



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**YARI BATIK SU ÇARKLARININ AKIŞ ÖZELİKLERİNE
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Numan KOCAMAN

DANIŞMAN

DR. ÖĞR. ÜYESİ Ercan GEMİCİ

BARTIN-2022



T.C.

**BARTIN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

YARI BATIK SU ÇARKLARININ AKIŞ ÖZELİKLERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Numan KOCAMAN

BARTIN-2022

KABUL VE ONAY



BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Dr. Öğr. Üyesi Ercan GEMİCİ danışmanlığında hazırlamış olduğum “YARI BATIK SU ÇARKLARININ AKIŞ ÖZELİKLERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

09.05.2022

Numan KOCAMAN



ÖNSÖZ

Öncelikle yüksek lisans eğitimim boyunca hiçbir yardımı esirgemeyen ve her zaman beni doğru bilgiye yönlendiren değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Ercan GEMİCİ' ye en içten teşekkürlerimi sunarım.

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca emeği geçen tüm Bartın Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümü bölüm hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

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

Yüksek lisans eğitim hayatım boyunca maddi manevi desteklerini esirgemeyen Çavuşoğlu Yemenler Yapı A.Ş. yönetim kurulu başkanı Sn. İsmail YEŞİLYURT ve yönetim kurulu başkan yardımcısı Sn. Recep YEŞİLYURT' a teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak tüm hayatım boyunca maddi manevi desteklerini esirgemeyen başta babam Adnan KOCAMAN, annem Müzeyyen KOCAMAN, sevgili eşim Ayşe Nur KOCAMAN ve küçük kızım Zümra Havva KOCAMAN' a sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Numan KOCAMAN

İnşaat Mühendisi

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YARI BATIK SU ÇARKLARININ AKIŞ ÖZELİKLERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Numan KOCAMAN

Bartın Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Ercan GEMİCİ

Bartın-2022, sayfa: 102

Akarsu içerisinde yüksek enerji, nehir tabanına zarar vermekte ve nehirde bulunan yapılarda hasar oluşturmaktadır. Nehirdeki yüksek enerjiyi düşürmek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada kanal içerisinde düşü oluşturmak ve kanal içerisine su çarkı yerleştirilmesi yoluyla enerjinin azaltılması alternatif bir çözüm olarak düşünülmüştür. Aynı zamanda bu çarklar enerji üretim amacıyla da değerlendirilebilecektir. Nehrin debisi yıl içerisinde sürekli değiştiği için burada da farklı debiler altında kanal içerisindeki hız, basınç, türbülans enerjisi, kayma gerilmesinin dağılımı araştırılmıştır. Su çarklarının kullanılmasıyla akarsu içerisinde hidrolik enerjinin azaltılabileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Enerji kırılımı, su çarkları, özgül enerji, hız ölçümü, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği-HAD, Açık kanal

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

RESEARCH OF SEMI SUNKEN WATER WHEELS EFFECTS ON FLOW CHARACTERISTICS

Numan KOCAMAN

Bartın University

Graduate School

Department of Civil Engineering

Thesis Advisor: Assist. Prof. Dr. Ercan GEMİCİ

Bartın-2022, pp: 102

High energy in the stream damages the river bottom and causes damage to the structures in the river. Various methods are used to lower the high energy in the river. In this study, reducing the energy by creating the drop in the channel and placing the water wheel in the channel is considered as an alternative solution. At the same time, these wheels can also be used for hydraulic energy production purposes. Since the flow of the river is constantly changing throughout the year, the velocity, pressure, turbulent energy, specific head and shear stress distribution in the channel were investigated under different discharges. It has been observed that hydraulic energy can be reduced in the stream by using water wheels.

Keywords: Energy dissipation, water wheels, specific head, velocity measurement, Computational Fluid Dynamics-CFD, Open Channel

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY.....	ii
BEYANNAME	iii
ÖNSÖZ	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
TABLolar DİZİNİ.....	xiv
EKLER DİZİNİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvi
KISALTMALAR.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	3
2.1. Kabartma Yapıları	3
2.1.1. Baraj ile Bağlamanın Karşılaştırılması	3
2.1.2. Bağlamalar, Savaklar	4
2.1.2.1. Bağlamaların Sınıflandırılması	6
2.2. Enerji Kırıcılar.....	6
2.2.1. Enerji Kırıcı Seçimi	6
2.2.2. Enerji Kırıcı Yapı Tipleri.....	10
Taban Düşüşü.....	10
2.3. Su Değirmeni, Çark Sistemi.....	11
2.4. Su Değirmenlerinin Tarihsel Gelişimi	13
2.5. Su Değirmenlerinin Çalışma Prensipleri.....	16
2.6. Su Çarklarının Çeşitleri	17
2.6.1. Alttan Su Alan Çarklar	17
2.7.2. Ortadan Su Alan Çarklar.....	18
2.7.3. Üstten Su Alan Çarklar	19
2.7. Su Değirmenlerinin Su Alma Yapıları.....	20
2.8. Tarihi Su Değirmenlerinin Enerji Potansiyelleri.....	21
2.9. Su Çarkları ile İlgili Deneysel Çalışmalar	23
2.10. Su Çarkları ile İlgili HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) Çalışmaları	25

3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	27
3.1. Giriş.....	27
3.2. Navier-Stokes Denklemleri	27
3.3. RANS (Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes) Denklemleri	29
3.3.1. Sıkışmayan Türbülanslı Akımda Hareket Denklemleri.....	30
3.4. Türbülans Modelleri.....	31
3.4.1. Standart k- ϵ Türbülans Modeli	32
3.4.2. RNG k- ϵ Türbülans Modeli.....	33
3.4.3 Realizable k- ϵ Türbülans Modeli (RKE)	35
3.4.4.Modifiye k- ω Modeli (MKW)	36
3.4.5. RSM Türbülans Modeli (RSM)	37
3.4.6. SST k- ω Türbülans Modeli (SST)	39
3.5. Açık Kanal Deney Düzenneği ve Deneylerin Yapılışı.....	41
3.6. Flow-3D Programı	42
3.7. Flow-3D Programı ile Model Kurulumu	45
3.7.1. Programa Giriş.....	45
3.7.2. Model Setup	46
3.7.3. Fizik koşulları.....	46
3.7.3.1. Gravity and Non-inertial Reference Frame.....	47
3.7.3.2. Moving and Simple Deforming Object.....	47
3.7.3.3.Particles	48
3.7.3.4. Viscosity and Turbulence	49
3.7.4. Akışkanlar (Fluids)	50
3.7.5. Meshing&Geometry.....	50
3.7.5.1. Hareket tanımlama (Type of Moving Object)	51
3.7.6. Mesh ve İntial (ilk su bölgeleri)	53
3.7.6.1. FAVOR (Fractional Area Volume Obstacle Representation).....	55
3.7.6.2. Hücre Sınır Koşullarının Belirlenmesi (Mesh Boundary Condition)	
.....	55
3.7.6.3. İntial.....	57
3.7.6.4. Particles	57
3.7.7. Sonuçların Alınması.....	58
3.7.7.1. .Transin Dosyası ile Sonuçların Alınması	59

4.	BULGULAR VE DEĞERLENDİRME.....	61
4.1.	Su Yüksekliklerinin Değerlendirmesi.....	62
4.2.	Basınç Dağılımları	68
4.3.	Türbülans Kinetik Enerjisi Dağılımları	73
4.4.	Akış Doğrultusunda Hız Bileşeni Dağılımları.....	77
4.5.	Özgül Enerji Dağılımları.....	82
4.5.	Kayma Gerilmesi Dağılımları.....	87
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	91
6.	KAYNAKÇA.....	93
	EKLER	99
	ÖZGEÇMİŞ	102

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Geometrik şekillerine veya kesit tiplerine göre savak çeşitleri	5
Şekil 2.2. Hidrolik Sıçrama Esnasında Bütün Debilerde $h_2=h_3$ olması durumu	7
Şekil 2.3. Hidrolik Sıçrama Esnasında Bütün Debilerde $h_2=h_3$ olması durumu	8
Şekil 2.4. Hidrolik Sıçrama Esnasında Bütün Debilerde $h_2<h_3$ olması durumu	8
Şekil 2.5. Hidrolik Sıçrama Esnasında Bütün Debilerde $h_2>h_3$ olması durumu	9
Şekil 2.6. Sıçrama Yüksekliği eğrisi ile Mansap Anahtar Eğrisinin Karşılaştırılması.....	9
Şekil 2.7. Taban Erozyonunu Önlemek İçin Öngörülen Taban Düşüsü	10
Şekil 2.8. Su gücü ile çalışan un değirmenleri restitüsyonu (Barbegal)	15
Şekil 2.9. Öğütme işleminde insan (a) ve hayvan gücü (b) kullanımı	16
Şekil 2.10. Hayvan gücü ile çalışan değirmen tasarımı	16
Şekil 2.11. Alttan su alan çark	18
Şekil 2.12. Ortadan su alan çark	19
Şekil 2.13. Üstten su alan çark	20
Şekil 3.1. Bartın Üniversitesi hidro-mekanik Laboratuvarından bir görüntü.....	41
Şekil 3.2. Bartın Üniversitesi hidro-mekanik laboratuvarı dikdörtgen kesitli kanaldan bir görüntü.....	42
Şekil 3.3. Flow-3D programından bir görsel.....	43
Şekil 3.4. Fiziksel olay ve Flow-3D modelinden görsel.....	44
Şekil 3.5. Kontrol Hacmi	45
Şekil 3.6. Flow-3D başlangıç sayfası ara yüzü.....	45
Şekil 3.7. Flow-3D Model setup ara yüzü.....	46
Şekil 3.8. Flow-3D Model setup physics alt menüsü ara yüzü.....	46
Şekil 3.9. Flow-3D physics alt menüsü gravity and non-inertial reference frame ara yüzü.....	47
Şekil 3.10. Flow-3D physics alt menüsü moving and simple deforming objects ara yüzü.....	48
Şekil 3.11. Flow-3D physics particles ara yüzü	48
Şekil 3.12. Flow-3D Physics viscosity and turbulence ara yüzü.....	49
Şekil 3.13. Flow-3D fluids alt menüsü ara yüzü	50
Şekil 3.14. Flow-3D meshing&geometry alt menüsü ara yüzü.....	50
Şekil 3.15. Flow-3D geometry özellikleri hareketli nesne tanımlama ara yüzü.....	51
Şekil 3.16. Flow-3D Moving object setup ara yüzü.....	52

Şekil 3.17. Flow-3D Initial/Prescribed velocities ara yüzü.....	53
Şekil 3.18. Flow-3D Geometry-Subcomponent ara yüzü.....	53
Şekil 3.19. Flow-3D mesh ağları ayarlama ara yüzü.....	54
Şekil 3.20. Flow-3D katı modelden bir görüntü.....	54
Şekil 3.21. Flow-3D mesh blokları grid-information ara yüzü	54
Şekil 3.22. Flow-3D FAVOR ara yüzü	55
Şekil 3.23. Flow-3D boundary ara yüzü.....	56
Şekil 3.24. Flow-3D giriş su yükseklikleri ve debi tanımlama ara yüzü.....	56
Şekil 3.25. Flow-3D ilk su tanımlama ara yüzü	57
Şekil 3.26. Flow-3D particles ekleme ara yüzü ve bir görüntü.....	58
Şekil 3.27. Flow-3D istenilen seviyelere probe eklenmesi bir görüntü.....	58
Şekil 3.28. Flow-3D Simülasyon dosya konumu ara yüzü	59
Şekil 3.29. Flow-3D .in dosyası hazırlama.....	59
Şekil 3.30. Flow-3D analiz ara yüzü	60
Şekil 4.1. Kanal boyunca önemli konumlar	61
Şekil 4.2. Q=12 L/s için su çarkının olmadığı durumda kanal boyunca su yüzey profili	62
Şekil 4.3. Q=12 L/s için su çarkının olduğu durumda kanal boyunca su yüzey profili	62
Şekil 4.4. Q=12 L/s için düşü veya eşik olmaması durumunda kanal boyunca su yüzey profili.....	63
Şekil 4.5. Q:17 L/s için su çarkının olmadığı durumda kanal boyunca su yüzey profili	64
Şekil 4.6. Q=17 L/s için su çarkının olduğu durumda kanal boyunca su yüzey profili	64
Şekil 4.7. Q=17 L/s için düşü veya eşik olmaması durumunda kanal boyunca su yüzey profili.....	64
Şekil 4.8. Q=22 L/s için su çarkının olmadığı durumda kanal boyunca su yüzey profili	65
Şekil 4.9. Q=22 L/s için su çarkının olduğu durumda kanal boyunca su yüzey profili	66
Şekil 4.10. Q=22 L/s için düşü veya eşik olmaması durumunda kanal boyunca su yüzey profili.....	66
Şekil 4.11. Q=22 L/s için su çarkının olmadığı durumda kanal boyunca su yüzey profili	67
Şekil 4.12. Q=27 L/s için su çarkının olmadığı durumda kanal boyunca su yüzey profili	67

Şekil 4.13. Q=27 L/s için düşü veya eşik olmaması durumunda kanal boyunca su yüzey profili	68
Şekil 4.14. Q=12 L/s için kanal boyunca 2D basınç dağılımı (a) 12-1 (b) 12-2 (c) 12-3	69
Şekil 4.15. Q=17 L/s için kanal boyunca 2D basınç dağılımı (a) 17-1 (b) 17-2 (c) 17-3	70
Şekil 4.16. Q=22 L/s için kanal boyunca 2D basınç dağılımı (a) 22-1 (b) 22-2 (c) 22-3	71
Şekil 4.17. Q=27 L/s için kanal boyunca 2D basınç dağılımı (a) 27-1 (b) 27-2 (c) 27-3	72
Şekil 4.18. Q=12 L/s için kanal boyunca 2D TKE dağılımı (a) 12-1 (b) 12-2 (c) 12-3	73
Şekil 4.19. Q=17 L/s için kanal boyunca 2D TKE dağılımı (a) 17-1 (b) 17-2 (c) 17-3	74
Şekil 4.20. Q=22 L/s için kanal boyunca 2D TKE dağılımı (a) 22-1 (b) 22-2 (c) 22-3	75
Şekil 4.21. Q=27 L/s için kanal boyunca 2D TKE dağılımı (a) 27-1 (b) 27-2 (c) 27-3	76
Şekil 4.22. Q=12 L/s için kanal boyunca 2D hız (u) dağılımı (a) 12-1 (b) 12-2 (c) 12- 3	78
Şekil 4.23. Q=17 L/s için kanal boyunca 2D hız (u) dağılımı (a) 17-1 (b) 17-2 (c) 17- 3	79
Şekil 4.24. Q=22 L/s için kanal boyunca 2D hız (u) dağılımı (a) 22-1 (b) 22-2 (c) 22- 3	81
Şekil 4.25. Q=27 L/s için kanal boyunca 2D hız (u) dağılımı (a) 27-1 (b) 27-2 (c) 27- 3	82
Şekil 4.26. Q=12 L/s için kanal boyunca 3D özgül enerji dağılımı (a) 12-1 (b) 12-2 (c) 12-3	83
Şekil 4.27. Q=17 L/s için kanal boyunca 3D özgül enerji dağılımı (a) 17-1 (b) 17-2 (c) 17-3	84
Şekil 4.28. Q=22 L/s için kanal boyunca 3D özgül enerji dağılımı (a) 22-1 (b) 22-2 (c) 22-3	85
Şekil 4.29. Q=27 L/s için kanal boyunca 3D özgül enerji dağılımı (a) 27-1 (b) 27-2 (c) 27-3	86
Şekil 4.30. Q=12 L/s için 3D kayma gerilmesi dağılımı (a) 12-1 (b) 12-2 (c) 12-3	87
Şekil 4.31. Q=17 L/s için 3D kayma gerilmesi dağılımı (a) 17-1 (b) 17-2 (c) 17-3	88
Şekil 4.32. Q=22 L/s için 3D kayma gerilmesi dağılımı (a) 22-1 (b) 22-2 (c) 22-3	89

Şekil 4.33. $Q=27$ L/s için 3D kayma gerilmesi dağılımı (a) 27-1 (b) 27-2 (c) 27-3 90



TABLolar DİZİNİ

Tablo No	Sayfa No
Tablo 3.1: RNG k- ϵ ve Standart k- ϵ türbülans modellerinde kullanılan katsayılara ait sayısal değerlerin karşılaştırılması (Kıray, 2014)	34
Tablo 4.1: Q=12 L/s için ölçülen ve hesaplanan su yükseklikleri.....	63
Tablo 4.2: Q=17 L/s için ölçülen ve hesaplanan su yükseklikleri.....	65
Tablo 4.3: Q=22 L/s için ölçülen ve hesaplanan su yükseklikleri.....	66
Tablo 4.4: Q=27 L/s için ölçülen ve hesaplanan su yükseklikleri.....	68
Tablo 4.5: Q=12 L/s için maksimum basınç değerleri	69
Tablo 4.6: Q=17 L/s için maksimum basınç değerleri	70
Tablo 4.7: Q=22 L/s için maksimum basınç değerleri	71
Tablo 4.8: Q=27 L/s için maksimum basınç değerleri	72
Tablo 4.9: Q=12 L/s için y:0.25 m konumunda ölçülen ve hesaplanan ortalama hızlar	63
Tablo 4.10: Q=17 L/s için y:0.25 m konumunda ölçülen ve hesaplanan ortalama hızlar	79
Tablo 4.11: Q=22 L/s için y:0.25 m konumunda ölçülen ve hesaplanan ortalama hızlar	80
Tablo 4.12: Q=27 L/s y:0.25 m konumunda ölçülen ve hesaplanan ortalama hızlar	81
Tablo 4.13: Savak öncesi ile kanal sonu arasında özgül enerji farkı.....	82

EKLER DİZİNİ

Ek	Sayfa
No	No

Ek 1. Bartın Üniversitesi Hidro-Mekanik Laboratuvarı Şematik Planı.....	
Ek 2. Akustik Doppler Hızölçer Cihazı.....	
Ek 3. Hidro-Mekanik Laboratuvarından bir görüntü	
Ek 4. Ultrasonik Debi Ölçer Cihazı.....	
Ek 5. Bartın Üniversitesi hidro-mekanik labaratuvarı Akustik dopler velocity yardımıyla ölçümlerin alınması	



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	:Alan
G	:Yer Çekimi İvmesi
P	:Basınç
Q	:Debi
V	:Hız vektörünün x bileşeni
v	:Hız vektörü
w	:Hız vektörünün y bileşeni
ρ	:Yoğunluk
τ	:Gerilme tensörü
τ_{ij}	:Laminer Viskozite Gerilmesi
μ	:Dinamik Viskozite Katsayısı
Re	:Reynolds Sayısı
ha	:hektar
km	:kilometre
m	:metre
m^2	:metrekare
m^3	:metreküp

KISALTMALAR

ADV:	Akustik Doppler velocity
CFD:	Computational fluids dynamics
FAVOR:	Fractional area volume obstarel representation
GDO:	Hareketli nesneler modeli
GCI:	Izgara yakınsama indeksleri
HAD:	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
HES:	Hidroelektrik santral
RANS:	Reynolds ortalımalı navier stokes
RNG:	Renormalized group
SST:	Share stress transportation
TDK:	Türk Dil Kurumu
TKE,k	Türbülanslı Kinetik Enerji
VOF:	Volume of fluid

1. GİRİŞ

İklim değışikliğinin su kaynakları üzerinde oluşturduğu baskılar neticesinde artık ciddi boyutlara ulaşan su kaynaklı afetler, dünyanın her coğrafyasında çözüm bekleyen küresel bir problem olarak yerini almıştır. Bu problemler sosyal ve ekonomik açıdan da zincirleme olarak yeni sorunlara sebep olmakta ve ekosistemlerin devamlılığını olumsuz etkilemektedir. Gerek artan dünya nüfusu karşısında yetersiz kalan temiz su kaynaklarının sürdürülebilirliğinin sağlanması ihtiyacı, gerekse yüzyılın son çeyreğinde frekansı hissedilir oranda artan ani su baskınları ve taşkın zararlarının azaltılması gereksinimi, insanlığı yeni arayışlara sevk etmiştir. Aynı zamanda çevreye verdiği zararlarla iklim değışikliğine katkı sunan ve maliyeti ile ülke ekonomilerini zorlayan fosil yakıtların kullanımından yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim, gelişen ve gelişmekte olan ülkeler öncülüğünde hız kazanmıştır. Dünyada enerji üretiminde en fazla kullanılan yenilenebilir enerji kaynağı durumunda su bulunmaktadır.

Suyun bulunması, çıkarılması, taşınması, depolanması, korunması, faydalanılması ve zararlarının önlenmesi çalışmalarının tümü su yönetimi olarak ifade edilmektedir. Su kıtlığından dolayı oluşan kurak bir yılın başka bir döneminde ani gelişen sağanaklar sonucunda su baskınları oluşabilmektedir. Su yönetiminde fazla suyun depolanarak değerlendirilmesi bir gerekliliktir, ancak kontrol altında tutulamayan aşırı suyun çevrede ve yapılarda hasara yol açtığı da bilinmektedir. Bu nedenle su haznelerinin optimum büyüklükte tasarlanması gerektiği gibi fazla suyun nehre kontrollü olarak verilmesi, nehir içerisinde yatak dengesinin korunması ve su yapılarının hasar almaması için enerji kontrol yapılarının yerleştirilmesi de optimum su yönetiminin gerekliliklerindendir. Suyun enerjisinin kırılması için, suyun enerji kırıcıya doğrudan çarpması, enerji kırıcı sonrası türbülans oluşturulması, enerji kırıcının suyu dağıtması veya su ve hava ile sürtünme sağlaması yollarından biri veya birileri kullanılabilir. Su içerisinde dönebilen bir çarka suyun çarpmasıyla enerjisinin kırılması da alternatif bir yöntem olarak değerlendirilebilir.

Suyun yüksekten düşerek çarkı döndürmesi veya altından geçen suyun çarkı döndürmesi yoluyla suyun gücünden faydalanılması, geçmişten günümüze kadar süren mekanik yöntemlerden biridir. Özellikle un, tahıl ve yağ üretimi amacıyla değirmenin bir parçası olarak tasarlanan su çarkları taşımacılık maksadıyla da sıklıkla kullanılmıştır. Su çarklarının

bilim insanları tarafından hidroelektrik dönüştürücü olarak kullanılması ise günümüze oldukça yakın zamanlarda gerçekleşmiştir (Müller ve Kauppert, 2004; Quaranta ve Revelli, 2018).

Kaplan türbini gibi standart alçak düşülü su türbinlerinin dahi 1.5 m'nin altında yükseklik farkı olan sulama kanalı, eski değirmen sahaları gibi alanlarda kullanımının uygun olmaması bu alanlarda su çarklarının değerlendirilmesinin önünü açmıştır. (ESHA, 2014; Kougias ve diğerleri, 2019). Alçak düşülü su türbinleri ile Arşimet burgu türbinlerine göre çok daha az maliyetle kurulabilen su çarklarından aynı zamanda enerji kırıcı olarak da faydalanılabilmektedir. Kanal içerisinde su seviyesi ve akış hızının dolayısıyla enerjinin kontrol altında tutulması için genellikle eşikler, savaklar, kapaklar, düşü havuzları gibi yapısal önlemler tercih edilmektedir. Bu yapıların sediment biriktirerek zamanla etkisinin azalması bir dezavantaj oluşturmaktadır. Su içerisinde dönen çarkların, tabanı beton ile güçlendirilmiş, aşınmaya karşı toprak dolgu yapılmış veya tabanda sediment hareketi olmayan bir kanal içerisinde sediment hareketine etkisi daha az olmaktadır. Ayrıca üreteç mekanizması eklenerek elektrik enerjisi üretimi de sağlayabilen su çarkları, kanatlarına çarpan suyun enerjisini de azaltmaktadır.

Son yıllarda su çarkları hakkında yapılan araştırmalar artsa da halen konu ile ilgili mühendislik bilgileri yeterince ayrıntılı ve eksiksiz değildir. Özellikle teorik modellerin nadiren deneysel analizlerle desteklendiği veya çalışmaların sadece deneysel olarak yürütüldüğü görülmektedir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. Kabartma Yapıları

Kabartma yapıları, bir akarsu yatağı veya vadisinde suyu biriktirmek, belirli bir seviyeye yükseltmek, belirli bir seviyede tutmak, başka bir yöne çevirmek gibi çok farklı amaçlara yönelik olarak planlanan sabit veya hareketli kısımları olan yapılardır. Bir kabartma yapısının memba bölgesindeki su derinliğine kabarma yüksekliği, memba ve mansap su seviyeleri arasındaki farka düşüm yüksekliği denir.

Kabartma yapıları memba ve mansap su seviyelerinin karşılıklı durumları göz önüne alındığında baraj, bağlama ve taban eşiği olmak üzere üç gruba ayrılır.

Barajlar: Yatağından başka tüm vadiyi kapatan ve akarsuyun akım rejimini etkileyen yapılardır. Barajlarda suyun mansaba aktarılması için özel yapılara (dip savak, dolu savak, işletme tesisleri gibi) ihtiyaç vardır. Akarsuyun ancak belirli yerlerinde baraj yapılabilir.

Bağlamalar, genel olarak yalnız akarsuyun yatağını kapatan, suyu biriktirmekten çok, su seviyesini belirli bir kota kadar yükselten, suyu belirli bir yöne çeviren, istenilen seviyeden arzu edilen miktarda su almayı sağlayan yapılardır. Bağlamalara savak, regülatör veya daha geniş anlamda yardımcı yapıları ile birlikte çevirme yapıları da denir.

Taban eşikleri, yapı tepesi ve gövdesi sürekli olarak mansap su seviyesinin altında kalan yapılardır. Bu durumda batmış bir akım meydana gelir. (Erkek ve Ağırlioğlu, 2013)

2.1.1. Baraj ile Bağlamanın Karşılaştırılması

Baraj ile bağlama karşılaştırıldığında benzer özellikleri bulunması yanında aralarında önemli bazı farklılıklar da görülür. Bunların başlıcaları:

- 1.Baraj akarsu yatağından başka tüm vadiyi, bağlama ise genellikle yalnız akarsu yatağını kapatır.
2. Baraj yapılış amacı ne olursa olsun suyu biriktirmekten çok, su seviyesini belirli bir kota kadar yükseltmek için yapılır. Bir kabartma yapısının hazne hacmi yıllık toplam akımın %20 sinden daha büyük olması durumunda, yapı baraj olarak isimlendirilir.
3. Baraj, suyu depo ettiğinden akarsuyun akım rejimini düzenleyici bir etki yapar ve kurak mevsimlerde minimum debiden daha büyük bir debi sağlayabilir. Bağlamanın akım rejimini düzenleyici etkisi ise çok sınırlıdır ve kurak mevsimlerde minimum debiden daha büyük bir debi alınması mümkün değildir.
4. Baraj sabit bir yapıdır. Baraj tepe kotu daima en yüksek hazne su seviyesinin üzerinde planlanır. Bağlamalar ise bağlama gövdesi üzerinden su aşacak şekilde sabit veya hareketli

olabilir.

5. Baraj akarsuyun memba bölgelerinde ve bazen orta kesiminde belirli yerlerde yapılabilir. Bağlama ise akarsuyun mansap bölgesi de dahil genellikle her yerinde inşa edilebilir.

6. Barajların yıkılması durumunda haznede toplanan sular büyük mal ve can kaybına sebep olur. Bağlama gerisinde toplanan su daha az olduğundan, yıkılmaları durumunda barajlara göre daha az hasar meydana gelir. Bunun sonucu olarak baraj proje ve inşaatlarında bağlamalara göre daha katı şartnameler ve kurallar geçerlidir.

7. Baraj gövdesi mansap tarafından topuk uç noktasında bitmesine karşılık bağlamadan geçen suların yapıya ve akarsu yatağına zarar vermemesi için bağlama mansaba doğru bir düşüm yatağı ile devam eder.

8. Barajların boyutlandırılmasında statik etkiler daha önemlidir. Bağlamalarda ise statik etkiler yanında dinamik etkiler de önemlidir.

9. Sabit bağlamalarda üstlerinden su aktığından gövde profili hidrolik koşullara uygun olarak şekillendirilir. Barajlarda ise statik yönden en uygun kesit seçilir.

10. Barajlarda bağlamalara göre kabartma yüksekliği daha büyük olduğundan çevre etkileri daha fazladır. (Erkek ve Ağralıoğlu, 2013)

2.1.2. Bağlamalar, Savaklar

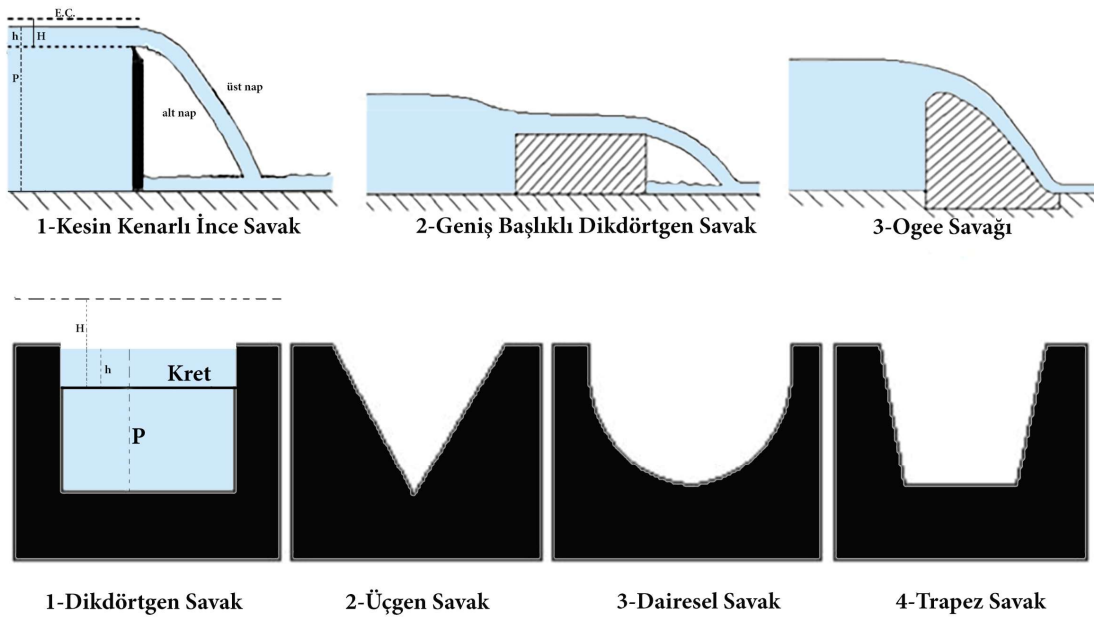
Savaklar açık kanal akımları ve baraj yapılarında kullanılan en eski basit hidrolik yapılardandır. Açık kanal akımlarında debi, hız ölçümlerinde kullanıldığı gibi taşkın geçişini ayarlama akımı kontrol etmek su seviyesini düzenleme gibi çeşitli amaçlarla yüzyıllardır kullanılmaktadırlar. Akımın hızını ve debisini ölçerken temelde akış hızının bir engelle değiştirilerek ölçmeye dayanır. Bağlamalar sulama, içme suyu temini, enerji üretimi, taşkın kontrolü, akarsu taşımacılığı, kirlilik kontrolü, gezinti ve dinlenme yeri temini amaçları için de yapılabilirler. Bağlamaların yapımı ile aşağıdaki hususların biri veya birkaçı sağlanarak istenen amaca ulaşılır. (İlkentapar, 2015)

1. Memba bölgesindeki suyu belirli bir seviyeye kadar kabartarak istenilen seviyen su almayı sağlamak,
2. Su alma ağzının önündeki su seviyesi değişimlerini azaltmak,
3. Suyu kabartarak düşüm yüksekliği elde etmek,
4. Su iletim kanalının boyunu kısaltmak,
5. Akarsu yatağındaki kıyı ve taban erozyonunu önleme ve ilgili yapıları oyulmalara karşı koruma için akış hızını düşürmek,
6. Ulaşım yapılan akarsularda özellikle minimum debilerde gerekli su derinliğini sağlamak,

7. Yeraltı su seviyesini yükseltmek,
8. Sürüntü maddesini ve sınırlı ölçüde de olsa askı maddesini geri tutmak,
9. Akarsuyun biyolojik olarak kendi kendisini temizlemesine yardımcı olmak,
10. Suyun kabartılmasında sınırlı da olsa daima bir depolama söz konusu olduğundan akışları düzenlemek gibi amaçlardan biri veya birkaçına hizmet etmek için yapılırlar. (Erkek ve Ağırlioğlu, 2013)

Çok farklı savak ayrımları yapılabilir bunlardan bazıları şöyledir;

Savaklar geometrik yapılarına göre; İnce savaklar, Geniş Savaklar ve Ogee savaklar şeklinde ayrılırlar. Öte yandan savak yapılarını kesit tiplerine göre veya hüzmeye (yapışık hüzmeli, serbest hüzmeli veya dalmış savaklar) şekline göre de ayırım yapılabilir. Savak tanımı basit ve benzer görünse de tüm bu ayrımlarda ki savakların hidrolik davranışları çok farklıdır.



Şekil 0.1. Geometrik şekillerine veya kesit tiplerine göre savak çeşitleri (Bal, 2011)

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

Bu eşitlikte Q debiyi (m^3/s), C_d debi katsayısını, H kret üzerindeki toplam yükü (m), g yerçekim ivmesini (m/s^2) ve W ise kret uzunluğunu (m) ifade etmektedir. Eşitlik (2.1)'deki toplam yük,

$$H = h + \frac{V_1^2}{2g} \quad (2.2)$$

(2.2) eşitliği ile hesaplanmaktadır. Burada h nap yükünü (m) ve V_1 ise membada ortalama akım hızını (m/s) ifade eder.

2.1.2.1. Bağlamaların Sınıflandırılması

Bağlamalar değişik yönlender aşığıda olduğu gibi sınıflandırılır.

1. Proje taşkın debisin büyüklüğüne göre:

Büyük bağlama $Q_{100} > 500 \text{ m}^3/\text{s}$,

Orta büyüklükte bağlama $500 > Q_{100} > 100 \text{ m}^3/\text{s}$,

Küçük bağlama $Q_{100} > 100 \text{ m}^3/\text{s}$,

Q_{100} : 100 yılda bir gelen taşkın debisidir.

2. Yapı ve İşletme Özelliklerine Göre:

Sabit bağlamalar, hareketli bağlamalar, karma bağlamalar.

3. Su geçirme Özelliğine Göre: Geçirimli bağlama, geçirimsiz bağlama, yarı geçirimli bağlama (Erkek ve Ağıraltıoğlu, 2013)

2.2. Enerji Kırıcılar

2.2.1. Enerji Kırıcı Seçimi

Akım rejiminin sel rejiminden nehir rejimine dönüşmesi ve tabanda meydana gelen kinetik enerjinin sönlünebilmesi için yapılan yapılardır. Buradaki amaç yalnızca nehir yatağındaki erozyonu önlemek için değil türbölanslı akımları da önleyerek nehir yatağındaki yapıları da korumaktır.

Savaklardan bırakılan suyun yüksekliğinden dolayı kazandığı enerjinin mansap su yapılarına zarar vermemesi için inşa edilirler. Enerji kırıcı yapılar doğru planlanmadığı takdirde mansap oyulmalarına veya hidrolik sıçramanın doğru bir şekilde sönlünemediği takdirde kaviteasyonlara sebebiyet vermektedir. Mansap oyulmaları nehir yataklarına ciddi zararlar verebilmektedir.

Enerji kırıcı tip seçimi bir çok faktöre bağlıdır. Büyük oranda yapılacağı bölgenin karakteristiklerine, kırılacak enerjinin büyüklüğüne, savağın kullanılacağı süre ve sıklığa bağlıdır diyebiliriz. Tüm gereksinimleri düşünerek gerekli tip seçimi yapılmalıdır. Enerji kırıcı tipine bakılmaksızın tüm enerji kırıcı tipleri acil durumlarda gereken yüksek seşarj kapasitesinde çalışabilmelidir. (ASCE, 1995)

Enerji kırıcı yapısı tip seçimine etki eden faktörleri Frodue sayısı, etek hızı, dolusavak tipi ve mansap kısmının jeolojik özellikleri olarak sıralanabilir.

Froude sayısı (Fr)=1 ise akım kritik akım olarak adlandırılır. $V^2 = gh$ ’ dır.

$Fr < 1$ ise kritik altı rejimidir.

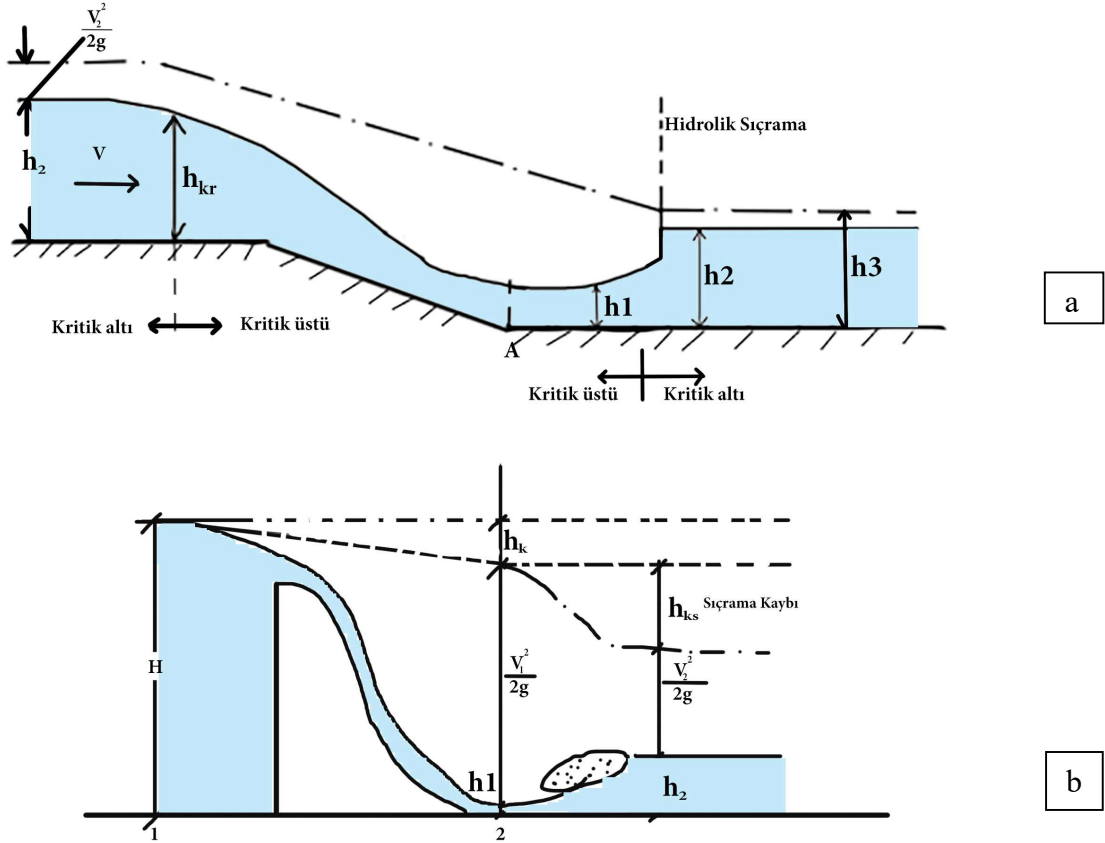
Yerçekimi kuvvetleri akımda rol oynar durgun-nehir akımı olarak isimlendirilir.

