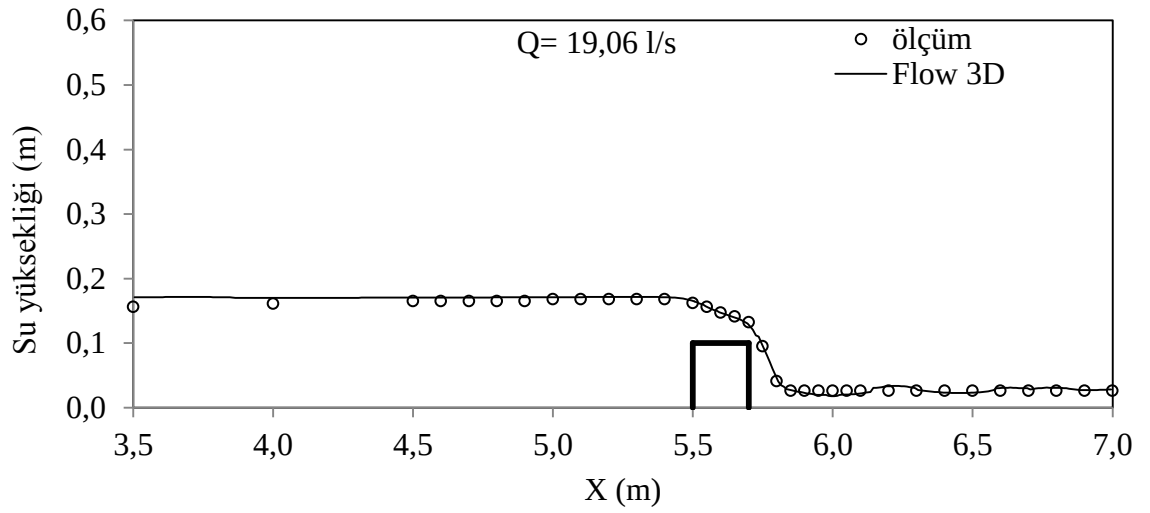
Şekil 3.11. Q=6,22 l/s için Su Yüzü Profillerinin DeneySEL ve Sayısal Karşılaştırılması ve Hız Dağılımlarının 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Gösterimi



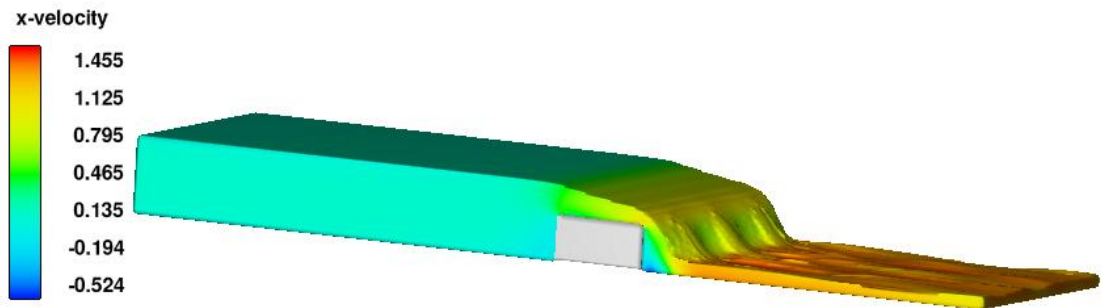
Time Frame: 10.00251



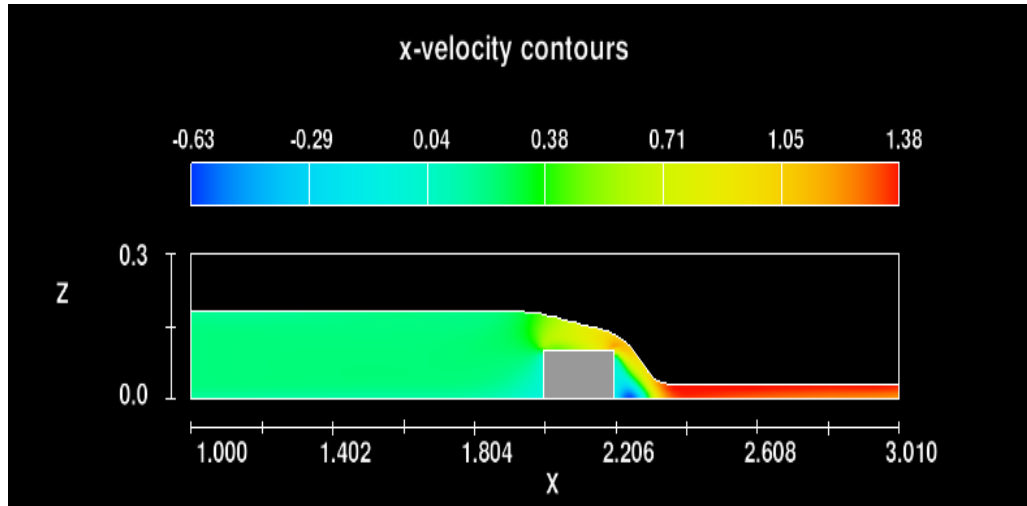
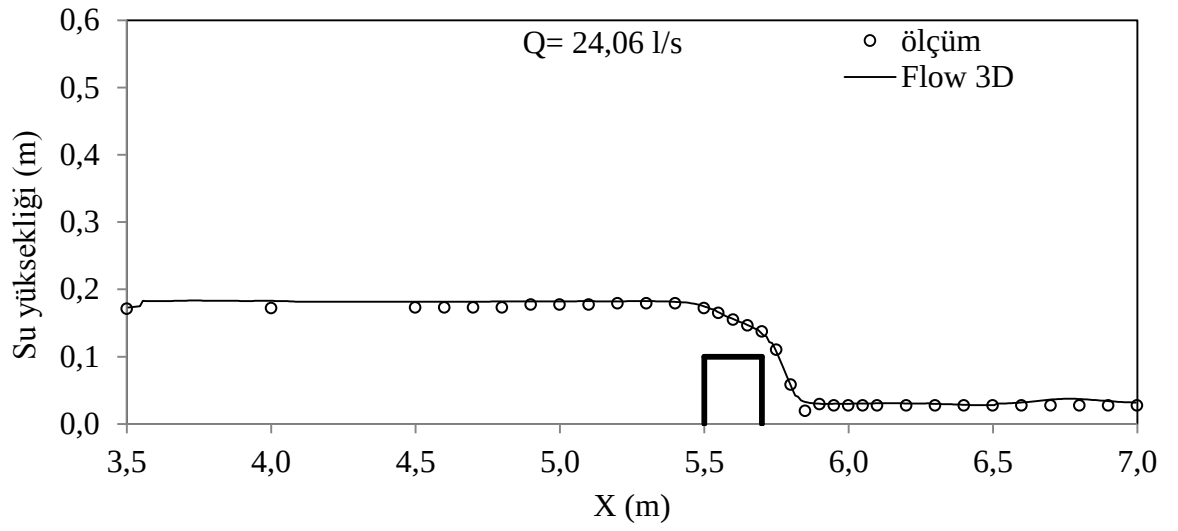
Şekil 3.12. $Q=13,08$ l/s için Su Yüzü Profillerinin Deneysel ve Sayısal Karşılaştırılması ve Hız Dağılımlarının 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Gösterimi



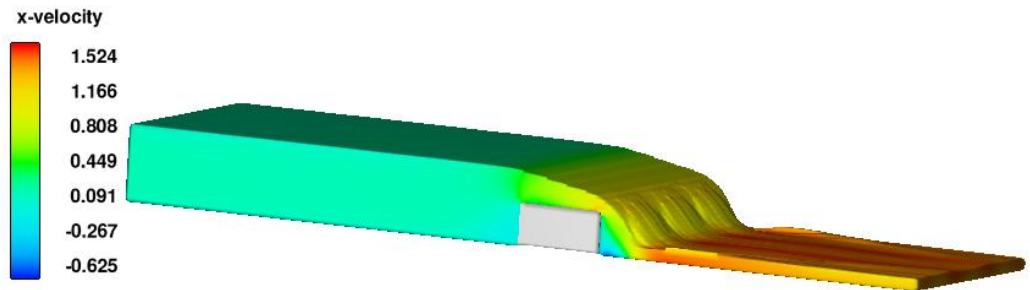
Time Frame: 10.00109



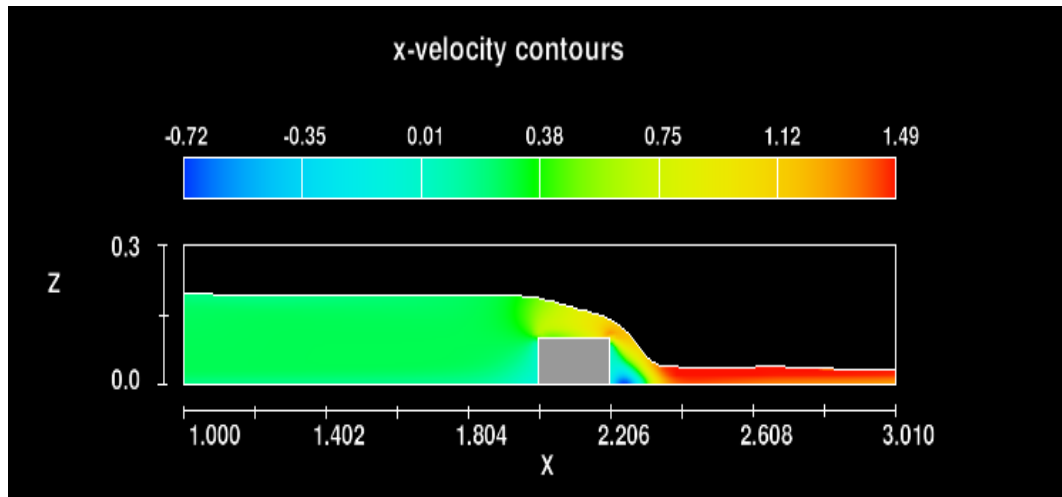
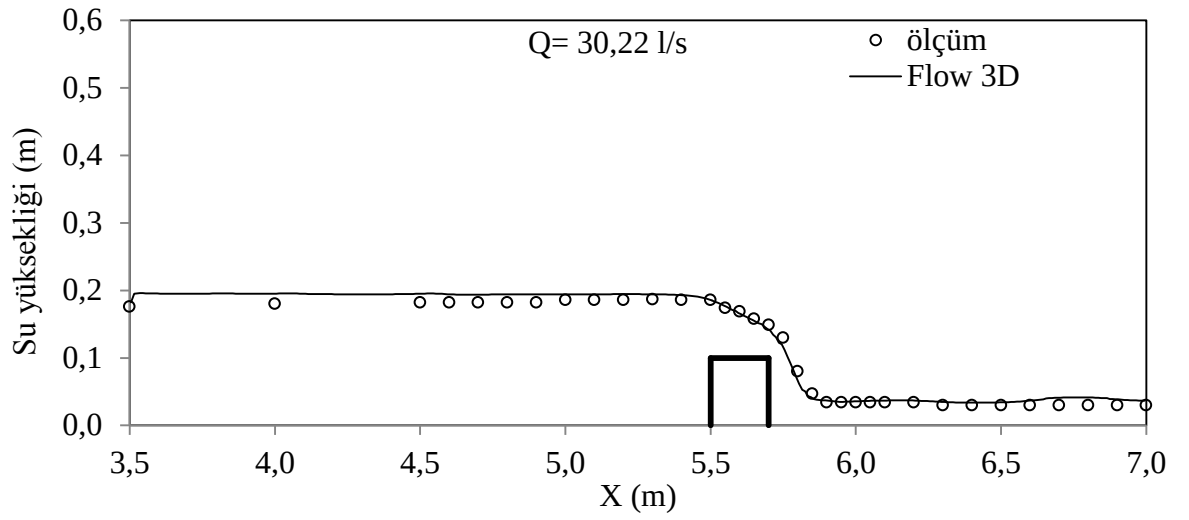
Şekil 3.13. Q=19,06 l/s için Su Yüzü Profillerinin Deneysel ve Sayısal Karşılaştırılması ve Hız Dağılımlarının 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Gösterimi



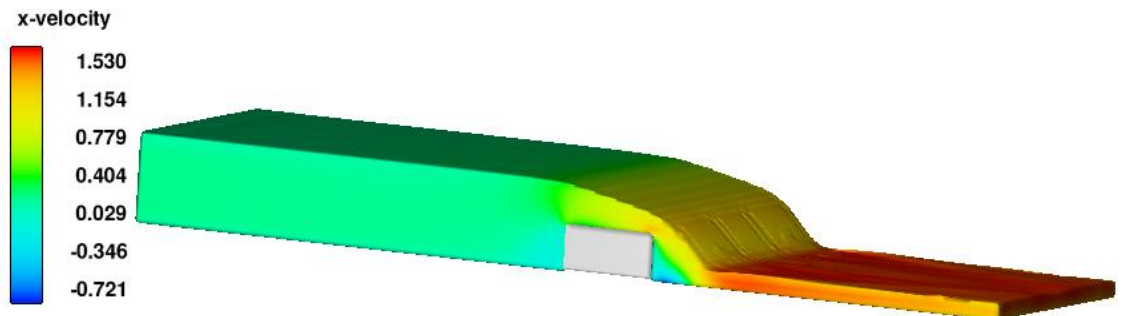
Time Frame: 10.00275



Şekil 3.14. Q=24,06 l/s için Su Yüzü Profillerinin Deneysel ve Sayısal Karşılaştırılması ve Hız Dağılımlarının 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Gösterimi



Time Frame: 10.00230



Şekil 3.15. $Q=30,22$ l/s için Su Yüzü Profillerinin Deneysel ve Sayısal Karşılaştırılması ve Hız Dağılımlarının 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Gösterimi

Şekil 3.11 ile başlayıp Şekil 3.15 ile biten şekillerde 0,2 m uzunluğundaki savakta 5 debi durumu için su yüzü ölçümleri ile sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırılması ve hız dağılımlarının 2 boyutlu ve 3 boyutlu görünümü bulunmaktadır. Aşağıda Tablo 3.7’de deneysel veriler ile FLOW-3D analiz sonuçlarına göre su yüzü profilinin yükseklik değerleri verilmiştir.

Grafik üzerindeki uyumlu görünen su yüzü profili karşılaştırmasını fark olarak da belirlemek amacıyla denklem (3.1) kullanılarak farklar hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 3.8’de verilmiştir.

Tablo 3.6 incelendiğinde savak önünde ve savak üstünde farkların %5’den küçük değerler aldığı, savak sonrası ise farkların arttığı görülmektedir. Savak sonunda serbest düşme ve karmaşık akım yapısı nedeniyle deneysel ölçümler hesap sonuçlarından bir miktar farklı olmaktadır. Bu bölümdeki ölçüm ve hesap değerlerine ait ortalama farklarda %11-%17,2 arasında değişmektedir. Kanal boyunca su yüzü profillerine ait bu farkların ortalama değerleri de %7,3-%10,8 arasında değişmektedir. Tüm debiler için farkların ortalaması incelendiğinde savak öncesi %5,2, savak üstü %1,5, savak sonu %14,9, tüm kanal boyunca 5 farklı debiye ait ortalama farklar %9,5 olarak belirlenmiştir.

Tablo 3.7. 0,2 m Uzunluğundaki Savakta Su Yüzü Ölçümlerinin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçları

Q= 6,22 l/s			Q=13,08 l/s		Q=19,06 l/s		Q=24,06 l/s		Q=30,22 l/s	
x(m)	H _{ölçüm} (m)	H _{Flow3D} (m)	H _{ölçüm} (m)	H _{Flow3D} (m)	H _{ölçüm} (m)	H _{Flow3D} (m)	H _{ölçüm} (m)	H _{Flow3D} (m)	H _{ölçüm} (m)	H _{Flow3D} (m)
3,50	0,116	0,131	0,139	0,154	0,156	0,171	0,171	0,173	0,176	0,182
4,00	0,113	0,131	0,145	0,155	0,161	0,170	0,172	0,183	0,180	0,195
4,50	0,115	0,132	0,149	0,155	0,165	0,171	0,173	0,181	0,182	0,195
4,60	0,115	0,132	0,149	0,156	0,165	0,171	0,173	0,182	0,182	0,194
4,70	0,115	0,132	0,149	0,156	0,165	0,171	0,173	0,182	0,182	0,194
4,80	0,115	0,132	0,149	0,156	0,165	0,171	0,173	0,182	0,182	0,194
4,90	0,115	0,132	0,149	0,156	0,165	0,171	0,177	0,182	0,182	0,194
5,00	0,133	0,133	0,152	0,156	0,168	0,171	0,177	0,182	0,186	0,194
5,10	0,133	0,133	0,152	0,156	0,168	0,171	0,177	0,182	0,186	0,194

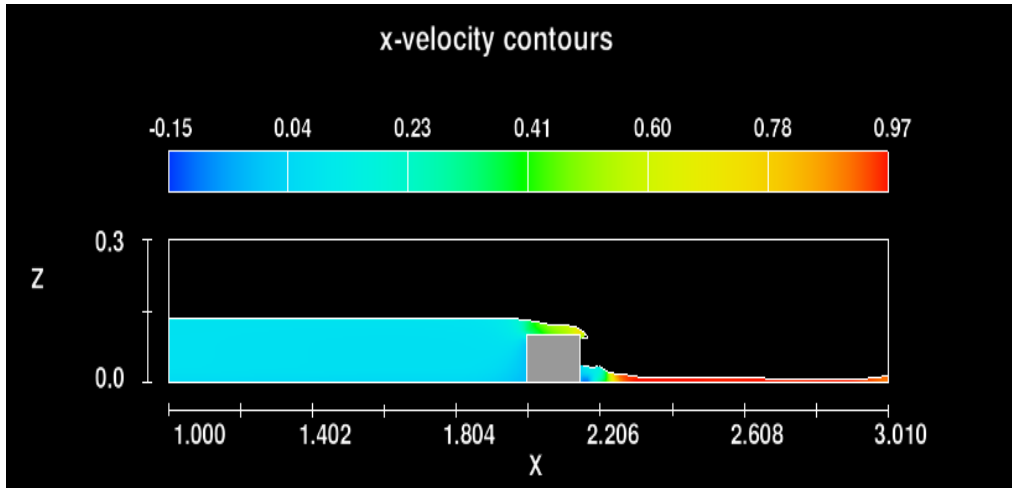
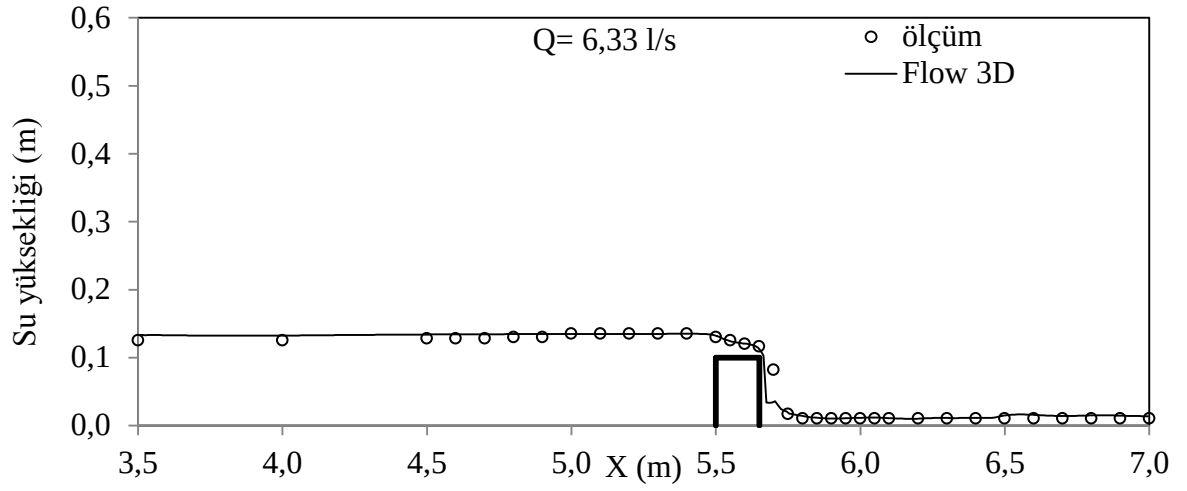
Tablo 3.7'nin devamı