$Re < 500$ ise laminar akım rejimidir. Atalet kuvvetleri akımda rol oynar

$Fr > 1$ ise sel akımı olarak isimlendirilir

$Re > 2000$ ise Türbülanslı akım rejimidir.

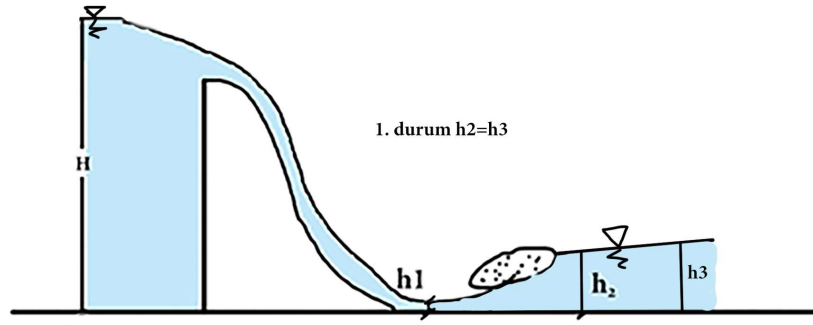
(URL-1)



Şekil 0.2. Açık Kanal Akımı Hidrolik Sıçrama, (URL-1)

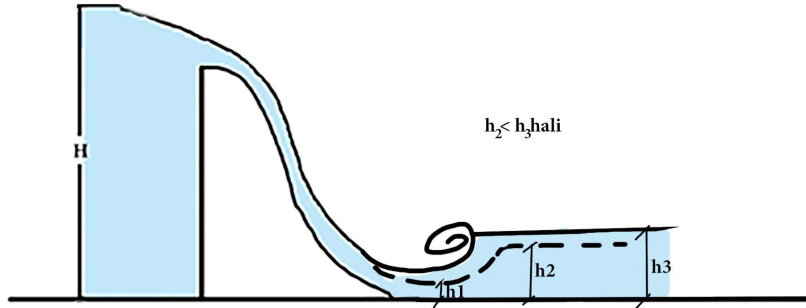
$$H = h_1 + \frac{V_1^2}{2g} + h_k \quad (2.3)$$

Hidrolik sıçramanın bağlama gövdesinin hemen önünde oluşması için (2 kesitinde) sıçramadan önceki h_1 derinliğindeki sel rejiminin meydana getireceği sıçramadan sonraki su derinliğinin (h_2) mansaptaki üniform su derinliğine (h_3) eşit olması durumunda gerçekleşir. Bu tip sıçrama sel rejimindeki (kritik üstü durumdaki) akımın kısa bir mesafede oluşması ve bitmesi hem de kırılan enerjinin çok olması dolayısı ile idealdir.



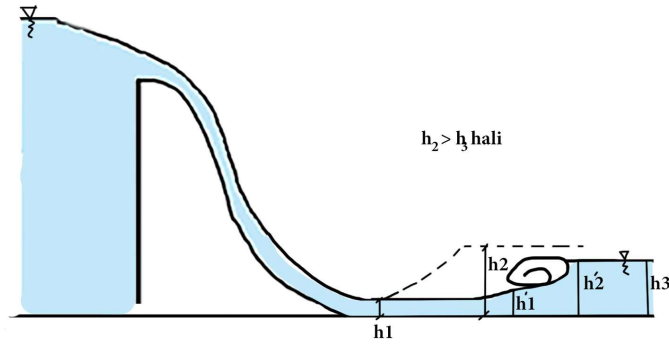
Şekil 0.3. Hidrolik Sıçrama Esnasında Bütün Debilerde $h_2=h_3$ olması durumu, (URL-1)

$h_2 < h_3$ ise batmış sıçrama meydana gelir. Eğer h_3 , h_2 den çok büyükse hiç sıçrama olmaz ve gelen akım mansap suyu içinde sadece çevrıntiler doğurur. Batmış sıçramada ve sıçrama olmaması durumunda çok az enerji kırıldığı için su mansaba doğru hızla akmaya devam eder. Tabandaki büyük hızların oyulmalara neden olacağı açıktır. Tam bir hidrolik sıçramanın oluşması için düşü yatağının yükseltilmesi gerekir. Bu durum uygulamada düşü yatağının eğimli yapılması ile su seviyelerinin aynı hizada olması ile sağlanır.



Şekil 0.4. Hidrolik Sıçrama Esnasında Bütün Debilerde $h_2 < h_3$ olması durumu, (URL-1)

$h_2 > h_3$ Bu durumda sel rejimi, sürtünme kayıplarının etkisiyle yeterli bir h_1 derinliğinin oluşacağı yere kadar devam eder ve $h_2 = h_3$ şartının gerçekleştiği yerde sıçrama meydana gelir. Sel rejimindeki akımın etkisi altında bulunan kesimde aşırı oyulmalar olacağı için bu tip sıçrama da yatak oyulmaları bakımından sakıncalıdır.



Şekil 2.5. Hidrolik Sıçrama Esnasında Bütün Debilerde $h_2 > h_3$ olması durumu, (URL-1)

Meydana gelecek sıçrama tipi debiye bağlı olarak değişir. Bu açıdan karşılaştırılması beklenen beş durum söz konusudur.

a-Bütün debilerde $h_2 = h_3$ olması durumu

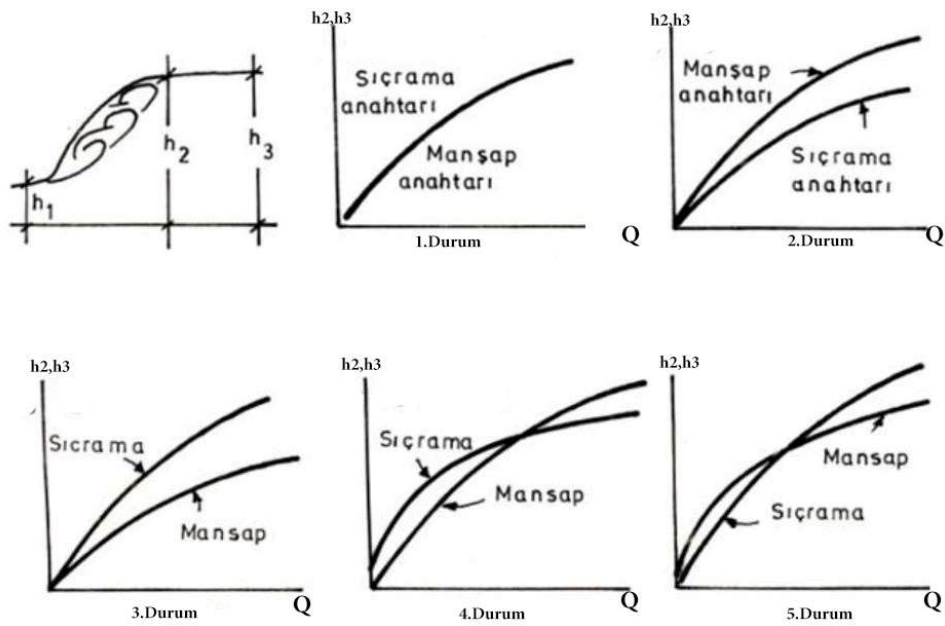
b-Bütün debilerde $h_2 < h_3$ olması durumu

c-Bütün debilerde $h_2 > h_3$ olması durumu

d-Küçük debilerde $h_2 > h_3$, büyük debilerde $h_2 < h_3$ olması durumu

e-Küçük debilerde $h_2 < h_3$, büyük debilerde $h_2 > h_3$ olması durumu

Debinin maksimum, ortalama ve minimum değerleri için meydana gelecek sıçrama yüksekliği (h_2) ve mansap yüksekliği (h_3) hesaplanarak sıçrama ve mansap anahtar eğrileri çizilir.



Şekil 0.6. Sıçrama Yüksekliği eğrisi ile Mansap Anahtar Eğrisinin Karşılaştırılması,(URL1)

2.2.2. Enerji Kırıcı Yapı Tipleri

Taban Düşüsü

Bir akarsuda dik eğim, büyük hızlara, taban oyulmalarına ve şev kaymalarına sebep olur. Taban düşüsü ile yataktaki su yüzeyi kısa bir mesafede alçaltılarak, akarsuyun enerji fazlalığı yok edilir ve yukarıdaki belirtilen zararlar önlenir. Taban düşüsünün yerini, büyük toprak hareketlerini önlemek ve yeraltı su yüzeyini arzu edilen seviyede tutmak için, arazi şartları belirler. Bir taban düşüsü temel savak duvarı, düşüm yatağı ve kanat duvarlarından oluşur. Bu tip tesisler mümkün olduğu kadar düz akarsu kesimlerinde planlanır. Taban düşüsü kesitleri genellikle akarsu kesitinden daha dar olup, dikdörtgen, yamuk, üçgen ve parabol şeklinde planlanabilir. Planlamada $\frac{h_u}{h_0} < 0.8$ olması gerektiğine dikkat edilmelidir. Taban düşüsünün taşkın esnasında da etkili olabilmesi için

Bleines'e göre,

$$h_D = h_{kr} \left[-3,97 + \sqrt{(n + 5,47)^2 - 14,15} \right] \quad (2.4.)$$

Olması gerekir.

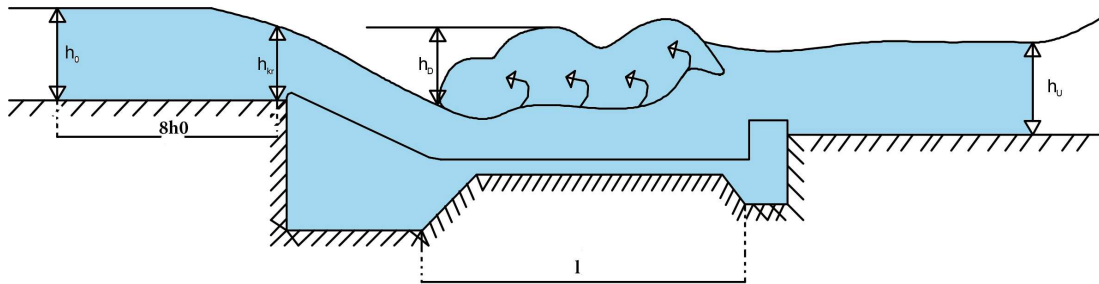
$$n = -1 + \sqrt{n_u^2 + \frac{2}{n_u} - 2} \quad (2.5)$$

Dikdörtgen kesitli kanallarda

$$n_u = \frac{h_u}{h_{kr}} \quad (2.6)$$

$$h_{kr} = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{b^2 g}} \quad (2.7)$$

Olarak verilir.



Şekil 0.7. Taban Erozyonunu Önlemek İçin Öngörülen Taban Düşüsü (Erkek ve Ağralıoğlu, 2013)

2.3. Su Değirmeni, Çark Sistemi

Taban ağacı: Su değirmenlerinde tüm mekanizmayı barındıran 25x20 cm boyutlarında 2 m uzunluğunda olan ağaç aksamı adı verilir. Bu tabanın sağ tarafında eşik sol tarafında ise ayak bulunur. Çay üzerine inşa edilen değirmende taban ağacının eşik üzerine gelen kısmına yan savak için yuva açılmakta ve bu açılan yuvanın üzerine yan savak konulmaktadır. Taban ağacını sabit kılmak için çevresine taş döşenmektedir.

Yan savak: Yarım ay şeklinde dönen ve değirmeni durdurabilmek için kullanılan mekanizmadır. Gelen suların çarka erişmesini önlemek için kullanılmaktadır. Yan savak dediğimiz sistem, 2 metre uzunluğunda ve 10 cm çapında yuvarlak ağaçtan yapılmaktadır. Bu ağaca çarka temas etmeyecek biçimde yan savağın 20x15 cm boyutlarındaki tahtası çakılmaktadır. Türkiye'nin kimi yerlerinde de bu savağa "alt savacak" adı verilmektedir (Demir ve Necati, 2003: 155).

Ayak: ezilen tahıl ürünlerinin küçüklüğünü ayarlayan mekanizmadır. 80 cm uzunluğunda olana 10x10 cm uzunluğunda kereste 50 cm'ye olabilecek şekilde ayarlanmaktadır. Taban ağacına dikey şekilde yerleştirilmektedir.

Ayak Çivisi: Taban ağacını kaldırmak, değirmen taşını ayarlayabilmek için eklenen çiziye denir.

Kurbacık: 4 cm eninde 15 cm uzunluğunda 3 cm boyutunda demir aksamı denilmektedir. Üzerine 3 tane nokta şeklinde çukur açılmaktadır. Bu çukurlara "tunç" eklenir. Zamanla "tunç" ve "kurbacık" taşınmaktadır. Tunç ve kurbacığın aşınmasında değirmen hareket etmez. Aşınma eyleminde olan tunç ve kurbacık değiştirilmektedir (Demir ve Necati, 2003: 159).

Tunç: Eğirmenle taban ağacın arasındaki ilişkiyi sağlayan demire denilmektedir. Ülkemizin kimi yerlerinde bu aksamaya iğnecik adı da verilmektedir.

İğ: genellikle 1,5 m uzunluğunda, 15 cm eninde kare şeklinde olan ağaç aksamıdır. Uzunluklarının bazı zamanlar 1 m olduğu da görülmüştür. Üst tarafında "erkek" adı verilen

aksamın 3 demir halkayla bağlandığı iğın alt tarafında da, 2 adet demir halkayla tunç takılmaktadır. Su değirmenlerinde, değirmen taşıyla çarkın arasındaki bağı sağlayan iğ, değirmenin üst taşının hareket etmesini sağlamaktadır. Ülkemizin kimi yerlerinde iğe, “yiğ”, “eğircek”, “kirmen” isimleri de denilmektedir.

Ayak Kolu: İç kısmına 1 metre uzunluğunda olan manılanın eklendiği sisteme denilmektedir. Değirmen taşlarının düzenlenmesini sağlamaktadır. Ayak kolu adı verilen kol, 40 cm uzunluğunda 10x15 cm ve 2,5x25 cm boyutlarında olan bir koldur. Bu kolun kalan yerine Manila takılmaktadır.

Manila: 1 metre uzunluğunda 5 cm çapına sahip bir ağaç türüdür. Unların kalın veya ince olmasını ayarlayabilmek için kullanılmaktadır. Manılanın alt kısmına 6x4 cm boyutlarında tahta kereste konulmaktadır. Manilaya baskı uygulayınca değirmenin üst taşı hareket eder, taşların arası açılır, bırakınca ise taşlar birbirine yanaşmaktadır. Unlanan hatılının yanına aşamalı olarak delikler açılmaktadır. Buna da hatıla adı verilir. Unun ince olmasını veya kalın olmasını ayarlayabilmek için manılanın üzeri arkası kalın önü ince 20 cm boyutunda 3 cm eninde gama yapılmaktadır.

Çark evi: Çarkın olduğu, 2x3,5 metre ile 2x4 metre boyutlarındaki yere denilmektedir. Çark yuvasının 4 m uzunluğunda olma nedeni, taban ağacını değiştirebilmek, taban ağacına kurbacık eklemek ya da çarkı kolaylıkla yerinden çıkarabilmek için olmaktadır.

Çark: Değirmenin hareket etmesini sağlayan tahta tipinden meydana gelen yuvarlak şeklindeki sisteme denilmektedir. 10x 10 cm ya da 8x10 cm boyutlarında 50 cm uzunluğunda tahtadan “kepçe” ismi verilen öğelerden oluşmaktadır. İğ yardımıyla üst kısmındaki taşla bağlantılı olan çark, üst taşın aynı tarafa hareket etmesini sağlamaktadır.

Kepçe: Suyun çarka değdiği bölüme denilmektedir. Ülkemizin kimi yerlerinde bu kısma kaşık adı da denilmektedir (Demir ve Necati, 2003: 159). Nehir kenarlarında bulunan çarkların 30 kepçeden, akımı daha az olan çay kenarlarında 40 ya da 42 kepçeden oluşmaktadır.

Çark Göbeği: Kepçelerin yerleştirildiği 70 cm boyutunda tüm çamdan 20 cm ebadındaki

tomruktan yuvarlak şeklinde kesilen ağaç aksama denilmektedir.

Kepçe Yuvası: Bu tomruğa kepçelerin takılabilmesi için açılan derinliği 10 cm, genişliği 2, 5 cm olan yuvalara denilmektedir. Değirmenin nehir ya da çay değirmeni olmasına göre 30, 40 ya da 42 adet olmaktadır.

Çark Demiri: Çarkın etrafını saran 3,5cm ile 4 cm eninde, 2 mm kalınlığında ve 4, 5 metre boyutundaki demir çemberdir. Bu çember çarkın çevresine ortalı olarak çakılmaktadır.

Çark Deliği: Çarkın orta kısmında bulunan 15x15 cm eninde 20 cm derinliğinde olan deliktir.

2.4. Su Değirmenlerinin Tarihsel Gelişimi

Türk Dil Kurumu değirmen kavramını “Öğüten Araç” veya “içinde öğütme işi yapılan yer” şeklinde ifade etmektedir (TDK, 2005). Dönme, çevrilme manasına taşıyan “teg” sözcüğünden “irmen” eki ile çoğaltılan ve hareket eden, dönen manasına gelen “teğirmen” kelimesinden gelmektedir (Bir ve ark. 2012). Bir su menşesinin yakınlarında kurulan ve su gücü ile hareket eden değirmenler Su Değirmeni ifadesiyle açıklanmaktadır. Osmanlı dilinde bu değirmene “Asiyab” adı verilmiştir. “As” sözcüğü Farça bir sözcük olup değirmen anlamına gelmektedir. Fars dilin sözlüğünde; tahılların un şekline dönüştürüldüğü tekerler biçiminde ve geniş iki taş olarak verilmektedir. Şayet bu taşlar su gücüyle dönüyorsa, Su Değirmeni anlamına gelen Âsiyâb sözcüğü kullanılır (Birici 2007).

İnsanlığın başlıca gereksinimleri arasında olan ve beslenme gereksiniminin esas maddesi olan unun ufalanmasında kullanmak için ilk kez değirmen çeşitleri meydana gelmiştir. Değirmen taşlarını hareket ettirebilmek için yararlanılan insan ve hayvan kuvvetinden sonra teknolojinin gelişmesiyle meydana gelen ve su gücüyle hareket eden su değirmenleri yakın zamana kadar çok önemliydi.

Bektaşoğlu (2013) ‘nın araştırmasında, su değirmenleri hakkında şu açıklamaları yapılmıştır: “Tarım ekonomisinde değirmenlerin ehemmiyeti büyüktür. Tarımsal ürünler, insan ve değirmen arasında paralel bir bağlantı bulunmaktadır. Değirmenin tarihine bakıldığında; değirmenleri Çinliler “yel değirmeni” şeklinde icat ettiği düşünülmektedir.

Ortaçağda su kuvvetinin değirmen taşlarını döndürmede kullanıldığı ve bu durumda değirmencilik teknolojisi bakımından önem arz ettiği bir aşama olarak görülmektedir”

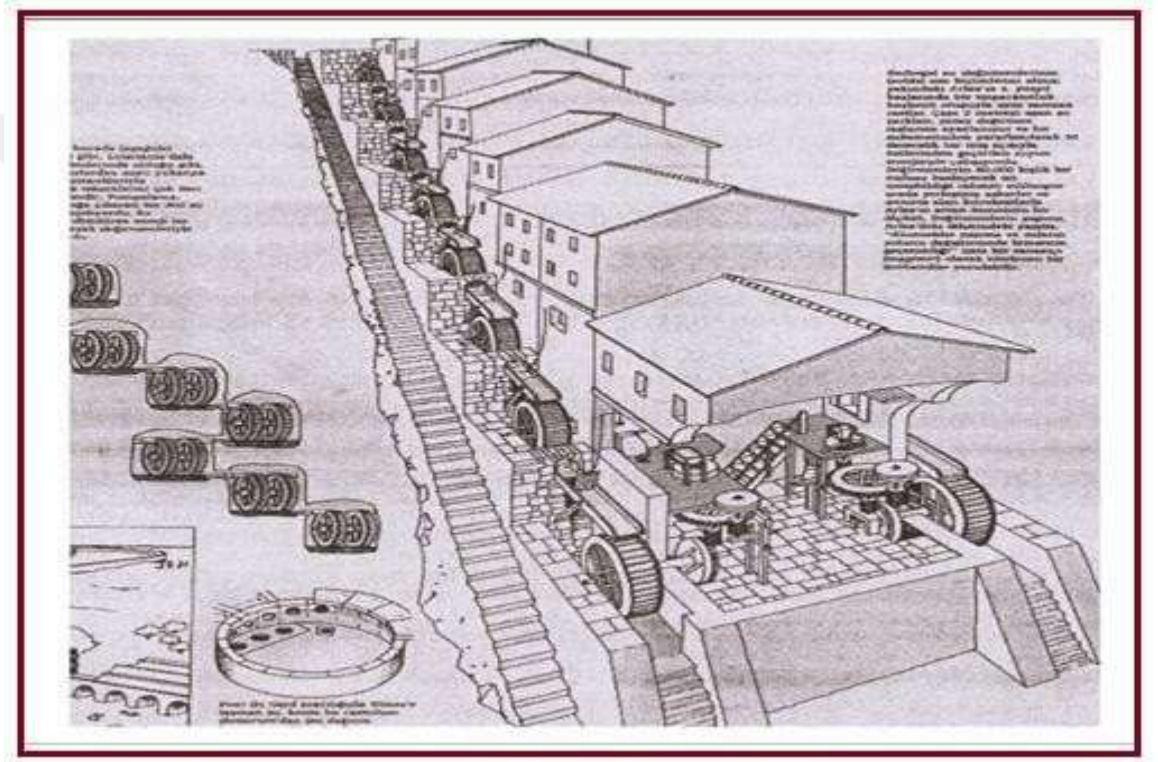
Su değirmenini ilk kez hangi millet ve ne zaman bulunup kullandığı kesin olarak bilinmemektedir. Birçok bilim adamı su değirmeninin icadını araştırmalarında değişik bilgiler vermişlerdir. Acar ve arkadaşları 2010 yılındaki çalışmasına göre değirmenin ilk misallerini, insanların geçim kaynağının tarım olduğu Cilâlitaş Devri’nde (M.Ö. 9000-5600) kısaca “Neolitik Dönem”e kadar uzandığını belirtmişlerdir. Moritz(1958) ve Wikander (2000) ’e göre su değirmenin buluşu milattan önce 2. yüzyılın sonu ya da 1. Yüzyılın başyken, Lewis’in 1997 yılındaki çalışmasına göre ise bu yıl M.Ö. 3. Yüzyılda öteki su kaldırıcılarıyla beraber meydana geldiğini söylemiştir (Moritz 1958; Wikander 2000; Lewis 2000). Abay vd. 2011 yılındaki çalışmasında, su değirmeninin ilkçağdan günümüze kadar kullanıldığını ve sayılarının gün geçtikçe daha çok olduğunu ifade etmişlerdir. Su değirmeninin ilk örneklerinden biri Norse modeli Su Değirmeni olduğu görülmektedir. Bu değirmen, yatay çarkı ve çarkın üzerinde su akıntısıyla hareket ettirilen kepçeleri olan basit bir sistemdir.

Su değirmeninin ülkemizde ortaya çıkması ile ilgili çalışmalardan ulaşılan bulgulara göre; Roma Çağını kadar dayalı olan su gücünden yararlanan teknoloji örnekleri arasında olduğu görülmektedir (Acar ve ark. 2010). İlk çağın coğrafyacısı olan Strabon, "Geographika" isimli yapıtında ifade ettiği bilgilere göre; Anadolu tarihinde bilinen su değirmeni Tokat-Niksar çevresindeki Kabeiria’da, Lykos (Kelkit) Irmağında Mithridates Krallığı zamanında ortalama M.Ö. 1. Yüzyılda kurulmuştur. Bu Anadolu’da resmi olarak bilinen en eskiye dayalı su değirmeni olmaktadır (Tosun, 2009). Su çarkı ve onun teknolojilerinden olan su değirmeninin Anadolu’daki tarihiyle alakalı bir diğer done ise M.Ö. 2. Yüzyılda Mithridates Krallığı’nın başkenti Cibera’da (günümüz adı ile Niksar’da) daha da üst düzey hale getirildiğidir (Bir ve ark. 2012).

Su değirmeninin Türklerdeki önem ise M.Ö. 3. yüzyıla kadar dayanmaktadır. Göktürkler, Uygurlar, Kırgızlar gibi milletlerde değirmen hakkında unsurlar görülmüştür. Su değirmenlerinin kullanılması ilk defa Uygurlara denk gelmiştir (Ögel, 1988). Ortaçağ İslam Dünyasında ise su değirmeni Endülüs’ten Kuzey Afrika’ya, Afrika’dan Maveraünnehir’e kadar büyük bir alanda tarıma dayalı olarak geliştirildiği görülmüştür. Aynı zamanda İslam

dünyasındaki mekaniksel araçlar hakkında resimler çizen El-Cezeri, yapıtında değirmen çarkları ve bu çarkların fonksiyonları ile ilgili bilgiler vardır (Bektaşoğlu, 2013).

M.S. 4. yüzyılda Güney Fransa'da kurulduğu öngörülen Barbegal bölgesinde yapılan hafriyatlarda belirlenen, ardı arkası takip eden milli düşey şu çarklarından meydana gelen ve su gücüyle çalışan değirmenin ilk misallerinden biri olarak görülen tahılları ufalamak için yararlanılan değirmenlere Şekil 2.1'de yer verilmiştir(Tosun, 2009).



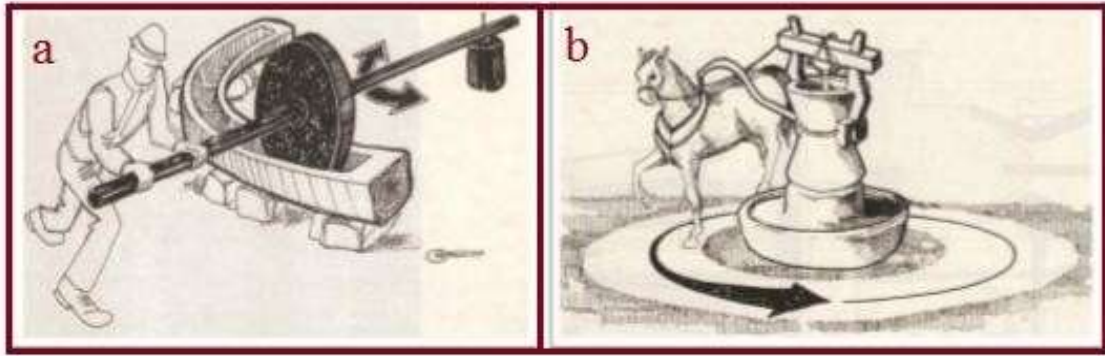
Şekil 0.8. Su gücü ile çalışan un değirmenleri restitüsyonu (Barbegal) (Tosun, 2009)

Osmanlılar zamanında su değirmeni çok ehemmiyetlidir. Bu zamanda tutulan Tahrir defterlerinde tüm eyaletlerin yerleşim yerlerinde kullanacağı değirmen sayıları yani çark ve taş sayısı gibi bilgileri Asiyab (su değirmeni) olarak kayıta geçmiş ve vergilendirmeye tabii tutmuşlardır.

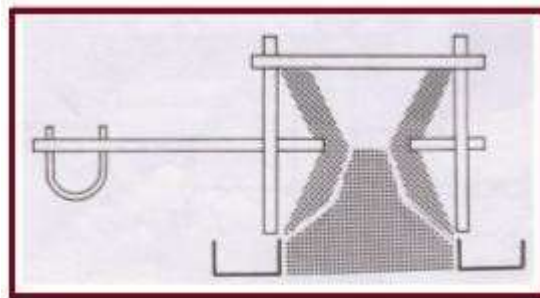
2.5. Su Değirmenlerinin Çalışma Prensipleri

Su çarklarının ve değirmen taşlarının bir mil ya da dişliyle bağlandığı sistemlere Su Değirmenleri adı verilmektedir. Zamanla meydana gelen basit mil ve çark mekanizmaları, çıkırık mekanizmaları, su çarkları, rüzgâr gücünden yararlanmak için yelkenin buluşu gibi icatlar sayesinde un sağlamak için farklı değirmen sistemleri kullanılmıştır. Faydalandıkları enerji çeşidine göre değirmenler; İnsan gücüyle çalışan el değirmenleri, Hayvan gücü ile çalışan değirmenler ve doğa gücü (rüzgâr ve su) ile çalışan değirmenler olarak sınıflara ayrılmıştır.

Yıllardır değirmenlerin enerji menşei insan kuvveti olmuş ve elle ufalama işlemi oluşturulmuştur. Ancak gün geçtikçe çoğalan kişi sayısına göre doğrudan artış gösteren imalat gereksinimini karşılayabilmek için elle ufalama işleminin yerine bu sistem geliştirilmiş ve daha kuvvetli menşelere bırakmıştır. Gelişim evresinde, değirmen taşlarını hareket ettirmek için hayvan, insan, rüzgâr ve su kuvvetlerine başvurulmuştur. Landels'in 1996 yılında yaptığı araştırmasında eski roma ve Yunan'da ufalama işlemlerinde kuvvet kaynağı olarak esirlerden faydalandığı ve hayvanların kullanıldığı ifade etmiştir.



Şekil 0.9. Öğütme işleminde insan (a) ve hayvan gücü (b) kullanımı (Irimie vd., 1981)



Şekil 0.10. Hayvan gücü ile çalışan değirmen tasarımı (Danışman, 1977)

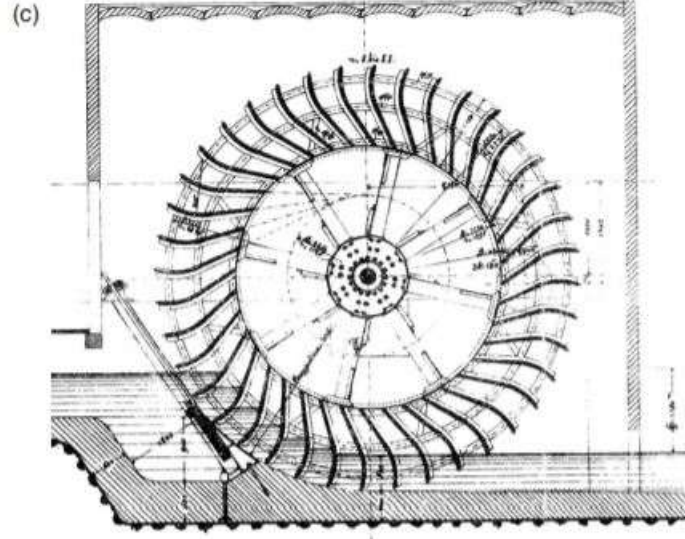
Rüzgâr gücünden yararlanma da yel değirmenin gelişmesine dayalı olarak başlamıştır. Avrupa ülkelerinde geliştirilen ve rüzgâr kaynağını daha etkin kullanacak biçimde yapılan düşey kuleli değirmenler rüzgâr gücünden yararlanmayı da arttırmıştır (Medioli ve ark. 1997).Orta Avrupa bölgesinde rüzgâr gücünden faydalanma ise XII. yy. da yaygın olan rüzgar gücünde tahıl öğütmek, su kaldırmak ve su pompalamak için faydalandığı Medioli vd. 1997 yılında yaptıkları çalışmada ifade etmişler.

Suyun var olması milletlerin gelişmesinde önemli rol oynamıştır. İnsan ve hayvan kuvvetine seçenек arayan milletler ilk mühendis araştırmalarında suyun taşıma kuvvetinden yararlanmışlardır. Bu yüzden suyun akış hızını güç enerjisi olarak ifade etmişlerdir. Bu enerjiden faydalanmaya başlanmasıyla su çarkları meydana gelmiştir.

2.6. Su Çarklarının Çeşitleri

2.6.1. Alttan Su Alan Çarklar

Altan su alan çarklar da su kanadın alt kısmına vurur ve çarkın saat yönünün tersine dönmesini sağlar. Kısa kanatlar, çarktan akan suya doğru radyal olarak çıkıntı yapmaktadır (Şekil 2.4). Su, çarkın çevresel hızından daha büyük bir hıza sahiptir ve kanatlardan aynı hızla ayrılarak çarka doğru bir kuvvet uygular. Bu süreç, suda oluşan türbülansı tanımlayan Bresse (1876) tarafından bir şok ve bozulma olarak açıklanmaktadır. Müller vd. (2007), bu su çarklarının yapay kanallar içinde oluşturulan sığ, kritik üstü akıslarda çalıştığını belirlemiştir. Altan su alan su çarkının varlığı memba akışının derinliği üzerinde bir etki yapmamaktadır. Bu çarkların dönüş hızları ile kanal debisi arasında sabit bir ilişki bulunmamaktadır. Dönme hızı, çarka uygulanan kuvvet tarafından belirlenir ve impulstan yararlanan alttan su alan çarklarının optimum verimlilikle çalışabilmeleri için iyi bir hız kontrolü gereklidir.



Şekil 0.11. Alttan su alan çark (Müller, 2004)

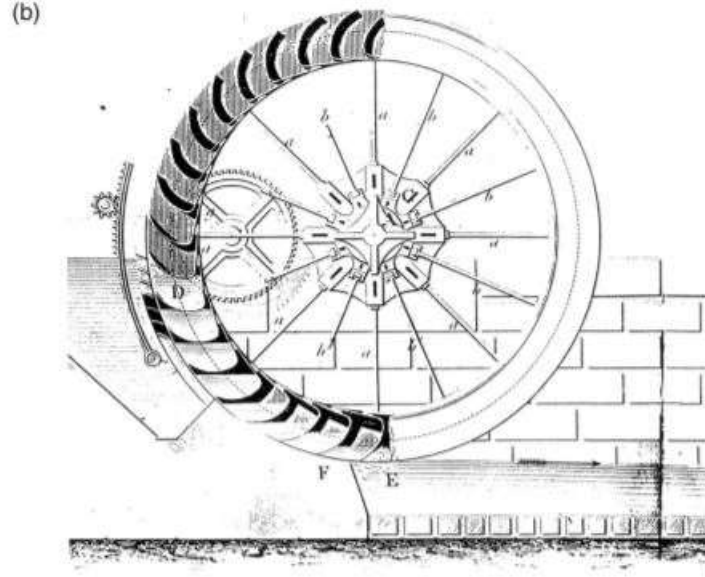
Son zamanlarda üretilen alttan su alan su çarklarının hafif kavisli kanatlara sahip olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, kinetik enerjinin bir kısmının çarkın içerisinde potansiyel enerjiye dönüştürülmesini sağlamaktır. Çünkü su, çarpma anında bıçağı hafifçe yukarı doğru hareket ettirerek potansiyel kazandırır.

2.7.2. Ortadan Su Alan Çarklar

Tüm orta atış su tekerleklerinin ortak özelliği, kanal yatağının örtü adı verilen ve etraflarında kısmen yukarı akışa doğru uzanan kavisli bölümüdür. Bu yapının amaçlanan amacı, suyun yerçekimi kuvveti altında dikey bir mesafeden tekerleğin hücreleri içinde aşağı indirilmesi ve suyun potansiyel enerjisinin kullanılmasına izin verilmesidir.

Kısmen doldurulmuş hücrelerle çalışan yaygın olarak inşa edilmiş orta atış su çarklarını göstermektedir. Dolum oranları birden az olan bu su çarklarının akış hızı ile dönme hızı arasında sabit bir ilişkisi yoktur. Bu özellik, şebekeye bağlı jeneratörlerin yükünün, sömürülen hidrolik güçle değiştiği, dönme hızının sabit kalacağı şekilde değiştiği modern orta atış su çarkı tesisatları tarafından kullanılır. Bu nedenle doldurma oranı akış hızının bir fonksiyonu haline gelir. Orta atış su çarkları iki şekilde ortaya çıkmıştır: büyük hücrelere ve yüksek dolum oranlarına sahip olanlardan ancak düşük dönme hızlarına, daha küçük hücrelere ve daha düşük doldurma oranlarına ancak daha yüksek dönme hızlarına sahip olanlar. Her iki form için de verimlilik açısından önemli bir husus, su ile bıçaklar arasındaki

ilişkiydi. İdeal olarak, su hücrelere çarpmadan girer, bunun yerine gösterildiği gibi bıçakların üzerine akar. Bu, suyun ve bıçakların açısına ve hızına bağlıdır.

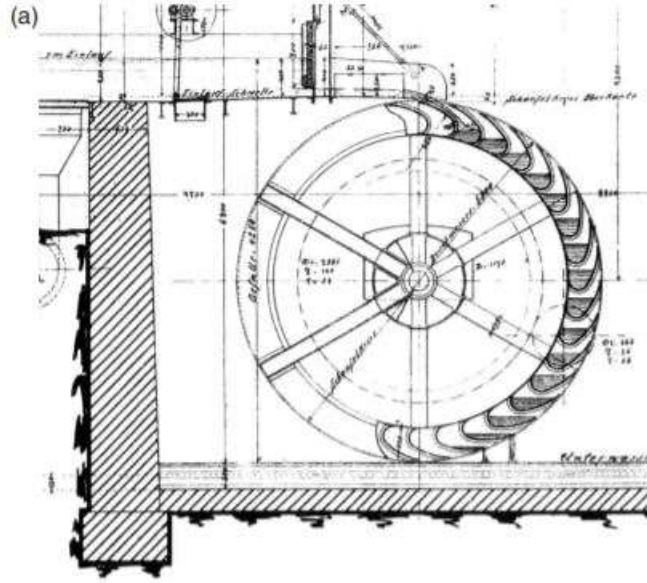


Şekil 0.12. Ortadan su alan çark (Müller, 2004)

2.7.3. Üstten Su Alan Çarklar

Üstten su alan çarklar suyun akışı yönünde dönmekte ve kanatlarına biriken su ile hareket etmektedir. Bu su çarklarının çalışma prensibinde potansiyel enerji kullanılır. Su çarkının bıçakları çark aşağıya dönebilsin ve döndükten sonra suyu boşaltabilmesi için eğri şekilde tasarlanmıştır. Suyun her bir alttaki hücrelere doğru düşerken bir enerji kaybı meydana gelir bıçak sayısı azaltılarak bu kayıp optimize edilebilir. İkinci ve en önemli kayıp kaynağı, aşağı akışa ulaşmadan önce hücrelerden su dökülmesiyle ortaya çıkan sömürülmemiş kafadır. Bu, açık hücreler tekerleğin altına çekilirken döndüklerinde meydana gelir ve doldurma oranı ve bıçakların tasarımı ile ilgilidir.

Uygulamada, atış üstü su çarkları 0,3 ile 0,5 (Bach, 1886) arasında dolgu oranlarına sahip olacak şekilde tasarlanmış ve %65 ile %89 arasında yoğunluk elde edilmiştir.



Şekil 0.13. Üstten su alan çark (Müller, 2004)

2.7. Su Değirmenlerinin Su Alma Yapıları

Su değirmeninin çalışması, suyun ya kinetik ya da potansiyel enerjisinin mekaniksel duruma dönüşme ilkesine dayanır (Bir vd., 2012). Potansiyel enerji kullanan değirmenler aynı mevcut zamanda HES (Hidroelektrik santral) ler gibi bir düşüye yani kot farkına gereksinim duyulmaktadır. Irmağın eğimleri çoğunlukla çok az olduğu için yatak boyunca her yerde uygun düşü yüksekliği görülmemektedir. Yine ırmağın kesit ortalama hızının az olması değirmen taşını hareket ettirecek seviyede bir kinetik enerjiye de bazı zamanlar sahip olmamaktadır. Bu sebeple uygun potansiyel enerjiyi sağlayabilmek için bir su alma yapısıyla ırmaktan kullanılan su yapay kanallar ile belli bir düşü yüksekliğinin olduğu bir yere taşındığı görülmektedir. Bazı zamanlar gereksinim duyulduğu durumda kanala su verebilmek için bir çevirme yapısı (derivasyon) uygulanmaktadır. Bu kanallar kısa uzaklıkta olmasıyla “yaklaşım kanalı”, daha çok uzaklıktan su alınıyorsa “sutaşıma kanalı” ifadesi kullanılmaktadır.

Engebeli ve dağlık alanlarda, kısa uzaklıkta uygun düşü yüksekliğine imkân sunduğu için su değirmenlerini kullanmak uygun görülmüştür. Hem yaklaşım kanallarında olan hemde sutaşıma kanallarındaki debi, açık kanal debisi (cazibeli debi, serbest yüzeyli debi) şeklinde isimlendirilmektedir. Çoğunlukla depo olmadığından dolayı temel kaynaktan suyun basınçlı sistemlerle değirmene taşınmadığı görülmüştür. Yüksek hız ve buna bağlı olarak yüksek

yük kaybı sebebiyle suyun borular ile (basınçlı akımlar şeklinde) uzun mesafelere götürülmesi uygun olmaktadır. Bu nedenle açık kanal şeklinde iletilmesi uygun görülmüştür.

Suyu değirmelere taşıyan ve genellikle taştan oluşturulan açık iletim yoluna "kanal ya da ark" denilmektedir. Değirmeni harekete geçirecek su da beton iletim yollarından gelmektedir. Anadolu'nun bazı yerlerinde "oluk" ismi verilen bu kanallar, suların açık alana yayılmasını engellemek gibi ehemmiyetli role sahip olmaktadır (Gürses ve Taşkın, 2007). Bu arklardan değirmene ulaşan su, "savak" ismi verilen sistemle kontrol edilmektedir. Artık suyun değirmene ulaşmasını engellemek ya da boş alana bırakabilmek için bu sistem kullanılmaktadır. Bu sistemden değirmene gelen sular belirli bir uzaklıktan sonra cebri borulara geçer. Arkın değirmenin bulunduğu yerde suyun değirmene taşınmasını sağlayan çoğunlukla saç borudan ya da taştan yapılan "Oban" ismi verilen bir yapı bulunmaktadır. Suyun başlangıcında, suyun akımını kontrol edebilmek için yararlanılan "kapak savak" bulunmaktadır. Su değirmene taşındığında öncelikle arkta geçer ve obana gelerek obandan hızlıca aşağıya inmektedir. Suyun dışarıya geldiği ve su kanatlarına suyu ulaştırıp çarkın hareket etmesini sağlayan yere de "boyra" adı verilmektedir. (Bektaşoğlu, 2013).

2.8. Tarihi Su Değirmenlerinin Enerji Potansiyelleri

Tarih boyunca Türkiye'de de enerji imali için pek çok girişimde bulunulmuştur. Türkiye'de bu doğrultuda küçük ölçekli hidroelektrik santral olarak su değirmenlerinden enerji üretimi Tarsus bölgesinde 1902'da kurulmuş ve 2 kW'lık enerji üretimi oluşturulmuştur. Türkiye'de bu doğrultuda birtakım araştırmalarda bulunulmuştur. Elde edilen bir araştırmada, su değirmenleri için debiyle üretimi yapılan enerji kapasitesindeki değer karşılaştırılmıştır. Ulaşılan bulgulara göre, debisi $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ olan bir ırmaktan sağlanan kuvvetin ortalama $1/20$ beygir veya $\frac{1}{2}$ insan gücüne denk olabileceğini ifade edilmiştir. Burada bir beygir gücü $0.986 \text{ HP} = 736 \text{ W} = 10$ insan kuvvetine eşit olarak alınmıştır. Bu durumda şayet debi 2 kata çıkarsa kuvvetinde de 8 kat artarak 0.4 beygir gücü, ya da 4 insan gücüne denk olabileceği ifade edilmiştir. (Bir ve Kayral, 1998).

Su değirmeninin enerji kaynağı olarak kullanılmasının farklı ülkelerde, farklı bölgelerde, farklı örnekleri mevcuttur. Örneğin; Hindistan'da yapılan bir çalışmada su değirmenlerini enerji üretme potansiyelinin yanı sıra yapılabilecek iyileştirmeler veya dönüşümler ile bu

enerjinin arttırılabileceği belirtilmiştir. Yatay ve düşey çarklı değirmenlerin enerjisi hesaplanarak karşılaştırma yapıldığında, her iki su değirmenin de yaklaşık % 60'lık bir mekanik verimle günde 12 saat kullanıldığı varsayılarak, dikey ve yatay su değirmenlerinin sırasıyla elektrik enerjisi bakımından 3.68 kW ve 7.36 kW'a eşdeğer enerji tasarrufu sağladığı hesaplanmıştır. Böylelikle dikey ve yatay su değirmenleri aylık olarak sırası ile 1.3 MW ve 2.6 MW enerji tasarrufu sağlayacağı belirtilmiştir (Singh vd., 2001).

Rize'nin bazı bölgelerinde yapılan çalışmalarda da su değirmenlerinden enerji üretilebileceği göz önüne serilmiştir. Salarha Deresinde yer alan düşük debili 19 su değirmeni için yapılan bir çalışmada toplam 66.867 kWh enerji üretilebileceği hesaplanmıştır (Süme, 2014). Derepazarı bölgesinde koordinatları tespit edilen 5 adet su değirmeni için yapılan bir çalışmada ise üretebilecekleri enerji potansiyeli 40.256 kWh olarak belirlenmiştir. Ayrıca çalışmada ek olarak su değirmenlerinde, kanal yapılarında yapılacak iyileştirmeler ile üretilebilecek bu enerji miktarının 112.30 kWh çıkabileceği belirtilmiştir (Süme, 2019).

Zonguldak ilinde yer alan 10 adet su değirmeninin teknik potansiyelleri hesaplandığında 7.5 kW ile 8.7 kW arasında değişen potansiyeller tespit edilmiş ve bu değirmenler mikro hidroelektrik santraller sınıfında yer almıştır. Bu 10 değirmen için toplamda ise 78.238 kW'lık bir enerji üretilebileceği tespit edilmiştir. Bu enerji miktarının maddi açıdan getirebileceği kazanç ise 8.7 kW için 10115 TL'dir (Dündar vd., 2017).

İtalya'da yapılan bir çalışmada, üstten çevirmeli su çarkına sahip bir su değirmeninin yenilenip tekrar kullanıma açılması ile % 88 verim sağlandığı ve bunun yaklaşık olarak 8550 W'lık enerji ürettiği belirtilmektedir (Franco vd., 2019).

2.9. Su Çarkları ile İlgili Deneysel Çalışmalar

Su çarklarının ilk örnekleri dikey bir aksa sahip, gücü değirmen taşına iletmek için ilave bir dişli mekanizması gerektirmeyen çarklardı. Yatay akslı ilk türler suyun aksın altından geçerek kanatlara çarpmasıyla kinetik enerjisinin çarka aktarılması esasına dayalı su altı çarklarıydı. Su çarklarına dair ilk analiz örnekleri Da Vinci, Bernoulli, Smeaton ve Borda gibi mühendis ve bilim adamları tarafından yapılmıştır (Senior, 2009; Capecchi, 2013). Antoine Parent, 1704 yılında su altı çarklarının verimliliğini hesaplayan bir teori yayınlamıştır (Denny, 2003). 1759 yılında John Smeaton üstten düşen su ile çalışan çarkların alttan geçen su ile çalışan çarklara göre daha verimli olduğunu gösteren deneysel bir çalışmada bulunmuştur (Capecchi, 2013). 19. yüzyılda, üstten dökülen su çarkları için uygun olmayan alanlarda da yüksek verim elde etmek için, gövdede kanatlar kullanılmaya başlanmıştır. Fransız mühendis Poncelet, küçük nehirlerdeki yavaş akan suyun potansiyel enerjisinin kinetik enerjisinden kayda değer ölçüde daha büyük olduğunu tespit etmiş ve ilk su çarkını çok düşük enerji farklılıkları kullanarak tasarlamıştır. Fransız mühendis Sagebien daha sonra sadece potansiyel enerjiyi kullanan, verimliliği önemli ölçüde artıran ve alttan su geçişine izin veren bir su çarkı sistemi geliştirmiştir (Quaranta ve Revelli, 2015). Altan ve orta gövdeden su alan çarklar için en verimli şekil nihayet İsviçreli hidrolik mühendisi Zuppinger tarafından geliştirilmiş ve 1883'te patent alınmıştır. Bu çarklar geriye eğimli, kavisli kanatlardan ve savak tipi bir içe akıştan oluşuyordu (Müller ve Kauppert, 2004).

Zuppinger ve Sagebien su çarklarının performans özelliklerini değerlendirmeyi amaçlayan ilk deneysel çalışma Quaranta ve Müller'in (2018) çalışmasıdır. Ayrıca, Von Harten vd. (2013) tarafından Zuppinger tekerlekleri test edilmiş ve farklı sayıda kanatla çark davranışını analiz etmişlerdir. Analizlerinde maksimum %80 verimlilik elde etmişler ve optimum dönüş hızının basınç farkı ve akış hızı ile arttığını göstermişlerdir. Optimum çark verimini korumak için farklı akış hızı ve basınç farkı koşulları durumunda farklı dönüş durumları gerektiği, bunun da pahalı dişli kutuları ve invertör sistemleri kurularak sağlanabileceği bildirilmiştir (Müller ve Kauppert, 2004).

Quaranta ve Müller (2020), alttan su alan Sagebien ve Zuppinger çarkları üzerinde deneysel testler gerçekleştirmiştir. Memba su derinliğini kontrol altında tutmaya ve giriş savakları kullanarak değişken debiler altında çarkların performansını iyileştirmeye çalışmışlardır. Deneysel çalışmayı 12 m uzunluğunda, 0.30 m genişliğinde ve 0.40 m derinliğinde bir

kanalda yapmışlardır. Çarkın yarıçapı 30 cm, genişliği 19.5 cm, kanat sayısı 30, kanat genişliği 18 cm, kanat uzunluğu 15cm seçilmiş ve çarkın membasında suyu kabartmak için hemen çark önüne 6.5 cm kalınlığında bir eşik yerleştirilmiştir. Froude benzerliğinden ölçek faktörü yaklaşık olarak 1:10 olarak alınmıştır. Eşik üzerinde kullanılan savak yükseklikleri 2, 3 ve 4 cm yükseklikleri ve debi değerleri 0.7 – 4.4 L/s aralığında alınmıştır. Zuppinger çarkı için en yüksek verim en düşük yükseklikli savak durumunda elde edilmiştir. Sagebien çarkı için ise 2 ve 3 cm savak yüksekliklerinin her ikisinde de yüksek verim elde edilmiştir. Buna göre çark öncesine yerleştirilen savak yüksekliğinin Zuppinger çarkı çapının 1:15, Sagebien çarkının %10'u olarak alınmasının uygun olduğu ifade edilmiştir.

Cleynen vd. (2018), serbest yüzeyli akış koşullarında çalışan bir su çarkının güç özelliklerini belirlemek amacıyla iki boyutlu hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonlarını kullanmıştır. Simülasyonların doğrulanması serbest yüzeyli bir kanalda oluşturulan deneysel model ile yapılmıştır. Çarkın net güç çıkışını ortaya koymak için her bir kanadın katkısı ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Bu nedenle kanatlar ayrıştırılmış ve karşılaştırma için parametrelendirilmiştir. Bu sayede giriş sıçraması, çıkış suyunun alınması, su birikmesi ve kanatlar arası etkileşim gibi durumlar tanımlanabilmektedir. Ayrıca değişen çark derinliğinin, uç hızı oranının, uç açısının ve kanat açısının çarktan elde edilen güç çıkışı ve verimliliğe etkileri açıklanmıştır. Nümerik araçlar kullanılarak serbest su çarkının performansına yönelik yapılan bu çalışmanın optimizasyona dair ilk adım olduğu ileri sürülmüştür. Daha derin, daha yavaş ve hızlı akış altında çalışan çarkların daha düşük verimli ve daha yüksek salınım şartları oluşsa da maksimum güç bu koşullar altında oluşmuştur. Artan derinlik ve azalan uç hızları gücü olumsuz etkilemiş ve çarkın hemen membasında su birikmesine neden olmuştur. Parazit etkilerle trendin tersine çevrilmesine izin verilmemesi koşuluyla kanat sayısının artırılması hem daha fazla hem de daha düzgün güç üretilmesine katkıda bulunmaktadır. Bu nedenle akımda çark kanatlarının neden olduğu etkilerin belirlenmesi gerekmektedir.

Paudel vd. (2013), laboratuvar ölçeğinde bir kanalda esnek kauçuk bıçaklara sahip su çarklarının performans özelliklerini araştırmıştır. Kanal genişliğinin su çarkı performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla çarkın menba ve mansabında farklı kanal genişlikleri kullanılmıştır. Çarklardan en fazla güç ve verimin, menba genişliğinin küçük mansap genişliğinin büyük olduğu durumda elde edildiği görülmüştür.

Belirli, basit bir akış çarkının performansını ölçmek için deneysel çalışmalara (Turnock vd. (2007); Batten vd. (2011)) literatürde rastlansa da optimum tasarım aranan deneysel çalışmalar halihazırda noksandır. Serbest akış koşullarında çalışan çarkların HAD (hesaplamalı akışkanlar dinamiği) kullanılarak araştırıldığı önceki çalışmaların, tekrarlana bilirliği sağlamak için simülasyonlar veya sonuçlar hakkında yeterli ayrıntı vermediği görülmektedir (Hadler ve Broekel (2011); Batten ve Müller (2012)). Ancak, son yıllarda deneysel doğrulamanın yardımıyla, HAD'ın serbest bir yüzey koşullarında hidro-kinetik cihazların performansı üzerindeki etkisini başarılı bir şekilde tanımlayabildiği gösterilmiştir (Kolekar ve Banerjee (2015); Liu vd. (2016); Tian vd. (2016)). Bu nedenle, serbest akışlı su çarkı tasarımı sorununa sayısal araçlarla yaklaşmak, tasarım parametrelerinin çark performansı üzerindeki etkisini sistematik olarak araştırmak için bir potansiyel mevcuttur.

2.10. Su Çarkları ile İlgili HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) Çalışmaları

Pujol vd. (2015), Himalaya bölgesinde kurulu geleneksel bir su çarkını, sonlu hacimler metoduna dayalı STAR-CCM+ HAD (hesaplamalı akışkanlar dinamiği) ticari yazılım programı ile modellemiştir. Çalışmalarında geleneksel su çarklarının temel yapısını korumayı, aynı dönüş hızlarında mekanik gücü artırabilmeyi ve çarklar üzerinde basit modifiyeler önermeyi hedeflemişlerdir. Bu amaçla farklı kanat tasarımları ile değişik simülasyonlar oluşturmuşlardır. Modellerinde türbülans kapama modeli olarak gerçeklenir k- ϵ modelini kullanmışlardır. Kavisli metal kanatlara sahip fazla sayıda kanatlı çarkların aynı dönüş sayısında daha yüksek güç ürettiğini simülasyonlarla doğrulamışlardır.

Cleynen vd. (2021), üretilen shaft gücünü en üst düzeye çıkarmak amacıyla serbest akışlı bir su çarkının tasarımını optimize etmek üzere bir HAD modeli kullanmıştır. STAR-CCM+ paketindeki sıvı akışını tanımlamak için iki boyutlu kararsız RANS (Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes) yaklaşımı kullanılmaktadır. İki faz, akışkan hacimleri VOF (volume of fluid) yaklaşımı kullanılarak tanımlanmış ve türbülans modeli olarak kayma gerilmesi taşınımı (SST) k- ω modeli kullanılmıştır.

Paudel ve Saenger (2015), fiziksel modelini Darmstadt Uygulamalı Bilimler Üniversitesi hidrolik laboratuvarında oluşturdukları Dethridge çarkının üç boyutlu sayısal çözümünü Flow-3D HAD yazılımı ile yapmıştır. Flow-3D, RANS (Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes) denklemlerini çözmek için sonlu hacim yöntemini kullanmaktadır. Yazılım,

hareketli nesneler modelini (GDO) üç boyutlu ortamda çark – su etkileşimini simüle etmek amacıyla kullanılmaktadır. Flow-3D'nin sayısal çözümlerinin deneysel sonuçlarla iyi bir uyum gösterdiği belirlenmiştir. Flow-3D ayrıca bu çalışmada yer alan karmaşık hidrodinamiği yakalamak için güçlü bir araç olarak ifade edilmiştir.

Paudel vd. (2021), fiziksel Zuppinger su çarkını Flow-3D HAD yazılımı ile üç boyutlu olarak simüle etmiştir. Izgara boyutunun sayısal modelin sonuçları üzerindeki etkisi, sistematik bir ızgara iyileştirme çalışması kullanılarak değerlendirilmiştir. Izgara yakınsama indeksleri (GCI) ile sabit bir ızgara iyileştirme oranı kullanılarak, her biri üç farklı ızgara boyutuna sahip iki ızgara kümesi için hesaplamalar yapılmıştır. HAD model sonuçları, tekerleğin farklı çalışma noktalarındaki fiziksel model sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Fiziksel ve sayısal model sonuçları arasındaki güç çıkışı ve verimlilikteki maksimum farklar sırasıyla %2,5 ve %8 olarak bulunmuştur.

Al-Dabbagh (2018), 5 m çapında bir akarsu çarkı türbinini, farklı akış koşulları altında ANSYS-CFX paket programını kullanarak sayısal olarak simüle etmiştir. Türbinin arkasındaki iz bölgesinin çarkın yanındaki diğer türbinleri de etkilemiştir. Simülasyon sonuçları, bu koşullarda bir çark çifti kullanılması durumunda akış yönündeki açıklığın 6 m'den az olmaması gerektiğini göstermiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Giriş

Bu kısımda Navier-Stokes ve RANS (Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes) denklemleri anlatılacaktır. Daha sonra türbülans modellerinden Standart k-ε ve bu çalışmada kullanılan RNG k-ε türbülans modeli açıklanacaktır. Sonrasında deney düzeneği açıklanacak ve deneyde kullanılan araç-gereçlerden değinilecektir. Son olarak bu bölümden FLOW-3D yazılımı anlatılacak ve kullanımı detaylıca irdelenecektir.

3.2. Navier-Stokes Denklemleri

Bir kontrol hacmine etki eden kuvvetler, bünye kuvvetleri ve basınç kuvvetleri olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Yüzey kuvvetleri ise basınç ve viskoz gerilmelerin toplamından oluşmaktadır. Üç boyutlu, sabit yoğunluk ve viskoziteli Newton tipi bir akışkan için diferansiyel momentum denklemleri, bu denklemler onları türeten Claude-Louis Navier ve George Gabriel Stokes'a atfen Navier-Stokes denklemleri olarak anılır. (Kıray, 2014) Sonsuz küçük bir kontrol hacmine Newton'un ikinci kanunu uygulanırsa; Newtonien bir akışkan için aşağıdaki Navier-Stokes denklemleri yazılabilir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = +\nabla \cdot (\rho V) \quad (3.1)$$

$$\rho \cdot \frac{dV}{dt} = -\nabla p + \nabla \tau + \rho \cdot g \quad (3.2)$$

Denklem (3.1) kütlenin korunumunu, denklem (3.2) momentumun korunumu temsil etmektedir. Burada V hız vektörünü, τ gerilme tansörünü, ρ yoğunluğu, g yerçekimini, t zamanı, p basıncı göstermektedir. Su sıkışmaz kabul edildiler ve yoğunluğu da değişmez.

Bu nedenle;

$$\frac{d\rho}{dt} = 0 \quad (3.3)$$

Böylelikle süreklilik ve momentum denklemleri düzenlemek mümkündür.

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (3.4)$$

$$\rho \cdot \frac{dV}{dt} = \rho \left(\frac{\partial V}{\partial t} + (\nabla \cdot V) \cdot V \right) = -\nabla p + \nabla \tau + \rho \cdot g \quad (3.5)$$

Yukarıdaki denklemleri tansör olarak ifade edersek.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial u_j}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (3.7)$$

Bir akımın 3 boyutu için $i,j=1,2,3$ değerlerini alır ve sırasıyla x, y, z doğrultularındaki akım bileşenlerini ifade etmektedir. Bu akışkan sıkışmaz ve Newtonien kabul edildiğinden gerilme tansörü, dinamik viskozite katsayısı ve şekil değiştirme hızları ile orantılıdır:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.8)$$

Bu ifade denklem (3.7) de yerine konulursa momentum denklemi aşağıdaki şekilde yazılır.

$$\rho \frac{\partial u_j}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \rho g_i \quad (3.9)$$

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

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.10)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\left(\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \right) \cdot \rho g_x = 0 \quad (3.11)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\left(\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \right) \cdot \rho g_y = 0 \quad (3.12)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\left(\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \right) \cdot \rho g_z = 0 \quad (3.13)$$

Serbest yüzeyli akımlarda etki eden tek kütsel kuvvet yerçekimi kuvvetidir. Yani denklemlerde ki g_x ve g_y terimleri sıfıra eşittir. Bu denklem sistemine bakıldığında bilinmeyen sayısı basınç p ve hız vektörünün üç bileşeni u, v, w olmak üzere dört adettir. Ve süreklilik ve üç adet lineer momentum denklemi olmak üzere elimizde toplam dört adet denklem bulunmaktadır. Fakat 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 (3.11), (3.12), (3.13) ten oluşan hareket denklemleri aşağıdaki gibi kapalı formda da yazılabilir.

$$\rho \cdot \frac{dV}{dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 V + \rho \cdot g \quad (3.14)$$

Denklem (3.14) ün fiziksel anlamı: yoğunluk* ivme= birim hacim başına basınç kuvveti+ birim hacim başına viskoz kuvvet+ birim hacim başına kütsel kuvvet şeklindedir.

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

$$\rho \cdot \frac{dV}{dt} = -\nabla p + \rho \cdot g \quad (3.15)$$

Viskozite terimleri bu denklemlerde yoktur ve sınır koşullarının da farklılıklar gösterir. Hız vektörü viskoz bir akışkanın katı bir sınırında sıfırdır. Bu da akışkanın katı madde sınırını ne geçebileceği ne de bu sınır üzerinde kayabileceği anlamına gelmektedir.

3.3. RANS (Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes) Denklemleri

Pratikte akımlar Reynolds sayısına bağlı olarak akımlar laminar veya türbülanslı olarak ikiye ayrılırlar.

$$Re = \frac{\rho \cdot V D}{\mu} \quad (3.16)$$

Burada V ortalama hızı, D ise karakteristik boyu, ρ yoğunluğu, μ ise dinamik viskozite katsayısını göstermektedir. Reynolds sayısı 500 den büyük olursa açık kanal akımlarında akım türbülanslı akım olarak adlandırılır. Açık kanal akımında savaklanan akım türbülanslıdır. Matematiksel olarak henüz türbülanslı akım yapısı çözülememiştir.

Türbülanslı akım karakteristik olarak belirli bir yönde olan ana akımın üzerine küçük ölçekli ve yüksek frekanslı rastgele salınımlar eklenmektedir. Normal olarak bu dalgalanmaların büyüklüğü, ana akımın büyüklüğünün %5-%10'u nispetindedir. (Kıray, 2014)

Türbülanslı akımlar da akım boyunca var olan noktalardan herhangi birinde akıma ait büyüklüklerin yönü ve şiddeti zamana bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Burdan yola çıkarak bu büyüklüklerin yani hızın ve basıncın değerini bulmak gerekirse ortalama olarak ve anlık salınımların toplamı şeklinde ifade etmek mümkündür.

$$u = \bar{u} + \hat{u}, \quad v = \bar{v} + \hat{v}, \quad w = \bar{w} + \hat{w}, \quad p = \bar{p} + \hat{p} \quad (3.17)$$

Burada $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}, \bar{p}$ hız ve basınca ait zamandan bağımsız ortalama değerleri, $\hat{u}, \hat{v}, \hat{w}, \hat{p}$ ise bunlara ait anlık salınan bileşenlerini temsil etmektedir. Denklem (3.1) de verilen u, v, w değerleri denklem (3.10) da verilen süreklilik denkleminde yerine yazılacak olursa;

$$\frac{\partial}{\partial x}(\bar{u} + \hat{u}) + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{v} + \hat{v}) + \frac{\partial}{\partial z}(\bar{w} + \hat{w}) = 0 \quad (3.18)$$

Bir Δt intervali için süreklilik denkleminin ortalaması alınır;

$$\overline{\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x}} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} = 0 \quad (3.19)$$

ifadesi bulunur. Denklem (3.19) daki ifade (3.18) den çıkarılırsa;

$$\frac{\partial \hat{u}}{\partial x} + \frac{\partial \hat{v}}{\partial x} + \frac{\partial \hat{w}}{\partial x} = 0 \quad (3.20)$$

3.3.1. Sıkışmayan Türbülanslı Akımda Hareket Denklemleri

Navier-Stokes denklemlerinin x bileşeni ele alınıp denklem (3.17) deki ifadeler denklem (3.11) de yerine koyulursa;

$$\rho \left(\frac{\partial(\bar{u}+\dot{u})}{\partial t} + (\bar{u} + \dot{u}) \frac{\partial(\bar{u}+\dot{u})}{\partial x} + (\bar{v} + \dot{v}) \frac{\partial(\bar{u}+\dot{u})}{\partial y} + (\bar{w} + \dot{w}) \frac{\partial(\bar{u}+\dot{u})}{\partial z} \right) = -\left(\frac{\partial\bar{p}+\dot{p}}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2(\bar{u}+\dot{u})}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(\bar{u}+\dot{u})}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(\bar{u}+\dot{u})}{\partial z^2} \right) \right) \cdot \rho g_x = 0 \quad (3.21)$$

Formülü elde edilir. Denklem (3.21) de her bir terimin zamana göre ortalaması alınırsa 'u '=0 olur. Böylece x doğrultusu için;

$$\rho \left(\frac{\partial\bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial\bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial\bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial\bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial\bar{u}\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial\bar{u}\bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial\bar{u}\bar{w}}{\partial z} \right) = -\left(\frac{\partial\bar{p}}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2\bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\bar{u}}{\partial z^2} \right) \right) \cdot \rho g_x = 0 \quad (3.22)$$

denklemini elde edilir. Çalkantı ifadeleri eşitliğin sağ tarafına alınırsa;

$$\rho \left(\frac{\partial\bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial\bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial\bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial\bar{u}}{\partial z} \right) = -\left(\frac{\partial\bar{p}}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2\bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\bar{u}}{\partial z^2} \right) \right) - \rho \left(\frac{\partial\bar{u}\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial\bar{u}\bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial\bar{u}\bar{w}}{\partial z} \right) + \rho g_x \quad (3.23)$$

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

$$\rho \left(\frac{\partial\bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial\bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial\bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial\bar{v}}{\partial z} \right) = -\left(\frac{\partial\bar{p}}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2\bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\bar{v}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\bar{v}}{\partial z^2} \right) \right) - \rho \left(\frac{\partial\bar{v}\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial\bar{v}\bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial\bar{v}\bar{w}}{\partial z} \right) + \rho g_y \quad (3.24)$$

$$\rho \left(\frac{\partial\bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial\bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial\bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial\bar{w}}{\partial z} \right) = -\left(\frac{\partial\bar{p}}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2\bar{w}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\bar{w}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\bar{w}}{\partial z^2} \right) \right) - \rho \left(\frac{\partial\bar{w}\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial\bar{w}\bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial\bar{w}\bar{w}}{\partial z} \right) + \rho g_z \quad (3.25)$$

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

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.26)$$

$$\rho \frac{\partial u_j}{\partial t} + \rho \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \frac{\partial(\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (3.27)$$

(3.27) denklemini, denklem (3.9)'da verilen Navier-Stokes denklemleri ile karşılaştırıldığında ilave olarak $\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)/\partial x_j$ ifadesini içerdiği görülmektedir. Bu ifade türbülansstan dolayı oluşan çalkantı gerilmelerini ya da literatürdeki ismiyle Reynolds gerilmelerini temsil etmektedir. 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 amaçla türbülans $\tau_{ij} = -\rho(\overline{u_i u_j})$ gerilmelerini (Reynolds gerilmeleri) ve denklem (3.8)'deki τ_{ij} laminer viskozite gerilmelerini göstermek üzere, denklem (3.27) gerilmeler cinsinden yeniden yazılacak olursa;

$$\rho \frac{\partial u_j}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau'_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (3.28)$$

eşitliği elde edilir.

Gerilme ifadeleri $i \partial \partial / x$ parantezine alınırsa

$$\rho \frac{\partial u_j}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial (\tau_{ij} + \tau'_{ij})}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (3.29)$$

denklemini ortaya çıkar.

Görüldüğü gibi RANS denklemlerinde toplam gerilme laminer 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.

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.30)$$

Burada μ türbülans viskozitesini işaret eder. Dinamik viskozite μ gibi akışkanın fiziksel bir özelliği değildir. μ akımdaki hız çalkantılarına bağlıdır. Başka bir ifade ile aynı akışkan için farklı akım koşullarında değişik değerler almaktadır. Dolayısıyla zamana bağlı RANS denklemlerinin çözülebilmesi için μ türbülans viskozitesinin değerinin hesaplanması gereklidir. Bu da farklı türbülans modelleri yardımıyla gerçekleştirilir.

3.4. Türbülans Modelleri

Türbülanslı akışkan hareketini, akışın çeşitli büyüklüklerinin uzaya ve zamana göre rasgele değişim gösterdiği, öyle ki istatistiki olarak belirgin bir ortalamanın güçlülükte ayırt

edilebildiği kurlsız bir akış durumu olarak tarif etmek mümkündür.(Kıray, 2014)

3.4.1. Standart k-ε Türbülans Modeli

Tüm k-ε denklemleri birçok bilinmeyen ve ölçülemeyen terimler içermektedir. Daha pratik bir yaklaşım için Launder ve Spalding tarafından 1974 yılında geliştirilen Standart k- ε modeli kullanılmaktadır. Bu model sayesinde tam k-ε denklemlerine göre bilinmeyen sayısı azaltılmakta ve aynı zamanda türbülanslı akışın hakim olduğu birçok uygulamada kullanılmak üzere denklem sistemleri elde edilmektedir.

Standart k-ε türbülans modeli için taşınım denklemlerini incelersek türbülans kinetik enerjisi (k) için;

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k + P_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (3.31)$$

Türbülans enerji yitimi (ε) için taşınım denklemi;

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (P_k + C_{1\epsilon} P_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (3.32)$$

Türbülans kinetik enerjisini denklem (3.5)'te gösterildiği şekilde ifade edebiliriz;

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2}) \quad (3.33)$$

Türbülans viskozitesi ;

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3.34)$$

(3.38) ve (3.39) denklemlerinde geçen türbülans kinetik enerjisi üretimi olup şu şekilde ifade edilebilir;

$$P_k = -\rho \overline{u_i u_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (3.35)$$

$$P_k = \mu_t S^2 \quad (3.36)$$

$$S \equiv \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (3.37)$$

Denklem (3.38) ve (3.39)'da geçen P_b kaldırma kuvvetinin etkisi olup;

$$P_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (3.38)$$

denklem (3.45)'te gösterildiği şekilde ifade edilebilir. Denklem (3.45)'teki denklemde geçen ifadesi i yönündeki yerçekimi ivmesini belirtmektedir. ifadesi enerji için türbülans Prandtl

sayısı olup Standart k- ϵ türbülans modeli için varsayılan değeri 0,85'tir. Sıcaklık genleşme katsayısı β ;

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (3.39)$$

Denklem (3.38) (3.39) ve (3.40)'ta geçen katsayılar;

$C_{1\epsilon}$	1,44
$C_{2\epsilon}$	1,92
$C_{3\epsilon}$	-0.33
C_μ	0.09
σ_k	1,00
σ_ϵ	1,3

Denklem (3.38)'de geçen terimi genleşmeden kaynaklanan kayıp olarak bilinmektedir ve sıkıştırılabilir akış özellikleri için önem arz eder. Fakat bu çalışmada tüm akışlar sıkıştırılmaz olduğu için bu terim bu çalışma için önemli değildir ve ihmal edilebilir.

Standart k- ϵ türbülans modelinde, türbülanslı akış viskozitesinin isotropik olarak kabul edilmiş olmasına rağmen bu durum gerçek hayatta karşımıza çıkan birçok durum için geçerli değildir. Böyle bir kabulün yapılmasından dolayı standart k- ϵ türbülans modeli akışın ayrılması, yüksek ters basınç gradyenine sahip akışlar, dönen akışlar, tekrar birleşme bölgeleri gibi durumlar için hassas tahminlerde bulunamamaktadır. Standart k- ϵ türbülans modeline ait zayıflıklar bilindiğinden dolayı CFD toplulukları tarafından RNG k- ϵ ve Realizable k- ϵ türbülans modelleri gibi çeşitli k- ϵ modelleri geliştirilmiştir.

3.4.2. RNG k- ϵ Türbülans Modeli

Bu türbülans modeli Navier-Stokes denklemlerinin 'Renormalizasyon Grubu' yöntemleri olarak bilinen matematiksel yöntemlerin kullanılması sonucunda ortaya çıkmıştır. RNG türbülans modeli gerilme oranlarından kaynaklanan etkileri dikkate almak için türbülans enerji yitimi (ϵ) 'ne ek bir kaynak terimi içermektedir.

k ve ϵ taşınım denklemlerini yazmak için farklı denklemler kurulabilir. Taşınım için kaldırma kuvvetinin ihmal edildiği daha basit bir denklem yazılabilir. Türbülans kinetik

enerjisi (k) için taşınım denklemi;

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \rho \varepsilon \quad (3.40)$$

Türbülans enerji yitimi için (ε) için taşınım denklemi;

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{P_k}{k} + C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.41)$$

$$C_{2\varepsilon} = C_{2\varepsilon} + \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{(1 + \beta \eta^3)} \quad (3.42)$$

$$\eta = S \frac{k}{\varepsilon} \quad (3.43)$$

$$S \equiv \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (3.44)$$

Bu denklemlerde yer alan katsayılar standart k- ε türbülans modelinin aksine RNG teorisi ile elde edilmiştir.

Tablo 0.1: RNG k- ε ve Standart k- ε türbülans modellerinde kullanılan katsayılar için sayısal değerlerin karşılaştırılması (Kıray, 2014)

Katsayılar	RNG k- ε	Standart k- ε
$C_{1\varepsilon}$	1,42	1,44
$C_{2\varepsilon}$	1,68	1,92
C_μ	0,0845	0,09
σ_k	0,7194	1,00
σ_ε	0,7194	1,30
η_0	4,38	----
β	0,012	----

RNG türbülans modeli diğer modeller ile kıyaslandığında aniden gerilen akış dönen akış ve düşük reynold' s sayısına sahip akışlarda seçmek daha mantıklıdır herhangi bir kısıtlaması yoktur ancak hesap süresini %10 ila 15 arasında arttırdığı bilinmektedir. Yüksek dönme sayısına sahip akışlarda yakınsama elde etmek ise zordur. RNG k-e türbülans modelinin, hız alanı ve su yüzünün hesaplamasında, bu çalışmada kullanılan diğer türbülans modellerine göre daha başarılı olduğu görülmüştür. (Bal,2011)

3.4.3 Realizable k- ε Türbülans Modeli (RKE)

Standart k-ε türbülans modelinde bulunan C_μ sabitinin değeri ataletli sınır tabaka altı bölgede elde edilmiştir. Gerçekte bu sabit farklı akış bölgelerinde değişim göstermektedir. Üstelik türbülans viskozitesinin hesabında kullanılan modelin yüksek şekil değiştirme miktarlarında “anlamsız”(non-realizable) olduğu uzun zamandır bilinen bir gerçektir. Buna göre, $Sk/\varepsilon > 3,7$ olduğunda, normal gerilme

negatif olabilmekte ve hatta Reynolds gerilmelerinde Schwartz eşitsizliği ihlal edilmektedir (Shin vd., 1995). RKE modelinde bu problemlerin önüne geçebilmek için standart k-ε ve RNG k-ε modellerinde sabit olan C_μ katsayısı dinamik bir form almaktadır. Buna göre

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}} \quad (3.45)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Denklem (3.45.)’da bulunan terimler,

$$U^* = \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}} \quad (3.46)$$

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k, \quad \Omega_{ij} = \overline{\Omega_{ij}} - \varepsilon_{ijk}\omega_k \quad (3.47)$$

$$A_s = \sqrt{6} \cos \varphi, \quad \varphi = \frac{1}{3} \arccos(\sqrt{6} W) \quad (3.48)$$

$$W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\tilde{S}^3} \quad (3.49)$$

$$\tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}} \quad (3.50)$$

şeklinde ifade edilir. Burada $\tilde{\Omega}_{ij}$, ω_k açısal hızıyla dönmekte olan bir referans sistemine göre ortalama dönme miktarı ve S_{ij} ise şekil değiştirme hızı tansörüdür. RKE modelinde standart k-ε modelinden farklı olarak yeni bir kayıp miktarı denklemi de geliştirilmiştir;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\rho\varepsilon_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_1}{\sigma_3} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (3.51)$$

Burada;

$$C_1 = \max \left(0.43; \frac{S_\varepsilon^k}{S_\varepsilon^k + 5} \right) \quad (3.52)$$

$C_2 = 1.9$ şeklinde verilmektedir. Görüldüğü gibi ε 'un oluşumu ve kaybı tamamen farklı bir formda ele alınmış ve oluşumu bir fonksiyona bağlanmıştır. RKE modeli geliştirilmiş biçimi ile yüksek Reynolds sayısına sahip ve tamamen türbülanslı akışlar için uygun olduğu bildirilmiştir (Shin vd., 1995).