Q= 6,22 l/s			Q=13,08 l/s		Q=19,06 l/s		Q=24,06 l/s		Q=30,22 l/s	
x(m)	H _{ölçüm} (m)	H _{Flow3D} (m)	H _{ölçüm} (m)	H _{Flow3D} (m)	H _{ölçüm} (m)	H _{Flow3D} (m)	H _{ölçüm} (m)	H _{Flow3D} (m)	H _{ölçüm} (m)	H _{Flow3D} (m)
5,20	0,133	0,133	0,152	0,156	0,168	0,172	0,179	0,182	0,186	0,194
5,30	0,133	0,133	0,152	0,157	0,168	0,172	0,179	0,183	0,187	0,194
5,40	0,133	0,133	0,152	0,156	0,168	0,171	0,179	0,182	0,186	0,193
5,50	0,133	0,131	0,149	0,152	0,162	0,166	0,172	0,176	0,186	0,187
5,55	0,124	0,123	0,141	0,143	0,156	0,157	0,165	0,167	0,174	0,178
5,60	0,124	0,121	0,135	0,136	0,147	0,148	0,155	0,157	0,169	0,167
5,65	0,124	0,120	0,132	0,131	0,141	0,141	0,146	0,148	0,158	0,156
5,70	0,117	0,115	0,120	0,121	0,132	0,130	0,137	0,136	0,149	0,143
5,75	0,023	0,033	0,071	0,053	0,095	0,101	0,110	0,112	0,130	0,120
5,80	0,015	0,014	0,020	0,021	0,041	0,050	0,058	0,062	0,080	0,072
5,85	0,011	0,011	0,020	0,019	0,026	0,028	0,019	0,033	0,047	0,042
5,90	0,011	0,012	0,020	0,016	0,026	0,023	0,029	0,030	0,034	0,037
5,95	0,011	0,011	0,020	0,017	0,026	0,020	0,027	0,030	0,034	0,035
6,00	0,011	0,011	0,020	0,021	0,026	0,018	0,027	0,030	0,034	0,036
6,05	0,011	0,012	0,020	0,023	0,026	0,020	0,027	0,030	0,034	0,036
6,10	0,011	0,012	0,020	0,025	0,026	0,022	0,027	0,031	0,034	0,037
6,20	0,011	0,012	0,020	0,025	0,026	0,033	0,027	0,030	0,034	0,037
6,30	0,011	0,013	0,020	0,022	0,026	0,030	0,027	0,030	0,030	0,035
6,40	0,011	0,011	0,020	0,020	0,026	0,024	0,027	0,029	0,030	0,034
6,50	0,011	0,011	0,020	0,019	0,026	0,023	0,027	0,028	0,030	0,034
6,60	0,011	0,013	0,020	0,021	0,026	0,030	0,027	0,032	0,030	0,037
6,70	0,011	0,016	0,020	0,020	0,026	0,030	0,027	0,036	0,030	0,041
6,80	0,011	0,015	0,020	0,019	0,026	0,031	0,027	0,037	0,030	0,042
6,90	0,011	0,014	0,020	0,018	0,026	0,027	0,027	0,034	0,030	0,039
7,00	0,011	0,014	0,020	0,018	0,026	0,028	0,027	0,032	0,030	0,037

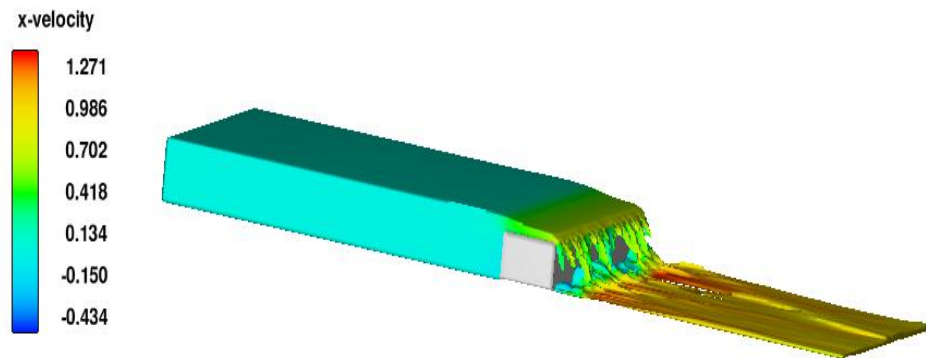
Tablo 3.8. 0,2 m Uzunluğundaki Savakta Ölçüm ve Sayısal Analiz Su Yüzü Değerlerin Farkları

x(m)	ε (%)				
	Q= 6,22	Q=13,08	Q=19,06	Q=24,06	Q=30,22
3,50	12,7	10,8	9,8	1,3	3,6
4,00	15,7	6,6	5,6	6,4	8,5
4,50	14,8	4,3	3,4	4,9	7,2
4,60	14,7	4,5	3,4	5,0	6,8
4,70	14,6	4,6	3,5	5,1	6,6
4,80	14,7	4,7	3,6	5,2	6,6
4,90	15,1	4,7	3,6	2,9	6,7
5,00	0,3	2,7	1,9	3,0	4,4
5,10	0,2	2,8	2,0	3,1	4,5
5,20	0,0	2,9	2,1	1,8	4,6
5,30	0,0	3,0	2,1	2,0	3,9
5,40	0,3	2,8	1,9	1,5	3,9
5,50	1,4	2,1	2,5	2,1	0,3
5,55	0,4	1,6	0,9	1,3	2,2
5,60	2,5	0,6	0,6	1,1	1,3
5,65	3,4	0,4	0,3	1,1	1,2
5,70	2,1	1,0	1,4	0,6	4,1
5,75	42,4	25,6	5,8	1,4	7,5
5,80	4,0	5,7	23,1	6,3	10,0
5,85	3,5	4,6	7,7	74,9	10,4
5,90	6,8	19,9	10,6	3,6	9,2
5,95	3,7	15,7	22,9	9,5	3,1
6,00	0,3	6,1	30,9	9,6	4,9
6,05	8,5	14,2	22,0	12,1	7,1
6,10	10,2	23,0	15,4	13,0	8,5
6,15	4,9	26,4	26,9	12,8	8,8
6,20	18,3	8,6	16,6	10,3	16,4
6,25	1,3	2,5	9,6	5,8	12,4
6,30	2,5	2,6	11,2	3,3	13,9
6,35	19,6	4,6	16,9	17,1	22,1
6,40	43,4	1,4	15,5	32,9	36,7
6,45	35,1	5,3	18,7	37,2	38,6
6,50	28,0	10,2	4,8	26,0	29,1
6,60	22,9	10,6	8,4	17,1	22,4
Ortalama					Gen. Ort
Savak Önü	8,6	4,5	3,6	3,5	5,2
Savak Üstü	2,0	1,1	1,1	1,3	1,5
Savak Sonu	15,0	11,0	15,7	17,2	14,9
Gen Ort	10,8	7,3	9,3	10,0	9,5

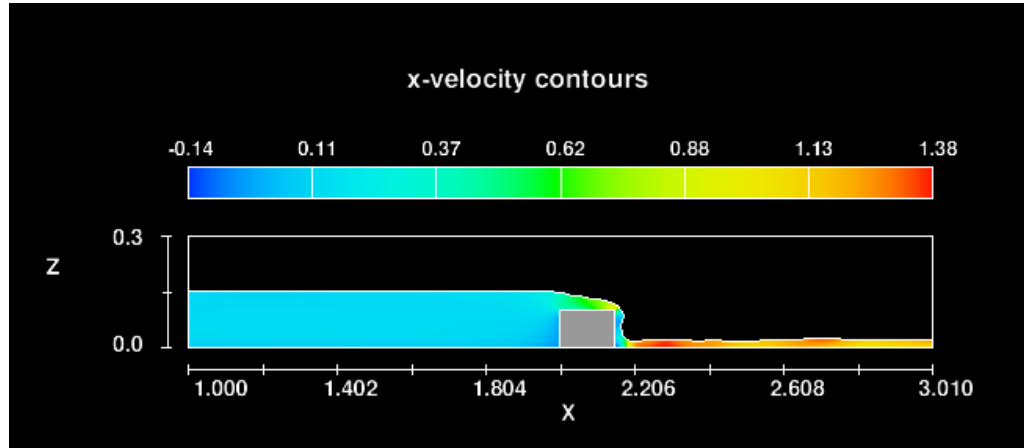
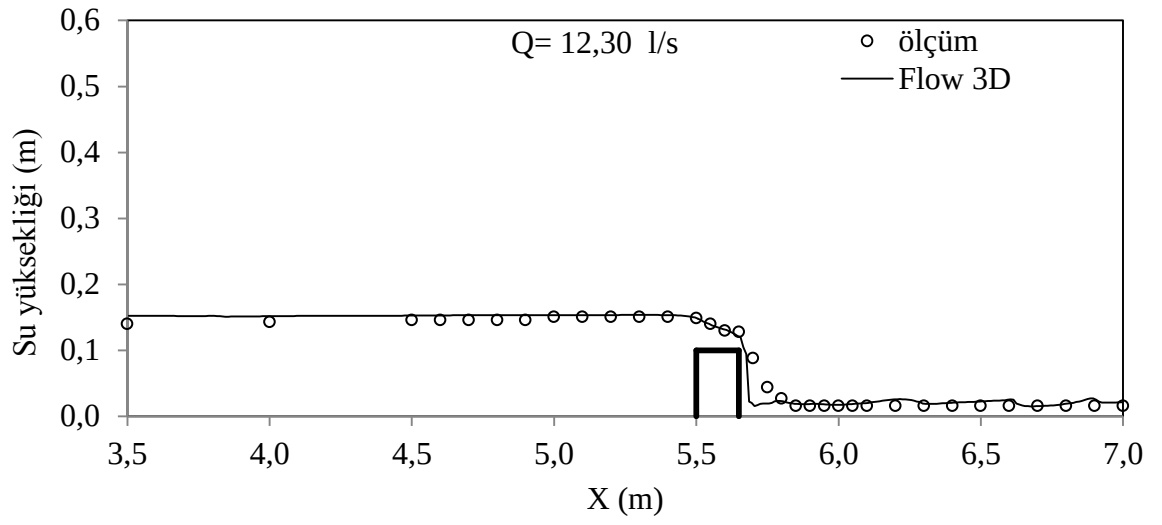
3.5. 0,6x0,15x0,1 m Ölçülerindeki Savakta Su Yüzü Profilleri ve Hız Dağılımları



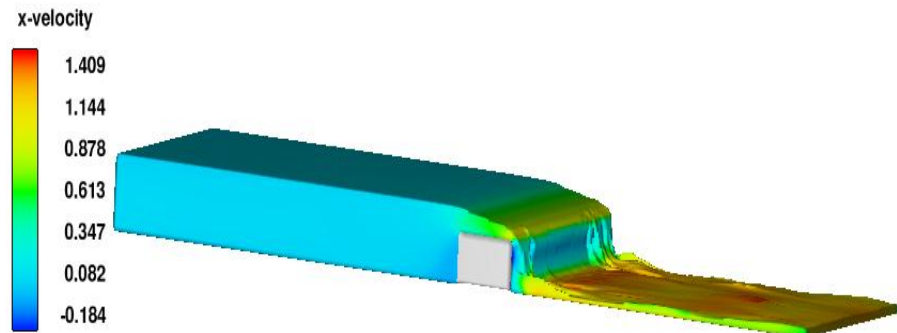
Time Frame: 10.00004



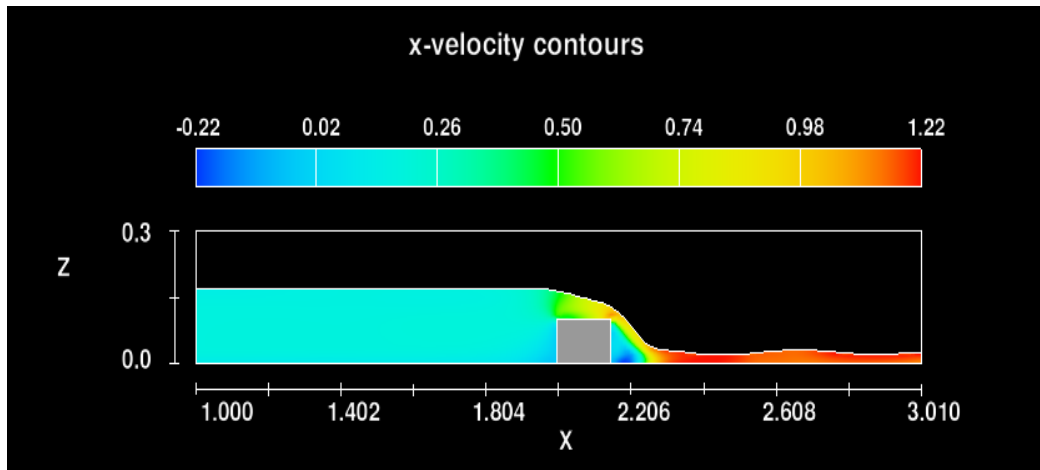
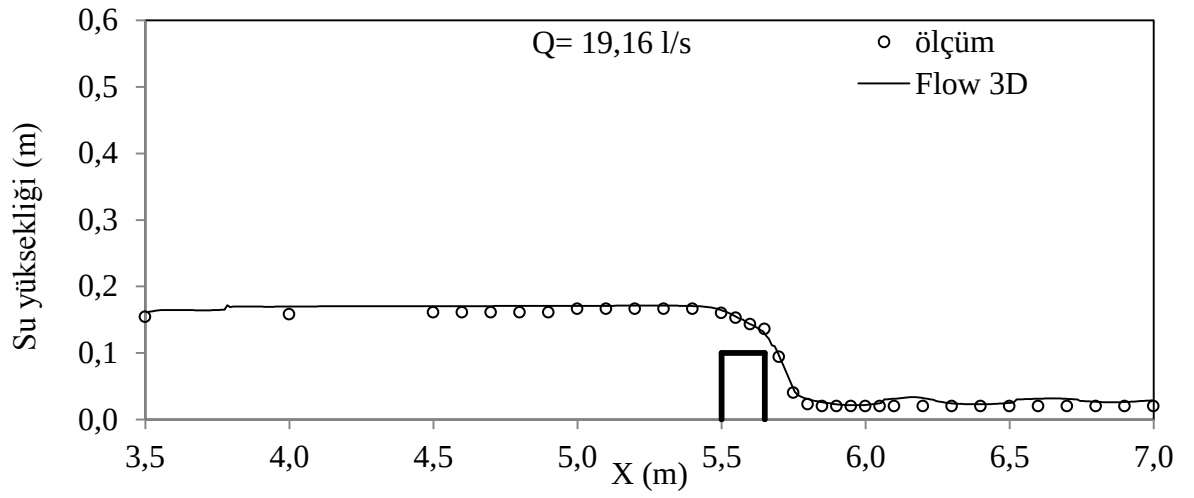
Şekil 3.16. $Q=6,33$ l/s için Su Yüzü Profillerinin DeneySEL ve Sayısal Karşılaştırılması ve Hız Dağılımlarının 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Gösterimi



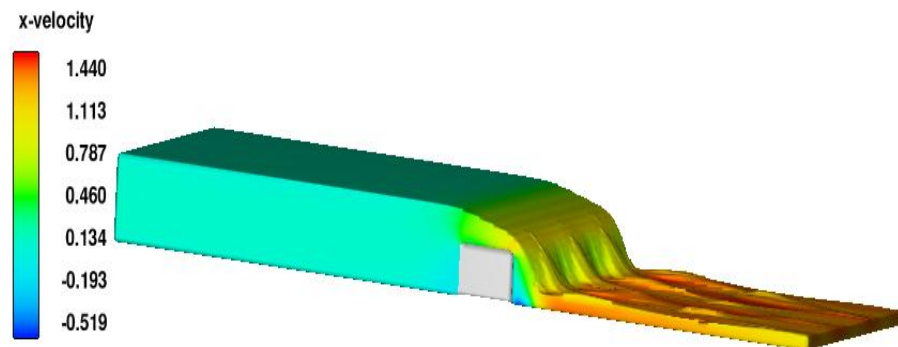
Time Frame: 10.00175



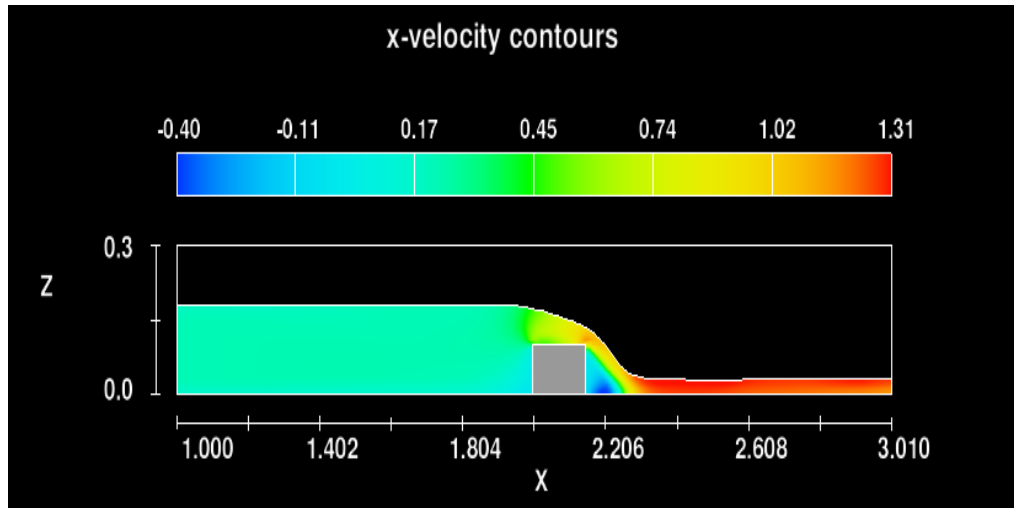
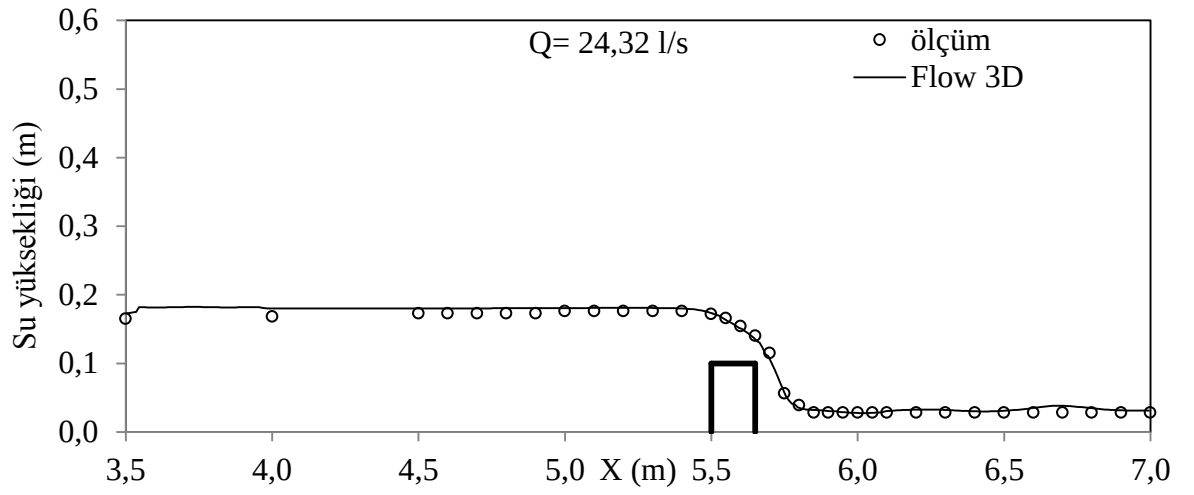
Şekil 3.17. $Q=12,30$ l/s için Su Yüzü Profillerinin Deneysel ve Sayısal Karşılaştırılması ve Hız Dağılımlarının 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Gösterimi