3.4.4. Modifiye k- ω Modeli (MKW)

Wilcox, kendisine ait Standard k-w modelini (Wilcox, 1988) modifiye ederek aşağıdaki Modified k-w modelini (Wilcox, 1998) vermiştir. Yeni k-w modelinde, düşük-Reynolds-sayısı düzeltmelerini de göz önüne almak üzere, türbülans viskozitesine bir sönüm fonksiyonu eklenmiştir. İkinci transport denklemi olarak ε yerine türbülans kinetik enerjisinin özgül kayıp oranı, $w=\varepsilon/k$, kullanılmıştır. Bu model ile türbülans viskozitesi μ_t , k-denklemini ve w-denklemini aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\mu_t = \alpha^* \frac{\rho k}{\omega} \quad (3.53)$$

Burada, α^* düşük Reynolds sayısı düzeltmesi için sönüm fonksiyonudur.

k-denklemini:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial(\rho k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_1}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho k \omega \quad (3.54)$$

ω -denklemini:

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_1}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 \quad (3.55)$$

Model sabitleri ve yardımcı eşitlikler (sıkışmayan akım için)

$$\alpha^* = \frac{\alpha_0^* + Re_t/R_k}{1 + Re_t/R_k} \quad , \quad \alpha_0^* = \beta_0/3 \quad , \quad \beta_0 = 0.072 \quad , \quad Re_t = \frac{\rho k}{\mu \omega} \quad , \quad R_k = 6 \quad (3.56)$$

$$\alpha = \frac{0.52 \alpha_0 + Re_t/R_\omega}{\alpha^* 1 + Re_t/\omega} \quad , \quad \alpha_0 = 1/9 \quad , \quad R_\omega = 2.95 \quad , \quad \sigma_k = 2 \quad , \quad \sigma_\omega = 2 \quad (3.57)$$

$$\beta^* = \beta_0^* f_{\beta^*} \quad , \quad \beta_0^* = \frac{9}{100} \frac{\frac{4}{15} + (Re_t/R_\beta)^4}{1 + (Re_t/R_\beta)^4} \quad , \quad R_\beta = 8 \quad , \quad f_{\beta^*} = \begin{cases} 1, & X_k \leq 0 \\ \frac{1+680 \frac{2}{k}}{1+400 \frac{2}{k}}, & X_k > 0 \end{cases} \quad (3.58)$$

$$\beta = \beta_0 f_\beta \quad , \quad f_\beta = \frac{1+70X_\omega}{1+80X_\omega} \quad , \quad X_\omega = \left| \frac{\Omega_{ij}\Omega_{jk}S_{ki}}{(\beta_0^*\omega^3)} \right| \quad , \quad X_k = \frac{1}{\omega^3} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad , \quad (3.59)$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} (\partial \overline{u_{i,j}} - \partial \overline{u_{j,i}}) \quad (3.60)$$

k-w modelinin yüksek-Reynolds-sayısı formunda: $\alpha^* = 1, \beta^* = 9/100$.

MKW modelinin, katı ile sınırlandırılmış ya da serbest türbülanslı akımların analizinde, sınır tabakalarının logaritmik hız bölgesinde, pozitif basınç gradyanının olduğu ayrılma bölgelerinde, SKE modeline göre üstünlük sağladığı ifade edilmiştir.

3.4.5. RSM Türbülans Modeli (RSM)

“Reynolds Gerilmesi Modeli” (RSM) adını alan bu yöntem Reynolds gerilmelerinin ($\rho u_i' u_j'$) doğrudan transport denklemlerinin çözümüyle hesaplanması esasına dayanır (Gibson ve Launder, 1978; Launder, 1989). Reynolds gerilmesi taşınım denkleminin Navier-Stokes ve RANS denklemlerinden basit matematiksel manipülasyonlarla birkaç adımda elde edilmeleri mümkündür. Söz konusu denklem Reynolds gerilmelerinin her bileşeni için tüm taşınım mekanizmasının fizikini içermektedir. Elde edilen denklemin terimleri fiziki anlamlarına uygun biçimde basitleştirilip modellenerek, her Reynolds gerilme bileşeni için ayrı bir denklem elde edilmektedir. RSM özellikle şekil değiştirmenin karmaşık bir yapı sergilediği ve eğriselliğin olduğu akışlarda türbülans viskozitesi modellerine göre daha avantajlıdır (Davidson, 2005). Sonuç olarak, 6 adet Reynolds gerilmesi denklemi ve Reynolds gerilmesi taşınım denkleminde yer alan kayıp terimi için de 1 adet disipasyon taşınım denklemi ile birlikte üç boyutlu simülasyonlarda 7 adet ekstra denklem çözülmesi gerekmektedir. Tahmin edileceği üzere RSM, hesaplama açısından masraflı bir modeldir. Kaldırma kuvvetlerinin etkisi ihmal edildiğinde bu transport denklemleri aşağıdaki formda yazılabilir:

$$\frac{\partial(\rho \overline{u_i' u_j'})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k_i \overline{u_i' u_j'})}{\partial x_k} = D_{T,ij} + D_{L,ij} + P_{ij} + \varphi_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (3.61)$$

Denklemin terimleri sırasıyla, türbülans difüzyon terimi:

$$D_{T,ij} = -\frac{\partial}{\partial t} \left[\overline{\rho u'_i u'_j u'_k} + \overline{\rho (\delta_{kj} u'_i + \delta_{ik} u'_j)} \right] \quad (3.62)$$

Moleküler difüzyon terimi:

$$D_{L,ij} = -\frac{\partial}{\partial x_k} \left(\mu \frac{\partial}{\partial x_k} \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (3.63)$$

Türbülans gerilmeleri üretim terimi:

$$P_{ij} = -\rho \left(\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right) \quad (3.64)$$

Basınç uzatma terimi:

$$\varphi_{ij} = \rho \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.65)$$

Dissipasyon terimi:

$$\varepsilon_{ij} = -2\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} \quad (3.66)$$

Bu terimlerden $D_{T,ij}$, φ_{ij} , ε_{ij} ve terimleri yeni ve bilinmeyen korelasyonlar içermekte olup hesaplanabilmeleri için modellenmeleri gerekmektedir. Genelleştirilmiş gradyan difüzyon hipotezinin basitleştirilmiş formu kullanılarak türbülans gerilmelerinden kaynaklanan üretim terimi;

$$D_{T,ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k} \right) \quad (3.67)$$

Şeklinde modellenebilir (Lien ve Leschziner, 1994). Lineer yaklaşım kullanılırsa basınç-uzama terimi üç bileşenin toplamı şeklinde yazılabilir. Bu bileşenler yavaş ve hızlı basınç-uzama bileşenleri ile cidar etkisini ifade eden $\phi_{i,j,w}$ bileşenidir (Gibson ve Launder, 1978; Launder, 1989). Buna göre basınç-uzama terimi;

$$\varphi_{ij} = -C_1 \frac{\varepsilon}{k} \left(\overline{u'_i u'_j} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right) - C_2 \left[\left(P_{ij} - \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \rho_1 \overline{u'_i u'_j}) \right) - \frac{1}{3} \left(P_{kk} - \frac{\partial}{\partial x_1} (\rho \rho_1 \overline{u'_k u'_k}) \right) \right] + \varphi_{ij,\omega} \quad (3.68)$$

şeklinde yazılabilir. Burada $C_1=1.8$, $C_2=0.6$ alınmıştır. Dissipasyon terimi ise sıkıştırılabilirlik ihmal edilerek;

$$\varepsilon_{ij} = \frac{2}{3} \rho \varepsilon \delta_{ij} \quad (3.69)$$

alınmıştır. Bu denklemlerde geçen türbülans kinetik enerjisi k $u u / 2 = i i$ ifadesinden

bulunabilirken bunun dissipasyonu olan ε fonksiyonu denklem (4.73.)’de $R=0$, $C1\varepsilon=1.44$, $C2\varepsilon=1.92$, $\sigma\varepsilon=1.0$ ve türbülans üretimi terimi $Gk=0.05P_{ii}$ alınarak elde edilir.

3.4.6. SST k- ω Türbülans Modeli (SST)

Standart k- ω modeli (Wilcox, 1988) sınır tabaka akışlarında yüksek başarı sağlıyor olsa da, Menter (1992)’in ters basınç gradyanı içeren sınır tabaka akışları için yaptığı popüler türbülans modelleri karşılaştırmasında, standart k- ω modeliyle gerçekçi hız profillerinin yanı sıra, haddinden fazla kayma gerilmesi hesaplandığı belirtilmektedir. Söz konusu çalışmada Menter bunun nedeninin modelin kayma gerilmesinin taşınımının hesabını içermediği belirtilmekte ve türbülans viskozitesinin hesabında yaptığı küçük bir değişiklik ile sonuçların iyileştirilmesini sağlamıştır. Çalışmada türbülans viskozitesinin standart tanımının ters basınç gradyanı içeren akışlarda hatalı sonuçların kaynağı olduğu belirtilmektedir. Bu düşünce uyarınca Menter (1993), türbülans viskozitesinin hesabında pratik bir değişiklik yaparak kayma gerilmesinin 0.3 (Bradshaw sabiti) k’den daha büyük çıkmamasını sağlamıştır. Ayrıca türbülans viskozitesinin hesabına akıllı bir fonksiyon ekleyerek bu değişikliğin yalnızca sınır tabaka bölgesinde kalmasını sağlamıştır. Buna göre türbülans viskozitesinin hesabı,

$$\mu_t = \rho \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_j \omega; \Omega F_2)} \quad (3.70)$$

şeklinde değiştirilmiştir. Burada α_1 , sabit bir katsayıdır ve değeri 0.3 tür. Ω genel kompleks akışlar için girdaplılık büyüklüğü olarak alınmaktadır. Öte yandan iki boyutlu bir akış için düşünecek olursak $\frac{\partial u}{\partial y}$ türevini göstermekte, F_2 ise sınır tabaka 1 (içerisinde) ve 0 (dışında) olan, ve bu iki değer arasındaki geçişin yumuşak biçimde olmasını sağlayan akıllı bir fonksiyondur. Buna göre F_2 fonksiyonu,

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2) \quad (3.71)$$

$$\arg_2 = \max\left(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega} \frac{500\nu}{y^2\omega}\right) \quad (3.72)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada duvardan olan uzaklık y ile ifade edilmektedir. Wilcox (1991), standart k- ω modelinin özellikle serbest kayma akışlarında ω ’nın giriş sınırındaki değerlerini aşırı derecede bağlı olduğunu ve türbülans viskozitesinin değerlerini iki kattan fazla değiştirebildiğini göstermiştir. ω taşınım denkleminde bazı eklentilerin yapılması gerekebileceğini belirtmiştir. Böylece Menter (1993), sınır tabaka içerisinde, bu bölgede çok başarılı olan orijinal k- ω modelini kullanıp serbest kayma akışlarında ise modelin serbest

akım değerlerine bağlılığından kurtulmayı amaçlayarak ω taşınım denkleminde önemli değişiklik yapmıştır. Denklem standart k- ε modelinde kullanılan ε taşınım denkleminde değişken dönüşümü yapılarak kullanılmakta ve böylece standart k- ω modelinde kullanılan ω taşınım denkleminde “çapraz difüzyon” adı verilen terim eklenmektedir. Ancak bu terimin sınır tabakada çok başarılı olan orijinal formu etkilememesi için (-ki etkilemektedir) (Wilcox, 1998) akıllı bir fonksiyon ile bu terimin yalnızca serbest akışlarda ve sınır tabakanın üst bölgelerinde kullanılması sağlanmıştır. Buna göre SST k- ω modeli, türbülans viskozitesinin hesabında daha önce sözü edilen değişiklik dışında, sınır tabaka içerisinde orijinal k- ω modelini, serbest kayma akışlarında ise standart k- ε modelini kullanmaktadır. SST modelinde kullanılan türbülans kinetik enerjisi, k ve özgül kayıp oranı ω için transport denklemleri;

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \right] + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta_k^* \rho k \omega \quad (3.73)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta_\omega \rho \omega^2 + 2(1 - F_1) \sigma_{cd} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (3.74)$$

şeklinde dirler. ω denkleminde en sonda yer alan çapraz difüzyon terimi F_1 fonksiyonuna bağlanmıştır. Buna göre türbülans viskozitesinin hesabındaki mantığa benzer biçimde sınır tabaka içinde viskoz alt tabaka ve logaritmik tabakada fonksiyon 1 değerini almakta ve dışarıya doğru yavaşça 0’a doğru değişmektedir. F_1 fonksiyonu,

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4) \quad (3.75)$$

$$\arg_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega}; \frac{500\nu}{y^2\omega} \right); \frac{4\rho k}{\sigma_{\omega 2} cd^2} \right] \quad (3.76)$$

$$cd = \max \left(\frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}; 10^{-20} \right) \quad (3.77)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Temel olarak fonksiyon, türbülans boy ölçeğinin çok küçüldüğü noktada viskoz alt tabakada ikinci terimi devreye sokarak logaritmik tabakadan sonra sürekli 1 değerini alabilmektedir. Ayrıca standart k- ε modelinin, ω ’nın serbest akım değerlerinden etkilenerek sınır tabaka dışındaki ω değerinin çok küçük hesaplama eğiliminin önüne geçebilmek için fonksiyondaki üçüncü terim vasıtası ile fonksiyonun mümkün olduğunca daha küçük değerler alarak duvara daha yakın bir noktada 1 değerine ulaşması hedeflenmiştir. SST modelinin iki ayrı model arasında geçişi için katsayılar da yine F_1 fonksiyonuna bağlanarak ϕ herhangi bir katsayıyı temsil etmek üzere,

$$\phi = F_1 \phi_1 + (1 - F_1) \phi_2 \quad (3.78)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Menter katsayılar üzerinde de hafifçe değişiklikler yapmıştır.

Buna göre model sabitleri,

$$\beta_k = 0.09 \quad , \quad \alpha_1 = 0.31 \quad , \quad K=0.41 \quad , \quad \sigma_{cd} = 0.856 \quad , \quad \sigma_{kl} = 1.176 \quad , \quad \sigma_{\omega l} = 2 \quad (3.79)$$

$$\beta_{\omega l} = 0.0750 \quad , \quad \gamma_1 = \frac{\beta_{\omega l}}{\beta_k} - \frac{\sigma_{\omega l} K^2}{\sqrt{\beta_k}} \quad , \quad \sigma_{k2} = 1 \quad , \quad \sigma_{\omega 2} = 1.168 \quad (3.80)$$

$$\beta_{\omega 2} = 0.0828 \quad , \quad \gamma_1 = \frac{\beta_{\omega 2}}{\beta_k} - \frac{\sigma_{\omega 2} K^2}{\sqrt{\beta_k}} \quad (3.81)$$

şeklinde verilmektedir. Menter (1994), orijinal modelin hassas noktalarını vurgulamıştır. Ve SST modeliyle kıyaslamalara yer vermiştir.

3.5. Açık Kanal Deney Düzeneği ve Deneylerin Yapılışı

Deneyler Bartın Üniversitesi İnşaat mühendisliği bölümü hidro-mekanik laboratuvarında bulunan kanalın membasın dan sonraki dikdörtgen kesitli kanal kısmında yapılmıştır. 0.5x0.5x5.5 m boyutlarındaki açık kanal düzeneğinde incelenmiştir. Taban ve yan duvarlar cam malzemeden yapılmıştır. Deneyler kanala su verildikten ve akımın stabil hale geldikten sonra başlamıştır. Su kanala pompa vasıtasıyla depodan basılmıştır. Kanal düzeneği boyunca tekrar aynı depoya üst kottan serbest olarak dökülmekte ve devir daim yapılmaktadır.



Şekil 0.1. Bartın Üniversitesi hidro-mekanik laboratuvarından bir görüntü



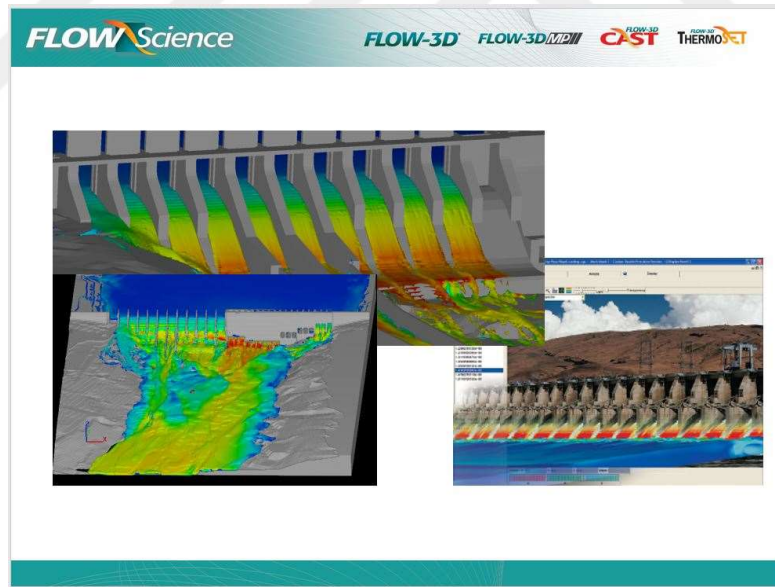
Şekil 0.2. Bartın Üniversitesi hidro-mekanik laboratuvarı dikdörtgen kesitli kanaldan bir görüntü

Deney düzeneğinde Bartın küçük sanayisinde üretimi yaptırılan 6 kanatlı özel çark sisteme dahil edilmiştir. suyun savaklanabilmesi için kullanılan savak şeklindeki gibidir. Başlangıçta belirlediğimiz 4 farklı debi değerleri için (12 lt/s 17 lt/s 22 lt/s ve 27 lt/s) 4.5 m lik kanalda çarkın olduğu deney düzeneği, çarkın olmadığı deney düzeneği ve kanal tabanının tamamen düz olduğu deney düzeneği için ayrı ayrı her 50 cm en kesitte ve her en kesitin 4 farklı boy kesitin de ve her bir boy kesitin kanal tabanından 0.2h - 0.4h - 0.6h -0.8h yüksekliklerinde ADV (Akustik dopler velocity- flow tracker) cihazı ile hız ölçümleri yapılmıştır. Suyun V_x ve V_y hızlarını cihaz yardımıyla ölçülmüştür. Aynı düzenek çarklı, çarksız ve kanal tabanı tamamen düz olması durumları için yapılmış her bir düzenek için 144 adet sonuç bulunmuştur. Akım hızlarını ölçerken ADV(akustik dopler velocity) bir sehpaye yerleştirilen ve 3 doğrultuda hareket edebilen muline kullanılmıştır. Kanal taban eğimi $S_0=0.0004$ dür ve 4.5 m için kanalın başlangıç ve bitiş noktaları arasında 1.8 cm kot farkı oluşturmaktadır.

3.6. Flow-3D Programı

Çok yönlü CFD yazılımı olan Flow-3D çok karmaşık fiziksel süreçleri modellemek için gerekli tüm özelliklere sahiptir. FLOW-3D 40 yıldan fazla bir süredir serbest yüzey sıvısı uygulamalarını modelleyebilmektedir. FLOW-3D programı ile neredeyse tüm akışkanlar mekaniği problemlerinin çözümünde başarılıdır. Programda baraj tasarımları, açık kanal akımları dalga enerjileri, çığ düşmesindeki meydana gelebilecek hasarlar gibi oldukça karmaşık problemleri de çözmek mümkündür. Program sonlu hacimler yöntemi ile çalışmakta olup üç boyutlu süreklilik ve hareket denklemlerinden oluşan diferansiyel

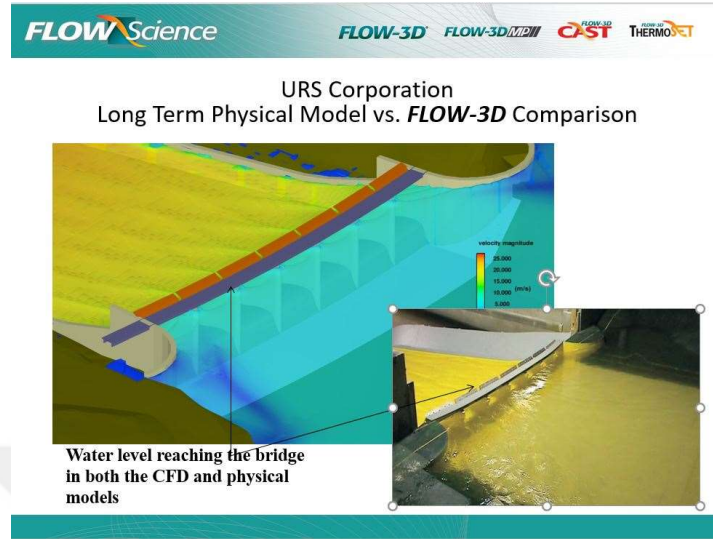
denklem sistemleri kullanılmaktadır. Problem çözümünde meshlerin sıklığına bağlı olarak programın doğru çözüm elde etmesi mümkündür mesh sayıları ve sıklığına göre çözüm süresi uzayacağından kullanılan bilgisayar gücüne bağlı kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalacak şekilde mesh sayısı ayarlanmalıdır. Kontrol hacminin merkezinde yer alan büyüklükler akışkan'a ait skaler büyüklüklerdir. (basınç, vizkozite vb.) Ancak akışkan'a ait hızlar (u,v,w) bu kontrol hacminin yüzeyinde hesaba katılmaktadır. Programda model kurulduktan ve mesh hücre yapısı yerlerini ve sayıları ayarlandıktan sonra FAVOR(Fractional Area/ Volume Obstacle Representation) yöntemiyle modeldeki katı cisimleri hücrelerin içerisine girdiği kadarını bir engel olarak algılar ve bu engelin kontrol hacminin ne kadarını kapladığını ve bu kontrol hacminin yüzeyinde algılanan engelin ne kadar alan kapladığını hesaplayarak bu iki değer oranlanır. Bu değer 0-1 arasında değişir. Değere bağlı olarak hücrede ne kadar akışkan olduğu tanımlanır. Oluşturulan bu mesh ağının sınırları ve meshlerin birbirine karışmaması hassasiyet açısından oldukça önemlidir. Geometrinin bu meshler arasında bir engel olarak algılanacağı için mesh ağlarını oldukça hassas yapılmalıdır.



Şekil 0.3. Flow-3D programından bir görsel

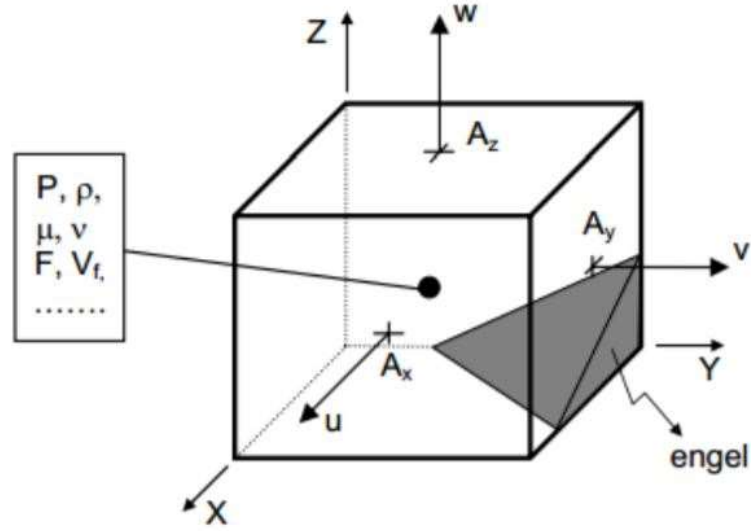
Her bir meshi yakından inceleyecek olursak su-hava arakesitine sahip meshler 0 yani tamamen boş veya 1 yani tamamen engel ile dolu meshler oluşacaktır. Su-hava arakesitine sahip meshler de serbest yüzeylerin belirlenmesi için yazılım VOF (Volume Of Fluid) yöntemi ile belirlenebilmektedir. Bu yöntemde de meshlerin suyla tamamen dolu olup olmadığını 0-1 değerleri arasında ifade edebilmekteyiz. (1 ise tamamen akışkan dolu 0 ise

tamamen engel ile kaplı) F değerlerini hesaplamak için diferansiyel denklemler yardımlarıyla çözülebilmektedir.



Şekil 0.4. Fiziksel olay ve Flow-3D modelinden görsel

Programa giriş yaptıktan sonra modelimizi oluşturmaya başlarken tanımlamalar yapmamız gerekmektedir. Model setup üst menüsünden general alt menüsündeki akışkan tanımlamaları simülasyon birim sistemi gibi seçenekleri belirlerken physics alt menüsünden de gerekli fiziksel sınır şartları ve yöntemleri belirlememiz gerekmektedir. Burada viscosity and turbulence fiziksel koşulları belirlenmesi gereklidir. Turbulence modelleri için programda 3 farklı yöntem bulunmaktadır. Bunlardan birincisi two-equation(k-e) modeli ikincisi Renormalized group (RNG) modeli son olarak ise two-equation (k-w) modelleri kullanılarak çözümler yapılabilir. Bizim çalışmamızda RNG (Renormalized group) türbülans modeli kullanıldı.



Şekil 0.5. Kontrol Hacmi (İlkentapar, 2015)

3.7. Flow-3D Programı ile Model Kurulumu

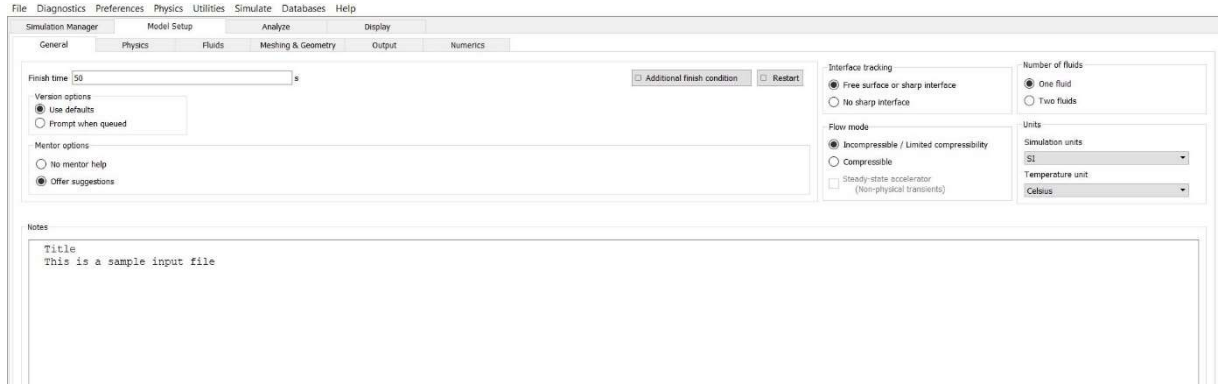
3.7.1. Programa Giriş

Modele, File menüsü add new simulation tıklayarak yeni simülasyon dosyası oluşturularak başlanır.



Şekil 0.6. Flow-3D başlangıç sayfası ara yüzü

Oluşturulan simülasyon hakkında kayıtlı olduğu dosya yeri gibi bilgilere Şekil 6'da verilen ekrandan ulaşılmaktadır.



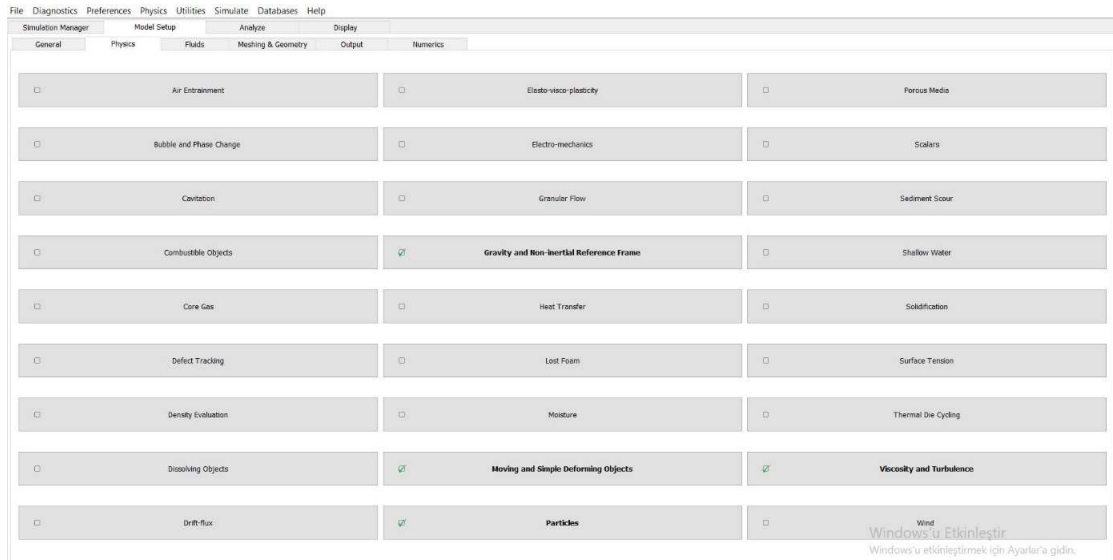
Şekil 0.7. Flow-3D Model setup ara yüzü

3.7.2. Model Setup

Model setup menüsü, General alt başlığından simülasyonun sürmesi istenen zaman saniye cinsinden (Finish time) girilir. Number of fluids başlığından kullanılacak akışkan sayısı girilebilir. Çalışmada tek bir akışkanın hareketi inceleniyorsa one fluid seçilmelidir. Units sekmesinden akışkanın sıcaklığını ve birim sistemi ayarlanabilir. Genel olarak uluslararası SI birim sistemi ve celsius kullanılmaktadır.

3.7.3. Fizik koşulları

Physics sekmesinden ise oluşturulacak modele ait bazı fiziksel parametrelerin seçimi yapılır (Şekil 3.8).

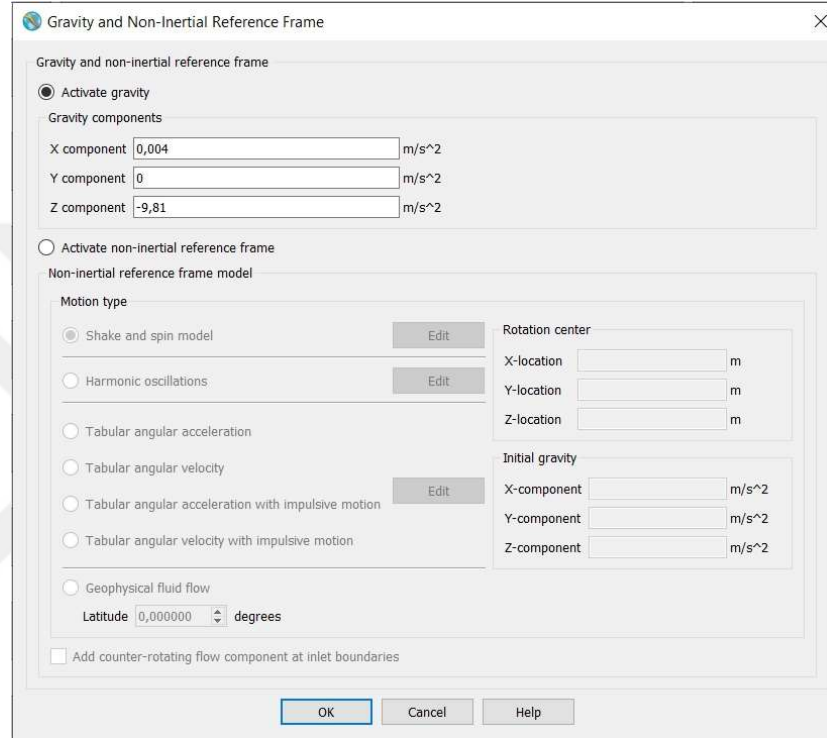


Şekil 0.8. Flow-3D Model setup physics alt menüsü ara yüzü

Burada; Gravity and non-inertial reference frame, Moving and simple deforming objects-

Hareketli nesneler için, Particles(İsteğe göre), Viscosity and Turbulence fiziksel koşulları aktif edilir.

3.7.3.1. Gravity and Non-inertial Reference Frame

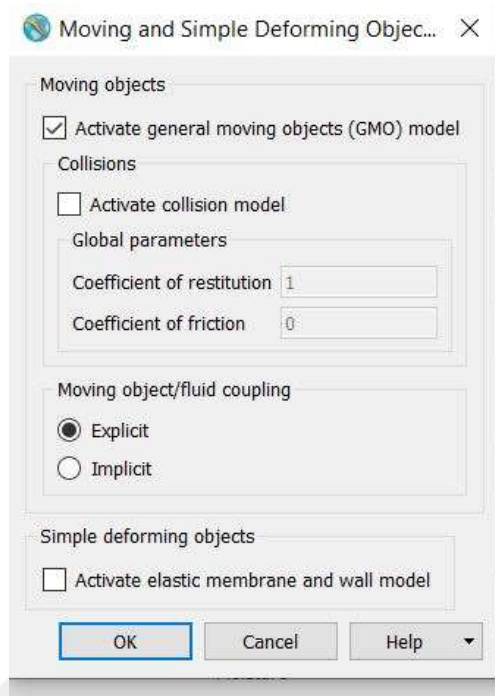


Şekil 0.9. Flow-3D physics alt menüsü gravity and non-inertial reference frame ara yüzü

Yer çekimi ivmesini Z yönünde -9.81 m/s² girilir. Kanalımız 0.0004'lik bir eğime sahiptir. Ana kanala eğim verilmesi durumunda verilerin alınması daha zor olacağından, yerçekimi ivmesi yatay ve dikey bileşenlere ayrılarak eğim etkisi dikkate alınmıştır. 0.0004'lük eğim 4.5 m lik kanalımızda 1.8 mm kot farkına sebep olmakta ve yer çekimi ivmesinin yatay bileşeni gravity and non-inertial arayüzündeki x bileşeni kısmında 0.004 değer olarak girilmiştir.

3.7.3.2. Moving and Simple Deforming Object

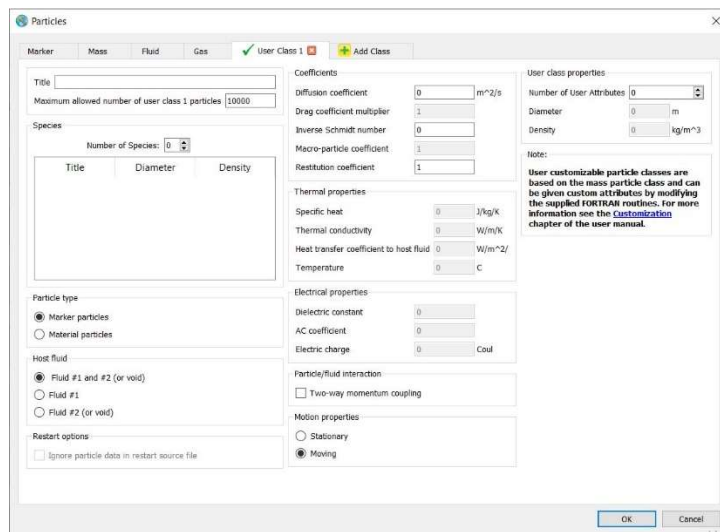
Sistemimiz de hareketli nesnemiz olduğu için moving objects aktif edilir.



Şekil 0.10. Flow-3D pyhsics alt menüsü moving and simple deforming objects ara yüzü

3.7.3.3. Particles

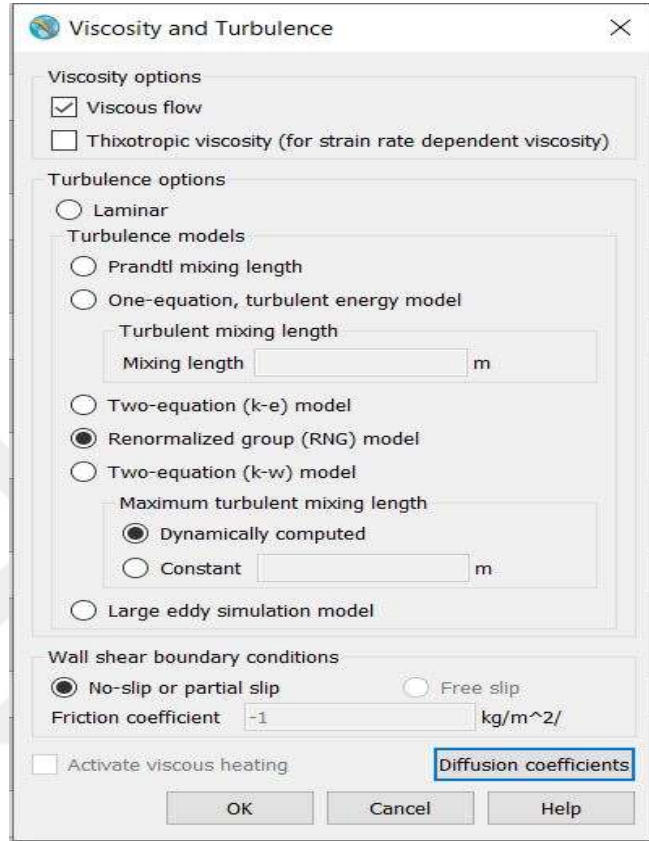
Partikülleri suyun hareketini daha rahat görebilmek için isteğe bağlı olarak açabiliriz. Marker sekmesinden Enable seçeneğini aktif edilir.



Şekil 0.11. Flow-3D pyhsics particles ara yüzü

3.7.3.4. Viscosity and Turbulence

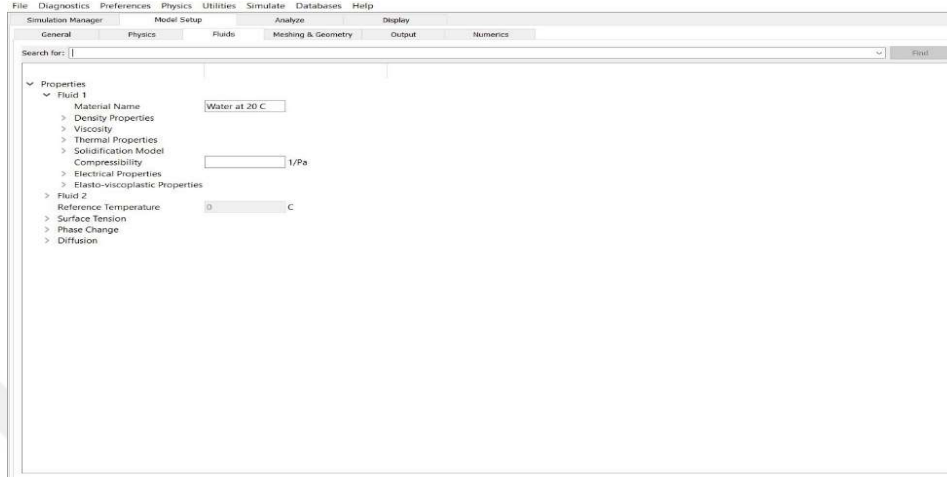
fiziksel özelliklerini açarak viscous flow seçeneğini aktif ederek RNG modelini seçilir.



Şekil 0.12. Flow-3D Pyhsics viscosity and turbulence ara yüzü

Bu fiziksel özellikler oluşturulan model için değerlerini girilir ve aktif edilir. Daha sonra Fluids sekmesine gelinerek akışkanın gerekli özellikleri doldurulur.

3.7.4. Akışkanlar (Fluids)



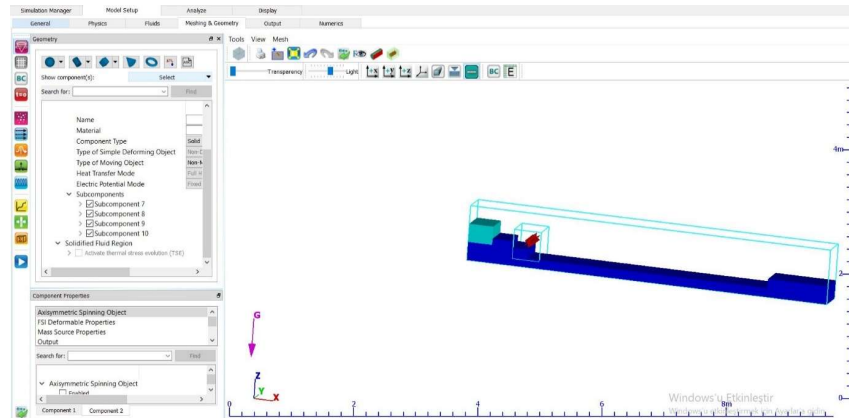
Şekil 0.13. Flow-3D fluids alt menüsü ara yüzü

Properties sekmesinin altındaki Fluid-1 sekmesine sağ tıklanır. Load material properties-Water at 20 C seçilir.