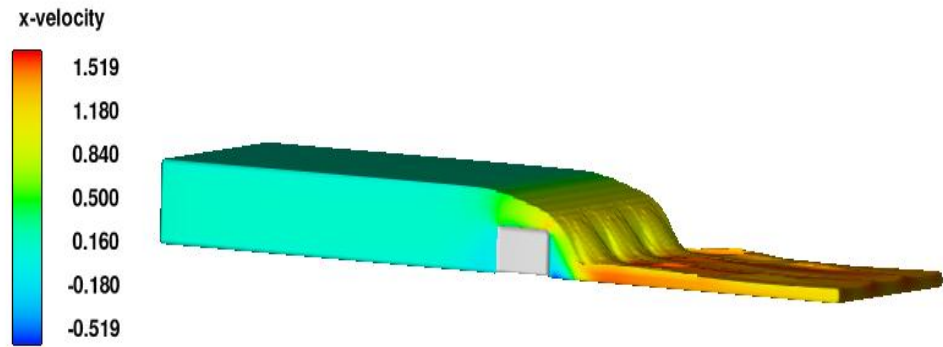
Time Frame: 10.00220



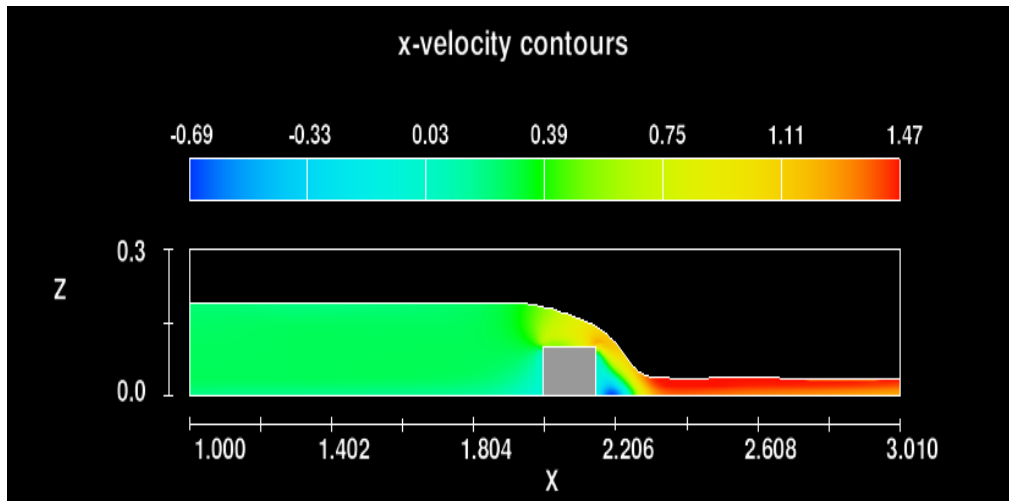
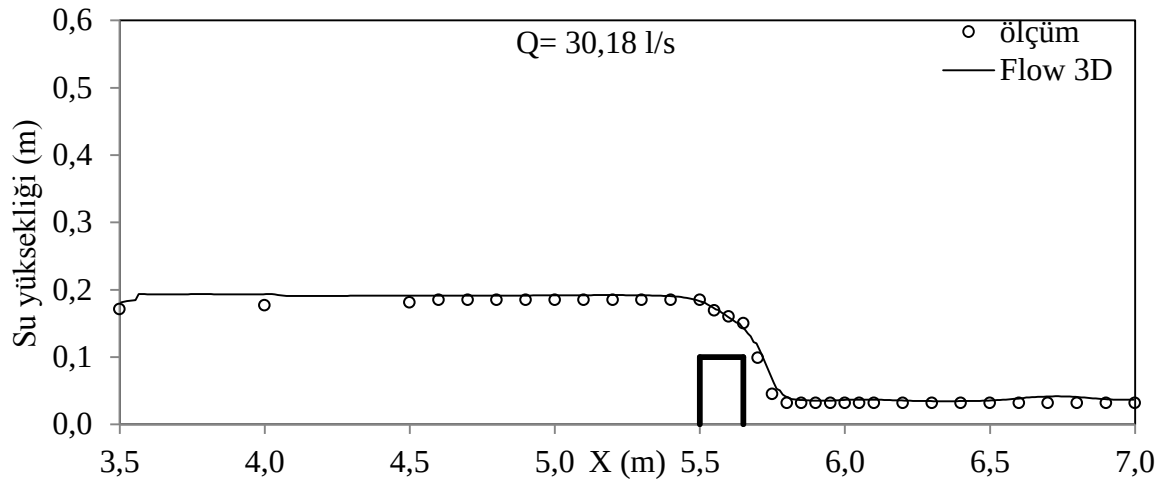
Şekil 3.18. $Q=19,16$ l/s için Su Yüzü Profillerinin Deneysel ve Sayısal Karşılaştırılması ve Hız Dağılımlarının 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Gösterimi



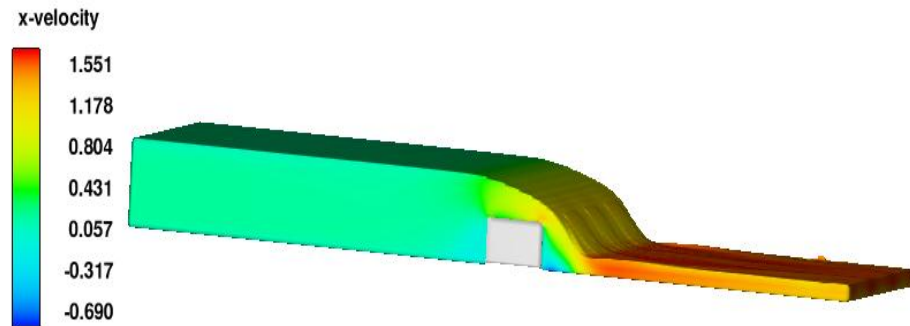
Time Frame: 10.00185



Şekil 3.19. $Q=24,32$ l/s için Su Yüzü Profillerinin Deneysel ve Sayısal Karşılaştırılması ve Hız Dağılımlarının 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Gösterimi



Time Frame: 10.00051



Şekil 3.20. $Q=30,18$ l/s için Su Yüzü Profillerinin Deneysel ve Sayısal Karşılaştırılması ve Hız Dağılımlarının 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Gösterimi

Şekil 3.16 ile başlayıp Şekil 3.20 ile biten şekillerde 0,15 m uzunluğundaki savakta 5 debi durumu için su yüzü ölçümleri ile sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırılması ve hız dağılımlarının 2 boyutlu ve 3 boyutlu görünümü bulunmaktadır. Aşağıda Tablo 3.9’da deneysel veriler ile FLOW-3D analiz sonuçlarına göre su yüzü profilinin yükseklik değerleri verilmiştir.

Grafik üzerindeki uyumlu görünen su yüzü profili karşılaştırmasını fark olarak da belirlemek amacıyla denklem (3.1) kullanılarak farklar hesaplanmış ve sonuçlar Tablo3.10’da verilmiştir.

Tablo 3.10 incelendiğinde savak önünde ve savak üstünde farkların %5’den küçük değerler aldığı, savak sonrası ise farkların arttığı görülmektedir. Savak sonunda serbest düşme ve karmaşık akım yapısı nedeniyle deneysel ölçümler hesap sonuçlarından bir miktar farklı olmaktadır. Bu bölümdeki ölçüm ve hesap değerlerine ait ortalama farklarda %12,1-%32,8 arasında değişmektedir. Kanal boyunca su yüzü profillerine ait bu farkların ortalama değerleri de %7,9-%19,0 arasında değişmektedir. Tüm debiler için farkların ortalaması incelendiğinde savak öncesi %3,9, savak üstü %1,6, savak sonu %24,5, tüm kanal boyunca 5 farklı debiye ait ortalama farklar %14,6 olarak belirlenmiştir.

Tablo 3.9. 0,15 m Uzunluğundaki Savakta Su Yüzü Ölçümlerinin Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçları

Q= 6,33 l/s			Q=12,30 l/s		Q=19,16 l/s		Q=24,32 l/s		Q=30,18 l/s	
x(m)	H _{ölçüm} (m)	H _{Flow3D} (m)	H _{ölçüm} (m)	H _{Flow3D} (m)	H _{ölçüm} (m)	H _{Flow3D} (m)	H _{ölçüm} (m)	H _{Flow3D} (m)	H _{ölçüm} (m)	H _{Flow3D} (m)
3,50	0,125	0,133	0,140	0,152	0,154	0,161	0,165	0,173	0,171	0,181
4,00	0,125	0,132	0,143	0,152	0,158	0,170	0,168	0,180	0,177	0,193
4,50	0,128	0,134	0,146	0,153	0,161	0,170	0,173	0,180	0,181	0,191
4,60	0,128	0,134	0,146	0,153	0,161	0,170	0,173	0,180	0,185	0,191
4,70	0,128	0,134	0,146	0,153	0,161	0,171	0,173	0,180	0,185	0,191
4,80	0,130	0,135	0,146	0,154	0,161	0,171	0,173	0,180	0,185	0,191
4,90	0,130	0,135	0,146	0,154	0,161	0,171	0,173	0,181	0,185	0,191
5,00	0,135	0,135	0,151	0,153	0,166	0,171	0,176	0,181	0,185	0,192
5,10	0,135	0,135	0,151	0,154	0,166	0,171	0,176	0,181	0,185	0,192

Tablo 3.9'un devamı

Q= 6,33 l/s			Q=12,30 l/s		Q=19,16 l/s		Q=24,32 l/s		Q=30,18 l/s	
x(m)	H _{ölçüm} (m)	H _{Flow3D} (m)	H _{ölçüm} (m)	H _{Flow3D} (m)	H _{ölçüm} (m)	H _{Flow3D} (m)	H _{ölçüm} (m)	H _{Flow3D} (m)	H _{ölçüm} (m)	H _{Flow3D} (m)
5,20	0,135	0,135	0,151	0,154	0,166	0,171	0,176	0,181	0,185	0,192
5,30	0,135	0,135	0,151	0,154	0,166	0,171	0,176	0,181	0,185	0,192
5,40	0,135	0,135	0,151	0,154	0,166	0,171	0,176	0,180	0,185	0,191
5,50	0,130	0,133	0,149	0,150	0,160	0,165	0,172	0,174	0,185	0,184
5,55	0,125	0,125	0,140	0,140	0,153	0,156	0,166	0,164	0,169	0,174
5,60	0,120	0,121	0,130	0,132	0,143	0,145	0,154	0,152	0,160	0,161
5,65	0,116	0,115	0,128	0,122	0,136	0,132	0,140	0,137	0,150	0,145
5,70	0,082	0,034	0,088	0,020	0,094	0,101	0,115	0,111	0,099	0,120
5,75	0,017	0,021	0,044	0,020	0,040	0,051	0,056	0,062	0,045	0,072
5,80	0,010	0,014	0,027	0,023	0,023	0,031	0,039	0,036	0,032	0,041
5,85	0,010	0,012	0,016	0,019	0,020	0,026	0,028	0,032	0,032	0,036
5,90	0,010	0,010	0,016	0,019	0,020	0,023	0,028	0,031	0,032	0,035
5,95	0,010	0,011	0,016	0,019	0,020	0,022	0,028	0,029	0,032	0,035
6,00	0,010	0,011	0,016	0,017	0,020	0,022	0,028	0,028	0,032	0,037
6,05	0,010	0,012	0,016	0,019	0,020	0,024	0,028	0,028	0,032	0,037
6,10	0,010	0,011	0,016	0,020	0,020	0,031	0,028	0,030	0,032	0,037
6,20	0,010	0,010	0,016	0,026	0,020	0,033	0,028	0,032	0,032	0,036
6,30	0,010	0,011	0,016	0,019	0,020	0,025	0,028	0,032	0,032	0,035
6,40	0,010	0,011	0,016	0,021	0,020	0,023	0,028	0,030	0,032	0,035
6,50	0,010	0,014	0,016	0,023	0,020	0,025	0,028	0,031	0,032	0,035
6,60	0,010	0,016	0,016	0,025	0,020	0,031	0,028	0,035	0,032	0,038
6,70	0,010	0,014	0,016	0,015	0,020	0,031	0,028	0,038	0,032	0,041
6,80	0,010	0,015	0,016	0,019	0,020	0,027	0,028	0,035	0,032	0,041
6,90	0,010	0,015	0,016	0,027	0,020	0,026	0,028	0,032	0,032	0,038
7,00	0,010	0,014	0,016	0,022	0,020	0,029	0,028	0,031	0,032	0,037

Tablo 3.10. 0,15 m Uzunluğundaki Savakta Ölçüm ve Sayısal Analiz Su Yüzü Değerlerin Farkları

x(m)	ε (%)				
3,50	6,5	8,8	4,8	5,0	6,1
4,00	6,0	6,2	7,6	7,2	9,2
4,50	4,7	4,6	5,8	4,1	5,7
4,60	4,8	4,8	5,8	4,0	3,4
4,70	5,0	5,0	5,9	4,1	3,4
4,80	3,5	5,2	6,0	4,3	3,4
4,90	3,7	5,2	6,1	4,4	3,5
5,00	0,1	1,6	2,9	2,6	3,6
5,10	0,2	1,7	3,0	2,7	3,8
5,20	0,2	1,7	3,1	2,8	3,8
5,30	0,1	1,8	3,1	2,7	3,7
5,40	0,1	1,7	2,8	2,3	3,0
5,50	2,2	0,7	3,3	1,1	0,7
5,55	0,2	0,1	1,8	0,9	2,9
5,60	0,7	1,5	1,1	1,4	0,3
5,65	0,9	4,8	2,6	2,0	3,5
5,70	58,9	76,9	7,5	3,8	21,6
5,75	21,2	55,5	27,7	10,7	60,2
5,80	44,2	13,1	36,0	7,5	29,4
5,85	15,9	20,4	31,9	15,2	13,5
5,90	4,8	17,6	15,8	9,4	10,3
5,95	6,8	16,2	7,7	3,3	10,5
6,00	14,5	9,1	8,4	1,0	14,1
6,05	17,7	17,6	21,0	1,0	15,5
6,10	11,2	24,6	55,2	7,5	14,9
6,15	1,1	61,7	63,1	15,9	11,3
6,20	11,6	21,0	22,6	15,0	8,2
6,25	14,6	29,5	14,4	7,5	8,3
6,30	44,6	40,9	23,9	9,9	10,9
6,35	58,8	57,9	55,9	24,0	19,7
6,40	42,9	3,2	55,9	36,5	29,3
6,45	49,1	18,7	33,3	24,0	27,6
6,50	47,3	71,3	30,9	12,6	17,4
6,60	37,6	35,8	44,0	12,1	14,5
Ortalama					Gen. Ort
Savak Önü	2,9	4,0	4,7	3,8	4,4
Savak Üstü	1,0	1,8	2,2	1,4	1,8
Savak Sonu	27,9	32,8	30,8	12,1	18,7
Gen. Ort.	15,9	19,0	18,3	7,9	11,7

Çalışmada dört farklı başlığın her birinde beş debi için ölçüm ve analiz yapılmış olup toplam yirmi adet sonuç karşılaştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde hesaplanan su yüzü profillerinin ölçülen su yüzü profilleri ile oldukça uyumlu olduğu grafiklerde

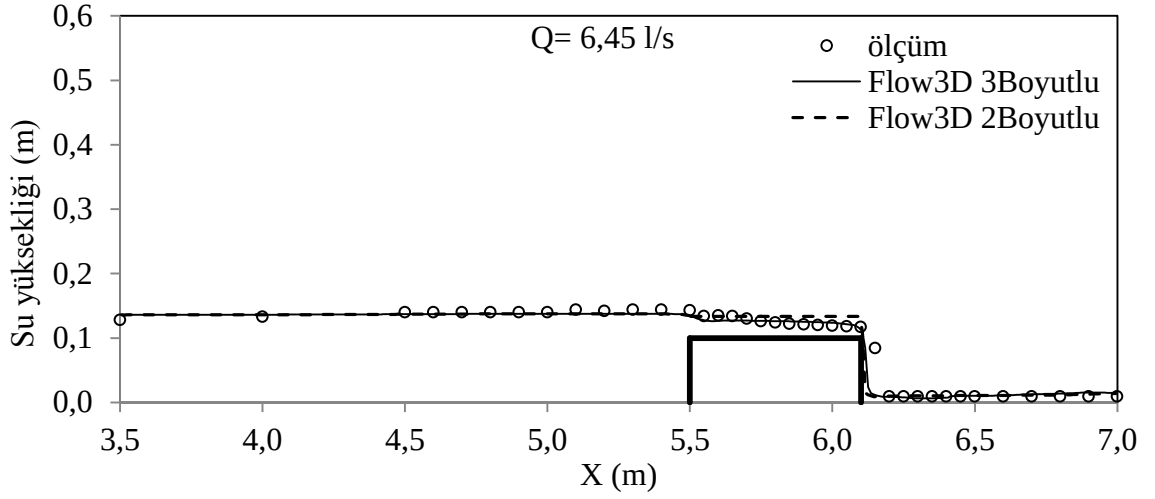
görülmektedir. Farklara bakıldığında tüm savak geometrileri için savak önü ve savak üstünde sayısal sonuçlar ile deneysel verilerin çok uyumlu olduğu, farkların %5 in altında kaldığı görülmektedir. Savak sonunda ise %8-%35 aralığında değişen farklar görülmektedir. Savak sonunda serbest düşme ve karmaşık akım yapısı nedeniyle deneysel ölçümler hesap sonuçlarından bir miktar farklı olmaktadır. Bu durum savak sonrası farkların artmasına neden olmuştur.