Birden fazla akışkan olması durumunda; veya sudan farklı bir akışkan kullanılırsa bu pencereden 2. ve daha fazla akışkan özelliklerini girilecekti

3.7.5. Meshing&Geometry

Model kurulmaya başlanır.

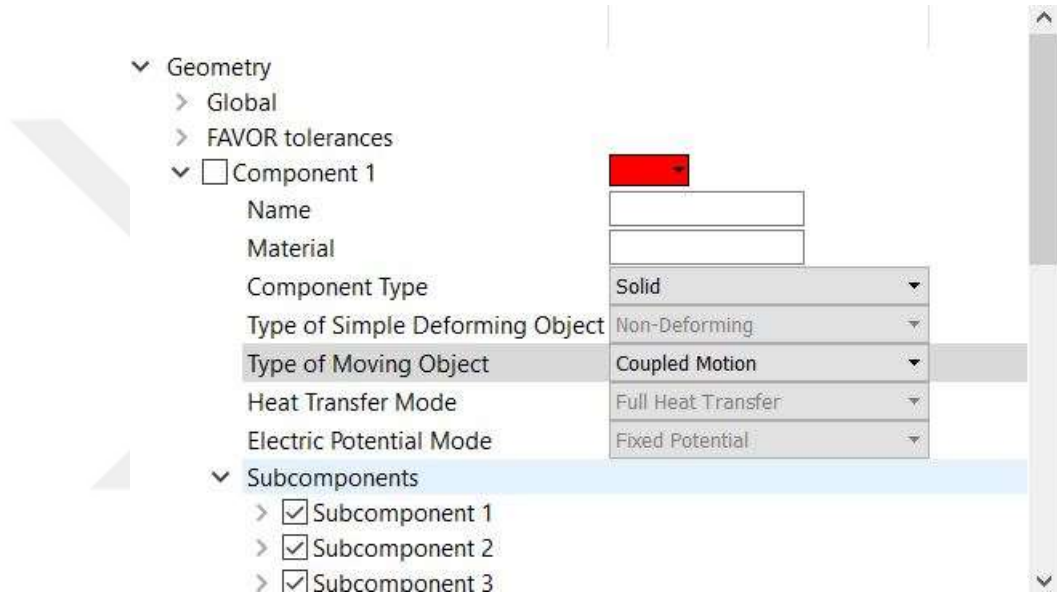


Şekil 0.14. Flow-3D meshing&geometry alt menüsü ara yüzü

Deneyisel olarak çalışılan kanalın katı modelini (Autocad,Solidworks vb.) programlar yardımıyla modellenir ve .stl formatında kayıt edilir. Flow-3D programına export edilir ve içeri alınır. Veya Flow-3D programının içerisinde de bazı kolay geometri modellemeleri yapılarak model kurulur.

Geometri sekmesinden kanalın modellemesini Flow-3D programı yardımıyla yapıldı.

Burada sistemimizde bulunan su çarkın' a hareket tanımlanacağı için farklı bir cisim olarak tanımlandı ve component-2 adıyla oluşturuldu. Suyun çarpmasıyla dönecek şekilde hareketi tanımlandı.



Şekil 0.15. Flow-3D geometry özellikleri hareketli nesne tanımlama ara yüzü

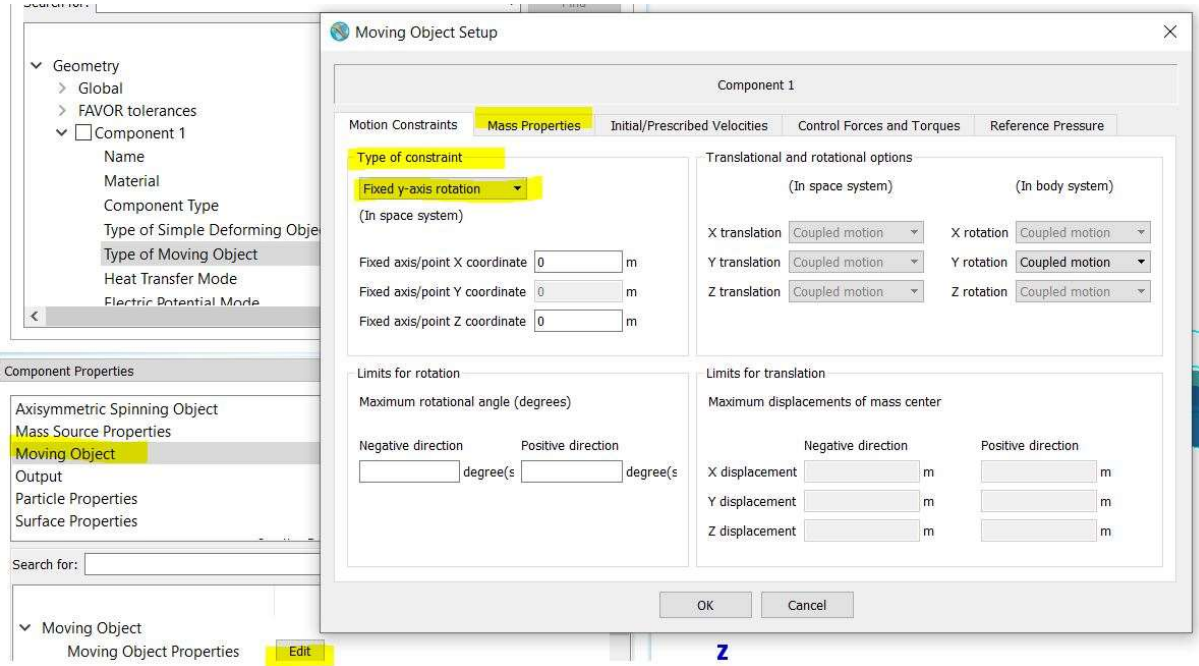
3.7.5.1. Hareket tanımlama (Type of Moving Object)

Hareket eden bileşenin alt başlığından type of moving object- ve alt başlığından coupled motion seçeneğini seçilir. Bu seçenek cismin suyun etkisiyle hareket edeceği için seçildi. Şayet farklı bir harekete sahip olsaydı buradaki seçenecek aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

Eğer belirli bir hareket tanımlamak istenilirse;

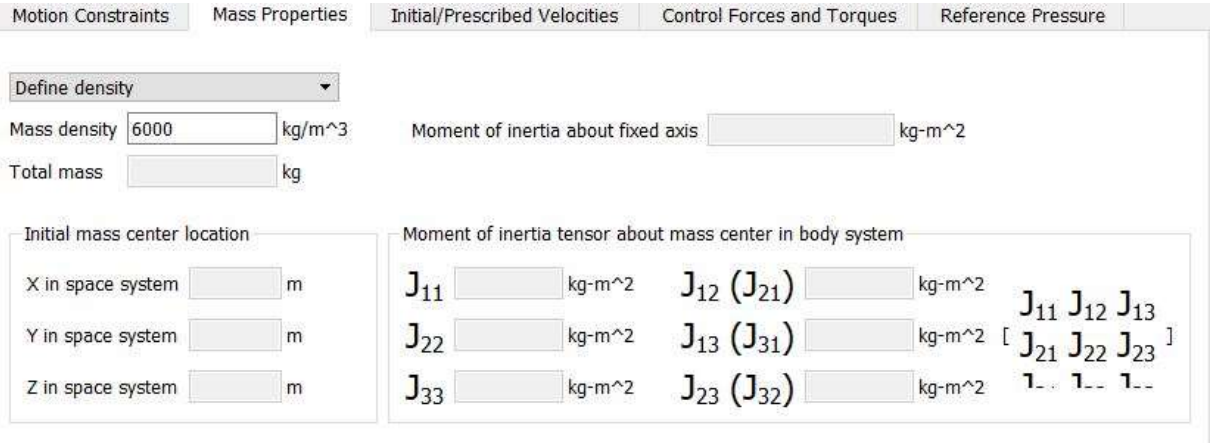


seçimini yapıldı.



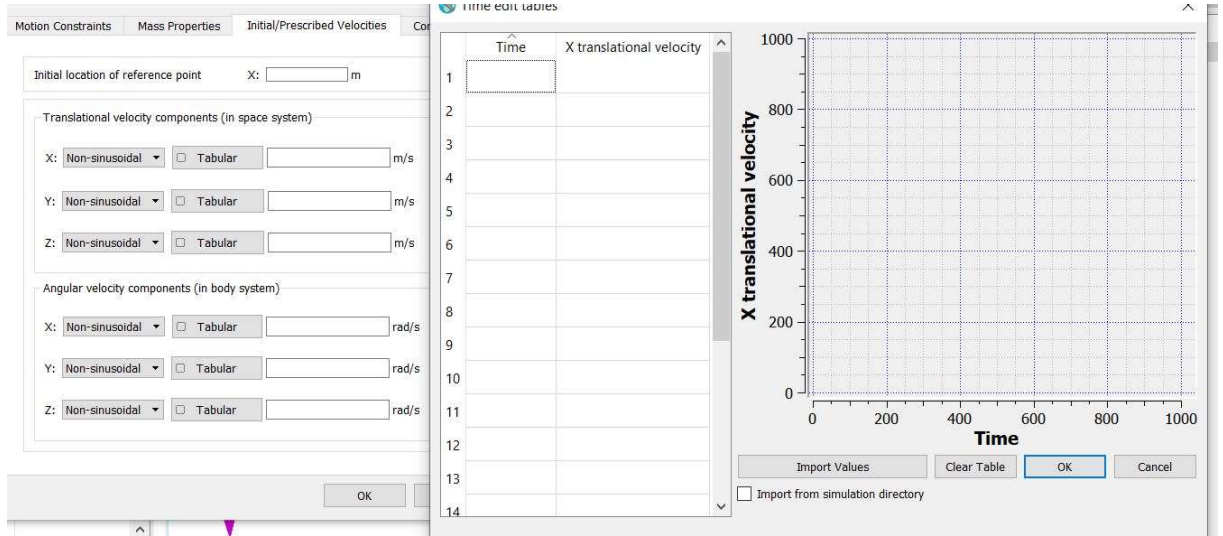
Şekil 0.16. Flow-3D Moving object setup ara yüzü

Aynı arayüzün alt seçeneklerinden moving object-edit sekmesinden ayarlarına girilir. Buradan hareket edecek nesnenin döneceği eksen tanımlanır. Dönecek cismin yoğunluğu (mass-properties/density) girilir.



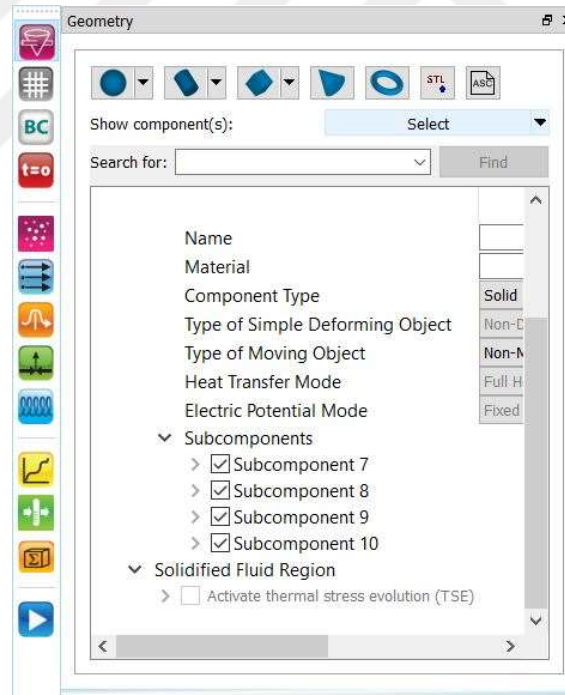
Şekil 3.14. Flow-3D hareketli nesne malzeme özelliklerini tanımlama ara yüzü

Eğer belirli bir hareket tanımlamak istenirse, moving object-edit-motion constraints-type of constraint-6 degrees freedom seçeneği seçilir. initial/prescribed velocities sekmesinden hareketin tanımlanması gerekir.



Şekil 0.17. Flow-3D Initial/Prescribed velocities ara yüzü

Kanal yatağını ve eşikleri component-1 adıyla ve altında subcomponentlerle Flow-3D programı içerisinde modellendi.

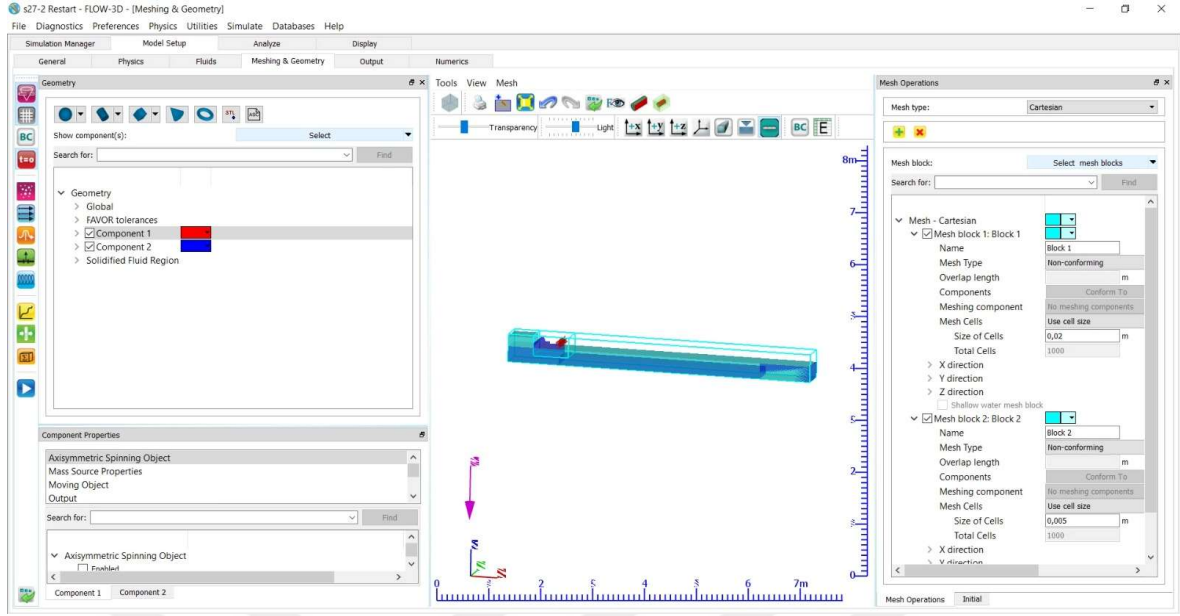


Şekil 0.18. Flow-3D Geometry-Subcomponent ara yüzü

3.7.6. Mesh ve İnitil (ilk su bölgeleri)

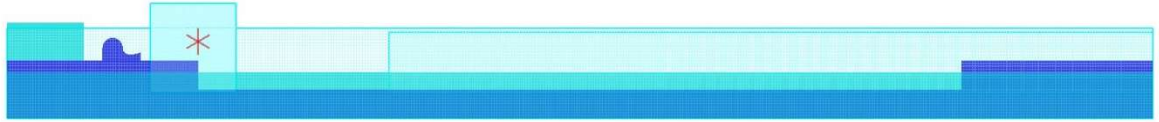
Geometri kurulduktan sonra mesh blokları, kanal sınır koşullarını initial (ilk su bölgeleri) tanımlanır.

İlk olarak meshleri ayarları yapılır.

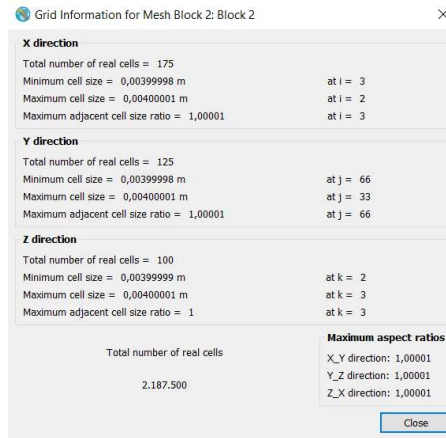


Şekil 0.19. Flow-3D mesh ağları ayarlama ara yüzü

3 farklı mesh bloğu ayarlandı. Kanalımızda su çarkımızın ve eşliğimizin olduğu kısma mesh-2 bloğu eklendi. Hava-su ara yüzünde herhangi bir açıklık kalmaması ve suyun hareketini daha doğru incelenebilmesi için mesh sıklığı artırıldı.



Şekil 0.20. Flow-3D katı modelden bir görüntü

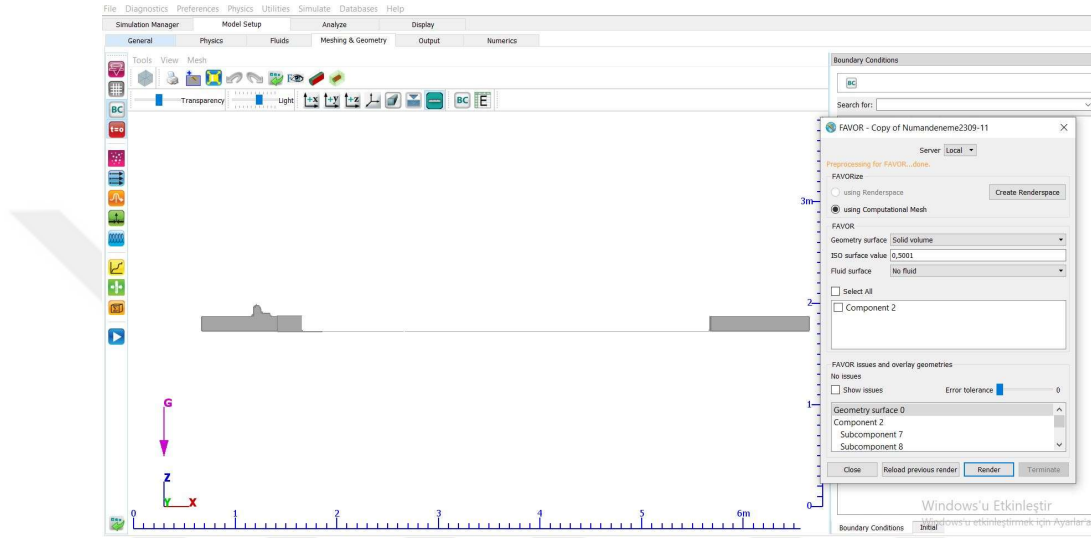


Şekil 0.21. Flow-3D mesh blokları grid-information ara yüzü

Mesh sayılarının sayısının kontrol edilmesi istenildiği takdirde mesh bloklarına sağ tıklanır.

Mesh information sekmesinden toplam hücre sayısı değerini görülebilmektedir. Bu yöntem ile toplamda 3 mesh bloğunda 2.400.000 e yakın hücre atmış olduk hücre sayısının yeterli olup olmadığının kontrolü için FAVOR(Fractional area volume obstarel representation) modelin kırım noktalarından yola çıkarak yorumlamak mümkündür.

3.7.6.1. FAVOR (Fractional Area Volume Obstarel Representation)



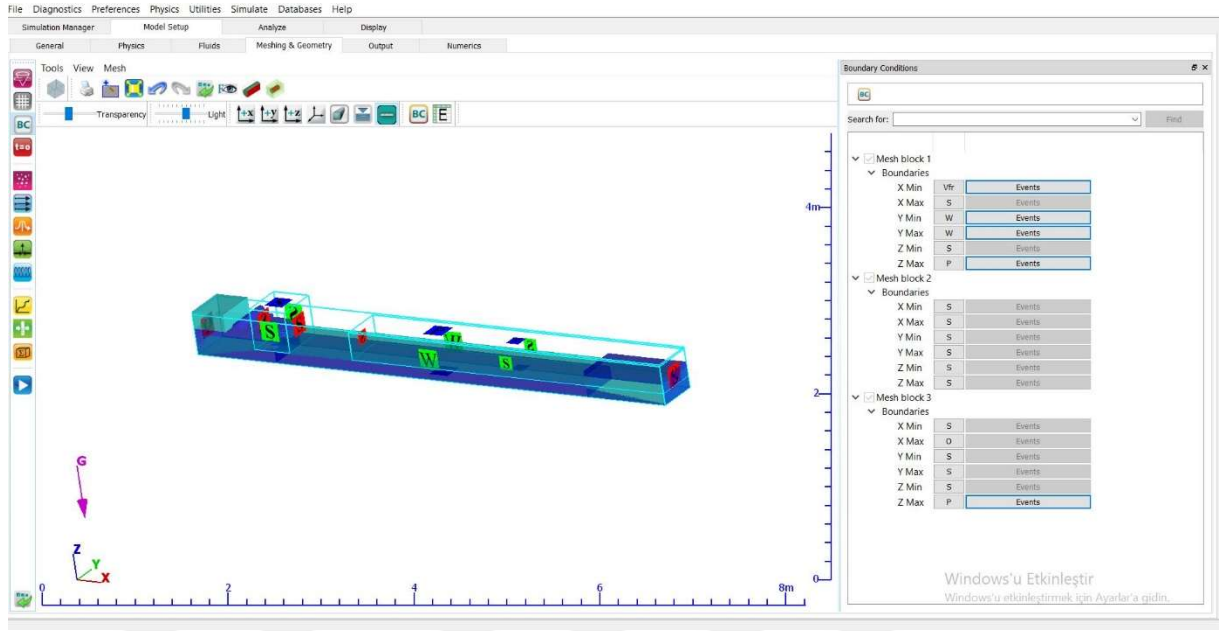
Şekil 0.22. Flow-3D FAVOR ara yüzü

İlk yapılan FAVOR(Fractional area volume obstarel representation) kontrolünün sonucuna bakıldığında; mesh sayısının yeterli olup olmadığını görebilir. İlk deneme olması kaydıyla hücre sayısının yetersiz olduğu yorumu katı modele bakılarak yapılır. Daha iyi bir çözüm için mesh sıklığı artırılmalıdır. Ancak ideal mesh sayısını deneme yoluyla bulmak önemlidir. Aksi halde gereksiz mesh sıklığı simülasyon süresini çok uzatacaktır.

Mesh sıklığı ayarlanırken dikkat edilmesi gereken 2. Bir husus ise tanımlanan mesh bloklarının sınırlarında veya kesiştiği noktalar da x-y-z eksenlerinde tam örtüşmesidir. Tam örtüşmenin önemi ise su kaçışı olmaması ve gerçeğe uygun olmayan durumlar ile karşılaşmamak için önemlidir.

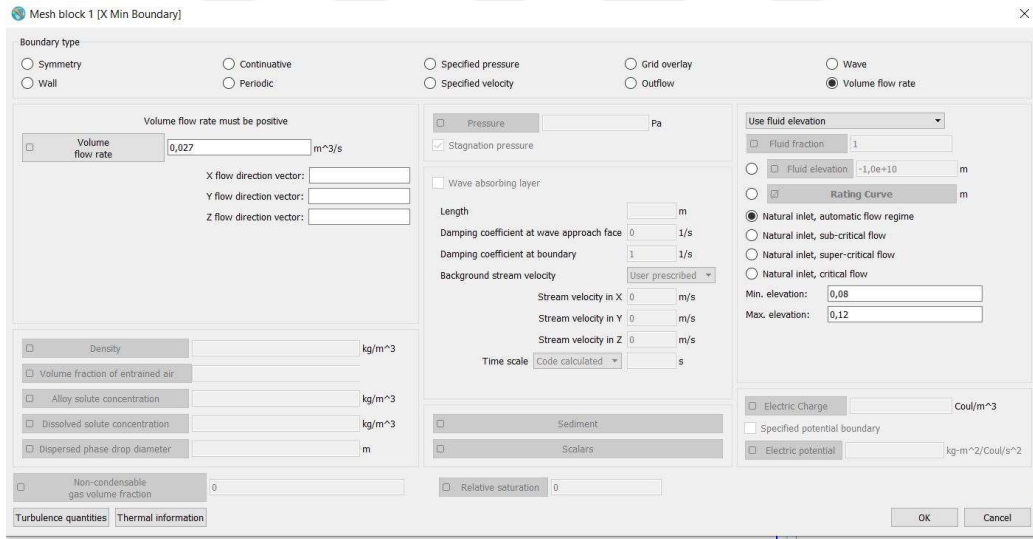
3.7.6.2. Hücre Sınır Koşullarının Belirlenmesi (Mesh Boundary Condition)

Daha sonra kanalın sınır koşulları belirlenir. Bizim düzeneğimizde farklı debi girişleri yaptığımız için debi verisinin girişi xmin sınır koşullarından volume flow rate seçilir. Sırayla hangi debi değerinin girilmesi gerekiyorsa m³/s cinsinden veri girişi yapılır.



Şekil 0.23. Flow-3D boundary ara yüzü

3 farklı mesh bloğu olduğu için her birine sınır koşulları tanımlandı.



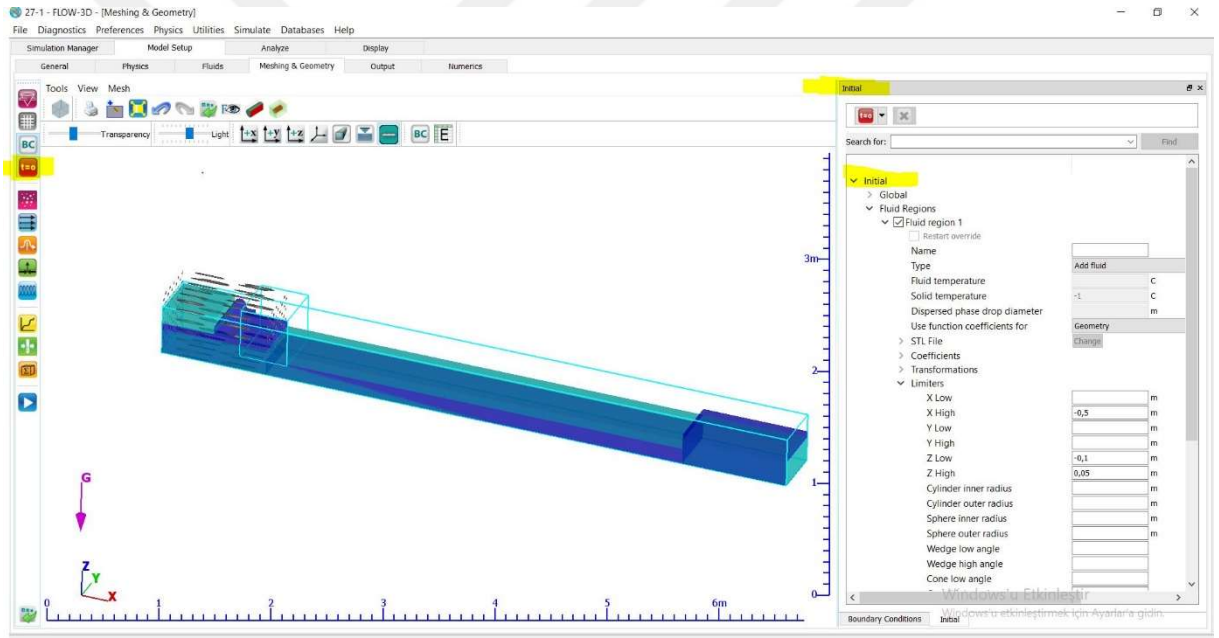
Şekil 0.24. Flow-3D giriş su yükseklikleri ve debi tanımlama ara yüzü

Xminde debi girişini yapılır. Sonra use fluid elevation seçeneğini seçilir. Natural inlet, automatic flow regime seçeneğini aktif edilir ve min-max su yükseklikleri tanımlanır. (suyun menbasında ve kanal yatağında yüksekliğini tanımlamak simülasyon süresinin gereksiz uzamaması için gereklidir.)

- Sınır Koşulları;
- Xmin: Volume flow rate
- Xmax: Out Flow
- Ymin: Symmetry
- Ymax Symmetry
- Zmin Symmetry
- Zmax:Pressure (Fluid Fraction değeri 0 girildi)

3.7.6.3. İntial

Eğer başlangıçta kanalımızda bir su varsa, İntial sekmesinden buradaki suyu modele eklenmesi gerekir. Simülasyon süresini kısaltmak içinde suyun tanımlanması önemlidir.

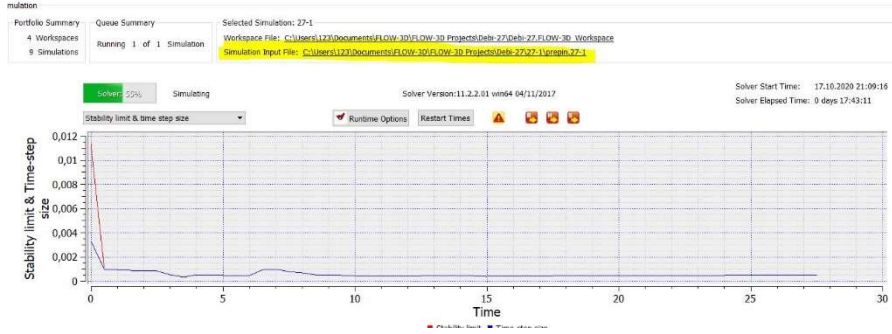


Şekil 0.25. Flow-3D ilk su tanımlama ara yüzü

3.7.6.4. Particles

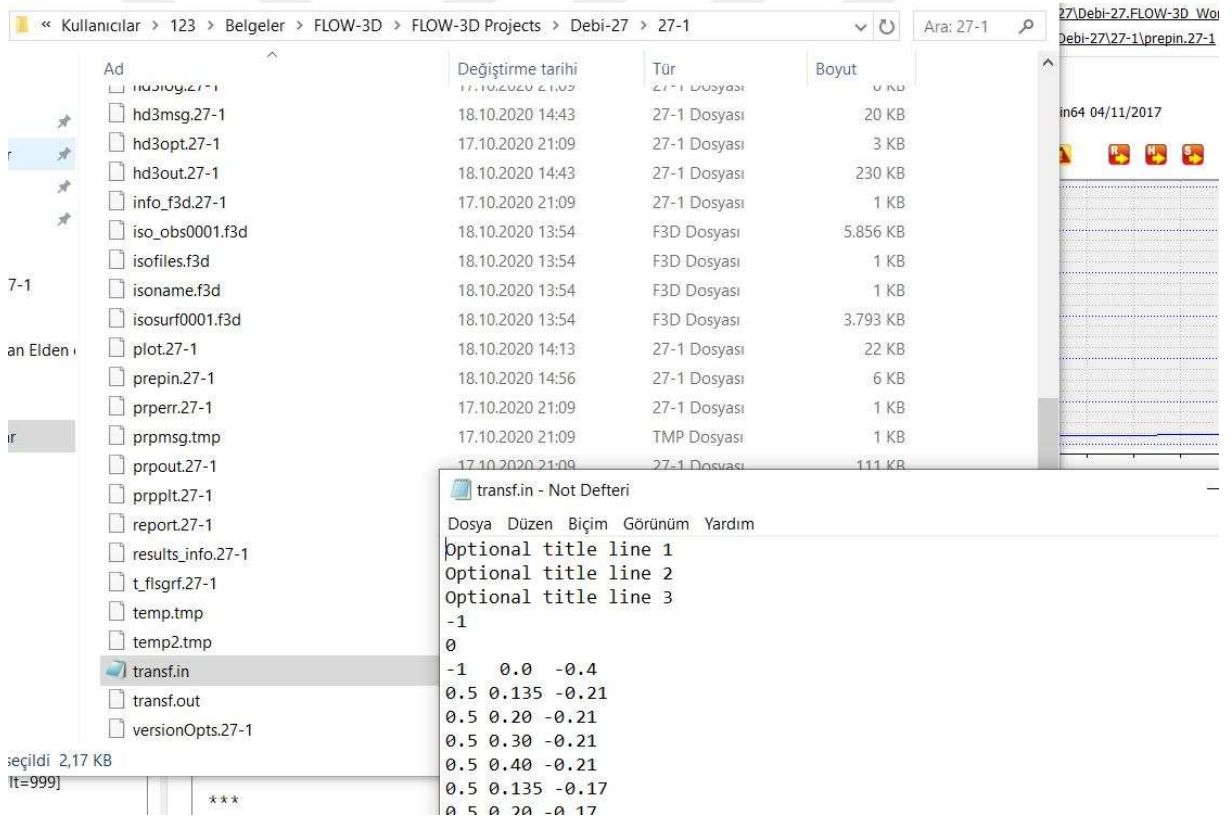
Suyun hareketini incelemek için partiküller eklenebilir bunun için fizik kısmında önce particles kısmını aktif etmek ve modelleme yaparken de görseldeki gibi partiküllerin yerini girmek gerekir.

3.7.7.1. .Transin Dosyası ile Sonuçların Alınması



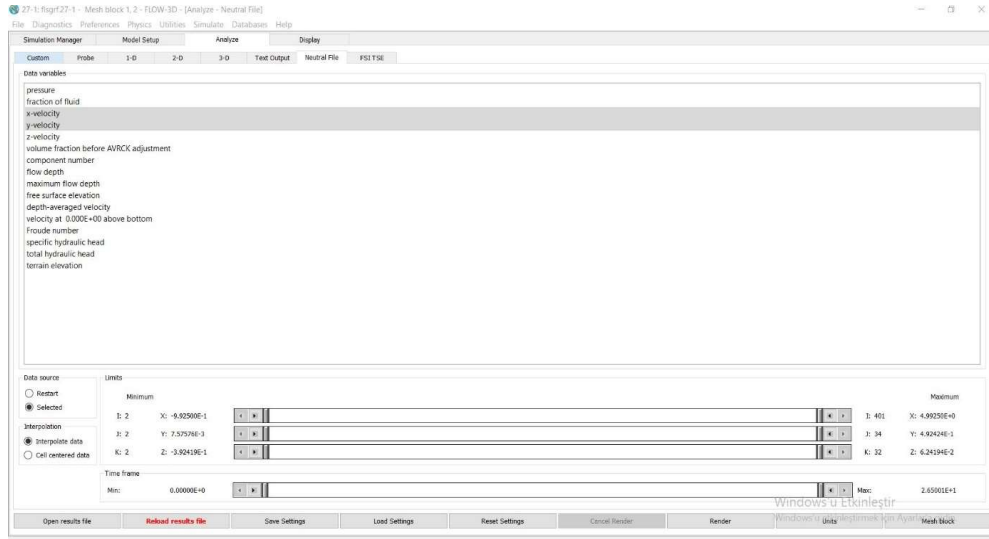
Şekil 0.28. Flow-3D Simülasyon dosya konumu ara yüzü

Simülasyon klasörünün yerini kolayca bulabilmek için yukarıdaki dosyaya tıklarız ve dosyanın yerine gideriz burada bir text dosyası hazırlarız.



Şekil 0.29. Flow-3D .in dosyası hazırlama

Bu dosyası hazırlarken Flow-3D içerisindeki 'help' butonundan dokümantasyona gireriz ve açılan flow-3d web sayfasından bu dosyanın nasıl oluşturulduğunu görebiliriz ilk 5 satır sabit olarak kalır ve altında ilk satıra modelimizin x min. y min. z min. koordinatlarını girdikten sonra sırayla istediğimiz her noktanın x, y, z koordinatlarını girerek transf.in dosyasını oluşturmuş oluruz ve analizden sonra bu noktalardan sonuçları okuruz.



Şekil 0.30. Flow-3D analiz ara yüzü

Sonuçlar için analiz sekmesinden istenilen görsel ve sonuçları elde edebiliyoruz Probe 1D-2D-3D görüntüler alınabildiği gibi neutral file sekmesinden bu yazılan transf.in dosyası için transf.out sonuçlarını selected seçimini ve istenilen parametreyi seçtikten sonra zaman barına da dikkat ederek render alabiliriz ve çıkan dosyayı text olarak kaydedebiliriz.

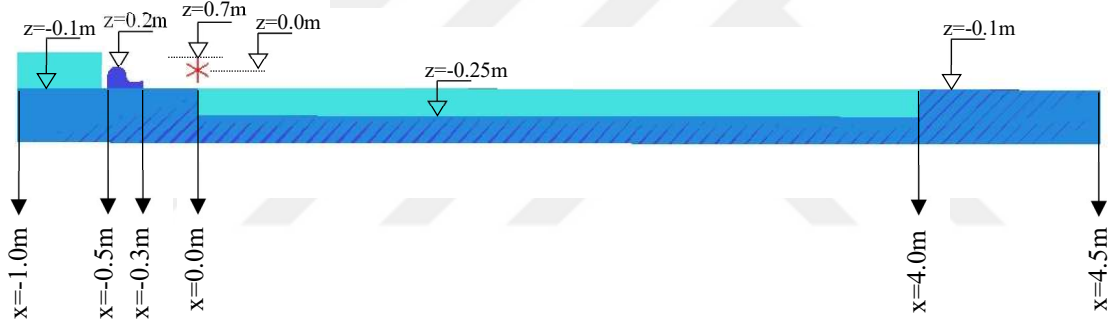
Aynı şekilde 3D den video ve 3 boyutlu görseller 2D sekmesinden 2 boyutlu video ve görseller alabiliriz.

Bizim deneyimizde X yönünde 9 noktadan y yönünde ve z yönünde 4 noktadan sonuç okuduk yani toplamda bir düzencek için 144 adet hız değeri okuması yaptık.

Bütün modelleri programda modelledikten sonra sonuçları alabilmek için simülasyonların bitmesi uzun bir süre aldı ve sonuçlarımızı okuduk.

4. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Laboratuvar koşullarında dikdörtgen kesitli bir kanal içerisinde savak kullanılarak suyun enerjisinin kırılmasına dair çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmada savak bulunan dikdörtgen bir kanalda ilave olarak düşü yapılması ve ardından düşüye ek olarak düşünün hemen başlangıcına yerleştirilen su çarkı ile suyun enerjinin hangi oranda kırılabileceği araştırılmıştır. Laboratuvar deneyleri su yüksekliklerinin ve akış hızlarının ölçülmesi şeklinde yapılmıştır. Deneyler, 10m uzunluğunda 0.5m genişliğinde bir kanalın mansap tarafında kalan son 5.5m bölümünde yapılmıştır. Çalışmanın esas amacı su içerisinde bulunan çarkın suyun enerjisini kırma kapasitesini araştırmak olduğu için su çarkının merkezi (0, 0) konumu olarak alınarak kanalın bütün koordinatları bu noktaya göre verilmiştir. Şekil 4.1’de kanal yüksekliği ve akım yönü doğrultusunda bazı önemli noktaların koordinatları verilmiştir.