Tablo 3.11’de ele alınan tüm savaklar için; savak önü, savak üstü, savak sonrası ve tüm kesit boyunca deneysel su yüzü ölçümleri ile sayısal analiz sonuçları arasındaki farklar toplu olarak gösterilmiştir. Bu tablo incelendiğinde savak öncesi en düşük fark 0,6 m uzunluğundaki savakta görülmüştür. Savak üstü farklar 0,2, 0,3, 0,15 m uzunluğundaki savaklarda 0,6 m uzunluğundaki savağa göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. Savak sonu ölçümlerde en düşük fark 0,2 m uzunluğundaki savakta olmuştur. Kanal geneli farkların ortalaması dikkate alındığında ise 0,6 m uzunluğundaki savakta farklar en düşük çıkmıştır.

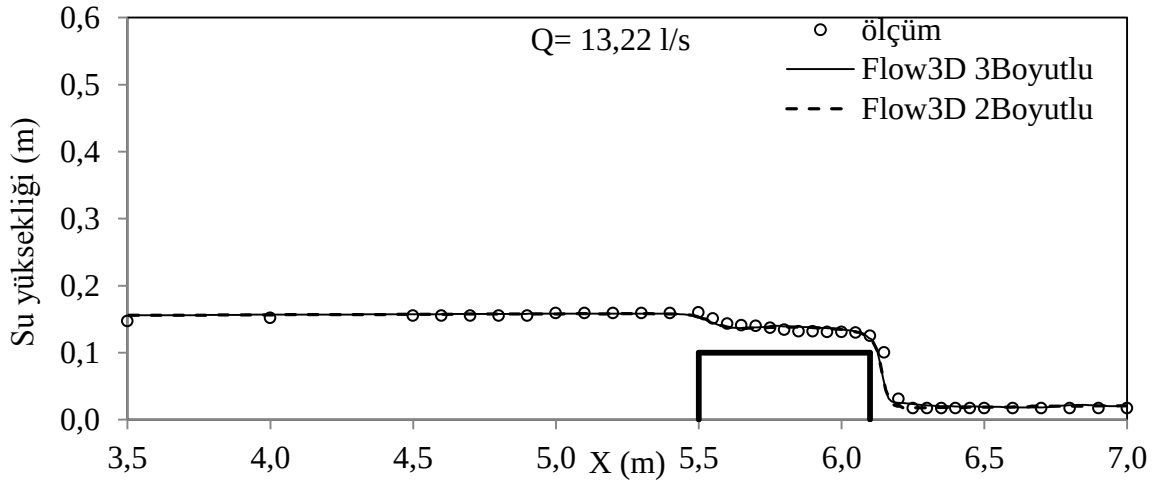
Tablo 3.11. Bütün Savaklar İçin Ölçüm ve Sayısal Analiz Su Yüzü Değerlerin Farkları

Savak Uzunluğu	ε (%)						
60 cm	Debi (l/s)	6,45	13,22	19,18	24,80	32,76	Gen. Ort.
	Savak Önü	3,0	1,7	1,8	1,6	1,9	2,0
	Savak Üstü	3,5	3,2	2,8	1,9	1,6	2,6
	Savak Sonu	34,7	21,0	17,0	22,5	16,9	22,4
	Gen. Ort.	14,0	8,8	7,3	8,9	7,0	9,2
30 cm	Debi (l/s)	6,41	12,90	18,82	23,90	30,12	Gen. Ort.
	Savak Önü	3,2	4,3	4,0	4,4	3,1	3,8
	Savak Üstü	3,6	1,5	1,1	1,0	1,0	1,6
	Savak Sonu	8,8	17,9	28,4	22,7	14,9	18,5
	Gen. Ort.	5,9	10,2	15,0	12,4	8,3	10,4
20 cm	Debi (l/s)	6,22	13,08	19,06	24,06	30,22	Gen. Ort.
	Savak Önü	8,6	4,5	3,6	3,5	5,6	5,2
	Savak Üstü	2,0	1,1	1,1	1,3	1,8	1,5
	Savak Sonu	15,0	11,0	15,7	17,2	15,4	14,9
	Gen. Ort.	10,8	7,3	9,3	10,0	9,9	9,5
15 cm	Debi (l/s)	6,33	12,30	19,60	24,32	30,18	Gen. Ort.
	Savak Önü	2,9	4,0	4,7	3,8	4,4	3,9
	Savak Üstü	1,0	1,8	2,2	1,4	1,8	1,6
	Savak Sonu	27,9	32,8	30,8	12,1	18,7	24,5
	Gen. Ort.	15,9	19,0	18,3	7,9	11,7	14,6

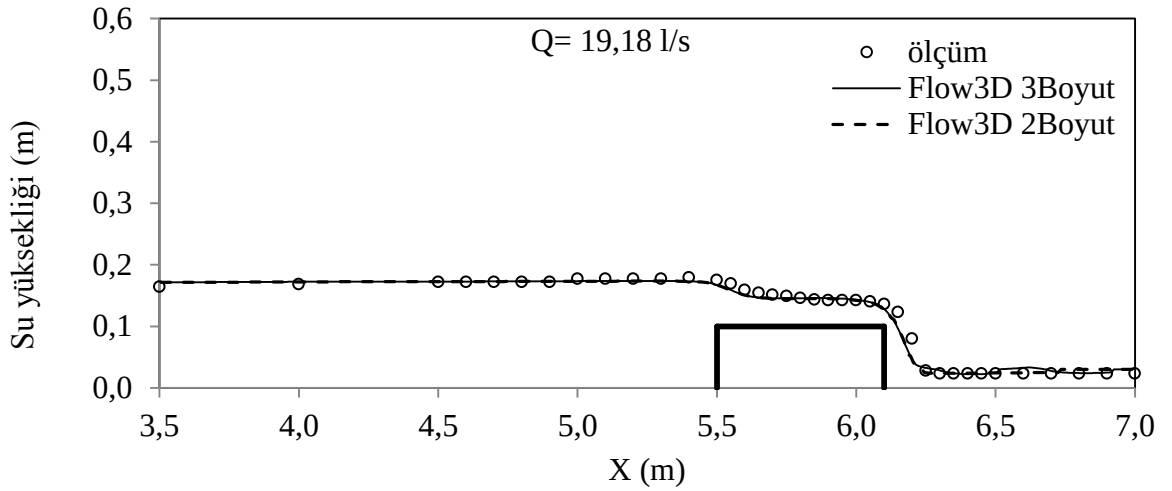
3.6. 0,6x0,6x0,1 m Ölçülerindeki Savakta 2D-3D Analiz İçin Su Yüzü Ölçümleri



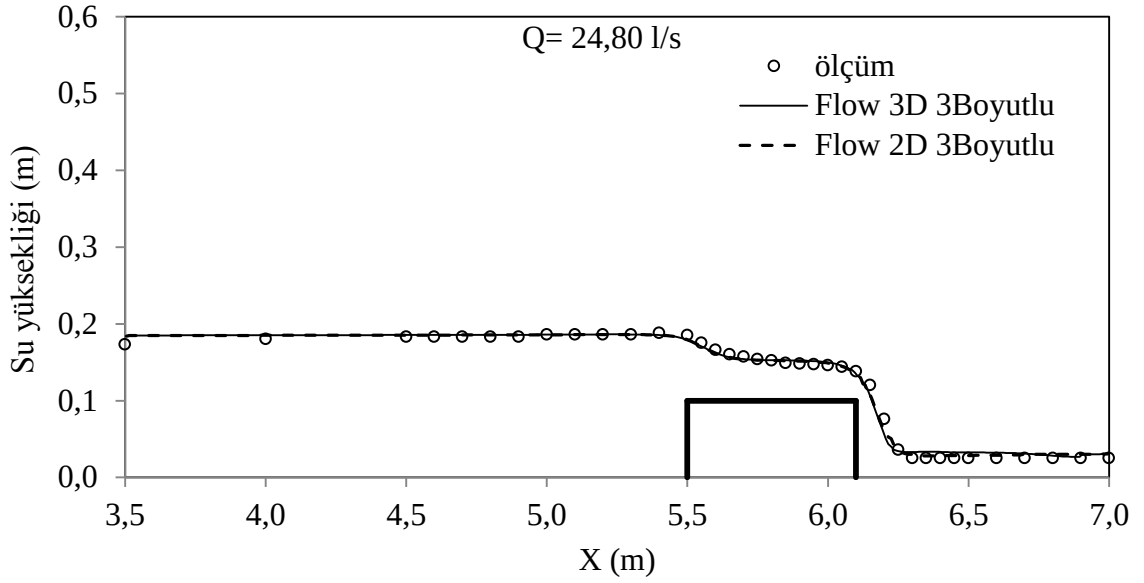
(a)



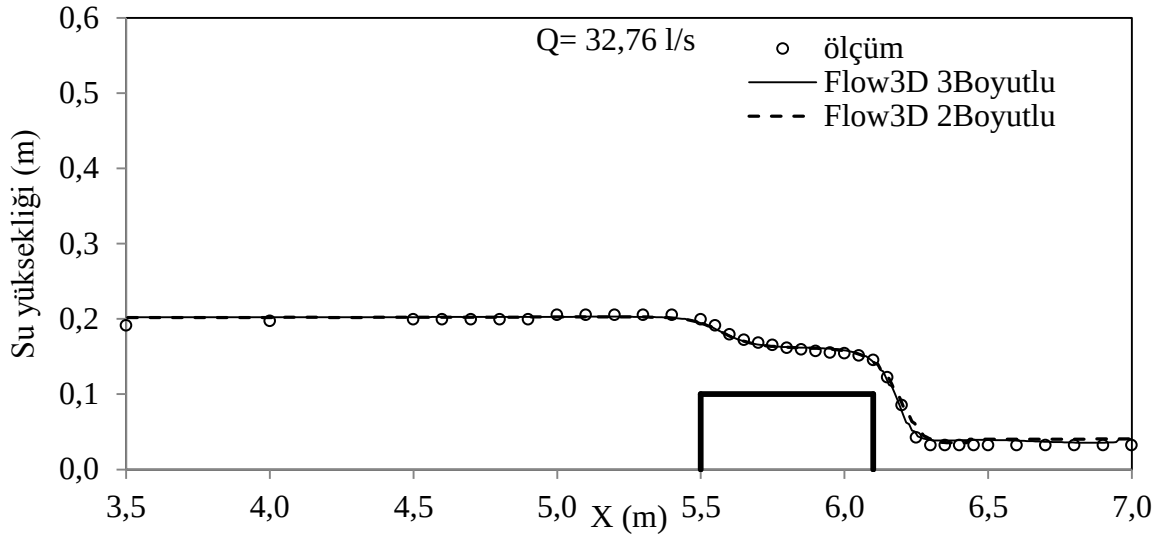
(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 3.21. (a) $Q=6,45 \text{ l/s}$ (b) $Q=13,22 \text{ l/s}$ (c) $Q=19,18 \text{ l/s}$ (d) $Q=24,80 \text{ l/s}$ (e) $Q=32,76 \text{ l/s}$ için 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Sayısal Çözüm Verileri ile Deneysel Su Yüzü Ölçümlerinin Karşılaştırılması

Şekil 3.21’de $0,6 \times 0,6 \times 0,1 \text{ m}$ ölçülerindeki savakta beş farklı debi için 2 boyutlu ve 3 boyutlu analiz sonuçları ile deneysel su yüzü ölçüm verilerinin karşılaştırılması grafiksel olarak görülmektedir. Tablo 3.12’de ise 2 boyutlu ve 3 boyutlu çözüm için su yüzü analiz sonuçları verilmiştir. Tablo 3.13’de ise analiz sonuçlarına ait fark oranları denklem (3.1) ile hesaplanarak tablo halinde verilmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde 2 boyutlu ve 3 boyutlu analiz sonuçlarının savak öncesi ve savak üstünde çok yakın olduğu farkların oldukça düşük olduğu görülmektedir. Savak öncesi genel fark %0,1, savak üstü ise %1,5 olmaktadır. Savak sonrası ise farklar artmakta ancak çok yüksek değerlere ulaşmamaktadır. Savak sonrası farkların ortalaması %11,7 olmaktadır. Genel olarak tüm kesitteki farklara bakıldığında ise kanal geneli farkların ortalamasının %4,6 olduğu görülmektedir.

Bu karşılaştırma dikkate alındığında su yüzü profilini elde etmek için 2 boyutlu analizin yeterli olduğu söylenebilir. Programın 2 boyutlu analiz süresi yaklaşık 2 dakika (tek bir debi savak için), 3 boyutlu analizde ise bu süre ortalama 45 dakika sürmektedir. Sonuç olarak su yüzü profilini elde etmek için 2 boyutlu analiz yapmanın hem doğru sonuç verdiği hem de programın çalışma süresi bakımından daha uygun olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak su yüzü profilini elde etmek için 2 boyutlu analiz yapmanın hem doğru sonuç verdiği hem de daha kısa sürdüğü gözlenmiştir.

Tablo 3.12. 0,6 m Uzunluğundaki Savakta Su Yüzü Ölçümlerinin 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Analiz Sonuçları

x(m)	Q= 6,45 l/s		Q=13,22 l/s		Q=19,18 l/s		Q=24,80 l/s		Q=32,76 l/s	
	3 Boyutlu	2 Boyutlu	3 Boyutlu	2 Boyutlu	3 Boyutlu	2 Boyutlu	3 Boyutlu	2 Boyutlu	3 Boyutlu	2 Boyutlu
	Flow3D	H _{Flow3D}	Flow3D	H _{Flow3D}	Flow3D	H _{Flow3D}	Flow3D	H _{Flow3D}	Flow3D (m)	H _{Flow3D}
3,50	0,136	0,136	0,156	0,156	0,172	0,172	0,184	0,184	0,202	0,202
4,00	0,136	0,136	0,157	0,157	0,172	0,172	0,185	0,185	0,202	0,202
4,50	0,137	0,137	0,157	0,157	0,173	0,173	0,186	0,185	0,202	0,202
4,60	0,137	0,137	0,158	0,157	0,173	0,173	0,186	0,185	0,203	0,202
4,70	0,137	0,137	0,158	0,158	0,173	0,173	0,186	0,186	0,202	0,202
4,80	0,138	0,137	0,158	0,158	0,173	0,173	0,186	0,186	0,203	0,202
4,90	0,138	0,138	0,158	0,158	0,173	0,173	0,186	0,186	0,203	0,202
5,00	0,138	0,138	0,158	0,158	0,173	0,173	0,186	0,186	0,203	0,203
5,10	0,138	0,138	0,158	0,158	0,174	0,173	0,186	0,186	0,203	0,203
5,20	0,138	0,138	0,158	0,158	0,174	0,174	0,186	0,186	0,203	0,203
5,30	0,138	0,137	0,158	0,158	0,174	0,174	0,186	0,186	0,203	0,203

Tablo 3.12'nin devamı

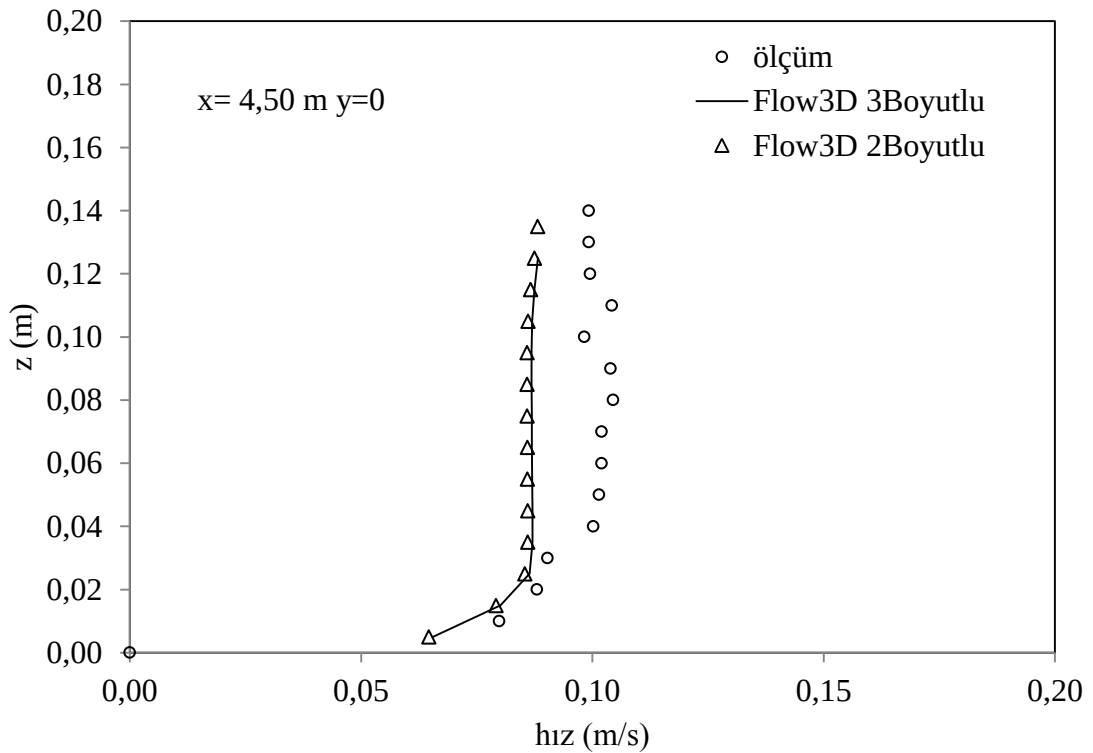
x(m)	Q= 6,45 l/s		Q=13,22 l/s		Q=19,18 l/s		Q=24,80 l/s		Q=32,76 l/s	
	3 Boyutlu Flow3D	2 Boyutlu H _{Flow3D}	3 Boyutlu Flow3D	2 Boyutlu H _{Flow3D}	3 Boyutlu Flow3D	2 Boyutlu H _{Flow3D}	3 Boyutlu Flow3D	2 Boyutlu H _{Flow3D}	3 Boyutlu Flow3D (m)	2 Boyutlu H _{Flow3D}
5,40	0,138	0,137	0,158	0,158	0,173	0,173	0,186	0,185	0,202	0,201
5,50	0,135	0,135	0,154	0,154	0,168	0,168	0,180	0,180	0,195	0,195
5,55	0,128	0,134	0,146	0,145	0,160	0,160	0,172	0,171	0,188	0,187
5,60	0,127	0,134	0,139	0,138	0,152	0,151	0,163	0,163	0,178	0,178
5,65	0,127	0,134	0,137	0,137	0,147	0,147	0,157	0,157	0,171	0,171
5,70	0,127	0,134	0,138	0,137	0,146	0,146	0,154	0,154	0,166	0,166
5,75	0,127	0,134	0,139	0,138	0,145	0,145	0,153	0,153	0,164	0,164
5,80	0,126	0,134	0,139	0,138	0,146	0,145	0,153	0,152	0,163	0,162
5,85	0,126	0,134	0,139	0,138	0,146	0,145	0,153	0,152	0,162	0,162
5,90	0,125	0,134	0,138	0,138	0,146	0,145	0,152	0,152	0,161	0,161
5,95	0,125	0,134	0,137	0,136	0,145	0,144	0,152	0,151	0,160	0,160
6,00	0,124	0,134	0,135	0,135	0,143	0,143	0,150	0,149	0,159	0,158
6,05	0,122	0,134	0,132	0,132	0,140	0,140	0,146	0,145	0,154	0,154
6,10	0,115	0,134	0,122	0,121	0,130	0,130	0,137	0,136	0,144	0,145
6,15	0,012	0,009	0,064	0,064	0,101	0,102	0,111	0,111	0,122	0,124
6,20	0,009	0,010	0,026	0,020	0,051	0,052	0,061	0,065	0,082	0,093
6,25	0,008	0,010	0,024	0,018	0,033	0,025	0,035	0,040	0,050	0,061
6,30	0,006	0,010	0,022	0,018	0,029	0,024	0,033	0,030	0,040	0,041
6,35	0,007	0,010	0,020	0,018	0,024	0,024	0,034	0,028	0,038	0,036
6,40	0,007	0,011	0,020	0,018	0,022	0,024	0,033	0,028	0,039	0,035
6,45	0,010	0,011	0,020	0,019	0,022	0,024	0,033	0,029	0,039	0,040
6,50	0,010	0,011	0,019	0,019	0,024	0,024	0,033	0,029	0,039	0,040
6,60	0,011	0,011	0,019	0,019	0,032	0,025	0,032	0,029	0,038	0,040
6,70	0,013	0,011	0,018	0,020	0,028	0,025	0,031	0,030	0,037	0,040
6,80	0,014	0,012	0,022	0,020	0,024	0,030	0,029	0,030	0,036	0,040
6,90	0,015	0,013	0,021	0,021	0,025	0,030	0,027	0,030	0,036	0,040
7,00	0,015	0,014	0,021	0,021	0,031	0,030	0,031	0,030	0,041	0,040