Şekil 0.1. Kanal boyunca önemli konumlar

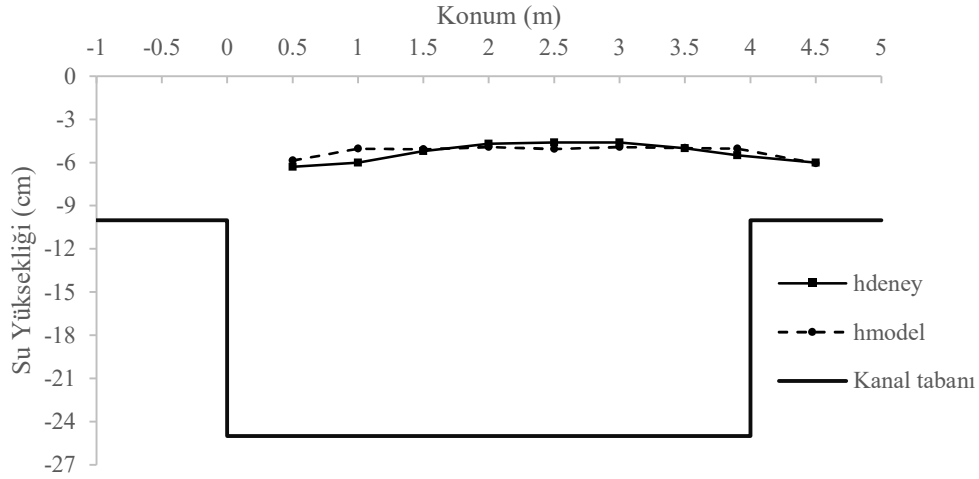
Farklı türbülans modelleri denenerek laboratuvar koşullarıyla aynı koşullar oluşturularak HAD modelleri kurulmuştur. Model performansında kanal pürüzlülüğü önemli bir parametredir. Farklı debilerde düz kanalda yapılan deneylerle kanalın Manning katsayısı $n=0.0108$ olarak elde edilmiş ve Eşitlik 4.1’den faydalanarak programa kanal duvarlarının pürüzlülüğü $k_s=0.0005$ olarak tanımlanmıştır.

$$n = \frac{k_s^{1/6}}{26} \quad (4.1)$$

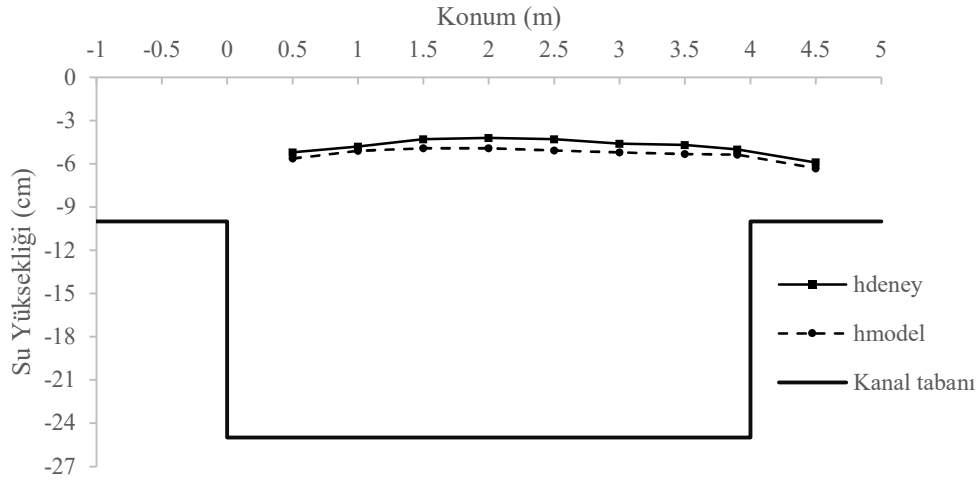
Burada; n : Manning Pürüzlülük katsayısı ve k_s (m): yüzey pürüzlülüğüdür. Laboratuvarda ölçülen su yükseklikleri ve akım hızları ile modellerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak ölçülen değerlere en yakın sonuçlar RNG k- ϵ modelinden elde edilmiştir.

4.1. Su Yüksekliklerinin Değerlendirmesi

Kanal boy kesitince farklı noktalarda deneysel olarak ölçülen su seviyeleri ile HAD yazılımı ile çözülen sonuçlar Şekil 4.2 – Şekil 4.13’de verilmiştir. Kanal boy kesitince en kesitin orta noktasından ölçülen ve modellerden elde edilen su yüksekliği değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu bu grafiklerden görülmektedir.

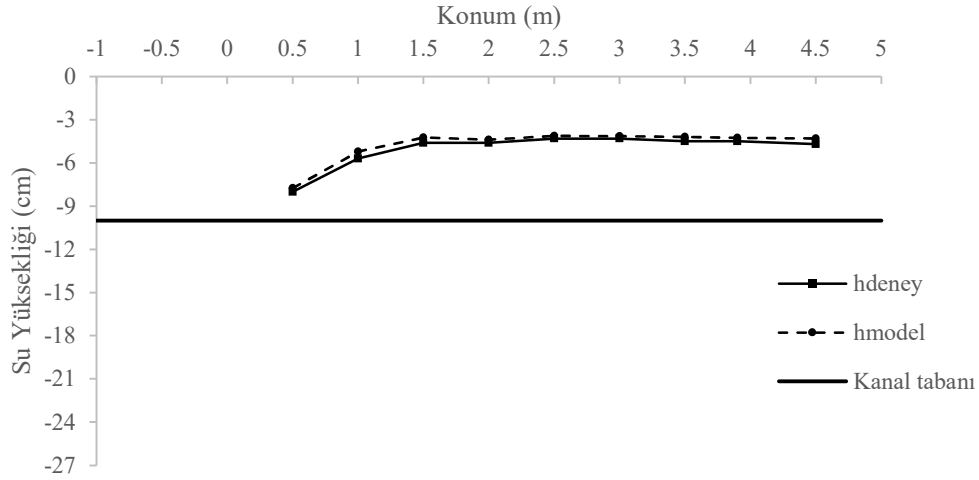


Şekil 0.2. Q=12 L/s için su çarkının olmadığı durumda kanal boyunca su yüzey profili



Şekil 0.3. Q=12 L/s için su çarkının olduğu durumda kanal boyunca su yüzey profili

12 L/s debi koşullarında model ile ölçülen su seviyeleri arasında fark düşü ve su çarkının birlikte olduğu durumda düşünün ortasında, sadece düşünün olduğu durumda düşünün başlangıç noktasında diğer bölgelere nazaran daha fazla olmuştur. Düşü etkisinin düşünün hemen başlangıcında, düşüye ilave olarak çarkın etkisiyle oluşan çalkantının daha uzaklara kadar ulaşması buna sebep olmaktadır. Düz kanalda ise en fazla fark akışın yüksek hızlara ulaştığı, savak sonrası kritik altı rejimin olduğu bölgede meydana gelmektedir.



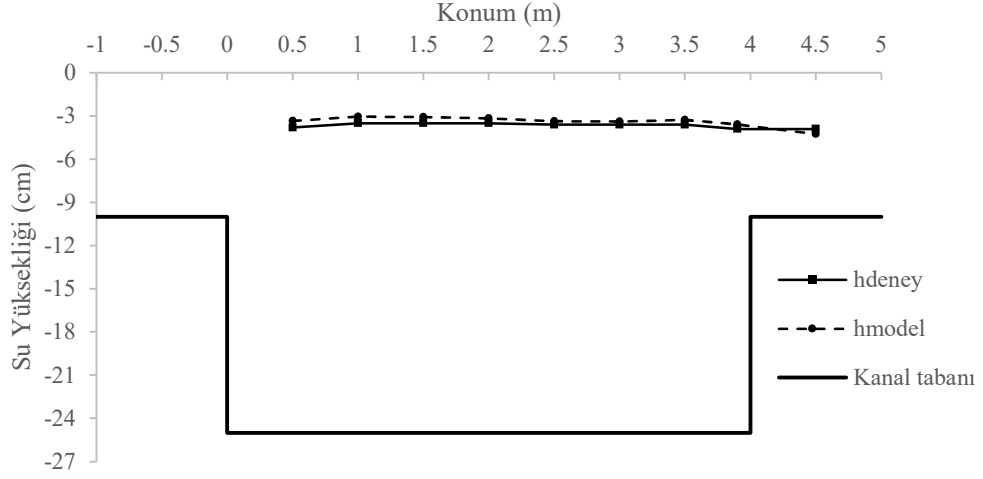
Şekil 0.4. Q=12 L/s için düşü veya eşik olmaması durumunda kanal boyunca su yüzeyi profili

Tablo 0.1: Q=12 L/s için ölçülen ve hesaplanan su yükseklikleri

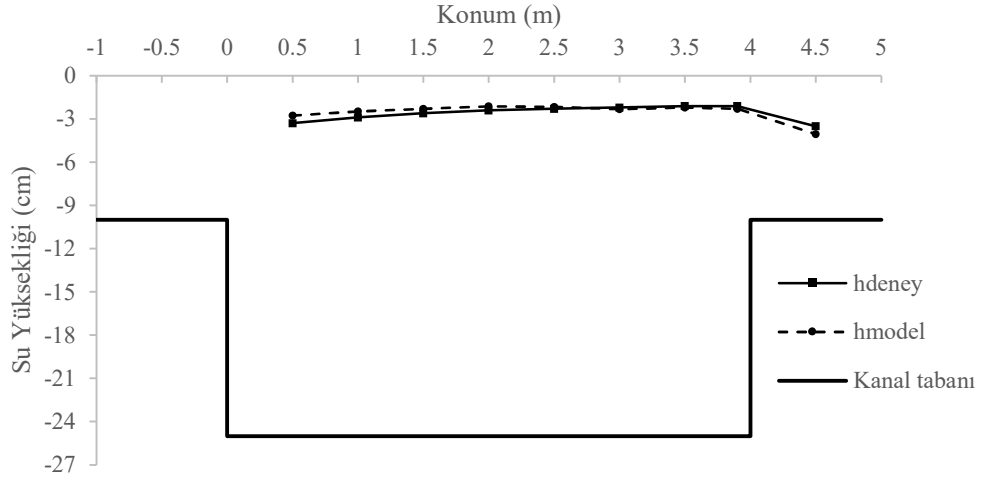
x(m)	Q=12 L/s Çark Yok (12-1)			Q=12 L/s Çark Var (12-2)			Q=12 L/s Çark ve Düşü Yok (12-3)			
	hdeney (cm)	hmodel (cm)	Fark (%)	hdeney (cm)	hmodel (cm)	Fark (%)	hdeney (cm)	hmodel (cm)	Fark (%)	
0.5	18.70	19.14	2.35	19.80	19.37	2.17	2.00	2.26	13.00	
1	19.00	19.96	5.05	20.20	19.91	1.44	4.30	4.79	11.40	
1.5	19.80	19.92	0.61	20.70	20.08	3.00	5.40	5.78	7.04	
2	20.30	20.08	1.08	20.80	20.07	3.51	5.40	5.61	3.89	
2.5	20.40	19.95	2.21	20.70	19.93	3.72	5.70	5.89	3.33	
3	20.40	20.08	1.57	20.40	19.80	2.94	5.70	5.87	2.98	
3.5	20.00	20.02	0.10	20.30	19.67	3.10	5.50	5.81	5.64	
3.9	19.50	19.97	2.41	20.00	19.63	1.85	5.50	5.76	4.73	
4.5	4.00	3.95	1.25	4.10	3.69	10.00	5.30	5.70	7.55	
Ortalama:			1.85	Ortalama:			3.53	Ortalama:		6.62

Tablo 4.1'e göre, ölçülen ve hesaplanan su seviyeleri arasında maksimum fark 12-1 modeli için %5.05, 12-2 modeli için %10.00, 12-3 modeli için %13.00 olarak bulunmuştur. 12-3 modeli ile ölçülen su yüksekliği arasındaki fark savak sonrası sıçrama olan bölgede yüksek çıkmıştır. Ölçülen ve modelden elde edilen su seviyeleri arasındaki ortalama farklar sırasıyla 12-1, 12-2 ve 12-3 durumları için %1.85, %3.53 ve %6.62 olarak elde edilmiştir.

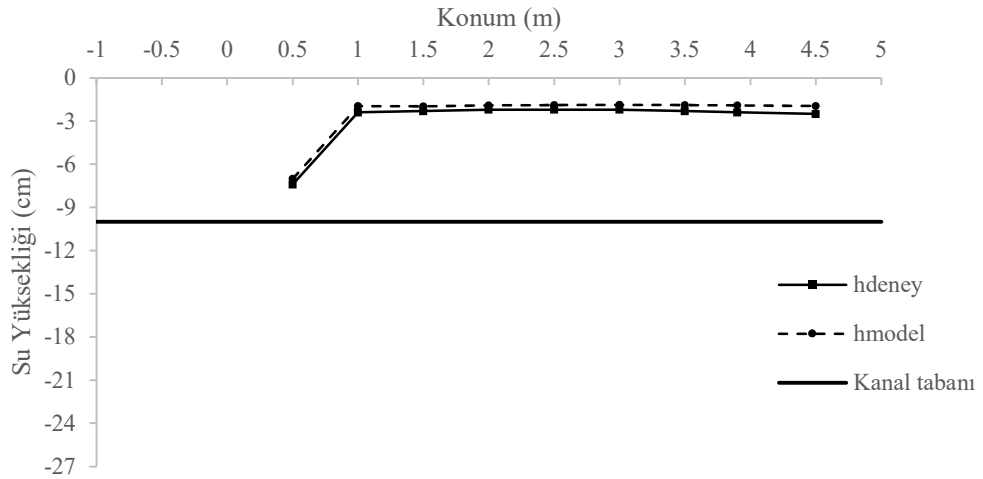
Debinin 17 L/s olduğu durum için ölçülen ve HAD modelinden elde edilen sonuçlar Şekil 4.5 – Şekil 4.7 ve Tablo 4.2'de sunulmuştur.



Şekil 0.5. Q:17 L/s için su çarkının olmadığı durumda kanal boyunca su yüzey profili



Şekil 0.6. Q=17 L/s için su çarkının olduğu durumda kanal boyunca su yüzey profili



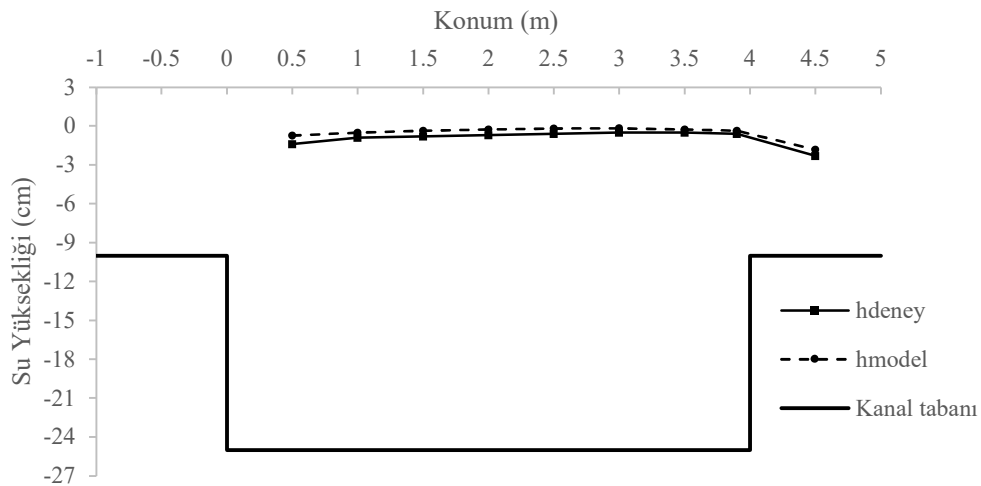
Şekil 0.7. Q=17 L/s için düşü veya eşik olmaması durumunda kanal boyunca su yüzey profili

Tablo 0.2: Q=17 L/s için ölçülen ve hesaplanan su yükseklikleri

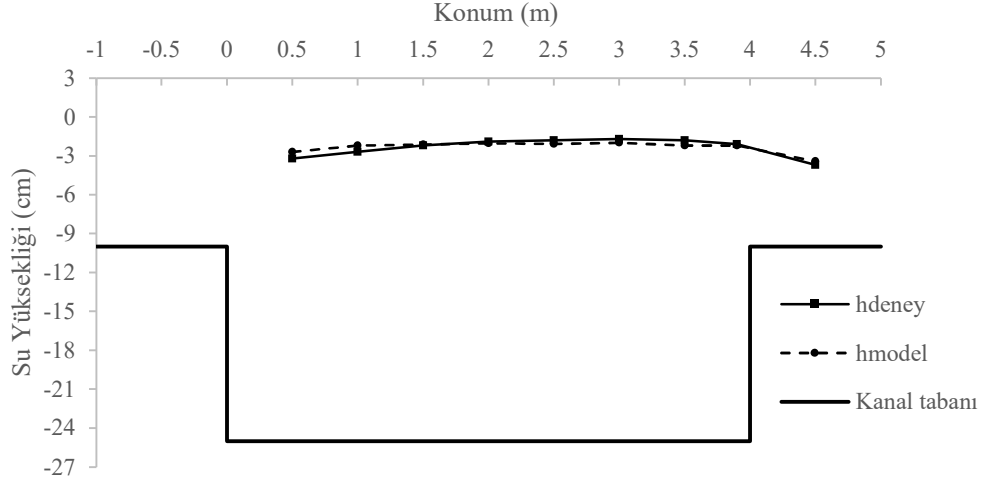
x(m)	Q=17 L/s Çark Yok (17-1)			Q=17 L/s Çark Var (17-2)			Q=17 L/s Çark ve Düşü Yok (17-3)		
	hdeney (cm)	hmodel (cm)	Fark (%)	hdeney (cm)	hmodel (cm)	Fark (%)	hdeney (cm)	hmodel (cm)	Fark (%)
0.5	21.2	21.66	2.17	21.7	22.23	2.44	2.6	2.99	15.00
1	21.5	21.96	2.14	22.1	22.53	1.95	7.6	8.04	5.79
1.5	21.5	21.92	1.95	22.4	22.71	1.38	7.7	8.03	4.29
2	21.5	21.84	1.58	22.6	22.88	1.24	7.8	8.1	3.85
2.5	21.4	21.65	1.17	22.7	22.85	0.66	7.8	8.12	4.10
3	21.4	21.61	0.98	22.8	22.68	0.53	7.8	8.13	4.23
3.5	21.4	21.72	1.50	22.9	22.80	0.44	7.7	8.11	5.32
3.9	21.1	21.41	1.47	22.9	22.70	0.87	7.6	8.09	6.45
4.5	6.1	5.75	5.74	6.5	5.95	8.46	7.5	8.05	7.33
Ortalama:			2.08	Ortalama:		2.00	Ortalama:		6.26

Tablo 4.2'den görüldüğü üzere, ölçülen ve hesaplanan su seviyeleri arasında maksimum fark 17-1 modeli için %5.74, 17-2 modeli için %8.46, 17-3 modeli için %15.00 olarak bulunmuştur. 17-1 ve 17-2 modellerinde düşü sonrası bölümde bağıl fark en yüksek değerdedir. 17-3 modelinde ise savak sonrası hidrolik sıçrama öncesi bölgede hata en fazladır. Ölçülen ve modelden elde edilen su seviyeleri arasındaki ortalama farklar sırasıyla 17-1, 17-2 ve 17-3 durumları için %2.08, %2.00 ve %6.26 olarak elde edilmiştir.

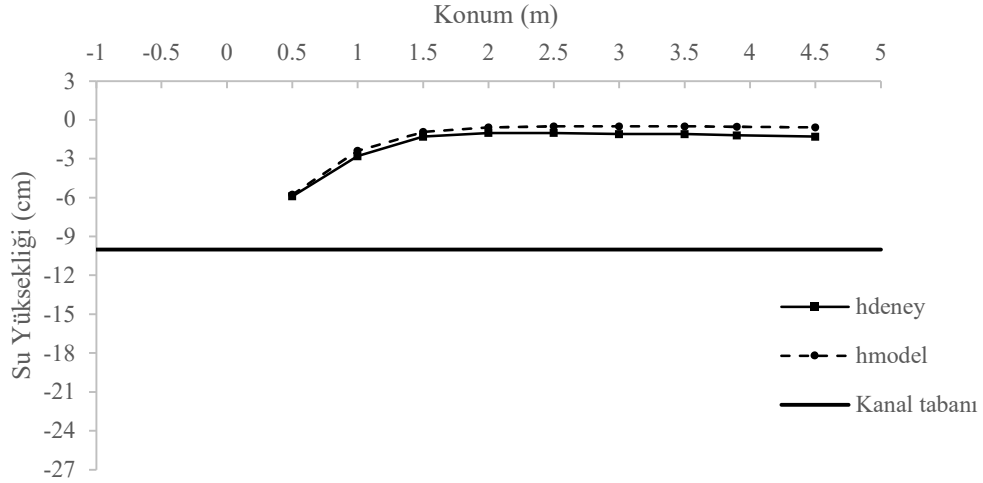
Kanala verilen debinin 22 L/s olduğu koşullarda ölçülen ve HAD modelinden alınan sonuçlar Şekil 4.8 – Şekil 4.10 ve Tablo 4.3'de verilmiştir.



Şekil 0.8. Q=22 L/s için su çarkının olmadığı durumda kanal boyunca su yüzey profili



Şekil 0.9. Q=22 L/s için su çarkının olduğu durumda kanal boyunca su yüzey profili



Şekil 0.10. Q=22 L/s için düşü veya eşik olmaması durumunda kanal boyunca su yüzey profili

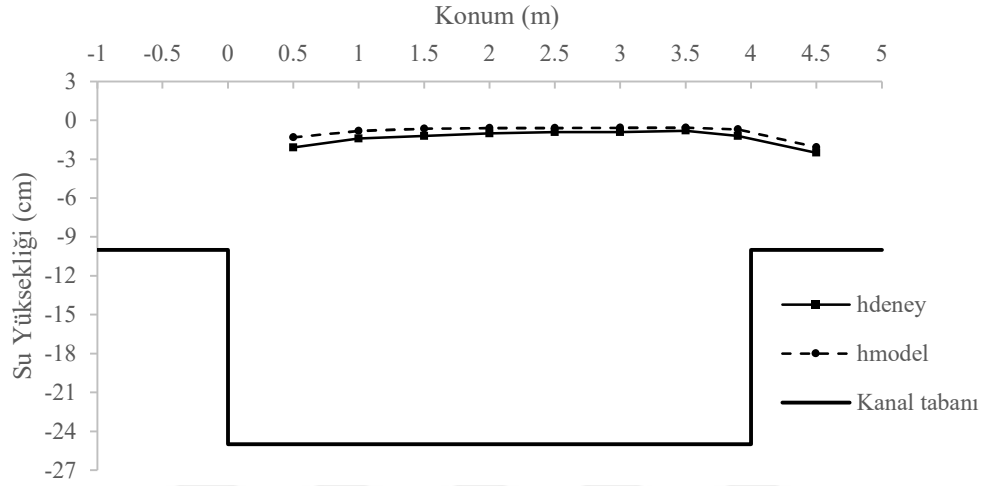
Tablo 0.3: Q=22 L/s için ölçülen ve hesaplanan su yükseklikleri

x(m)	Q=22 L/s Çark Yok (22-1)			Q=22 L/s Çark Var (22-2)			Q=22 L/s Çark ve Düşü Yok (22-3)		
	hdeney (cm)	hmodel (cm)	Fark (%)	hdeney (cm)	hmodel (cm)	Fark (%)	hdeney (cm)	hmodel (cm)	Fark (%)
0.5	23.6	24.27	2.84	21.8	22.32	2.39	4.1	4.24	3.41
1	24.1	24.49	1.62	22.3	22.81	2.29	7.2	7.63	5.97
1.5	24.2	24.65	1.86	22.8	22.87	0.31	8.7	9.08	4.37
2	24.3	24.75	1.85	23.1	22.98	0.52	9	9.43	4.78
2.5	24.4	24.81	1.68	23.2	22.93	1.16	9	9.51	5.67
3	24.5	24.83	1.35	23.3	23.02	1.20	8.9	9.51	6.85
3.5	24.5	24.74	0.98	23.2	22.81	1.68	8.9	9.51	6.85
3.9	24.4	24.65	1.02	22.9	22.81	0.39	8.8	9.47	7.61
4.5	7.7	8.18	6.23	6.3	6.59	4.60	8.7	9.42	8.28
Ortalama:			2.16	Ortalama:			Ortalama:		

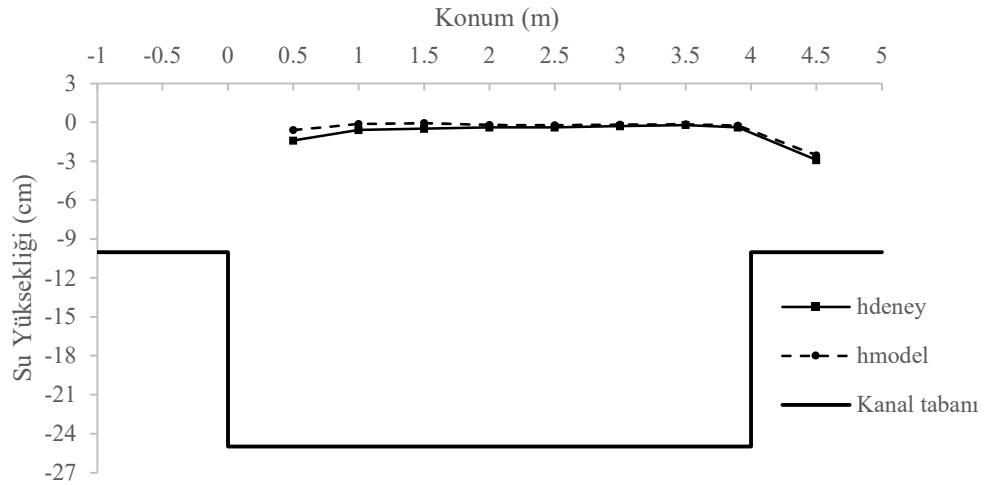
Tablo 4.3'e göre, ölçülen ve hesaplanan su seviyeleri arasında en yüksek fark 22-1 modeli için %6.23, 22-2 modeli için %4.60, 22-3 modeli için %8.28 olarak bulunmuştur. Tüm

durumlarda en yüksek hata kanalın son bölgesinde görülmüştür. Ölçülen ve modelden elde edilen su seviyeleri arasındaki ortalama farklar sırasıyla 22-1, 22-2 ve 22-3 durumları için %2.16, %1.62 ve %5.98 olarak bulunmuştur.

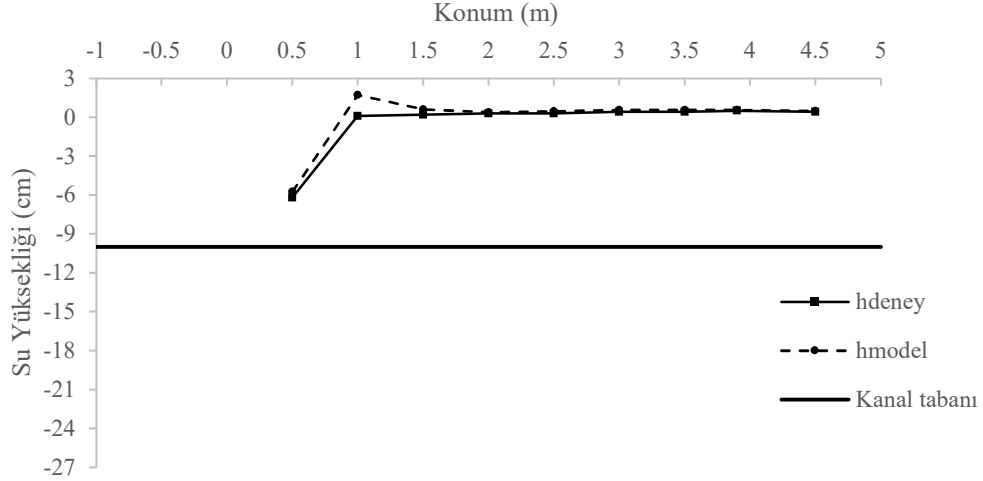
Kanalda debinin 27 L/s olduğu koşullarda ölçülen ve HAD modelinden alınan sonuçlar Şekil 4.11 – Şekil 4.13 ve Tablo 4.4’de gösterilmiştir.



Şekil 0.11. Q=22 L/s için su çarkının olmadığı durumda kanal boyunca su yüzey profili



Şekil 0.12. Q=27 L/s için su çarkının olmadığı durumda kanal boyunca su yüzey profili



Şekil 0.13. Q=27 L/s için düşü veya eşik olmaması durumunda kanal boyunca su yüzeyi profili

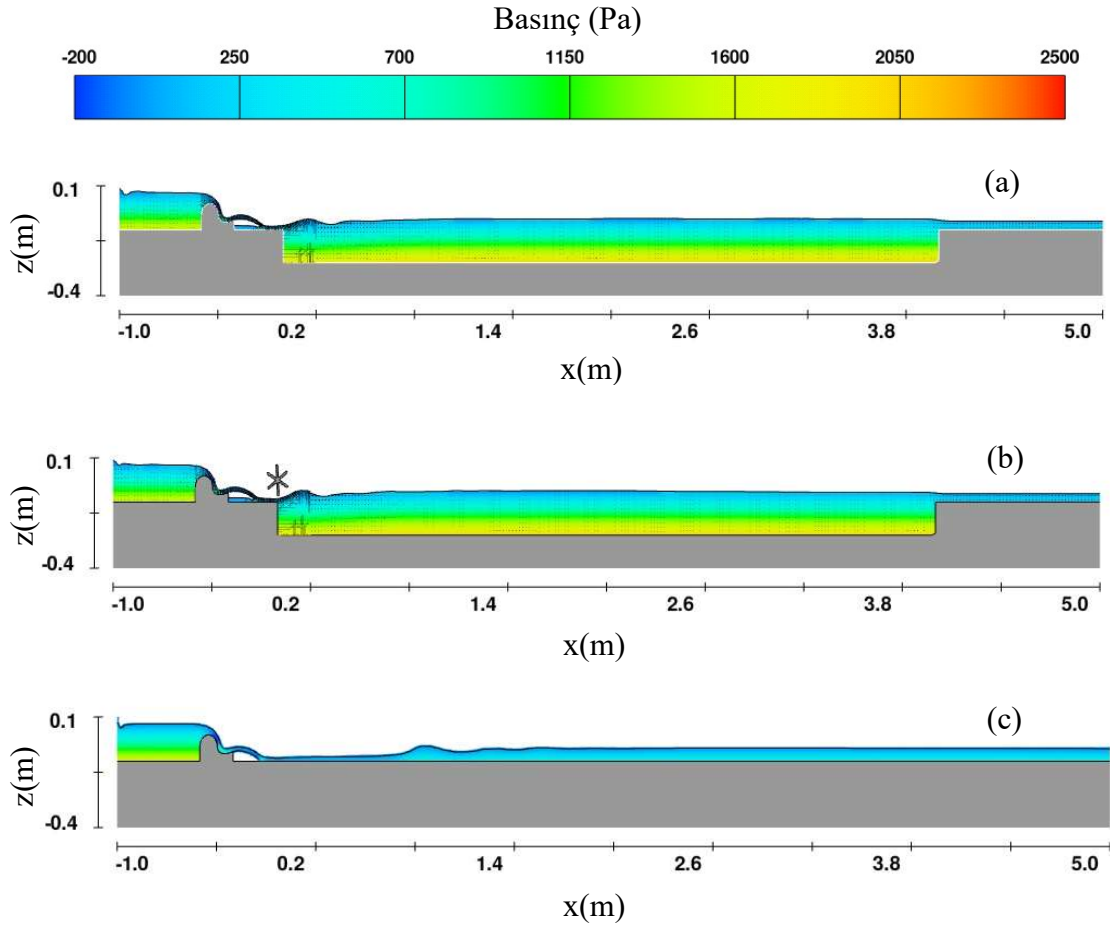
Tablo 0.4: Q=27 L/s için ölçülen ve hesaplanan su yükseklikleri

x(m)	Q=27 L/s Çark Yok (27-1)			Q=27 L/s Çark Var (27-2)			Q=27 L/s Çark ve Düşü Yok (27-3)			
	hdeney (cm)	hmodel (cm)	Fark (%)	hdeney (cm)	hmodel (cm)	Fark (%)	hdeney (cm)	hmodel (cm)	Fark (%)	
0.5	22.9	23.7	3.49	23.6	24.41	3.43	3.8	4.26	12.11	
1	23.6	24.18	2.46	24.4	24.89	2.01	10.1	11.72	16.04	
1.5	23.8	24.37	2.39	24.5	24.94	1.80	10.2	10.62	4.12	
2	24	24.41	1.71	24.6	24.8	0.81	10.3	10.39	0.87	
2.5	24.1	24.41	1.29	24.6	24.77	0.69	10.3	10.46	1.55	
3	24.1	24.43	1.37	24.7	24.83	0.53	10.4	10.55	1.44	
3.5	24.2	24.43	0.95	24.8	24.85	0.20	10.4	10.57	1.63	
3.9	23.8	24.3	2.10	24.6	24.75	0.61	10.5	10.57	0.67	
4.5	7.5	7.92	5.60	7.1	7.47	5.21	10.4	10.49	0.87	
Ortalama:			2.37	Ortalama:			1.70	Ortalama:		4.37

Tablo 4.4'e gösterildiği üzere, ölçülen ve hesaplanan su seviyeleri arasında en yüksek fark 27-1 modeli için %5.60, 27-2 modeli için %5.21, 27-3 modeli için %16.04 olarak bulunmuştur. 27-3 modelinde akımın kritik üstü rejimde olduğu bölgede ölçülen ve hesaplanan değerler arasında fark en fazladır. Ölçülen ve modelden elde edilen su seviyeleri arasındaki ortalama farklar sırasıyla 27-1, 27-2 ve 27-3 durumları için %2.37, %1.70 ve %4.37 olarak elde edilmiştir.

4.2. Basınç Dağılımları

Kanal akımının fazla olmadığı tam gelişmiş açık kanal akımlarında akışkan içerisindeki basınç dağılımı hidrostatik olduğu için basınç değerleri su yükseklikleri ile doğru orantılıdır. Şekil 4.14 – Şekil 4.17 arasında kanal içerisinde oluşan basınç dağılımları görülmektedir.

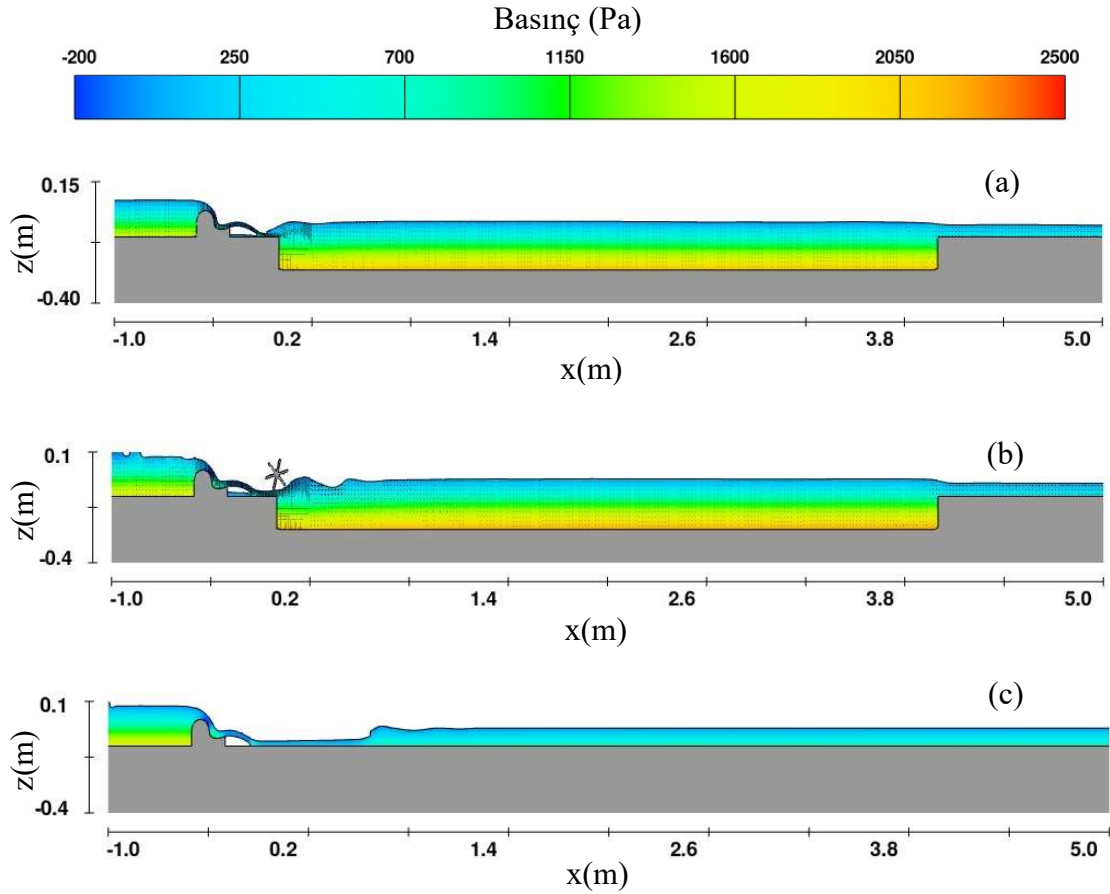


Şekil 0.14. $Q=12$ L/s için kanal boyunca 2D basınç dağılımı (a) 12-1 (b) 12-2 (c) 12-3

Tablo 0.5: $Q=12$ L/s için maksimum basınç değerleri

Model	Basınç (Pa)		Fark (%)
	$x=-0.5m$	$x=4.5m$	
12-1	1640.87	387.49	76.39
12-2	1642.27	361.82	77.97
12-3	1622.95	559.38	65.53

Kanal son bölümünde en düşük basınç değerinin hem çark hem de düşünün olduğu 12-2 modelinde olduğu Şekil 4.14'den görülmektedir. Savaşın membasıyla ($x=-0.5m$) kanalın sonu arasında ($x=4.5m$) basınç farkları karşılaştırıldığında sırasıyla en fazla basınç farkının 12-2 modelinde %77.97 olduğu Tablo 4.5'den görülmektedir. 12-1 modelinde basınç farkı %76.39 ve 12-3 modelinde %65.53 olduğu belirlenmiştir.