Tablo 3.13. 0,6 m Uzunluğundaki Savakta 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Analiz Su Yüzü Farkları

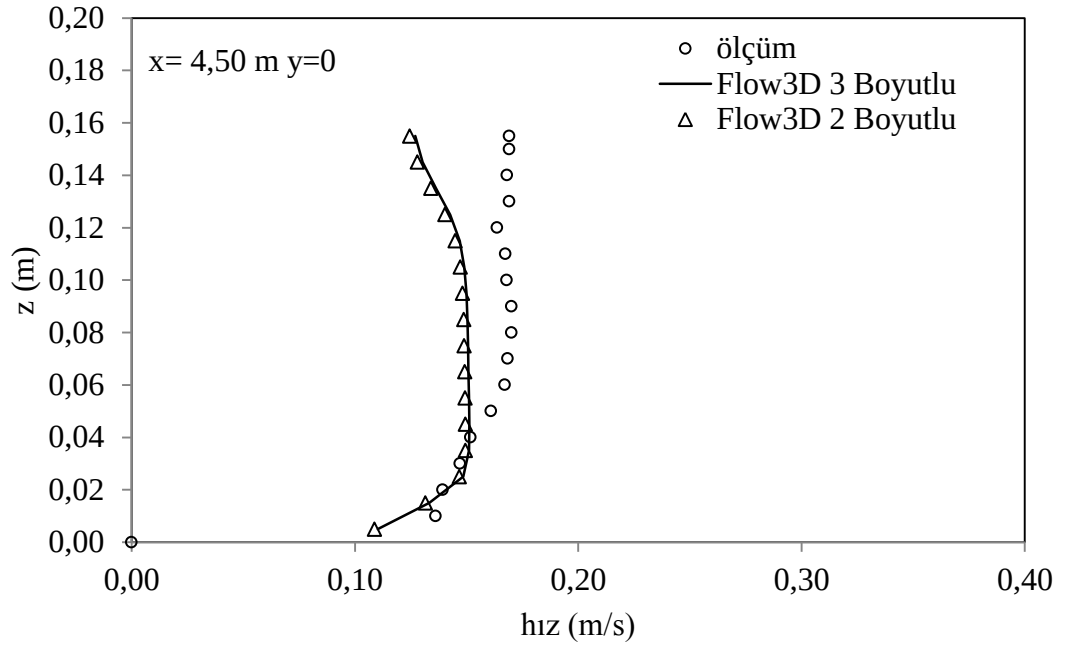
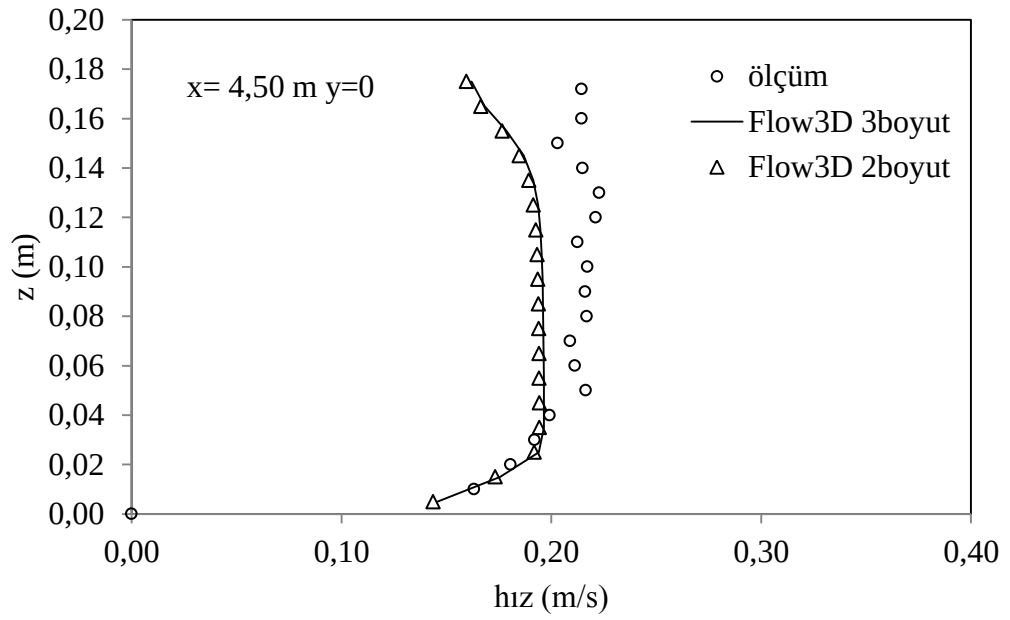
x(m)	ε (%)				
	Q= 6,45	Q=13,22	Q=19,18	Q=24,80	Q=32,76
3,50	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1
4,00	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
4,50	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
4,60	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
4,70	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1
4,80	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1
4,90	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
5,00	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
5,10	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
5,20	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
5,30	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1
5,40	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
5,50	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1
5,55	4,4	0,1	0,0	0,1	0,1
5,60	5,6	0,1	0,0	0,1	0,1
5,65	4,9	0,2	0,0	0,1	0,1
5,70	5,1	0,6	0,1	0,1	0,1
5,75	5,5	1,0	0,2	0,2	0,1
5,80	5,7	0,6	0,3	0,2	0,1
5,85	6,1	0,3	0,5	0,3	0,2
5,90	6,5	0,2	0,6	0,4	0,3
5,95	7,1	0,2	0,6	0,5	0,3
6,00	7,9	0,2	0,5	0,5	0,3
6,05	9,6	0,2	0,1	0,5	0,3
6,10	16,0	0,7	0,1	0,7	0,2
6,15	25,0	0,5	1,2	0,6	1,9
6,20	15,6	20,6	0,9	6,0	13,0
6,25	25,2	24,9	24,5	16,1	21,5
6,30	62,2	16,6	18,1	9,4	2,8
6,35	59,9	10,5	1,0	15,7	6,6
6,40	46,1	6,1	6,8	15,1	8,8
6,45	4,3	5,0	7,6	13,2	2,1
6,50	4,8	3,6	0,1	12,7	2,1
6,60	0,6	2,2	24,1	10,2	4,8
6,70	10,3	9,5	11,0	3,9	9,0
6,80	15,7	5,7	25,0	5,6	12,8
6,90	16,4	2,2	22,5	12,9	13,6
7,00	5,3	0,1	0,5	1,2	0,3
Ortalama					Gen. Ort.
Savak Önü	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Savak Üstü	6,5	0,3	0,2	0,3	1,5
Savak Sonu	22,4	8,3	11,0	9,4	11,7
Gen. Ort.	9,9	3,0	3,9	3,4	4,6

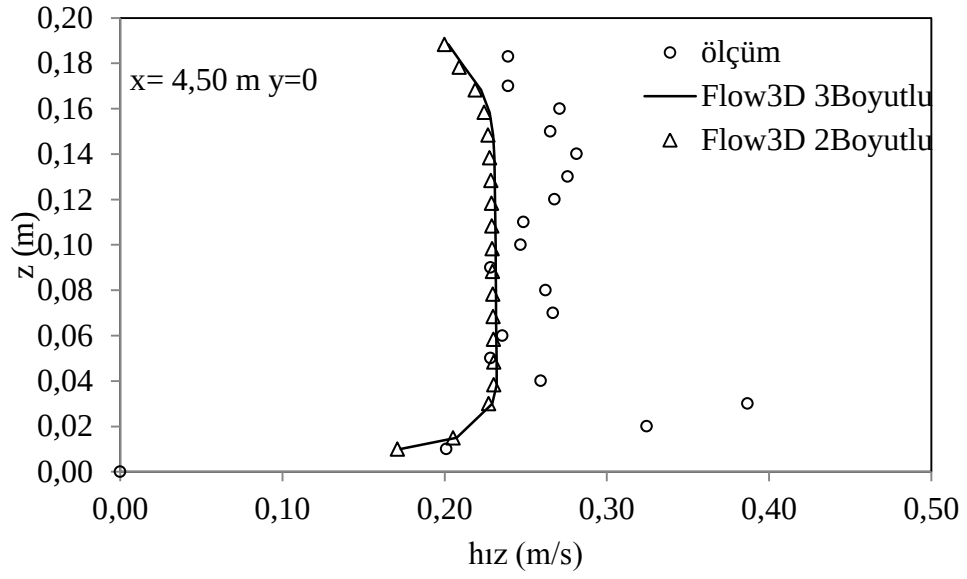
3.7. 0,6x0,6x0,1 m Ölçülerindeki Savakta 2D-3D Analiz İçin x=4,5m Hız Ölçümleri

Şekil 3.22 de 0,6x0,6x0,1 ölçülerindeki savakta beş farklı debi için 2 boyutlu ve 3 boyutlu analiz sonuçları ile deneysel hız profillerinin karşılaştırılması görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde 2 boyutlu ve 3 boyutlu analiz sonuçlarının çok yakın olduğu gözlemlenmektedir. Bu karşılaştırma dikkate alındığında hız profilini elde etmek için 2 boyutlu analizin yeterli olduğu söylenebilir. Programın 2 boyutlu analiz süresi yaklaşık 2 dakika (tek bir debi savak için), 3 boyutlu analizde ise bu süre ortalama 45 dakika sürmektedir. Sonuç olarak hız profilini elde etmek için 2 boyutlu analiz yapmanın hem doğru sonuç verdiği hem de programın çalışma süresi bakımından daha uygun olduğu belirlenmiştir. Hız profillerinin dağılımı incelendiğinde sayısal veriler ile ölçüm sonuçları arasındaki uyumun yüksek debiler için daha iyi olduğu görülmektedir.

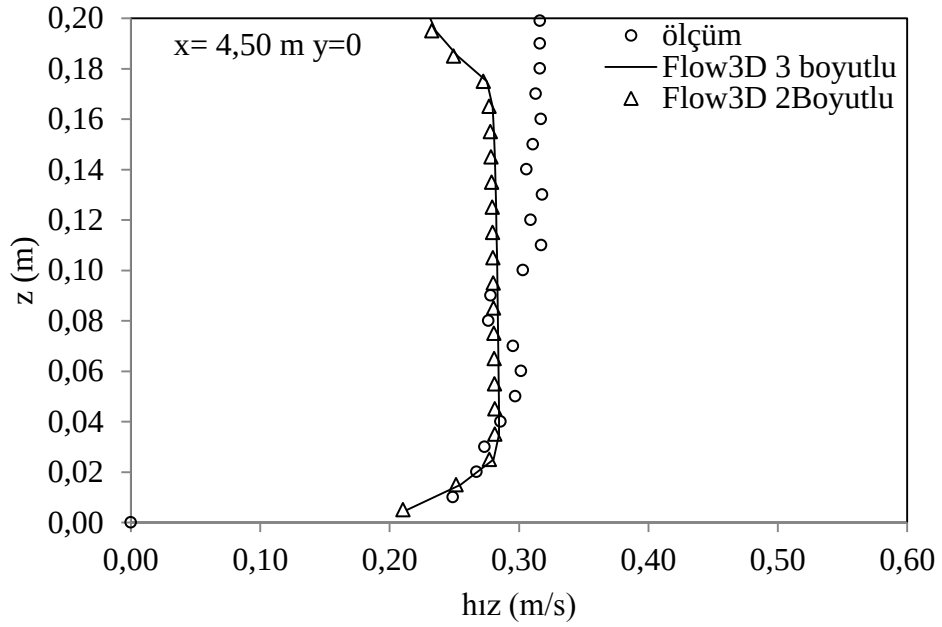


(a) $Q=6,45\text{ l/s}$

(b) $Q = 13,22 \text{ l/s}$ (c) $Q = 19,18 \text{ l/s}$



(d) $Q=24,80$ l/s

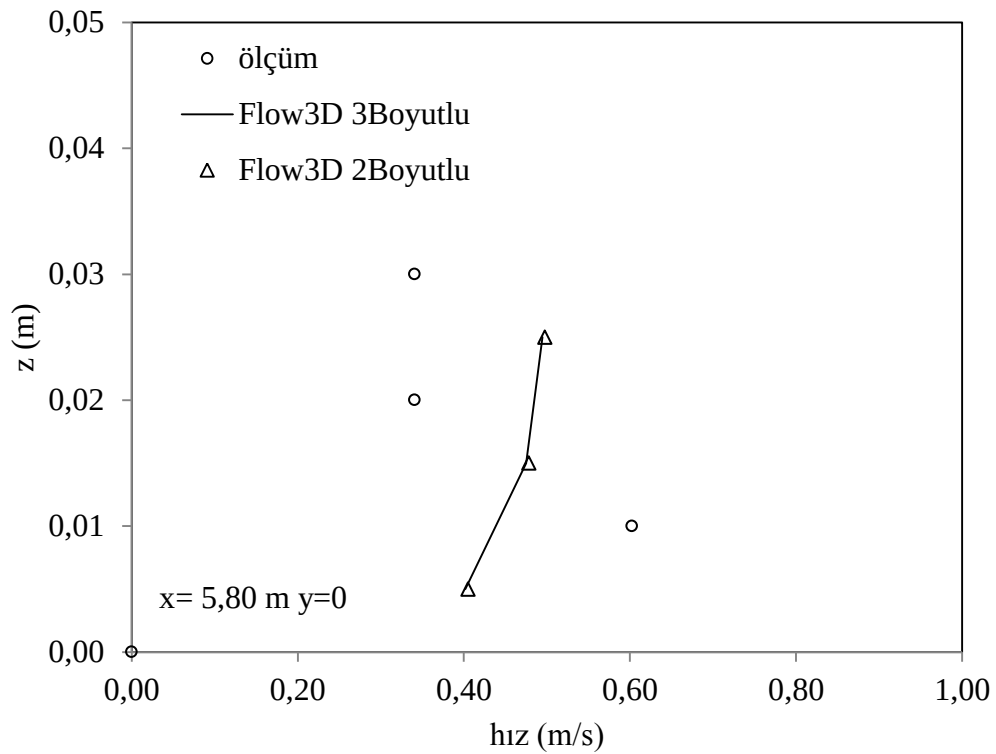


(e) $Q=32,76$ l/s

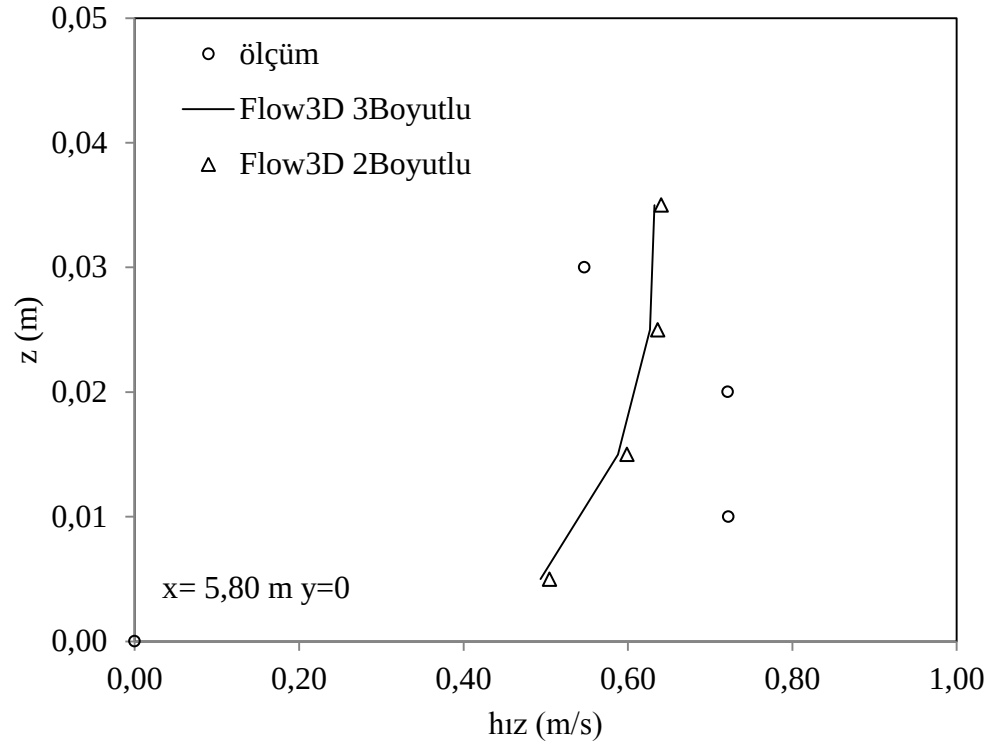
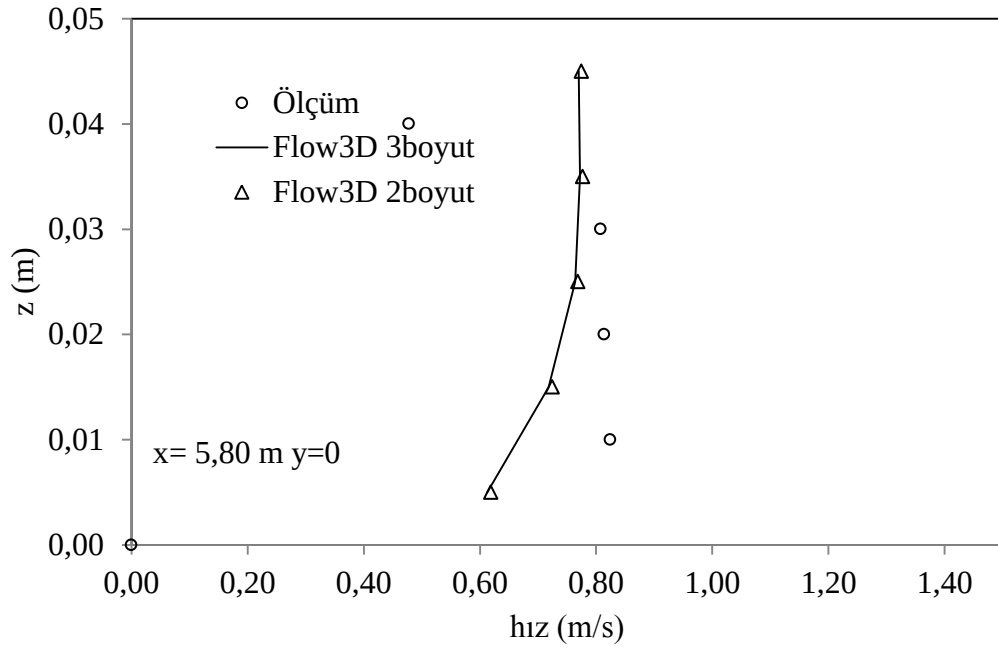
Şekil 3.22. $x=4,5$ m $y=0$ (orta nokta) da (a) $Q=6,45$ l/s (b) $Q=13,22$ l/s (c) $Q=19,18$ l/s (d) $Q=24,80$ l/s (e) $Q=32,76$ l/s için 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Sayısal Çözüm Verileri ile Deneysel Hız Profillerinin Karşılaştırılması

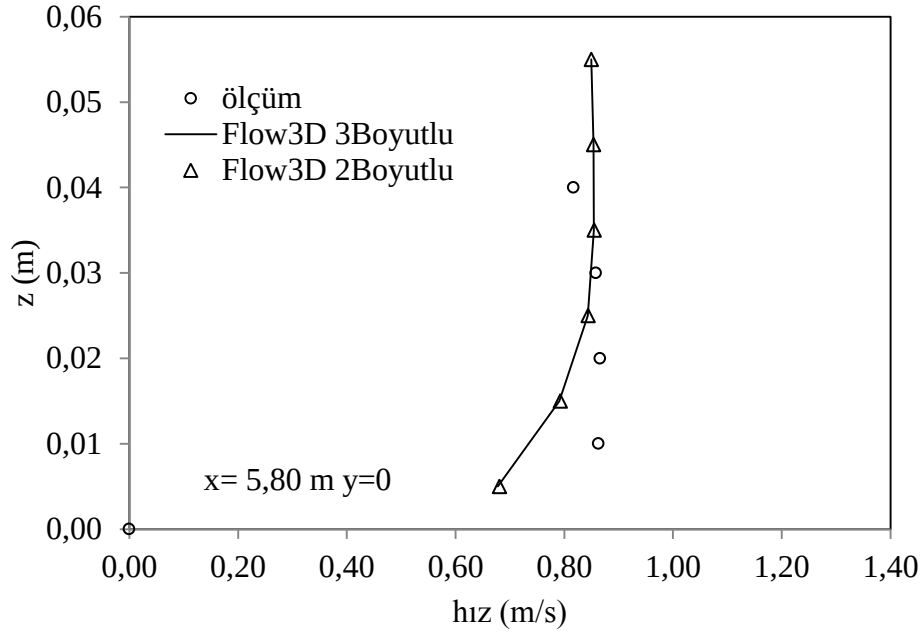
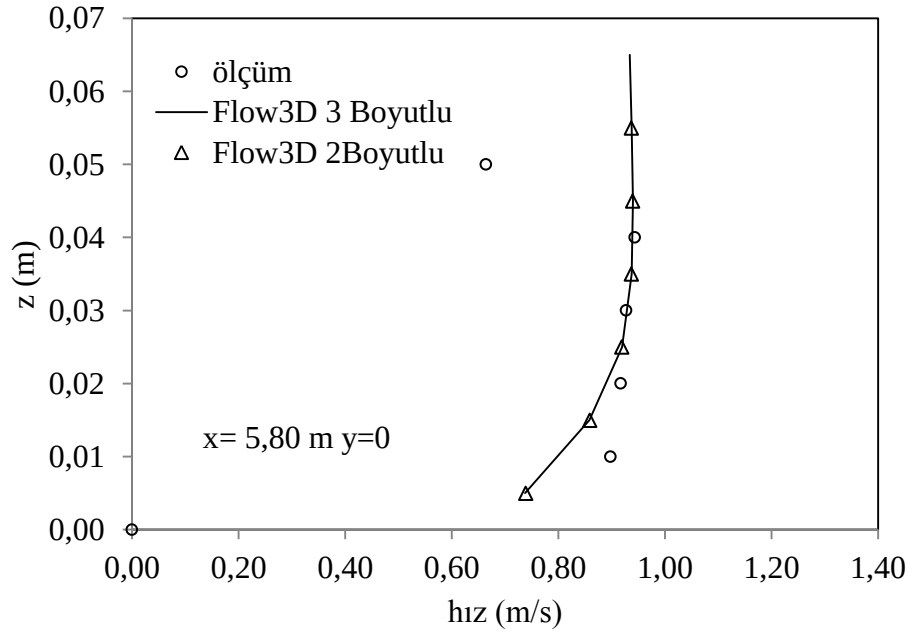
3.8. 0,6x0,6x0,1 m Ölçülerindeki Savakta 2D-3D Analiz İçin Savak Orta Noktası Hız Ölçümleri

Şekil 3.23’de 0,6x0,6x0,1 m ölçülerindeki savakta beş farklı debi için 2 boyutlu ve 3 boyutlu analiz sonuçları ile deneysel savak üstü orta noktada hız profillerinin karşılaştırılması görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde savak membaındaki ölçümlere benzer şekilde 2 boyutlu ve 3 boyutlu analiz sonuçlarının oldukça yakın olduğu gözlemlenmektedir. Bu karşılaştırma dikkate alındığında hız profilini elde etmek için 2 boyutlu analizin yeterli olduğu söylenebilir. Programın 2 boyutlu analiz süresi yaklaşık 2 dakika (tek bir debi savak için), 3 boyutlu analizde ise bu süre ortalama 45 dakika sürmektedir. Sonuç olarak hız profilini elde etmek için 2 boyutlu analiz yapmanın hem doğru sonuç verdiği hem de programın çalışma süresi bakımından daha uygun olduğu belirlenmiştir. Hız profillerinin dağılımı incelendiğinde sayısal veriler ile ölçüm sonuçları arasındaki uyumun yüksek debiler için daha iyi olduğu görülmektedir.



(a) Q=6,45 l/s

(b) $Q=13,22 \text{ l/s}$ (c) $Q=19,18 \text{ l/s}$

(d) $Q=24,80 \text{ l/s}$ (e) $Q=32,76 \text{ l/s}$

Şekil 3.23. $x=5,8 \text{ m } y=0$ (orta nokta) da (a) $Q=6,45 \text{ l/s}$ (b) $Q=13,22 \text{ l/s}$ (c) $Q=19,18 \text{ l/s}$ (d) $Q=24,80 \text{ l/s}$ (e) $Q=32,76 \text{ l/s}$ için 2 Boyutlu ve 3 Boyutlu Sayısal Çözüm Verileri ile Deneysel Hız Profillerinin Karşılaştırılması

3.9. 0,6x0,6x0,1 m Ölçülerindeki Savakta Q=32,76 l/s için x=4,5m Hız Ölçümleri

Tablo 3.14 de x=4,5 m’de yapılan deneysel hız ölçümleri verilmiştir. Tablo 3.15’de ise FLOW-3D analiz sonuçlarından elde edilen hız değerleri gösterilmiştir. Ölçüm sonuçları ile sayısal verilerin farkı denklem (3.2) yardımı ile hesaplanarak Tablo 3.16’da verilmiştir. Bu değerler arasındaki farklar incelendiğinde enkesit boyunca yatayda kanal orta kesitinde (y=0) ve kanal kenarında (y=25cm), biraz fazla olduğu belirlenmiştir. Derinlik boyunca yapılan ölçümlerde ise su yüzüne yakın bölgelerde farkların arttığı görülmüştür.

$$\varepsilon (\%) = \left| \frac{u_{ölçüm} - u_{FLOW-3D}}{u_{ölçüm}} \right| * 100 \quad (3.2)$$

Tablo 3.14. Q=32,76 l/s x=4,5 m’de Ölçülmüş Hız Değerleri

Z (m)	u(m/s)					
	y=0cm	y=5	y=10	y=15	y=20	y=25
0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,01	0,249	0,234	0,214	0,217	0,220	0,202
0,02	0,267	0,237	0,242	0,243	0,233	0,216
0,03	0,274	0,247	0,237	0,240	0,244	0,229
0,04	0,286	0,264	0,258	0,259	0,266	0,234
0,05	0,297	0,281	0,262	0,258	0,258	0,234
0,06	0,302	0,272	0,271	0,261	0,257	0,256
0,07	0,295	0,282	0,269	0,254	0,256	0,245
0,08	0,277	0,289	0,277	0,267	0,272	0,258
0,09	0,278	0,290	0,278	0,276	0,267	0,255
0,10	0,303	0,291	0,283	0,269	0,276	0,258
0,11	0,317	0,292	0,275	0,270	0,268	0,261
0,12	0,309	0,287	0,281	0,275	0,268	0,258
0,13	0,318	0,300	0,281	0,275	0,274	0,265
0,14	0,306	0,295	0,282	0,273	0,271	0,268
0,15	0,311	0,296	0,285	0,280	0,271	0,259
0,16	0,317	0,306	0,287	0,280	0,266	0,252
0,17	0,313	0,302	0,296	0,286	0,262	0,242
0,18	0,316	0,301	0,284	0,276	0,270	0,241
0,19	0,316	0,301	0,284	0,276	0,270	0,241
0,20	0,316	0,301	0,284	0,276	0,270	0,241

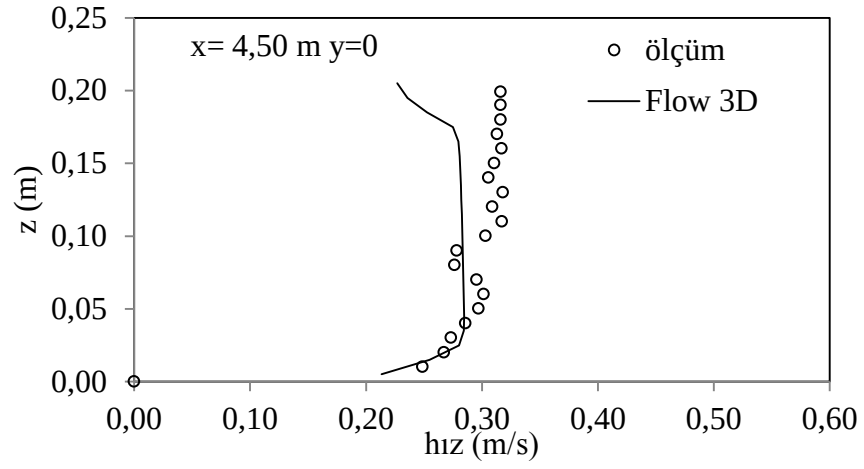
Tablo 3.15. Q=32,76 l/s x=4,5 m FLOW-3D Hız Verileri

Z (m)	u(m/s)					
	y=0cm	y=5	y=10	y=15	y=20	y=25
0,01	0,213	0,213	0,213	0,214	0,214	0,214
0,02	0,255	0,255	0,255	0,255	0,255	0,256
0,03	0,280	0,280	0,280	0,281	0,281	0,281
0,04	0,284	0,284	0,285	0,285	0,285	0,285
0,05	0,285	0,285	0,285	0,285	0,285	0,285
0,06	0,284	0,284	0,284	0,284	0,285	0,285
0,07	0,284	0,284	0,284	0,284	0,284	0,285
0,08	0,284	0,284	0,284	0,284	0,284	0,285
0,09	0,284	0,284	0,284	0,284	0,284	0,284
0,10	0,283	0,283	0,283	0,283	0,284	0,284
0,11	0,283	0,283	0,283	0,283	0,283	0,284
0,12	0,283	0,283	0,283	0,283	0,283	0,284
0,13	0,282	0,282	0,282	0,282	0,283	0,283
0,14	0,282	0,282	0,282	0,282	0,282	0,283
0,15	0,281	0,281	0,281	0,281	0,282	0,282
0,16	0,281	0,281	0,281	0,281	0,281	0,281
0,17	0,280	0,280	0,280	0,280	0,280	0,280
0,18	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275	0,276
0,19	0,253	0,253	0,253	0,253	0,253	0,253
0,20	0,236	0,236	0,236	0,236	0,236	0,236
0,21	0,227	0,227	0,227	0,227	0,227	0,227

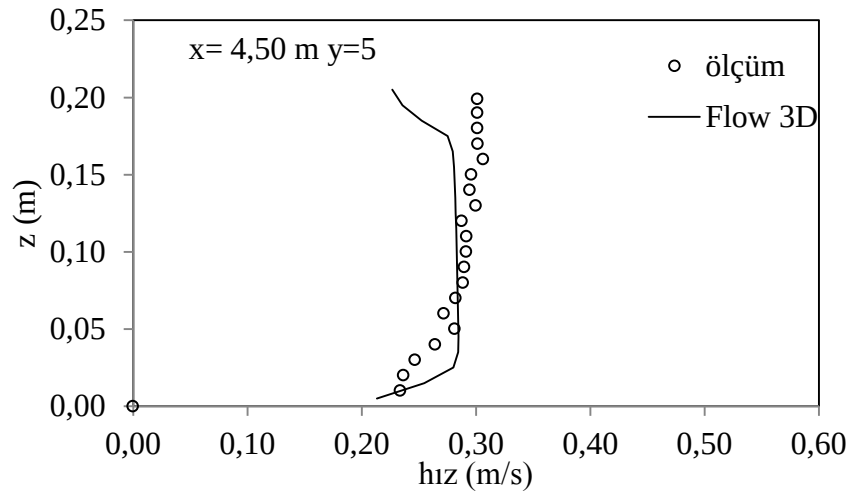
Tablo 3.16. Q=32,76 l/s x=4,5 m Deney-FLOW-3D Hız Değerlerinin Farkları

z (m)	ϵ (%)					
	y=0	y=5	y=10	y=15	y=20	y=25
0,01	14,30	8,73	0,45	1,42	3,00	5,88
0,02	4,68	7,64	5,34	4,86	9,55	18,34
0,03	2,46	13,62	18,30	17,01	14,97	22,95
0,04	0,54	7,60	10,22	9,75	7,27	21,95
0,05	4,26	1,08	8,69	10,20	10,62	21,85
0,06	5,75	4,50	4,91	8,86	10,63	11,46
0,07	3,86	0,64	5,50	12,06	11,07	16,10
0,08	2,62	1,70	2,38	6,24	4,67	10,30
0,09	1,88	2,21	1,92	2,98	6,53	11,70
0,10	6,56	2,81	0,03	5,45	2,97	10,09
0,11	10,83	3,07	2,91	4,76	5,72	8,82
0,12	8,57	1,68	0,52	2,74	5,59	9,73
0,13	11,26	5,88	0,38	2,79	3,06	6,71
0,14	7,86	4,36	0,05	3,29	4,13	5,45
0,15	9,51	4,94	1,27	0,53	3,84	8,88
0,16	11,49	8,40	2,36	0,37	5,51	11,83
0,17	10,72	7,32	5,67	2,27	6,90	15,74
0,18	13,06	8,75	3,23	0,22	1,99	14,66
0,19	20,17	16,21	11,14	8,37	6,32	5,25
0,20	25,48	21,79	17,05	14,47	12,58	1,91
ORTALAMA	8,79	6,65	5,12	5,93	6,85	11,98

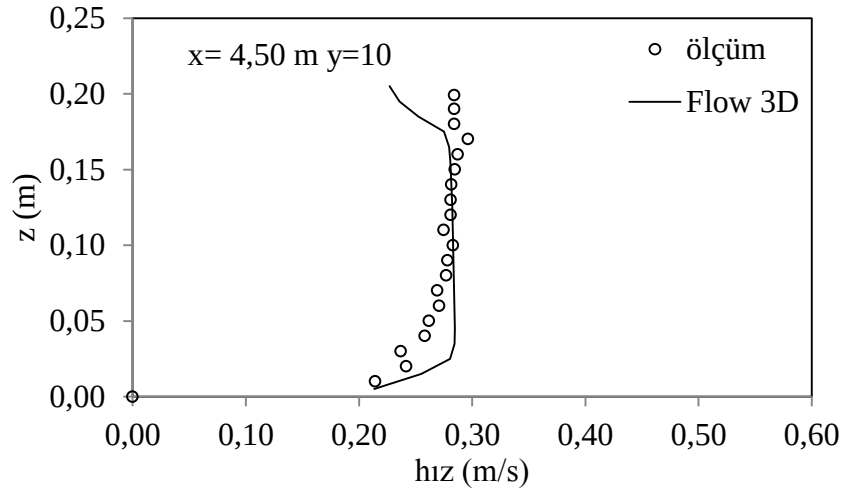
Aşağıda su yüzü profillerinin karşılaştırılması grafiksel olarak verilmiştir.