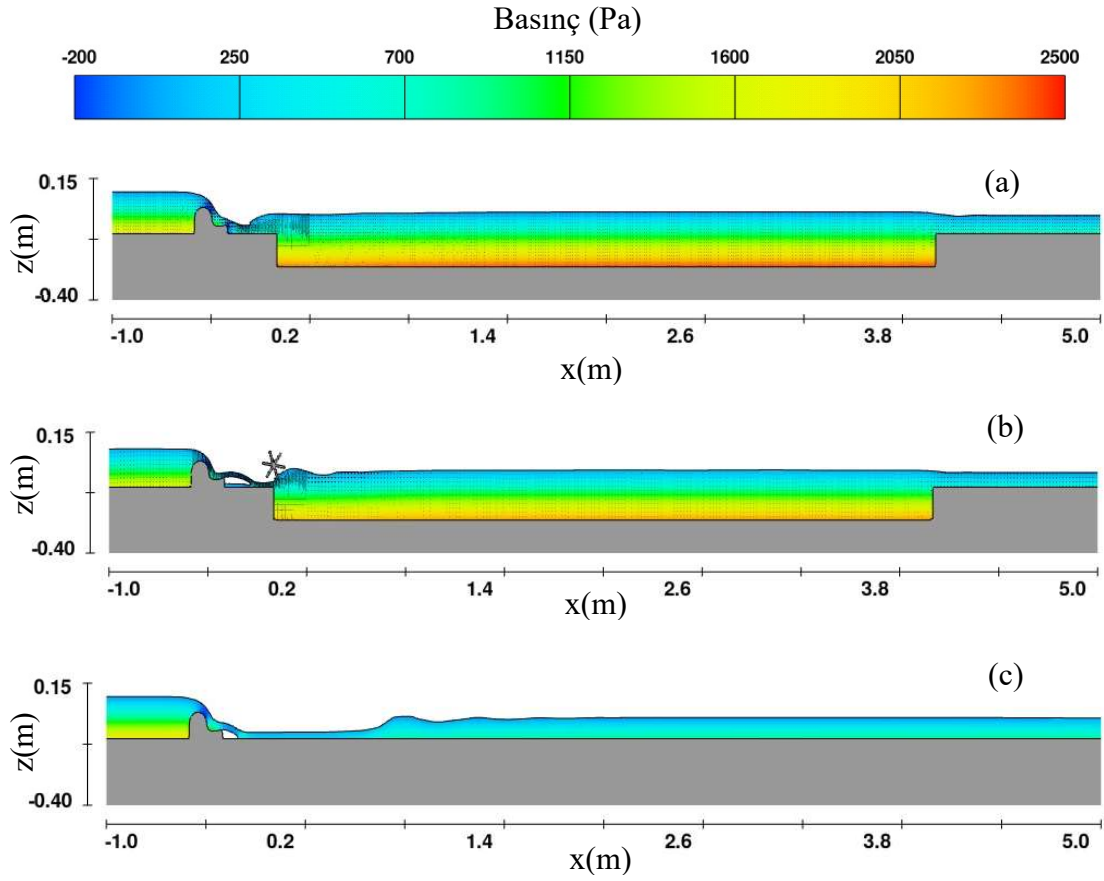


Şekil 0.15. $Q=17$ L/s için kanal boyunca 2D basınç dağılımı (a) 17-1 (b) 17-2 (c) 17-3

Tablo 0.6: $Q=17$ L/s için maksimum basınç değerleri

Model	Basınç (Pa)		Fark (%)
	$x=-0.5m$	$x=4.5m$	
17-1	1604.24	563.43	64.88
17-2	1790.84	583.76	67.40
17-3	1715.35	790.06	53.94

Kanal son bölümünde en düşük basınç değeri 563.43Pa ile sadece düşünün olduğu 17-1 durumunda oluşmuştur. Savaşın membasıyla ($x=-0.5m$) kanalın sonu arasında ($x=4.5m$) basınç farkları karşılaştırıldığında sırasıyla en fazla basınç farkının 17-2 modelinde %67.40 olarak hesaplanmıştır. Tablo 4.6'dan görüldüğü üzere basınç farkı 17-1 modelinde %64.88 ve 17-3 modelinde %53.94 olmuştur.

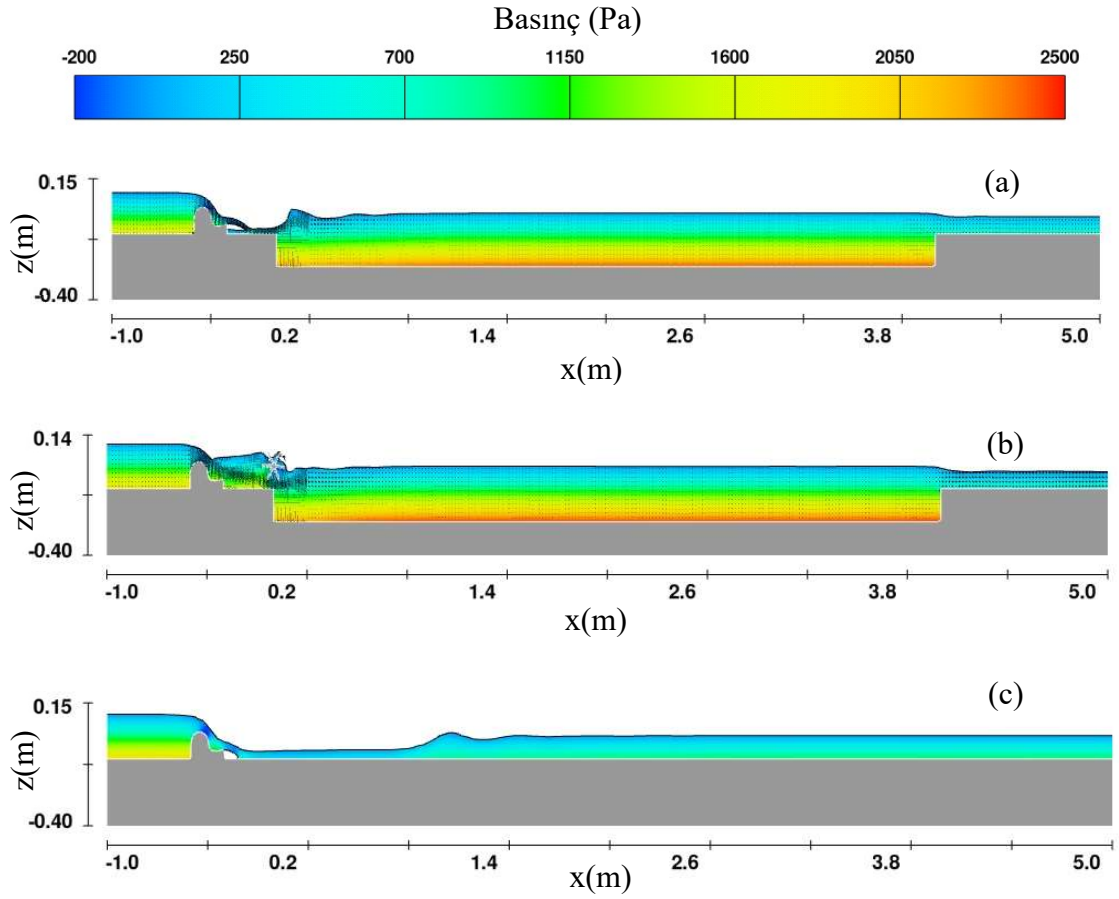


Şekil 0.16. $Q=22$ L/s için kanal boyunca 2D basınç dağılımı (a) 22-1 (b) 22-2 (c) 22-3

Tablo 0.7: $Q=22$ L/s için maksimum basınç değerleri

Model	Basınç (Pa)		Fark (%)
	$x=-0.5m$	$x=4.5m$	
22-1	1750.02	802.28	54.16
22-2	1696.76	646.06	61.92
22-3	1750.06	923.75	47.22

Kanalın $x=0.5m$ konumunda en düşük basınç değerinin hem çark hem de düşünün olduğu 22-2 modelinde olduğu Şekil 4.16'dan görülmektedir. Savaşın membasıyla ($x=-0.5m$) kanalın sonu arasında ($x=4.5m$) basınç farkları karşılaştırıldığında sırasıyla en fazla basınç farkının 22-2 modelinde %61.92 olduğu Tablo 4.5'den görülmektedir. 22-1 modelinde basınç farkı %54.16 ve 22-3 modelinde %47.22 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 0.17. $Q=27$ L/s için kanal boyunca 2D basınç dağılımı (a) 27-1 (b) 27-2 (c) 27-3

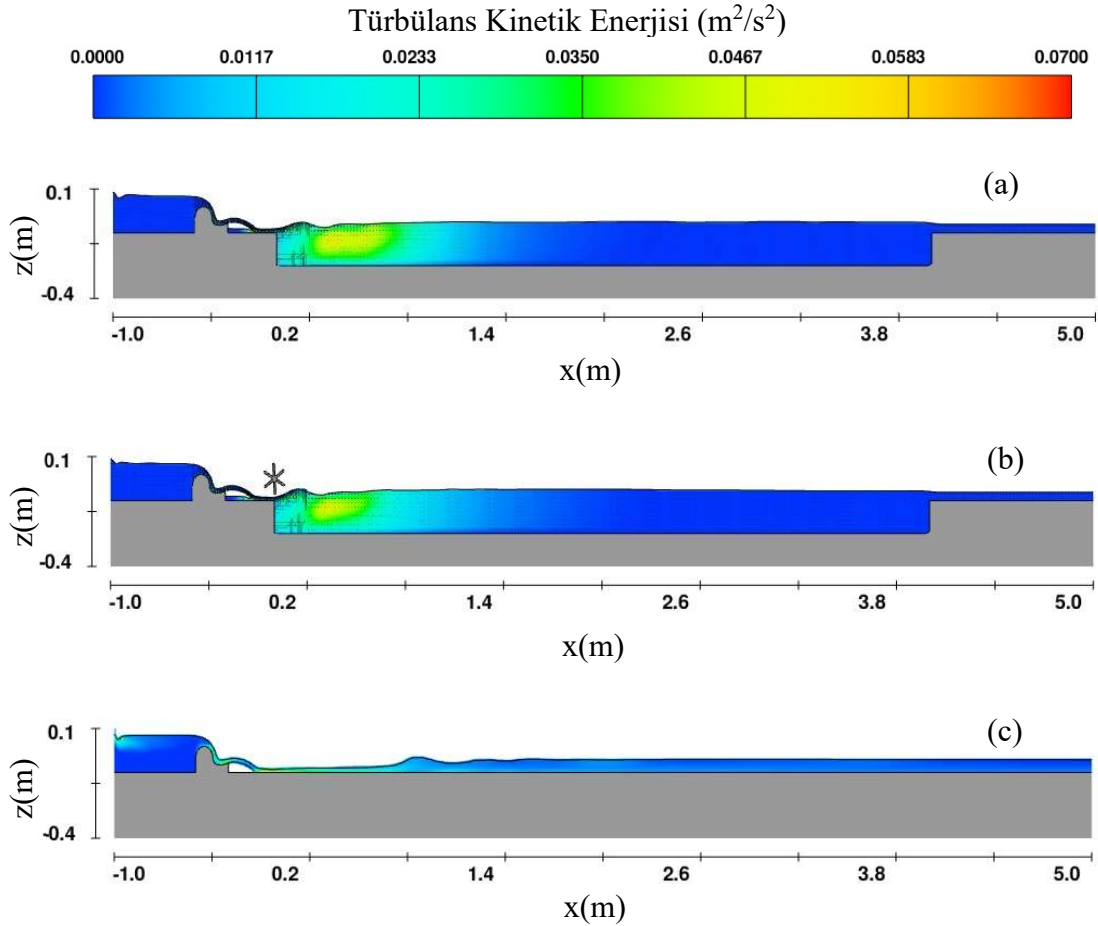
Tablo 0.8: $Q=27$ L/s için maksimum basınç değerleri

Model	Basınç (Pa)		Fark (%)
	$x=-0.5m$	$x=4.5m$	
27-1	1771.53	777.38	56.12
27-2	1888.33	733.12	61.18
27-3	1836.01	1029.01	43.95

Kanal son bölümünde en düşük basınç değeri 733.12Pa ile düşü ve çarkın beraber kombine edildiği 27-2 durumunda oluşmuştur. Savaşın membasıyla ($x=-0.5m$) kanalın sonu arasında ($x=4.5m$) basınç farkları karşılaştırıldığında sırasıyla en fazla basınç farkının 27-2 modelinde %61.18 olarak hesaplanmıştır. Tablo 4.8'den görüldüğü üzere basınç farkı 27-1 modelinde %56.12 ve 27-3 modelinde %43.95 olarak bulunmuştur.

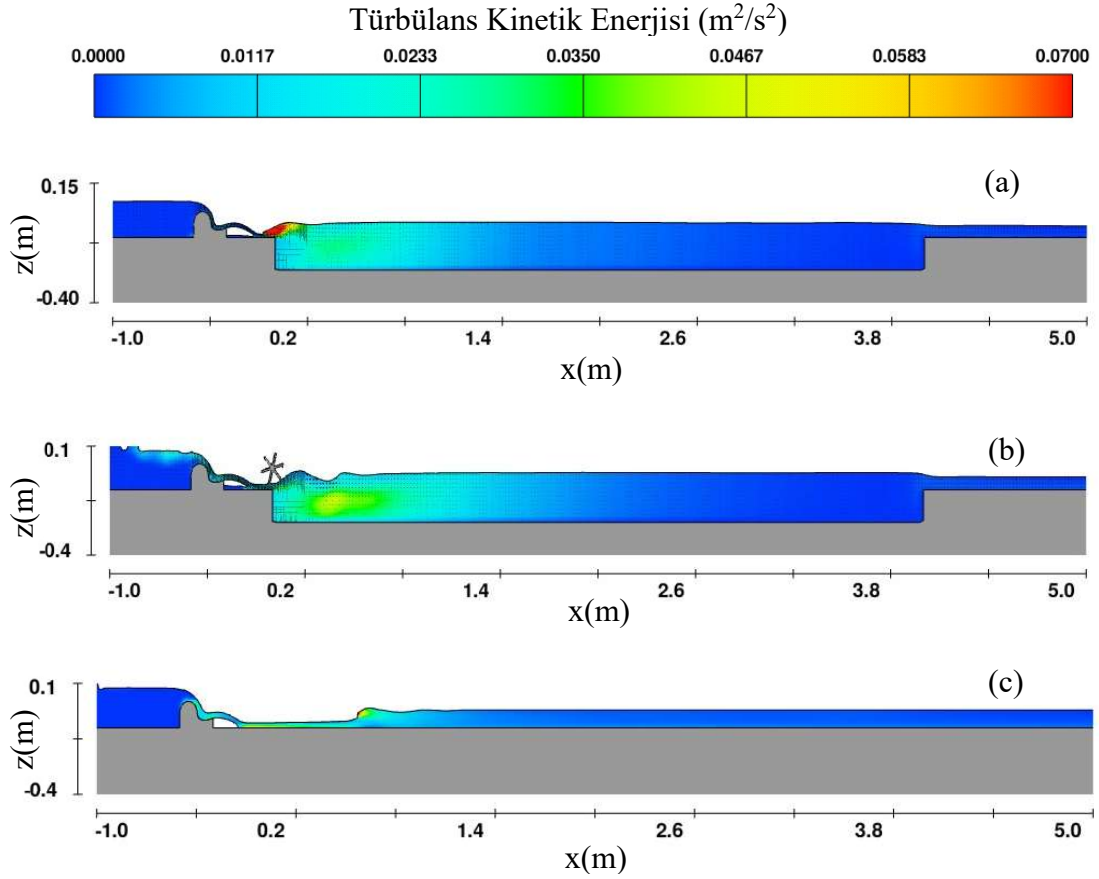
4.3. Türbülans Kinetik Enerjisi Dağılımları

RNG k- ϵ türbülans modeli ile hesaplanmış türbülans kinetik enerjisi dağılımları sırasıyla Q=12, 17, 22 ve 27 L/s debileri için Şekil 4.18 - Şekil 4.21’de verilmiştir.



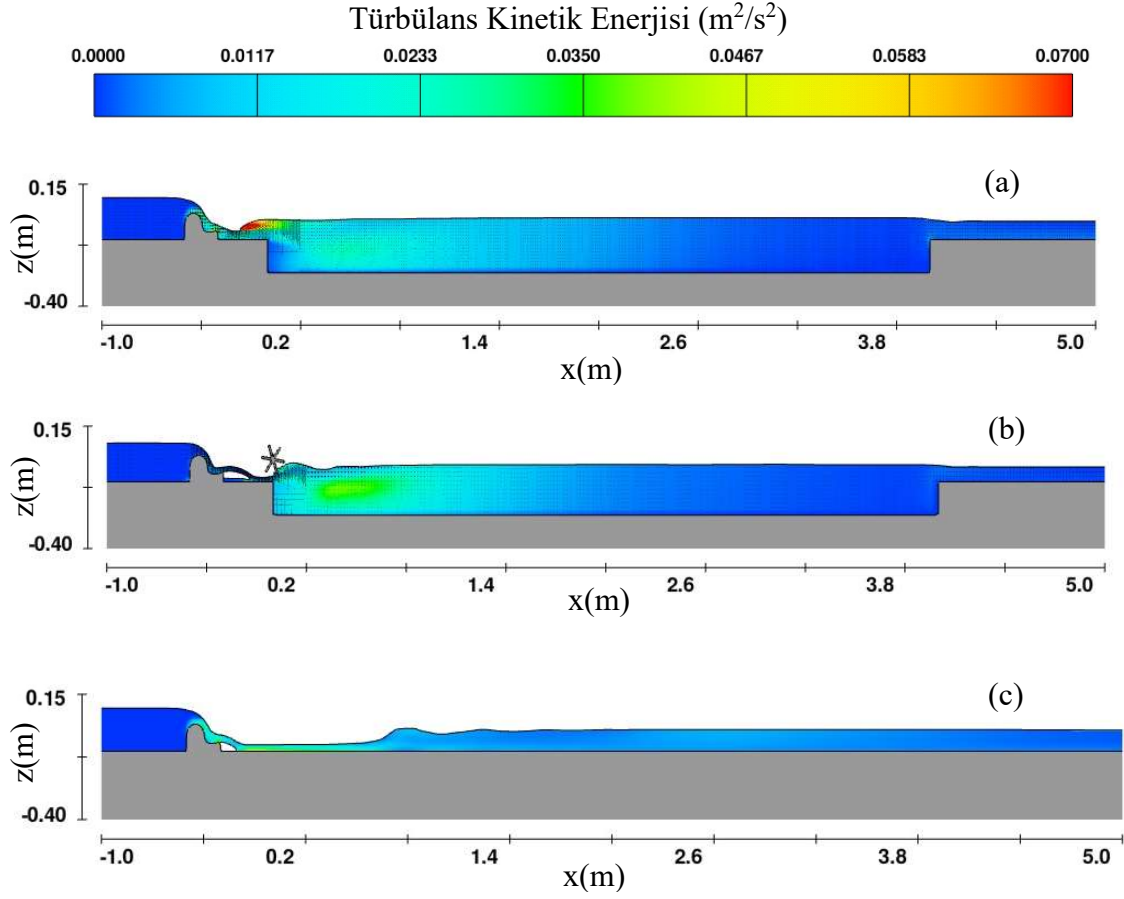
Şekil 0.18. Q=12 L/s için kanal boyunca 2D TKE dağılımı (a) 12-1 (b) 12-2 (c) 12-3

Türbülans etkisinin sadece düşünün olduğu 12-1 durumunda kanalın $x=0.8\text{m}$ konumlarına kadar sürdüğü, düşü ve çarkın birlikte kullanıldığı durumda ise $x=0.6\text{m}$ konumlarına kadar etkili olduğu görülmektedir. 12-1 durumu için maksimum TKE, $x=0.4\text{m}$ ve $z=-0.13\text{m}$ konumunda $0.0509 \text{ m}^2/\text{s}^2$ değerine ulaşmaktadır. 12-2 modelinde $x=0.3$ ve $z=-0.13\text{m}$ konumunda $0.0490 \text{ m}^2/\text{s}^2$ olarak en yüksek değerini almaktadır. 12-3 modelinde ise $x=-0.1$ ve $z=-0.09\text{m}$ konumunda maksimum TKE= $0.0351 \text{ m}^2/\text{s}^2$ olarak hesaplanmıştır.



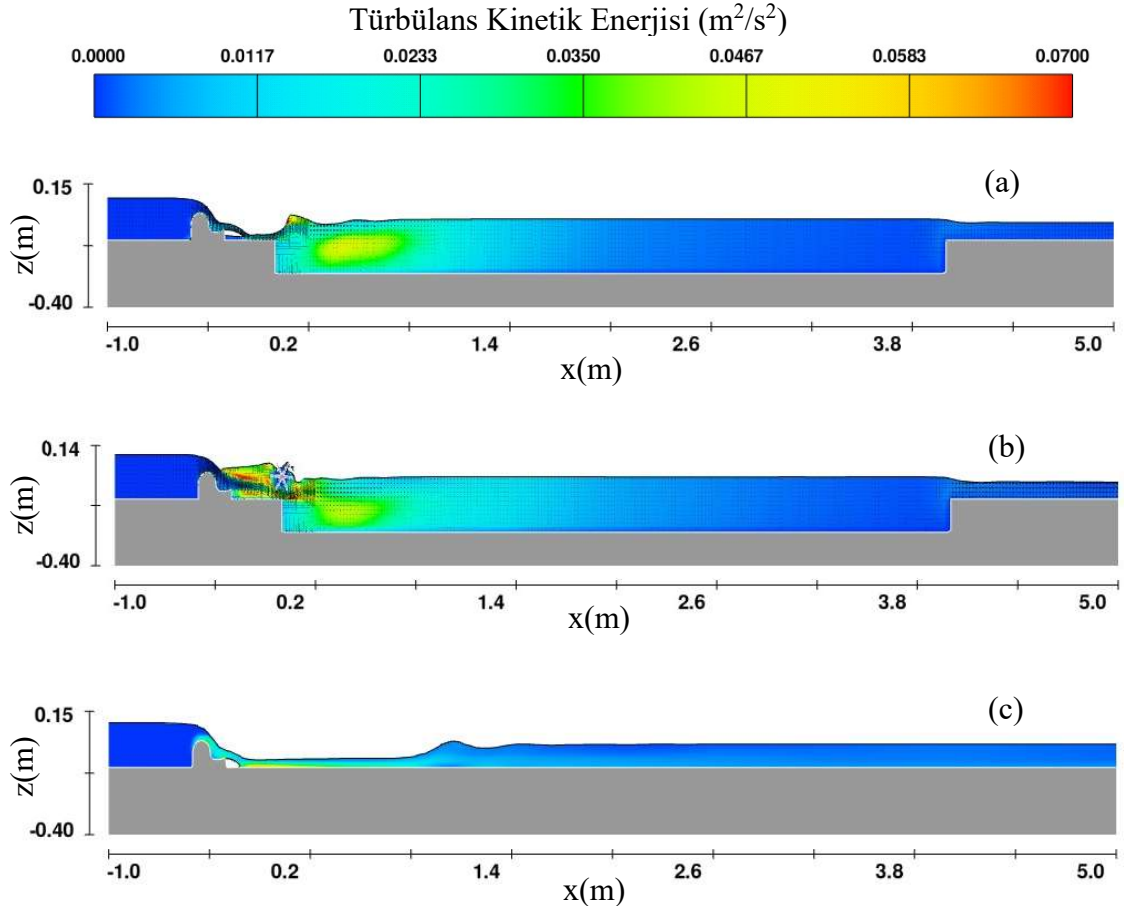
Şekil 0.19. $Q=17 \text{ L/s}$ için kanal boyunca 2D TKE dağılımı (a) 17-1 (b) 17-2 (c) 17-3

Türbülans enerjisinin sadece düşünün olduğu 17-1 durumunda savaktan su napının bittiği noktada yüksek değerlere ulaştığı Şekil 4.19(a)'da görülmektedir. Çarkın olduğu 17-2 durumunda $x=1.0\text{m}$ konumu sonrasında TKE'nin etkisini yitirdiği görülmektedir. Düz kanalın olduğu 17-3 durumunda hidrolik sıçrama esnasında maksimum değerine ulaşan TKE akımın nehir rejimine geçmesiyle etkisini kaybettiği görülmektedir. 17-2 modelinde $x=0.4$ ve $z=-0.13\text{m}$ konumunda $0.0475 \text{ m}^2/\text{s}^2$ olarak maksimum değerine ulaşmaktadır.



Şekil 0.20. $Q=22 \text{ L/s}$ için kanal boyunca 2D TKE dağılımı (a) 22-1 (b) 22-2 (c) 22-3

Türbülans enerjisinin sadece düşünün olduğu 22-1 durumunda savak napının sonlandığı yerde yüksek değerlere ulaştığı düşünün tam ortalarında türbülansın yok olduğu ifade edilebilir. Düşüye ilave çarkın eklenmesiyle oluşturulan 22-2 modelinde türbülansın $x=0.2\text{m}$ ile $x=0.8\text{m}$ konumları arasında etkili olduğu ve sadece düşünün olduğu duruma göre daha erken etkisini kaybettiği görülmektedir. Savak sonrası kanalın düz devam ettiği 22-3 durumunda hidrolik sıçrama sonrası TKE değeri azalsa da kanalın son bölümüne kadar etkisini sürdürmektedir. 17-2 modelinde $x=0.4$ ve $z=-0.12\text{m}$ konumunda $0.0400 \text{ m}^2/\text{s}^2$ olarak maksimum değerine ulaşmaktadır.



Şekil 0.21. $Q=27 \text{ L/s}$ için kanal boyunca 2D TKE dağılımı (a) 27-1 (b) 27-2 (c) 27-3

Debinin yükselmesiyle 27-1 modelinde savak sonrası suyun kısa bir mesafe sel rejiminde devam ettikten sonra düşü ile karşılaşmasıyla sıçrama yaptığı Şekil 4.21(a)'dan görülmektedir. Düşü başlangıcında ikincil akımların meydana geldiği ve $x=0.2\text{m}$ ile $x=0.8\text{m}$ konumları arasında TKE değerinin maksimuma ulaştığı izlenmektedir. 27-2 modelinde yüksek debi nedeniyle suyun tamamı çarkın altından rahatlıkla geçemediği için membada birikme yaparak geçebilmektedir. 27-2 modeli için türbülansın $x=0.2\text{m}$ ve $x=0.6\text{m}$ konumları arasında etkin olduğu görülmektedir. 27-3 modelinde savak sonrası kritik akım gözlenen bölgede TKE değerinin tabanda yükseldiği sıçrama sonrası türbülans enerjinin azalarak kanal sonuna kadar devam ettiği Şekil 4.21'den görülmektedir.

4.4. Akış Doğrultusunda Hız Bileşeni Dağılımları

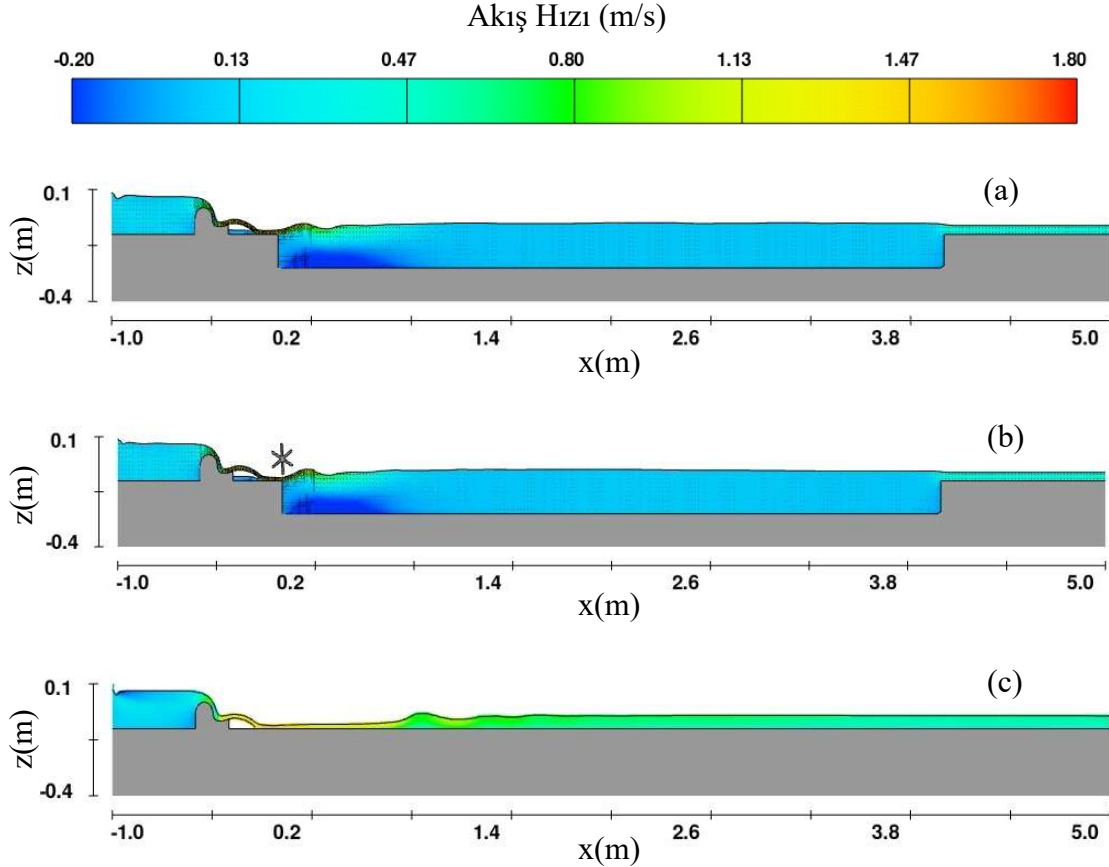
Model kurulumunun gerçek olayı yansıtmada, sınır şartları ve kanal karakteristiklerinin doğru tanımlanması kadar doğru türbülans modelinin seçimi, mesh tipi ve sayısının belirlenmesi de oldukça önemlidir. Bu amaçla modelin test edilmesinde kullanılan önemli deneysel verilerin başında hız ölçümleri gelmektedir. Kanal orta noktasında farklı boyuna konumlarda ve farklı düşeylerde ölçülen hız değerleri ile elde edilmiş ortalama hızlar ve modellerden elde edilmiş hızlar karşılaştırılarak Tablo 4.9 – Tablo 4.12 arasında verilmektedir.

Tablo 0.9: Q=12 L/s için y=0.25m konumunda ölçülen ve hesaplanan ortalama hızlar

Model	Konum (m)	Ortalama Hızlar (m/s)			Mutlak Bağlı Farklar (%)	
		u _{d02-08}	u _{d06}	u _{dmodel}	εu _{d02-08}	εu _{d06}
12-1	0.5	0.245	0.256	0.225	8.09	12.11
	1.5	0.076	0.078	0.071	6.08	8.60
	2.5	0.085	0.085	0.081	3.63	4.31
	3.5	0.086	0.087	0.084	2.64	3.87
	4.5	-	0.448	0.415	-	7.38
	Ortalama:				5.11	7.25
12-2	0.5	0.239	0.248	0.212	11.37	14.52
	1.5	0.085	0.086	0.081	4.45	5.68
	2.5	0.096	0.097	0.093	3.49	4.08
	3.5	0.083	0.083	0.080	2.98	3.22
	4.5	-	0.421	0.394	-	6.42
	Ortalama:				5.57	6.78
12-3	0.5	-	1.316	1.173	-	10.89
	1.5	-	0.732	0.675	-	7.90
	2.5	-	0.649	0.608	-	6.39
	3.5	-	0.549	0.527	-	4.06
	4.5	-	0.553	0.513	-	7.28
	Ortalama:				-	7.30

Debinin 12 L/s olduğu koşullarda genel olarak su seviyesinin 0.2 ile 0.8 katı yüksekliklerde ölçülen hızların ortalaması ile bulunan hızların su seviyesinden 0.6h yükseklikte ölçülen hız ile bulunan ortalama hızlara çok az da olsa düşük olduğu ve modelden elde edilen hızlara daha yakın olduğu görülmektedir. Su seviyesinin düşük olduğu durumlarda sadece tek düşeyde hız ölçümü yapılabildiği için karşılaştırmalar sadece su seviyesinden 0.6h derinlikte yapılan hızlara göre yapılmıştır. 12 L/s debi şartlarında tüm modellerde x=0.5m konumunda model ile ölçülen hızlar arasında farkın yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni o bölgede TKE değerinin fazlalığı ve düşü havuzuna giren akımın kararsız olmasıdır. 12-3 durumu için

$x=0.5\text{m}$ konumundaki modelden elde edilen ile ölçülen hız arasında farkın daha yüksek olması akımın kritik üstü rejiminde olması dolayısıyla yüksek hızlara ulaşılmasıdır. Genel olarak model ile ölçülen hızlar arasında farkın yüksek olmadığı görülmektedir. Model ile ölçülen hızlar arasında farkın ortalamaları karşılaştırıldığında en yüksek değerin kanalda düşü olmayan 12-3 durumunda görülmüştür. Bu koşul altında 0.6h derinlikte ölçülen hızlarla modelden elde edilen hızların ortalaması $\%7.30$ olarak hesaplanmıştır.

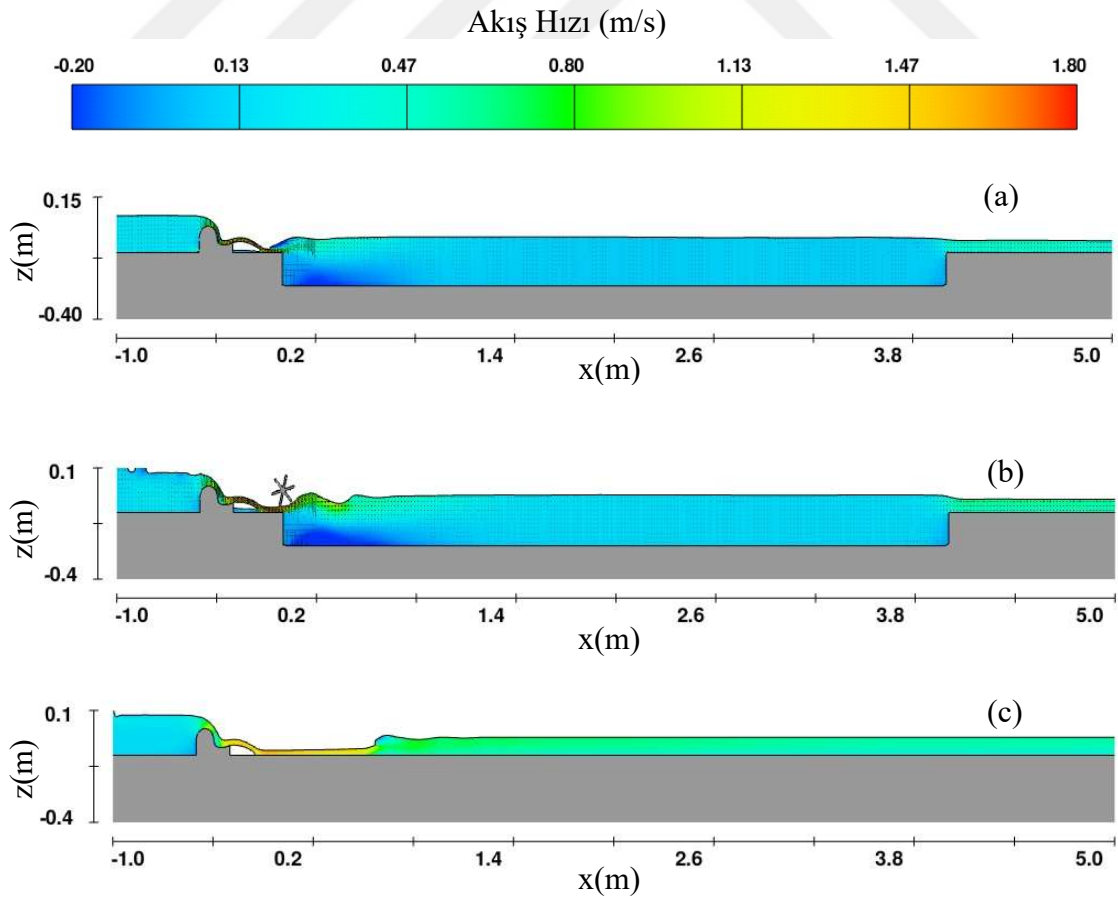


Şekil 0.22. $Q=12\text{ L/s}$ için kanal boyunca 2D hız (u) dağılımı (a) 12-1 (b) 12-2 (c) 12-3

12 L/s debi altında kanalda düşünün olduğu durumda düşü başlangıcından $x=0.7\text{m}$ konumuna kadar tabanda oluşan ikincil akımlar nedeniyle negatif hızların oluştuğu görülmektedir. Düşü olmayan 12-3 durumunda savak sonrası akımın kritik üstü rejimde aktığı ve yaklaşık $x=0.8\text{m}$ konumunda hidrolik sıçramanın gerçekleştiği ve hızın 0.7m/s altında devam ettiği izlenmektedir.

Tablo 0.10: Q=17 L/s için y=0.25m konumunda ölçülen ve hesaplanan ortalama hızlar

Model	Konum (m)	Ortalama Hızlar (m/s)			Mutlak Bağlı Farklar (%)	
		u _{d02-08}	u _{d06}	u _{d02-08}	ε _{u_{d02-08}}	ε _{u_{d06}}
17-1	0.5	0.165	0.165	0.146	11.73	11.51
	1.5	0.117	0.117	0.106	9.26	9.64
	2.5	0.118	0.120	0.109	7.20	8.91
	3.5	0.114	0.116	0.109	4.83	6.55
	4.5	-	0.512	0.486	-	5.17
		Ortalama:			8.25	8.36
17-2	0.5	0.305	0.306	0.272	10.95	11.30
	1.5	0.173	0.174	0.157	9.21	9.79
	2.5	0.161	0.164	0.152	5.80	7.35
	3.5	0.161	0.162	0.152	5.52	6.28
	4.5	0.599	0.616	0.563	5.96	8.60
		Ortalama:			7.49	8.66
17-3	0.5	-	1.326	1.198	-	9.61
	1.5	-	0.645	0.599	-	7.12
	2.5	-	0.602	0.559	-	7.28
	3.5	-	0.537	0.513	-	4.45
	4.5	-	0.541	0.505	-	6.70
		Ortalama:			-	7.03



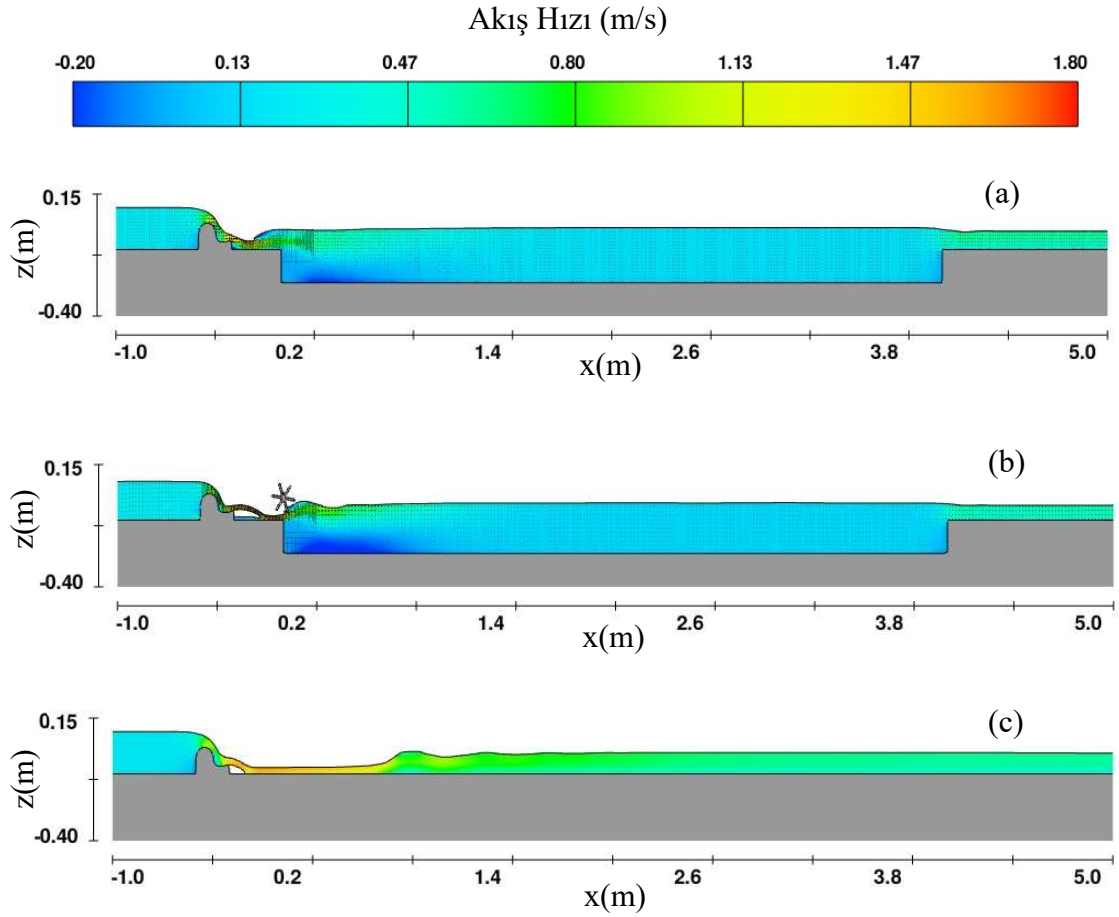
Şekil 0.23. Q=17 L/s için kanal boyunca 2D hız (u) dağılımı (a) 17-1 (b) 17-2 (c) 17-3

17 L/s debi şartlarında düşü ve çarkın olduğu 17-2 durumunda, diğer iki duruma göre negatif yönde akış hızlarının daha fazla yer kapladığı görülmektedir. Çarkın alt bıçaklarının yarısına kadar su yüksekliğinin çıkmasıyla çarkın dönme frekansı yükselmiş su da sadece düşü olan duruma göre daha hızlı akmıştır. Model hızları ile ölçülen hızlar arasında mutlak bağıl farklar karşılaştırıldığında en az ortalama fark %7.03 ile düz kanal koşullarında elde edilmiştir. Bunu %7.49 ile 0.2h-0.8h yüksekliklerinde ölçülen hızların ortalamaları ile 17-2 modeli ile edilmiş durum izlemiştir. En fazla fark da %8.66 olarak 0.6h değerinde ölçülmüş hız ile 17-2 HAD modelinden elde edilen hızlar arasında bulunmuştur.