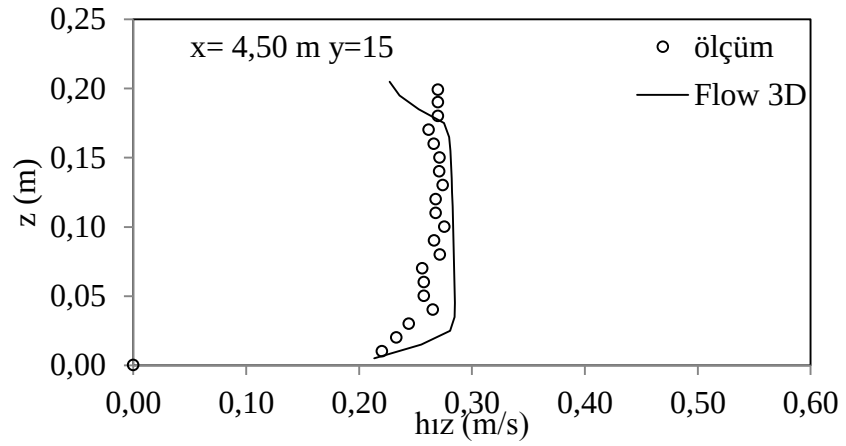
(a)



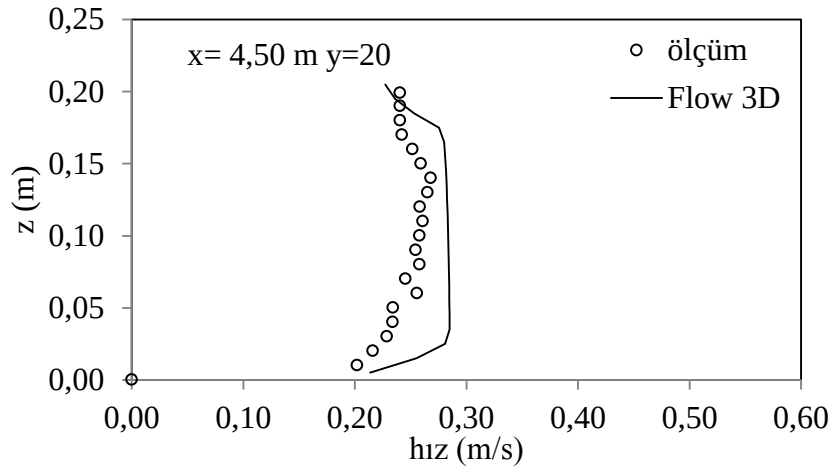
(b)



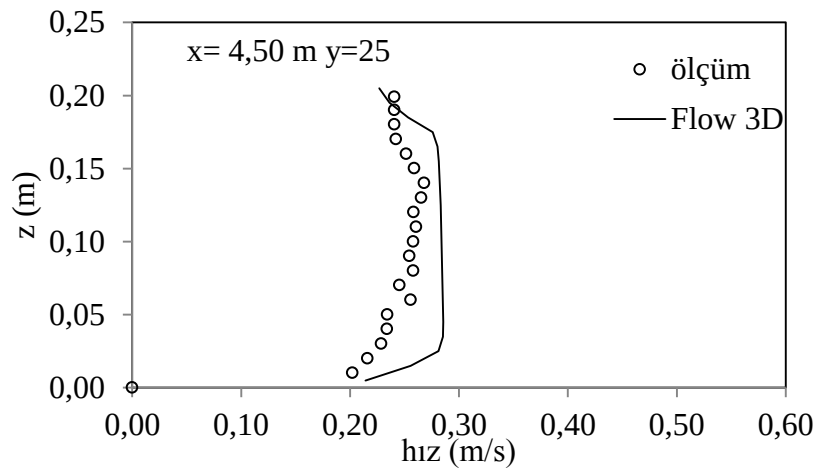
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 3.24. $Q=32,76\text{ l/s}$ $x=4,5\text{ m}$ Sayısal ve Deneysel Hız Profillerinin Karşılaştırılması

3.10. 0,6x0,6x0,1 m Ölçülerindeki Savakta Q=32,76 l/s için x=5,8 m Hız Ölçümleri

Tablo 3.17’de savak üstü orta noktasında (x=5,8m) yarı en kesit boyunca yapılan deneysel hız ölçümleri verilmiştir. Tablo 3.18 de ise FLOW-3D analiz sonuçlarından elde edilen hız değerleri gösterilmiştir. Ölçüm sonuçları ile sayısal verilerin farkı denklem (3.2) yardımı ile hesaplanarak Tablo 3.19’da verilmiştir. Farklar incelendiğinde düşey doğrultuda tabanda ve su yüzünde yaklaştıkça farkların arttığı görülmektedir. x=4,5 m sonuçlarına göre savak üstünde yapılan hız ölçümlerinin daha başarılı sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

Tablo 3.17. Q=32,76 l/s x=5,8 m Hız Okumaları

Z (m)	u(m/s)					
	y=0cm	y=5	y=10	y=15	y=20	y=25
0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,01	0,898	0,886	0,878	0,874	0,870	0,864
0,02	0,917	0,909	0,894	0,895	0,883	0,867
0,03	0,928	0,915	0,901	0,894	0,893	0,880
0,04	0,944	0,938	0,935	1,002	0,905	0,875
0,05	0,955	1,035	0,889	0,881	0,869	0,849

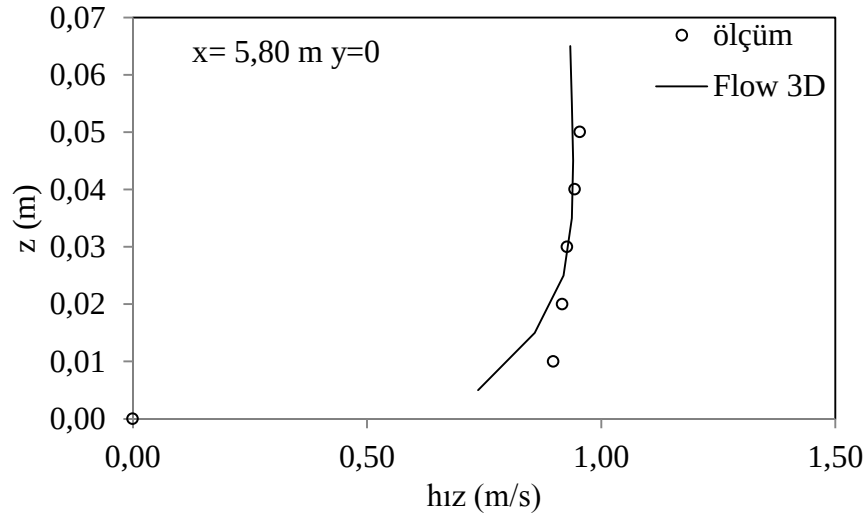
Tablo 3.18 Q=32,76 l/s x=5,8 m FLOW-3D Hız Verileri

Z (m)	u(m/s)					
	y=0cm	y=5	y=10	y=15	y=20	y=25
0,01	0,737	0,737	0,737	0,737	0,741	0,766
0,02	0,858	0,858	0,858	0,858	0,861	0,882
0,03	0,919	0,919	0,919	0,919	0,920	0,927
0,04	0,937	0,937	0,937	0,936	0,936	0,936
0,05	0,940	0,940	0,939	0,939	0,938	0,935
0,06	0,937	0,937	0,937	0,936	0,935	0,932
0,07	0,934	0,934	0,933	0,932	0,932	0,929

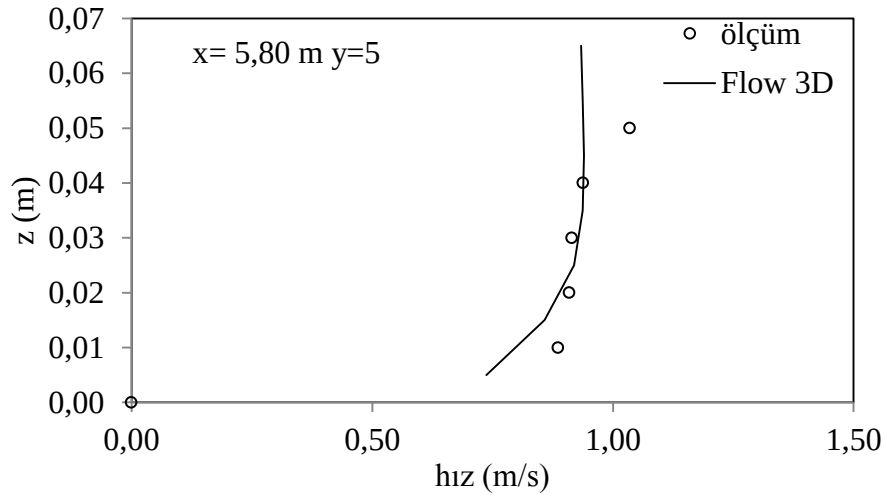
Tablo 3.19. Q=32,76 l/s x=5,8 m Deney-FLOW-3D Hız Değerlerinin Farkları

Z (m)	ε (%) Ölçüm FLOW-3D					
	y=0	y=5	y=10	y=15	y=20	y=25
0,01	17,92	16,80	16,11	15,66	14,81	11,34
0,02	6,46	5,63	4,06	4,18	2,45	1,64
0,03	0,89	0,47	1,93	2,78	2,96	5,32
0,04	0,69	0,12	0,21	6,57	3,37	6,91
0,05	1,59	9,25	5,65	6,53	7,91	10,17
ORTALAMA	5,51	6,45	5,59	7,15	6,30	7,07

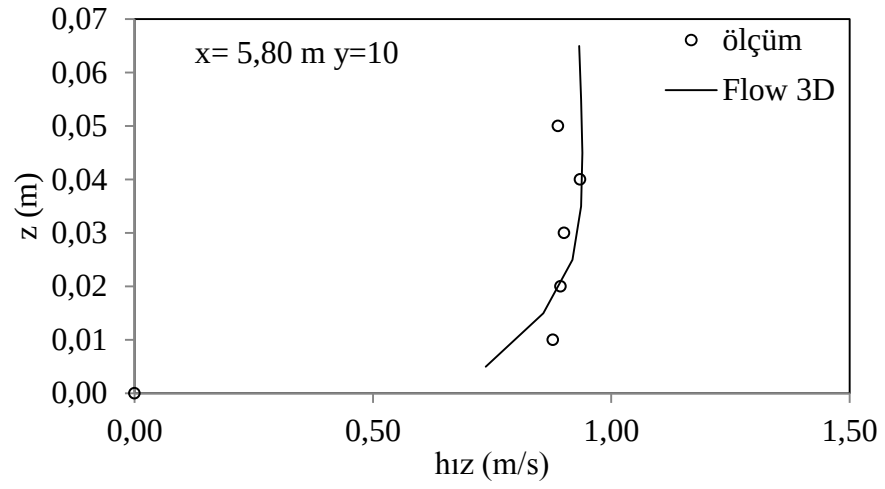
Şekil 3.23-24 de 0,6x0,6x0,1 m ölçülerindeki savakta $Q=32,76$ l/s debi için $x=4,5$ m (savaktan 1 m önce) ve $x=5,80$ m (savak üstü orta nokta) de sayısal analiz sonucu elde edilen hız değerleri ile deneysel hız ölçümleri grafiksel olarak karşılaştırılmıştır. Programdan elde edilen hız değerleri, ölçüm verileri ve fark oranları tablo olarak verilmiştir. Savak öncesi yapılan ölçümlerde sonuçlar karşılaştırıldığında bu değerler arasındaki farklar incelendiğinde enkesit boyunca yatayda kanal orta kesitinde ($y=0$) ve kanal kenarında ($y=25$ cm), biraz fazla olduğu belirlenmiştir. Derinlik boyunca yapılan ölçümlerde ise su yüzüne yakın bölgelerde farkların arttığı görülmüştür. Aynı savakta farklı debiler için yapılan 4 ölçümde ve diğer savak geometrilerinde yapılan ölçümlerde benzer sonuçlar gözlemlenmiştir.



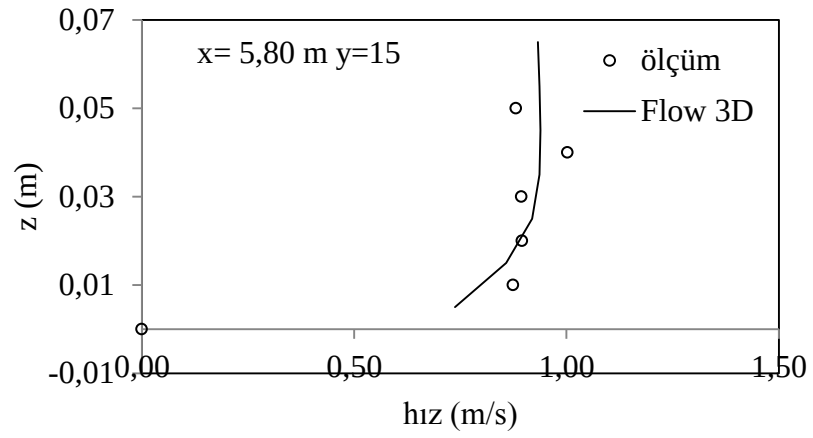
(a)



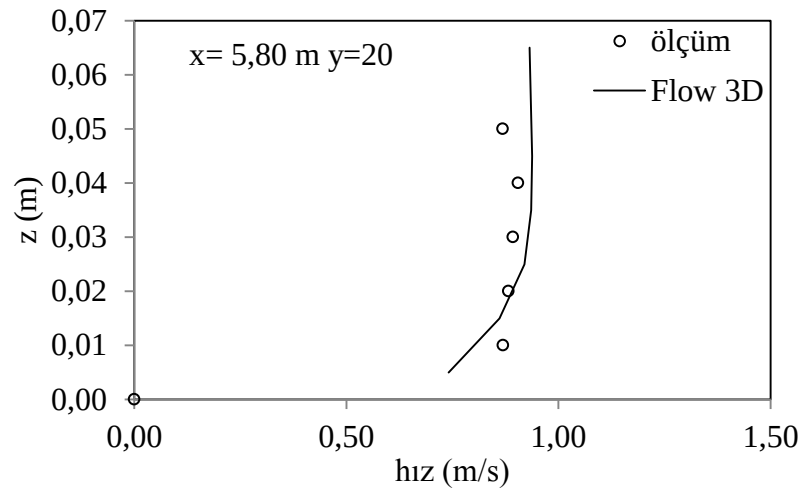
(b)



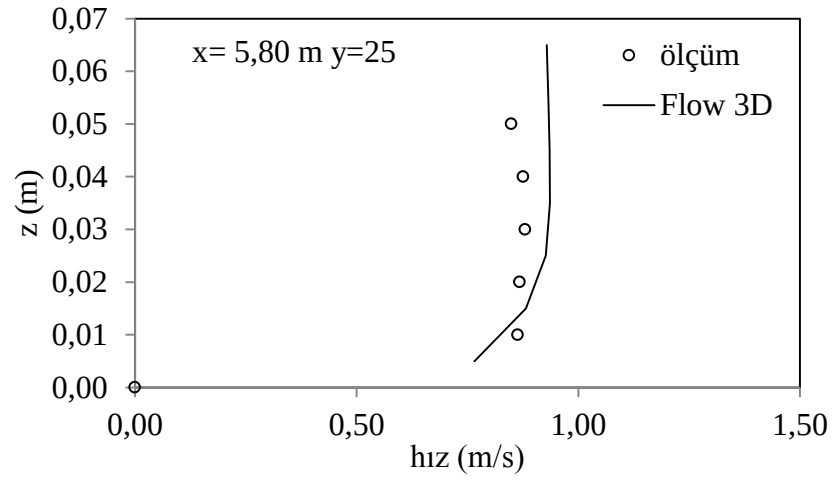
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 3.25. $Q=32,76$ l/s $x=5,8$ m Sayısal ve Deneysel Hız Profillerinin Karşılaştırılması

4. BÖLÜM

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

4.1. Sonuçlar ve Öneriler

Laboratuvar kanalında dört farklı geniş başlıklı savak ve her bir savak için beş farklı debi durumunda su yüzü profilleri, savak öncesi ve üstü hız dağılımları ölçülmüştür. Geniş başlıklı savak akımını idare eden temel denklemler, iki denklemlili $k-\varepsilon$ türbülans modeli kullanılarak, sonlu hacimler yöntemine dayalı FLOW-3D paket programı ile çözülmüştür. Serbest su yüzüne ait profiller akışkan hacimleri (VOF) yöntemi ile hesaplanmıştır. Yirmi farklı akım durumunda belirlenen deneysel veriler ile hesaplanan bulgular karşılaştırılmıştır.

Geniş başlıklı savaklarda düzgün akım profillerinin oluşması için belirtilen $0,07 \leq H/L \leq 0,5$ şartın ele alınan 20 farklı akım için sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmiştir. Ele alınan akım şartlarında hesaplanan H/L oranları incelendiğinde 0,6 m uzunluğundaki savakta çoğunlukla sağladığı diğer savaklar için $H/L > 0,5$ olmaktadır. 0,2 m ve 0,15 m ölçülerindeki savaklarda ise tüm ölçümler için $H/L > 0,5$ olduğu gözlenmiştir.

Su yüzü profillerinde FLOW-3D numerik sonuçları ile ölçümlerin tutarlılığını gözlemek amacıyla farklar hesaplanmıştır. 0,6 m uzunluğundaki savakta tüm debiler için ortalama fark değerleri savak öncesinde %2, savak üstünde %2,6, savak sonrası %22,4, tüm kanal boyunca beş farklı debiye ait ortalama fark ise %9,2 olarak belirlenmiştir. 0,3 m uzunluğundaki savakta tüm debiler için ortalama fark değerleri savak öncesinde %3,8, savak üstünde %1,6, savak sonrası %18,5, tüm kanal boyunca bu ortalama fark %10,4 olarak belirlenmiştir. 0,2 m uzunluğundaki savakta tüm debiler için ortalama fark değerleri savak öncesinde %5,2, savak üstünde %1,5, savak sonrası

%14,9, kanal genelinde ise %9,5 olarak hesaplanmıştır. 0,15 m uzunluğundaki savakta tüm debiler için ortalama fark değerleri savak öncesinde %3,9, savak üstünde %1,6, savak sonrası %24,5, tüm kanal boyunca %14,6 olmuştur. Bu değerler incelendiğinde savak öncesinde ve savak üstünde farkların yeterince küçük olduğu, savak sonrası ise hesaplanan ve ölçülen su yüzü profillerine ait farkların arttığı görülmüştür. Savak öncesi en düşük fark 0,6 m uzunluğundaki savakta görülmüştür. Savak üstü farklar 0,2, 0,3, 0,15 m uzunluğundaki savaklarda 0,6 m uzunluğundaki savağa göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. Savak sonu ölçümlerde en düşük fark 0,2 m uzunluğundaki savakta olmuştur. Kanal geneli farkların ortalaması dikkate alındığında ise 0,6 m uzunluğundaki savakta farklar en düşük çıkmıştır.

2 boyutlu ve 3 boyutlu analiz çözümlerinin farkını görebilmek için 0,6 m uzunluğundaki savakta 5 debi için 2 boyutlu ve 3 boyutlu analiz yapılmıştır. Tek debi için analiz süresi 2 boyutlu çözümde yaklaşık 2 dakika sürerken bu süre 3 boyutlu analizde 45 dakikaya kadar çıkmıştır. Ölçüm sonuçlarında su yüzü profili için sayısal verilerin farkları incelenmiş, tüm debiler için ortalama fark değerleri savak öncesinde %0,1, savak üstünde %1,5, savak sonrası %11,7 olarak belirlenmiştir. Kanal geneli fark ortalaması incelendiğinde ise bu değer %4,6 olduğu görülmüştür. Su yüzü profiline benzer durum elde edilen hız profilleri için de gözlemlenmiş, 2 boyutlu ve 3 boyutlu analiz sonucu elde edilen hız profilleri oldukça uyumlu çıkmıştır. Çözüm süresinin kısalığı ve sonuçların 3 boyutlu çözüm ile uyumlu çıkması göz önüne alındığında 2 boyutlu analizin geniş başlıklı savaklarda yeterli olduğu söylenebilir.

Savak önünde $x=4,5\text{m}$ 'de deneysel hız ölçümleri ile sayısal analizden elde edilen hız ölçümleri karşılaştırılmıştır. Bu değerler arasındaki farklar incelendiğinde enkesit boyunca yatayda kanal orta kesitinde ($y=0$) ve kanal kenarında ($y=25\text{cm}$), biraz fazla olduğu belirlenmiştir. Derinlik boyunca yapılan ölçümlerde ise su yüzüne yakın bölgelerde farkların arttığı görülmüştür. 0,6 m uzunluğundaki savağın membaında en yüksek debi ($Q=32.76\text{ lt/s}$) için alınan hız ölçümleri ile hesaplanan hız değerlerine ait ortalama farkları %7,6 olarak belirlenmiştir.

Savak üstü orta noktasında yarı en kesit boyunca yapılan hız ölçümleri incelendiğinde deneysel veriler ile sayısal hesaplama sonuçları savak öncesi $x=4,50\text{ m}$ 'de yapılan ölçümlere göre daha uyumlu olduğu görülmüştür. 0,6 m uzunluğundaki savakta en

yüksek debi için alınan tüm ölçümler ile elde edilen analiz sonuçlarının ortalama farkları %6,3 olarak belirlenmiştir. Savak üstünde yapılan ölçümlerde farkların tabanda ve su yüzünde arttığı gözlemlenmiştir.

Çalışmada 0,6 m, 0,3 m, 0,2 m ve 0,15 m olmak üzere dört farklı uzunlukta savak ile çalışılmıştır. Yaklaşık olarak aynı debi aralığında deney yapılmıştır. Aynı debilerdeki ölçümlere bakıldığında savak uzunluğu azaldıkça su yüksekliğinin azaldığı gözlenmiştir. Hız profilleri incelendiğinde aynı durumun hız değerleri içinde geçerli olduğu görülmüştür.

Hız ölçümleri için deney verilerinin sayısal analiz verilerinden farklılık gösterdiği göz önüne alındığında hız ölçümleri için daha hassas okuma yapan deney düzeneklerinin kullanılması ileride yapılacak çalışmalar için tavsiye edilir.

KAYNAKLAR

1. Şimşek, O., 2011. Eğrisel Geniş Başlıklı Savak Üzerinden Geçen Açık Kanal Akımının Deneysel Ve Teorik Analizi. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana, 109 s.
2. Bal, H., 2011. Geniş Başlıklı Savak İçeren Açık Kanal Akımının Sayısal Modellenmesi. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana, 99 s.
3. Soydan, N. G., Aköz, M. S. , Şimşek, O., Gümüş, V., 2012. Trapez Kesitli Geniş Başlıklı Savak Akımının k- ϵ Tabanlı Türbülans Modelleri ile Sayısal Modellenmesi. **Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi**, 27 (2), 47-58.
4. Kocaman, S., 2007. Baraj Yıkılması Problemlerinin Deneysel ve Teorik Olarak İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Adana, 286 s.
5. USBR, (2001). Water Measurement Manual 3rd edition, Water Resources Research Laboratory, Bureau of Reclamation, U. S. Department of the Interior.
6. Sümer, B. M., Ünsal, İ., Bayazıt, M., 1984. Hidrolik. Birsan Yayınevi. İstanbul. 325 s.
7. Bos M.G., 1989. Discharge Measurement Structure, 3rd edition, International Institute for Land Reclamation and Improvement/ILRI, Wageningen, Netherlands. 402 pp.
8. Doğan, Y., 2009. Savaklarda Kret Şeklinin Debi Katsayısına Etkisinin İncelenmesi. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ, 50 s.
9. Ramamurthy, S. A., Tim, U. S., Rao, M. V. J. 1987. Flow Over Sharp Crested Plate Weirs, **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Vol. 113.
10. Faltas, M.S., Hana, S.N., Abd-el-malek, M.B., 1989. Linearised Solution of a Free Surface Flow Over a Trapezodial Obstacle. **Acta Mechanica**, 78:

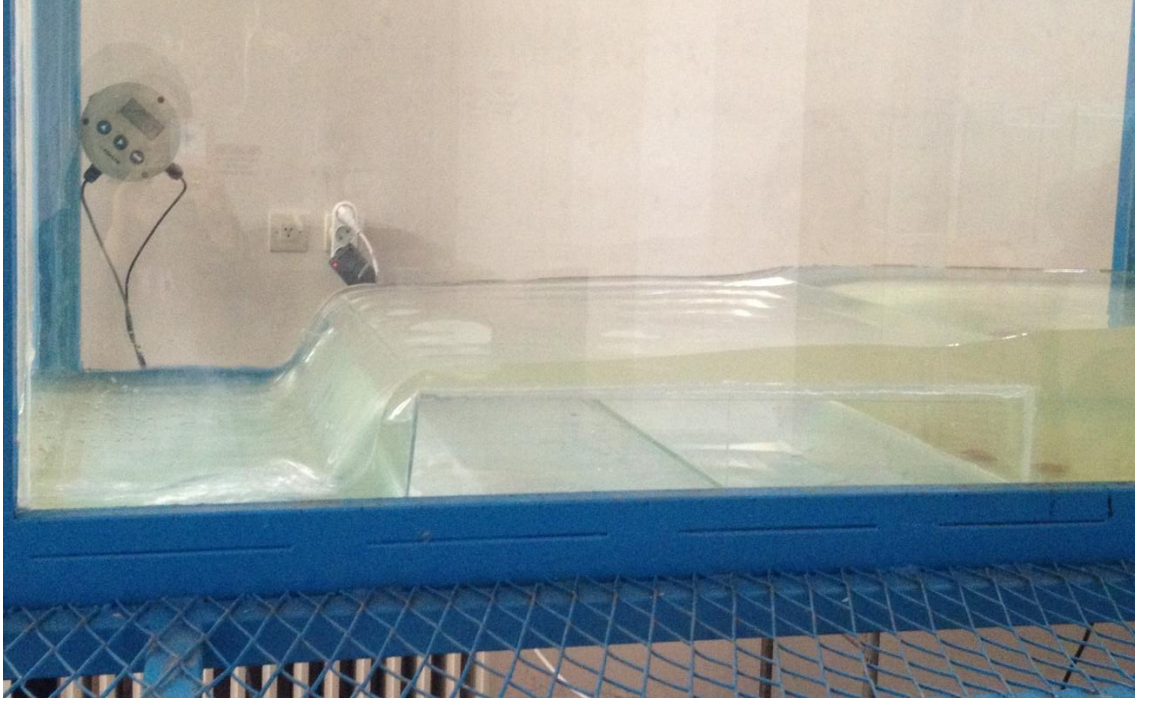
219-233.

11. Hager, Asce, M., W. H. ; Schwalt, M. ,1994. Broad Crested Weir, **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, pp, 43-85
12. Wen, X., Ingham D.B., Widodo, B., 1997. The Free Surface Fluid Flow Over a Step of an Arbitrary Shape in a Channel. **Engineering Analyses with Boundary Elements 19**: 299-308.
13. Montes, J.S., 1997. Irrotational Flow and Real Fluid Effects under Planar Sluice Gates. **Journal of Hydraulic Engineering**, 219.
14. Chanson, H., Montes, J. S., 1998. Overflow Characteristics Of Circular Crested Weirs: Effects Of Inflow Conditions. *J. Irrig. Drain Eng.* 124(3), 152 – 162.
15. Choi, W., Kim, M.H., 2000. Free-Surface Fluid Flow Over Spillway. 4th International Conference Hydro-Science and Engineering, Seoul.
16. Assy, T.M., 2001. Solution for Spillway Flow by Finite Difference Method. **Journal of Hydraulic Research**, 39
17. Chen, Q.; Dai, G.; Liu, H., 2002. Volume of Fluid Model for Turbulence Numerical Simulation of Stepped Spillway Overflow, **Journal of Hydraulic Engineering**, 7. 683-688.
18. Sarker, M. A., Rhodes, D. ,G., 2004. Calculation of free-surface profile over a rectangular broad-crested weir, **Flow Measurement and Instrumentation 15** , 215–219
19. Ashgriz, N., Barbat, T., Wang, G., 2004. A Computational Lagrangian- Eulerian Advection Remap for Free Surface Flows. **International Journal for Numerical Methods in Fluids**, 44:1-32
20. Nguyen, V.T., Nestmann, F., 2004. Applications of CFD in hydraulics and river engineering, **International Journal of Computational Fluid Dynamics**, vol. 18(2): 165-174, Germany.
21. Chatila, J., Tabbara, M., 2004. Computational modeling of flow over on ogee spillway, **Computers and Structures**, 82: 1805-12
22. Şeker. T. 2006, Kontrol Yapıları Arkasındaki Açık Kanal Akımlarının Sayısal ve

Deneysel Analizi. Yüksek Lisans Tezi,Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

23. Kirkgöz, M. S. ve Öner, A. A., 2006. Yatay Bir Dairesel Silindir Etrafındaki Akımda Hız Alanının DeneySEL ve Teorik İncelenmesi. **Ç.Ü. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi**, **21**: 85-98.
24. Öner A.,A., Kirkgöz, M., S., Aköz, M., S., 2007. Geniş Başlıklı Savak Akımının DeneySEL ve Sayısal Yöntemle İncelenmesi, III. Ulusal Su Mühendisliği Sempozyumu, 3-12, İzmir.
25. Aköz, M., S., Kirkgöz, M., S., 2009. Öner A., A., Experimental and Numerical Modeling of a Sluice Gate Flow, **Journal of Hydraulic Research**, **47**: 167-176.
26. Kirkgöz, M. S.;Öner, A. A. ve Aköz, M. S. 2009. Numerical Modeling of Interaction of a Current With a Circular Cylinder Near a Rijid Bed, **Advances in Engineering Software**, **40**: 1191-1199.
27. Salması, F., Poorescandar, S., Dalır, A. H., Zadeh, D. F., 2011, **Journal of Agricultural Sciences**, 17: 324-336
28. Felder, S, and Chanson, H. 2012. Free-surface Profiles, Velocity and Pressure Distributions on a Broad-Crested Weir: a Physical study. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE**, **138**(12):1068–1074
29. Salması, F., Yıldırım, G., Masoodi, A., Parsamehr, P., 2013, **Arabian Journal of Geosciences**, **6** : 2709-2717
30. Qasim J.M., 2013, Laboratory and HEC-RAS Simulations of a Single-Step Weir, **ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences**, **8** (12): 1005-1011.
31. Duru, A., 2014. Numerical Modelling Of Contracted Sharp Crested Weirs. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 44 s.
32. Hoseini, S.H., Afshar, H., 2014 Flow over a Broad-Crested Weir in Subcritical Flow Conditions, Physical Syudy, **Journal of River Engineering**, **2**,(1), : 1005-1012

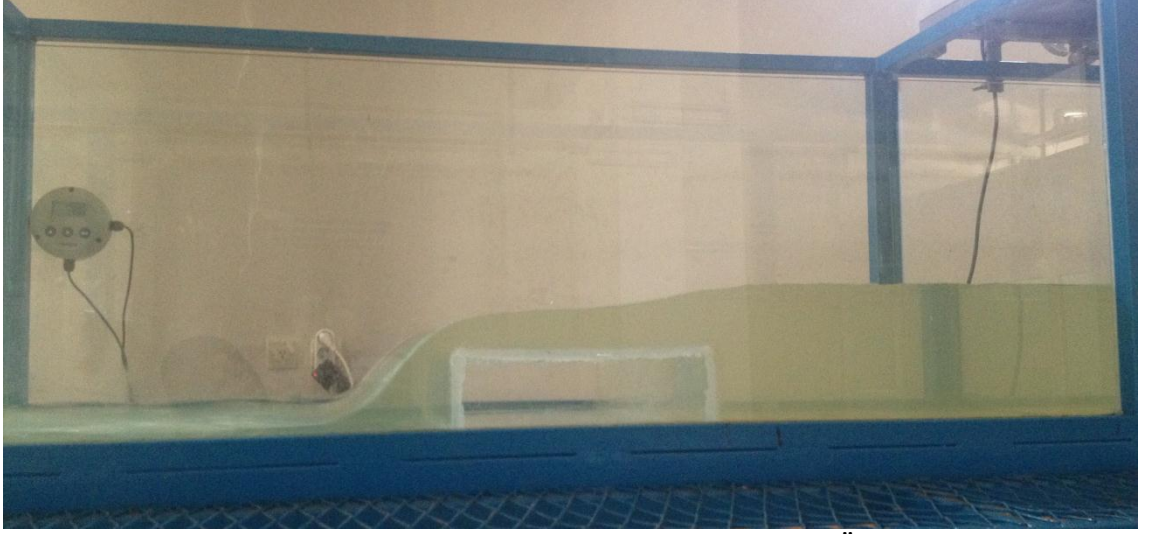
33. Al-Khatip, İ., Gogus, M., 2014 Prediction Models For Discharge Estimation In Rectangular Compound Broad-Crested Weirs, **Flow Measurement and Instrumentation**, **36**: 1-8
34. Örs, H., 1994. Akışkanlar Mekaniği. Boğaziçi Üniversitesi Yayınevi, İstanbul. 390s.
35. Shigematsu, T., Liu P. L.-F. ve Oda, K., 2004. Numerical Modeling of the Initial Stages of Dam-break Waves. **Journal of Hydraulic Research**, **42** (2):183-195.
36. Hirt, C. W. ve Nichols, B. D., 1981. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries. **Journal of Computational Physics**, **39**, 201–225.
37. Flow Science Inc., “Flow-3D User’s Manuals”, Santa Fe, N.M., 2007.

EKLER

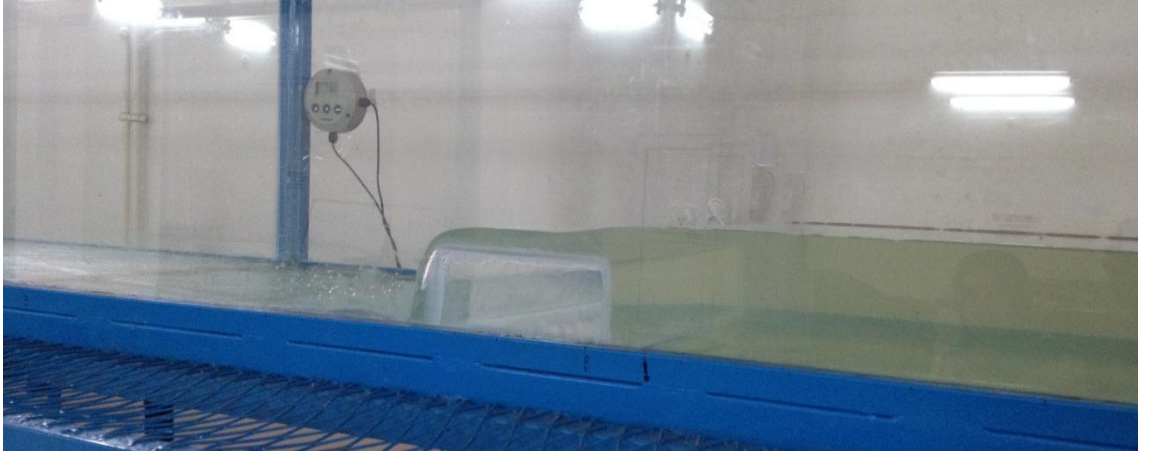
Şekil Ek 1 0,6x0,6x0,1 Savakta $Q=6,45$ l/s için Savak Üstü Su Akışı



Şekil Ek 2 0,6x0,3x0,1 Savakta $Q=23,90$ l/s için Savak Üstü Su Akışı



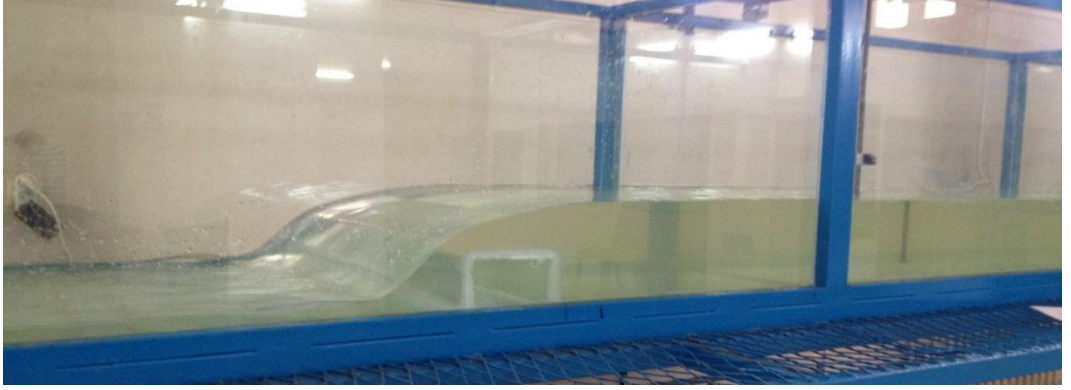
Şekil Ek 3 0,6x0,3x0,1 Savakta $Q=30,12$ l/s için Savak Üstü Su Akışı



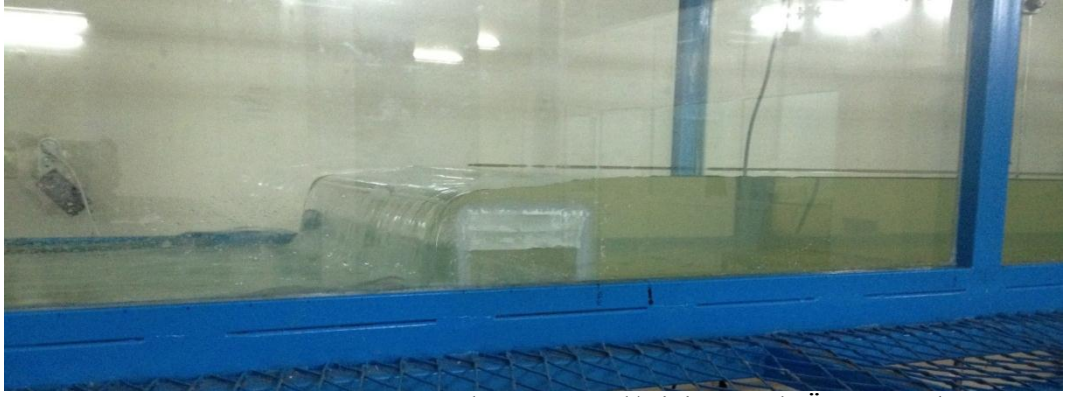
Şekil Ek 4 0,6x0,2x0,1 Savakta $Q=6,22$ l/s için Savak Üstü Su Akışı



Şekil Ek 5 0,6x0,2x0,1 Savakta $Q=30,22$ l/s için Savak Üstü Su Akışı



Şekil Ek 6 0,6x0,15x0,1 Savakta $Q=3,18$ l/s için Savak Üstü Su Akışı



Şekil Ek 7 0,6x0,15x0,1 Savakta $Q=6,33$ l/s için Savak Üstü Su Akışı



Şekil Ek 8 Hız Ölçümlerinin Yapılışı



Şekil Ek 9. Su Yüzü Ölçümü Yapılışı

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Mücella İLKENTAPAR
Uyruğu : Türkiye (TC)
Medeni Hali : Evli
Doğum Tarihi ve Yeri : 01.09.1989, Kayseri
Tel : +90 352 207 66 66- 32330
E-posta : mucella@erciyes.edu.tr
Adres : Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat
Mühendisliği Bölümü Melikgazi / KAYSERİ

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Lisans	ERÜ Mühendislik Fakültesi İnşaat Müh. Bölümü, Kayseri	2012
Lise	Fahrettin Kerim Gökay Anadolu Lisesi İstanbul	2008

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2012-Halen	Erciyes Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü	Araştırma Görevlisi

YABANCI DİL

İngilizce