Tablo 0.11: Q=22 L/s için y=0.25m konumunda ölçülen ve hesaplanan ortalama hızlar

Model	Konum (m)	Ortalama Hızlar (m/s)			Mutlak Bağıl Farklar (%)	
		U _{d02-08}	U _{d06}	U _{dmodel}	εU _{d02-08}	εU _{d06}
22-1	0.5	0.276	0.283	0.251	9.2	11.5
	1.5	0.199	0.203	0.184	7.3	9.0
	2.5	0.184	0.188	0.176	4.3	6.0
	3.5	0.178	0.180	0.173	2.5	3.4
	4.5	-	0.557	0.520	-	6.7
Ortalama:					5.83	7.32
22-2	0.5	0.298	0.302	0.275	7.6	8.9
	1.5	0.149	0.150	0.143	3.9	4.5
	2.5	0.145	0.147	0.140	3.4	4.6
	3.5	0.142	0.144	0.138	2.7	3.8
	4.5	-	0.522	0.495	-	5.2
Ortalama:					4.41	5.41
22-3	0.5	-	1.471	1.315	-	10.6
	1.5	-	0.766	0.727	-	5.1
	2.5	-	0.656	0.620	-	5.4
	3.5	-	0.598	0.575	-	3.8
	4.5	-	0.586	0.559	-	4.6
Ortalama:					-	5.93

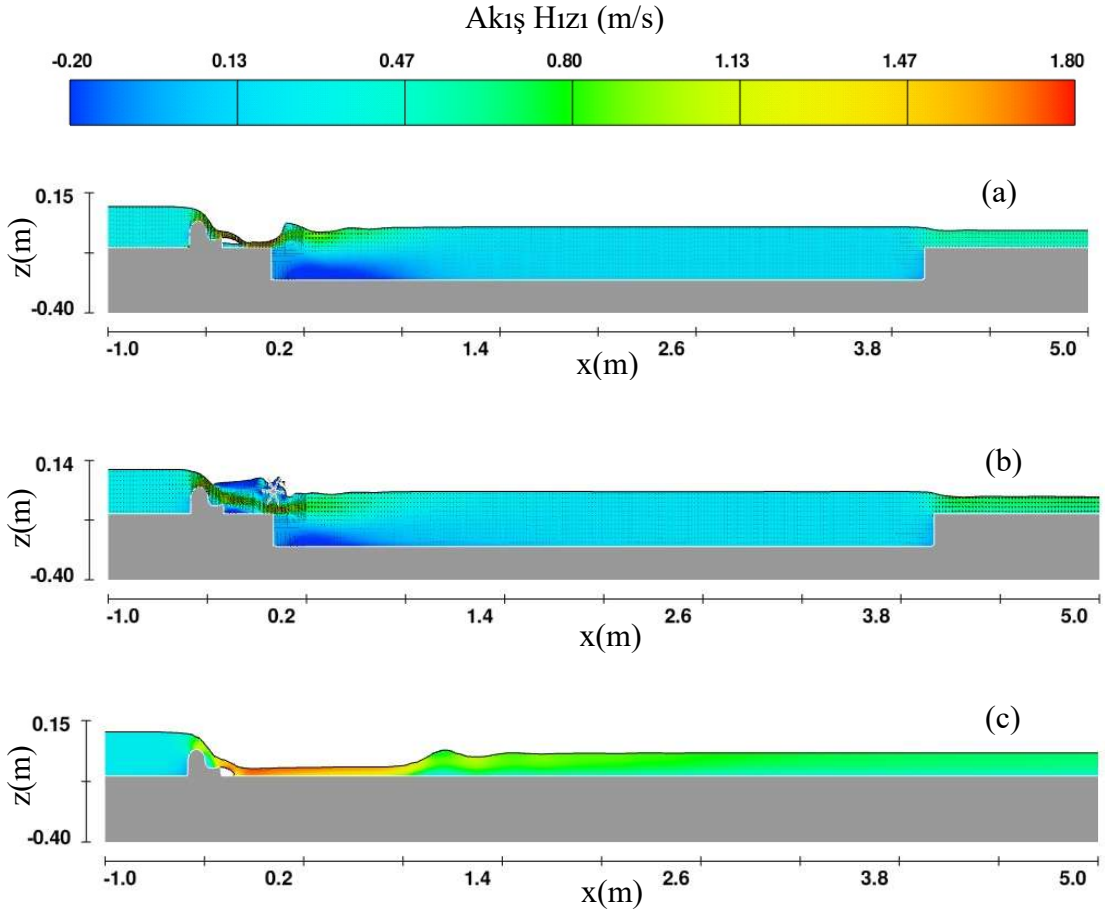
Debinin 22 L/s olduğu durumda ölçülen ve modelden hesaplanan ortalama hızlar arasında farkın düşük debilere oranla daha yakın olduğu görülmektedir. Ölçülen ve modelden elde edilen hızlar arasında en büyük farkların x=0.5m konumunda olduğu Tablo 4.11'den okunmaktadır. Bunun nedeni düşü ve çark olan durumlarda düşüye giriş ve çark sonrası oluşan ters yönlü akımlar ve TKE değerinin yüksek olmasıdır. 17-3 modelinde sel rejiminin görüldüğü bölgede yüksek hız ve çalkantılar nedeniyle oluşan karmaşıklık modelin, ölçülen hızları tam anlamıyla yakalayamamasına neden olmaktadır. Dolayısıyla bu noktada model ve ölçülen hızlar arasında %10'un üzerinde fark olduğu Tablo 4.11'den görülmektedir.



Şekil 0.24. $Q=22$ L/s için kanal boyunca 2D hız (u) dağılımı (a) 22-1 (b) 22-2 (c) 22-3

Tablo 0.12: $Q=27$ L/s için $y=0.25$ m konumunda ölçülen ve hesaplanan ortalama hızlar

Model	Konum (m)	Ortalama Hızlar (m/s)			Mutlak Bağıl Farklar (%)	
		u _{d02-08}	u _{d06}	u _{dmodel}	ϵ u _{d02-08}	ϵ u _{d06}
27-1	0.5	0.313	0.318	0.288	7.84	9.35
	1.5	0.172	0.174	0.164	5.09	5.80
	2.5	0.180	0.175	0.176	1.96	1.01
	3.5	0.179	0.178	0.175	2.26	2.04
	4.5	-	0.558	0.536	-	3.80
Ortalama:					4.29	4.40
27-2	0.5	0.315	0.318	0.296	6.02	6.76
	1.5	0.188	0.190	0.177	6.19	7.22
	2.5	0.207	0.207	0.194	5.83	6.20
	3.5	0.206	0.211	0.198	3.84	5.99
	4.5	-	0.675	0.640	-	5.08
Ortalama:					5.47	6.25
27-3	0.5	-	1.668	1.456	-	12.73
	1.5	-	0.839	0.778	-	7.19
	2.5	-	0.768	0.718	-	6.49
	3.5	-	0.692	0.652	-	5.75
	4.5	-	0.653	0.626	-	4.15
Ortalama:					-	7.26

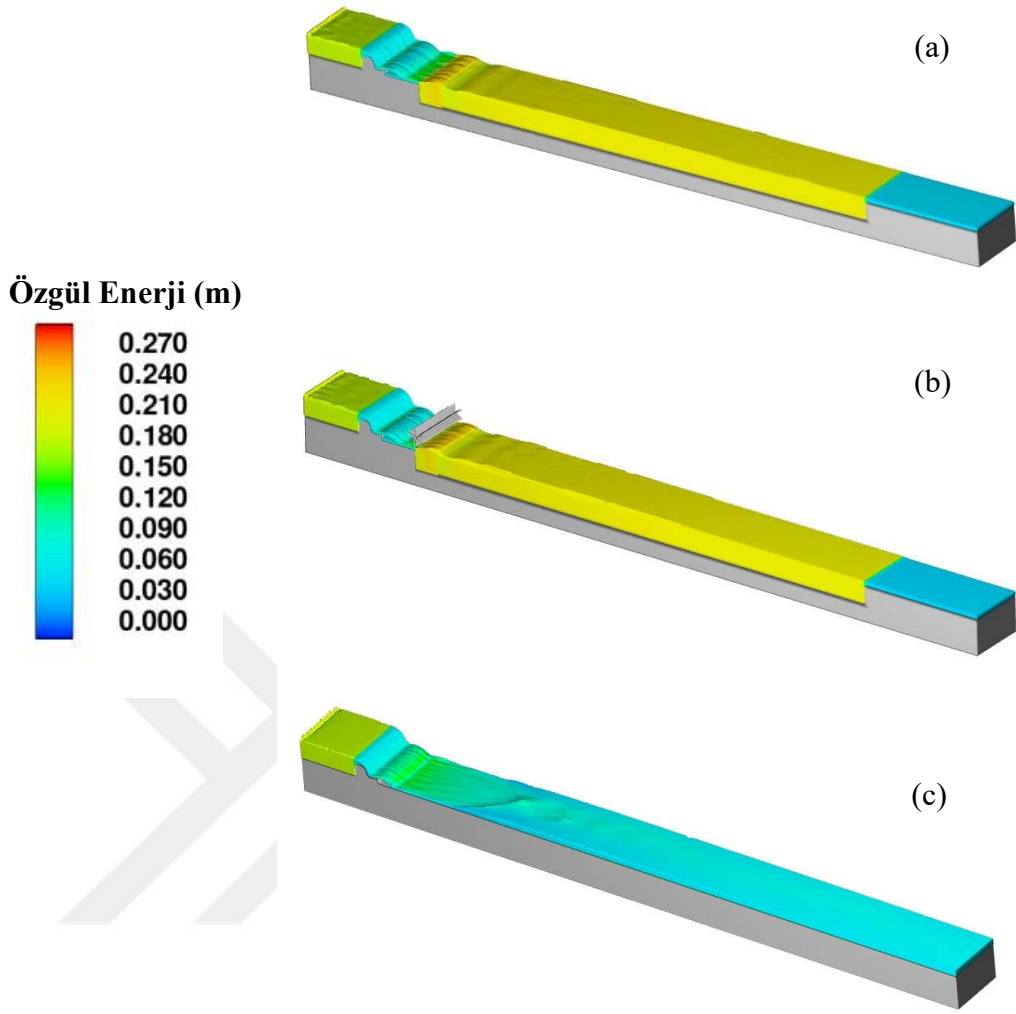


Şekil 0.25. $Q=27$ L/s için kanal boyunca 2D hız (u) dağılımı (a) 27-1 (b) 27-2 (c) 27-3

27 L/s debi şartlarında sadece düşünün olduğu 27-1 durumunda, diğer iki duruma göre negatif yönde akış hızlarının daha geniş bir bölge kapladığı görülmektedir. Düşü ve çarkın beraber olduğu durumda debinin tamamının çarkı an altından geçemediği bir kısmının geri döndüğü Şekil 4.25’den izlenmektedir. Düşü ve çarkın olmadığı 27-3 durumunda hızların oldukça yüksek olması durumuyla $x=0.5$ m konumunda ölçülen ve modelden elde edilen ortalama hız farkının %12.73 değerini aldığı, sıçrama sonrası bu farkın %7.19’un altına indiği görülmektedir.

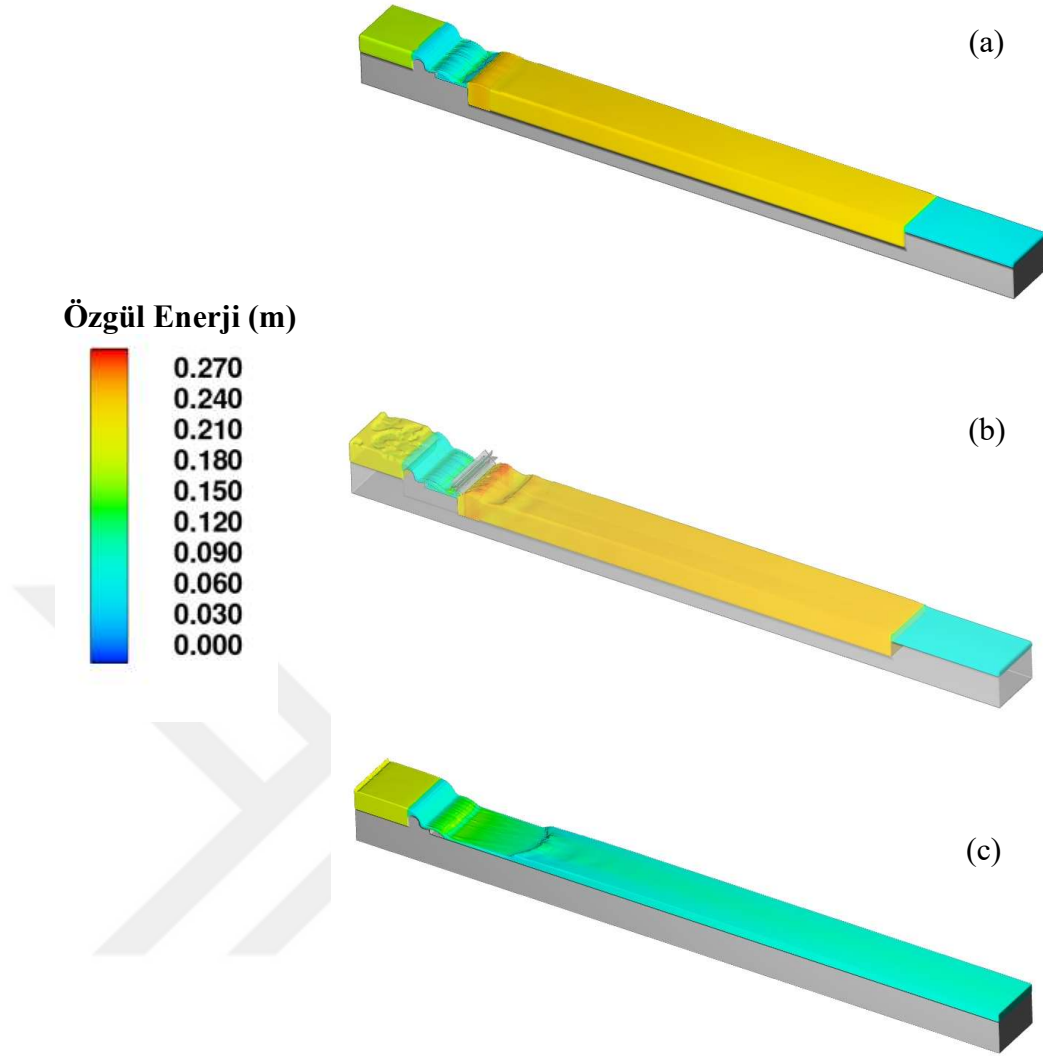
4.5. Özgül Enerji Dağılımları

Kanal içerisinde yapılacak yapıların emniyeti açısından yapıya etkiyen akış hızı ve basınç kuvvetinin dolayısıyla özgül enerjinin olabildiğince azaltılması gerekir. (Gemici vd., 2022) Şekil 4.26’da kanal içerisinde debinin 12 L/s olması durumunda, kanal içerisinde bulunan savak sonrasına düşü yapılması (12-1), düşüye ilave olarak çark eklenmesi (12-2) ve savaktan sonra kanalın sabit kesitle devam etmesi (12-3) koşullarında özgül enerji dağılımı üç boyutlu olarak verilmiştir.



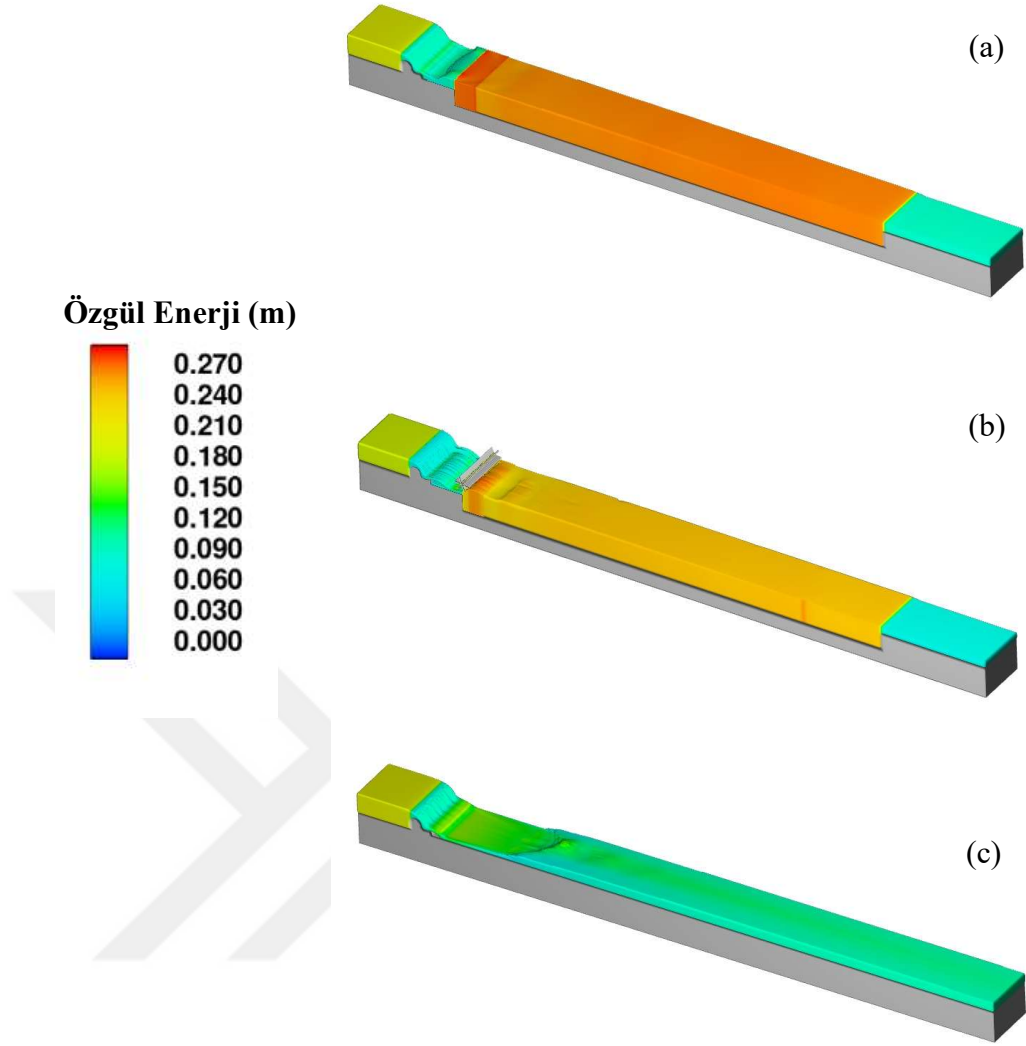
Şekil 0.26. $Q=12$ L/s için kanal boyunca 3D özgül enerji dağılımı (a) 12-1 (b) 12-2 (c) 12-3

Debinin 12 L/s olduğu durumda renk skalasına göre savak öncesi özgül enerjiler birbirine yakınken, hidrolik sıçrama ile enerjinin bir bölümü kaybolmasına rağmen kanalın son bölümünde 12-3 koşullarında özgül enerjinin diğer durumlara göre daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 0.27. $Q=17$ L/s için kanal boyunca 3D özgül enerji dağılımı (a) 17-1 (b) 17-2 (c) 17-3

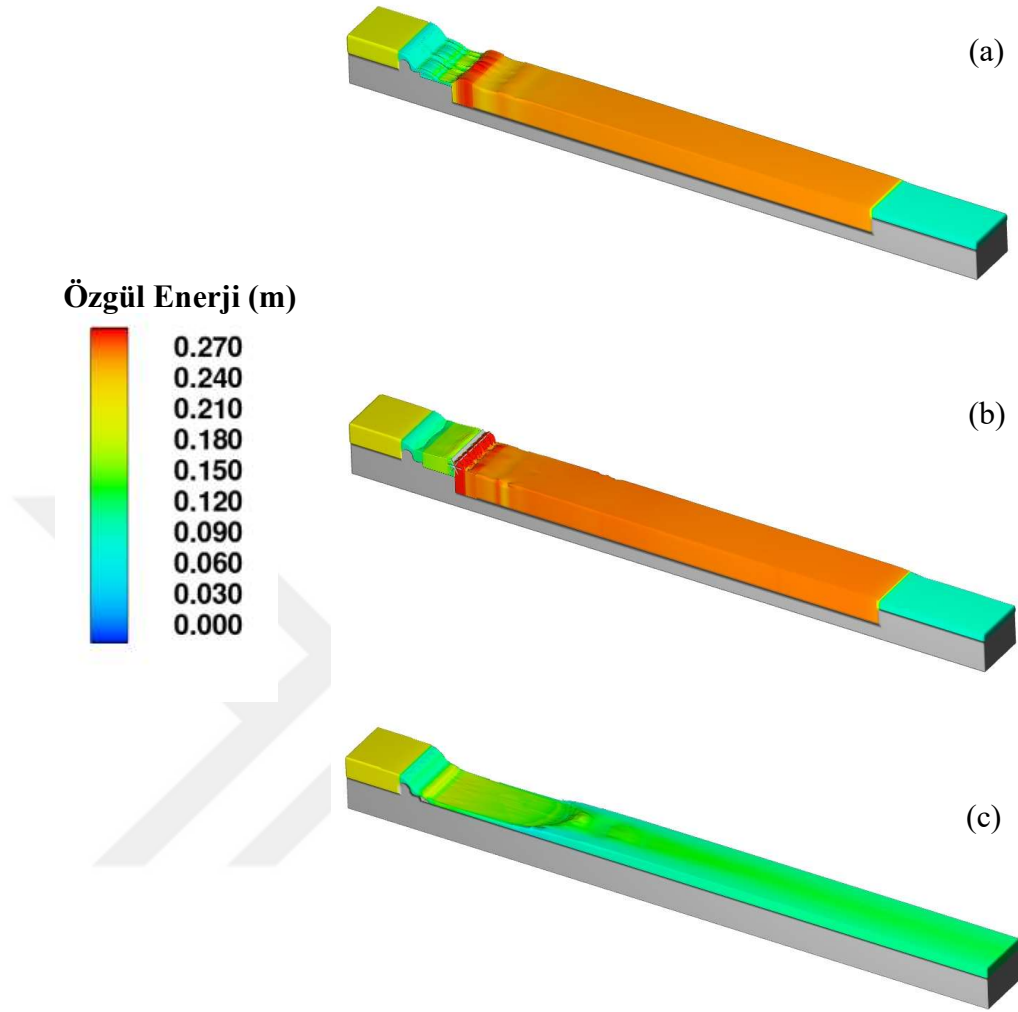
17 L/s debi altında Şekil 4.27 (c) ile verilen 17-3 koşullarında kanalın son bölümünde özgül enerjinin diğer koşullara göre nispeten daha fazla olduğu görülmektedir. 17-3 durumunda savak sonrası hidrolik sıçrama öncesinde akışın hızlı olması nedeniyle özgül enerjinin 0.12m düzeyinde olduğu okunmaktadır. 17-1 ile 17-2 şartlarında düşü içerisinde su seviyesinin yüksek olması dolayısıyla özgül enerji 0.20-0.22m düzeyine ulaşmaktadır.



Şekil 0.28. $Q=22$ L/s için kanal boyunca 3D özgül enerji dağılımı (a) 22-1 (b) 22-2 (c) 22-3

22 L/s debi koşullarında hem düşü hem de çark olan 22-2 durumunda, kanalın son bölümündeki özgül enerjinin diğer iki duruma göre daha düşük olduğu renk skalasından görülmektedir. Sadece düşünün olduğu 22-1 durumundaki özgül enerjinin de kanal en kesitinin sabit olarak devam ettiği 22-3 durumuna göre daha düşük değere sahip olduğu Şekil 4.28'den izlenmektedir.

Debinin 27 L/s olduğu şartlarda ise düşünün yapılmadığı 27-3 durumunda özgül enerjinin diğer iki duruma göre daha yüksek değerlerde olduğu Şekil 4.29'dan görülebilmektedir



Şekil 0.29. $Q=27$ L/s için kanal boyunca 3D özgül enerji dağılımı (a) 27-1 (b) 27-2 (c) 27-3

Tablo 0.13: Savak öncesi ile kanal sonu arasında özgül enerji farkı

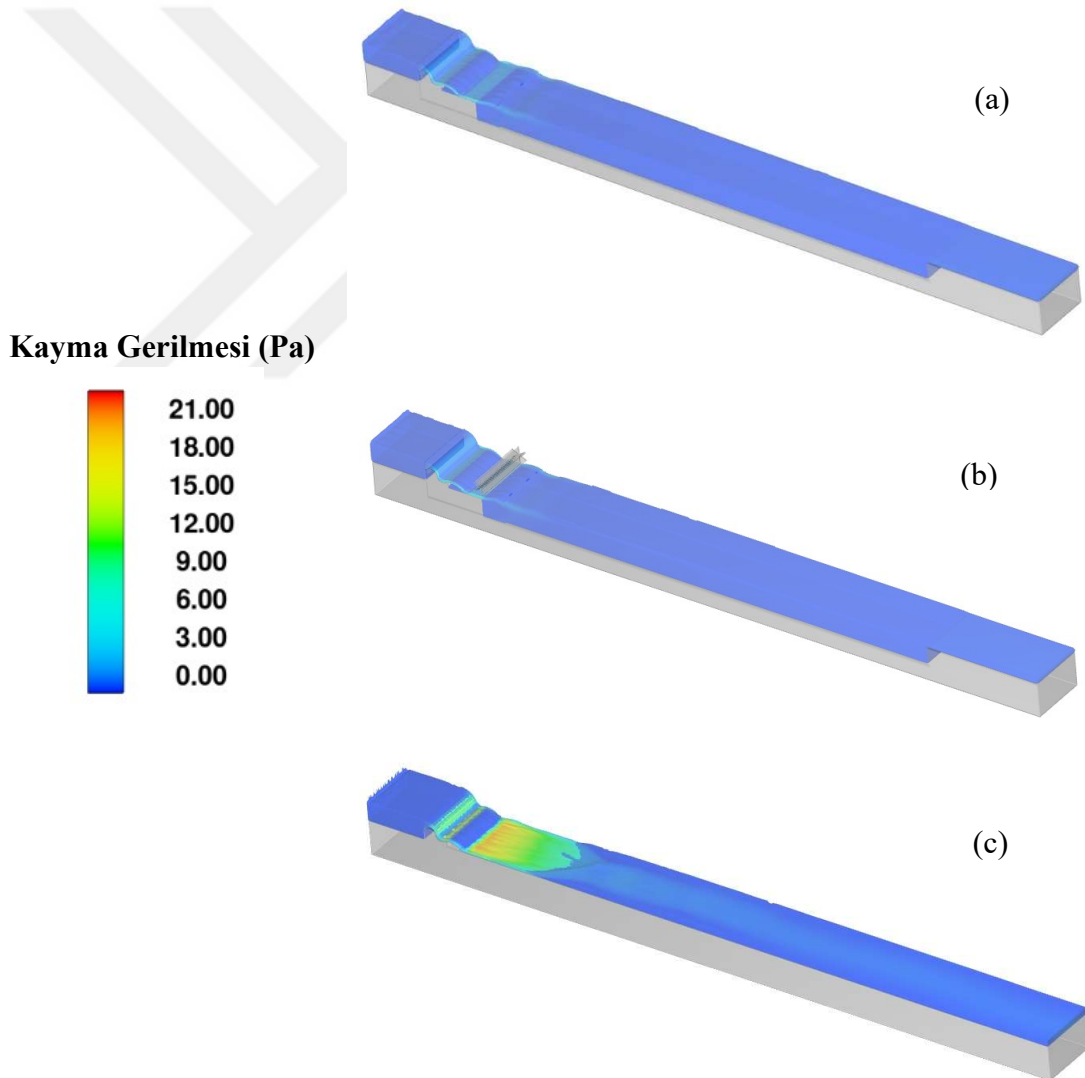
Model	Özgül Enerji (m)		$\epsilon(\%)$
	x=-0.5m	x=4.5m	
12-1	0.1685	0.0483	71.35
12-2	0.1686	0.0448	73.43
12-3	0.1665	0.0704	57.71
17-1	0.1672	0.0695	58.46
17-2	0.1844	0.0757	58.98
17-3	0.1769	0.0935	47.13
22-1	0.1820	0.0955	47.49
22-2	0.1780	0.0784	55.97
22-3	0.1820	0.1101	39.52
27-1	0.1871	0.0939	49.81
27-2	0.1968	0.0956	51.42
27-3	0.1920	0.1249	34.99

Tablo 4.13'den bütün durumlarda hem düşü hem de çarkın olduğu koşullarda özgül enerji

azaltımı en yüksektir. Sadece düşünün olduğu şartlarda da enerji azaltımının kanal en kesitinin sabit olarak devam ettiği koşullara göre oldukça fazla olduğu Tablo 4.13'den okunmaktadır.

4.6. Kayma Gerilmesi Dağılımları

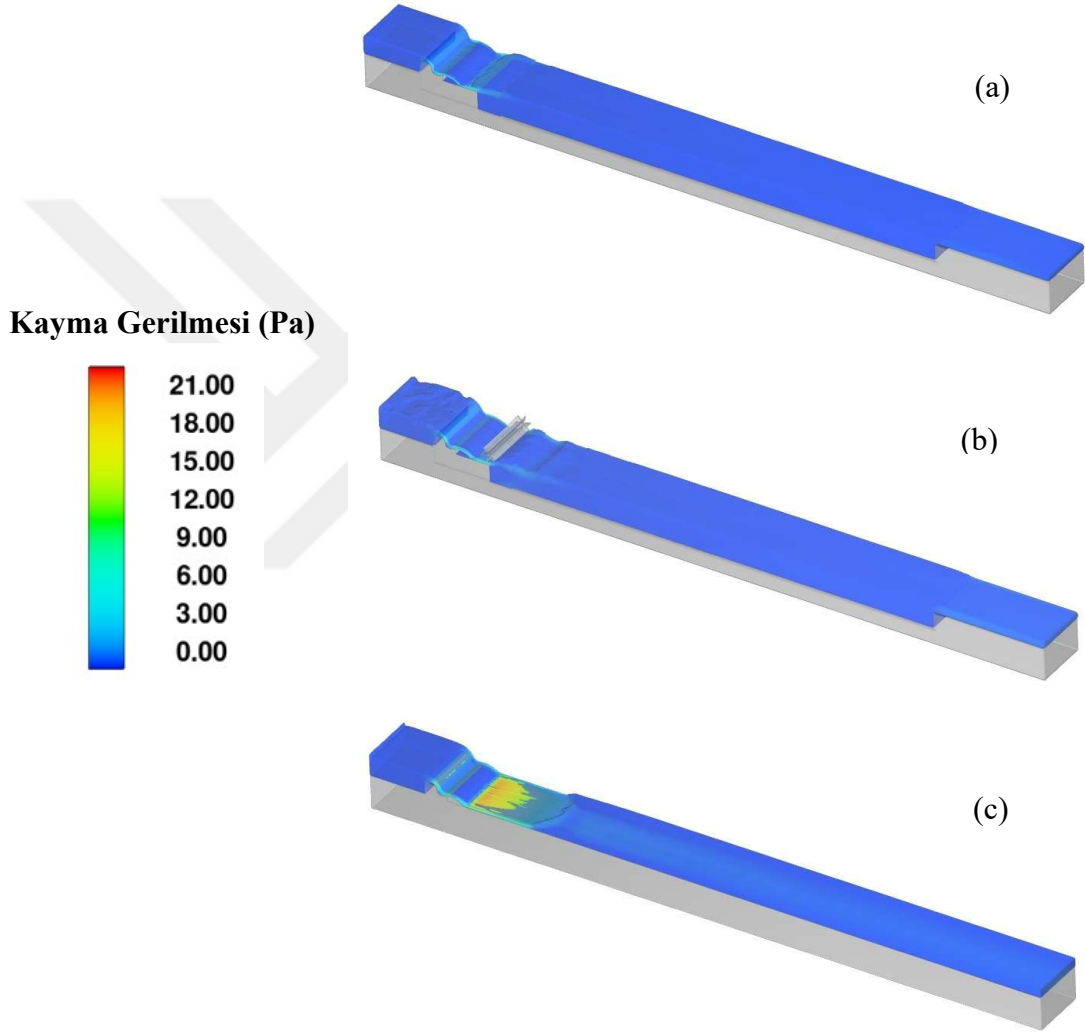
Akışkan akımında cidardaki sürtünme ve taban hareketli ise katı madde şeklinden dolayı kayma gerilmeleri oluşmaktadır. Hareketsiz tabanlı olarak yapılan bu deneylerde duvar pürüzlülüğü önemli etkindir. Akımı hızının yüksek olduğu yerlerde özellikle tabanda kayma gerilmesi değerlerinin yüksek olduğu Şekil 4.30 – Şekil 4.33'den görülmektedir.



Şekil 0.30. $Q=12$ L/s için 3D kayma gerilmesi dağılımı (a) 12-1 (b) 12-2 (c) 12-3

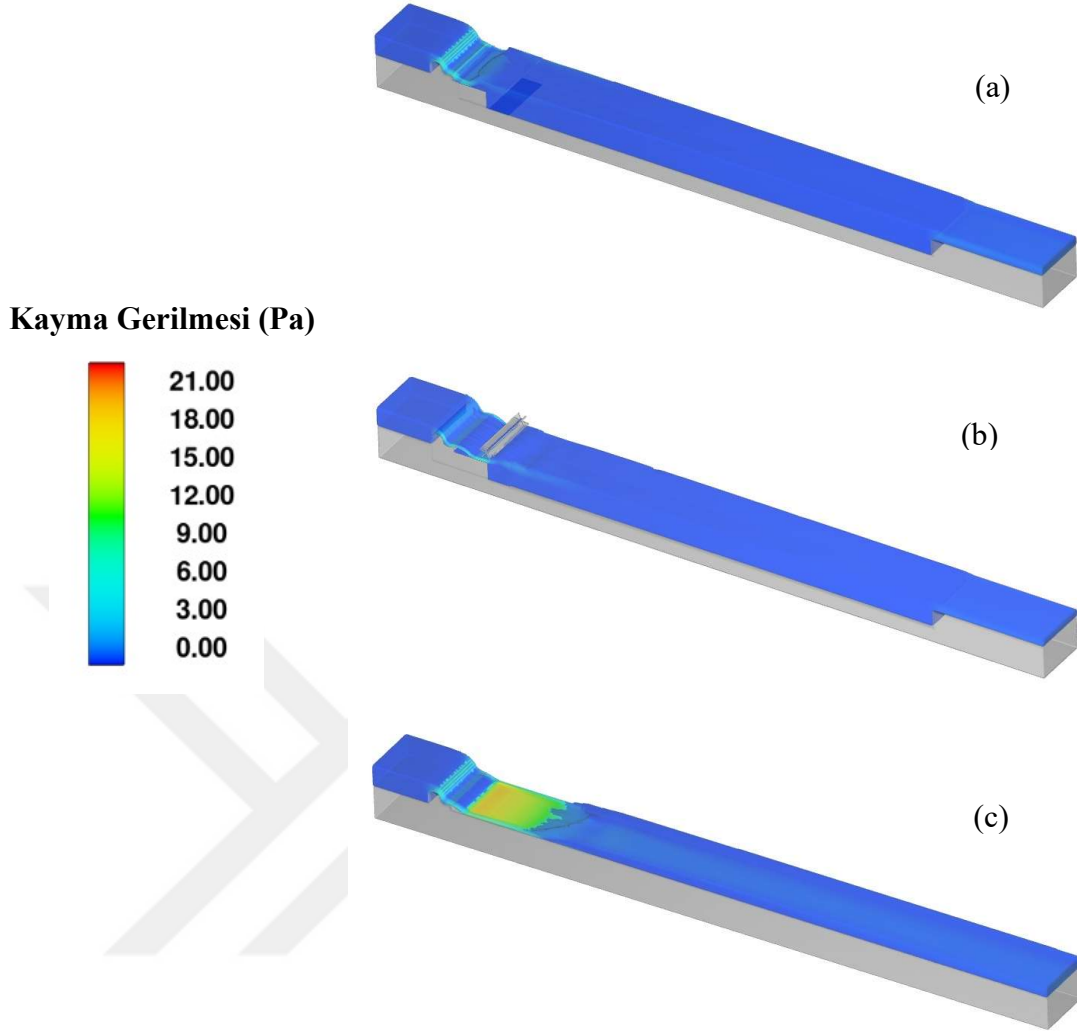
Kanalda debinin 12 L/s olduğu şartlarda en yüksek kayma gerilmelerinin kanal boy kesitinde

herhangi bir değişikliğin yapılmadığı 12-3 durumunda gözlenmektedir. Savak sonrası sel rejiminde akan suyun hızı dolayısıyla savak napı sonrası kayma gerilmesinin 18Pa değerlerine ulaştığı şekil 4.30(c)'den görölmektedir. Kanal düşüşü ve kanal düşüşüne ilave olarak çark eklenen diğer iki durumda ise en yüksek kayma gerilmelerinin savak üzerinde ve savak napının sonlandığı bölgede olduğu ve düşük değerlerde kaldığı şekil 4.30(a) ve şekil 4.30(b)'den izlenmektedir.



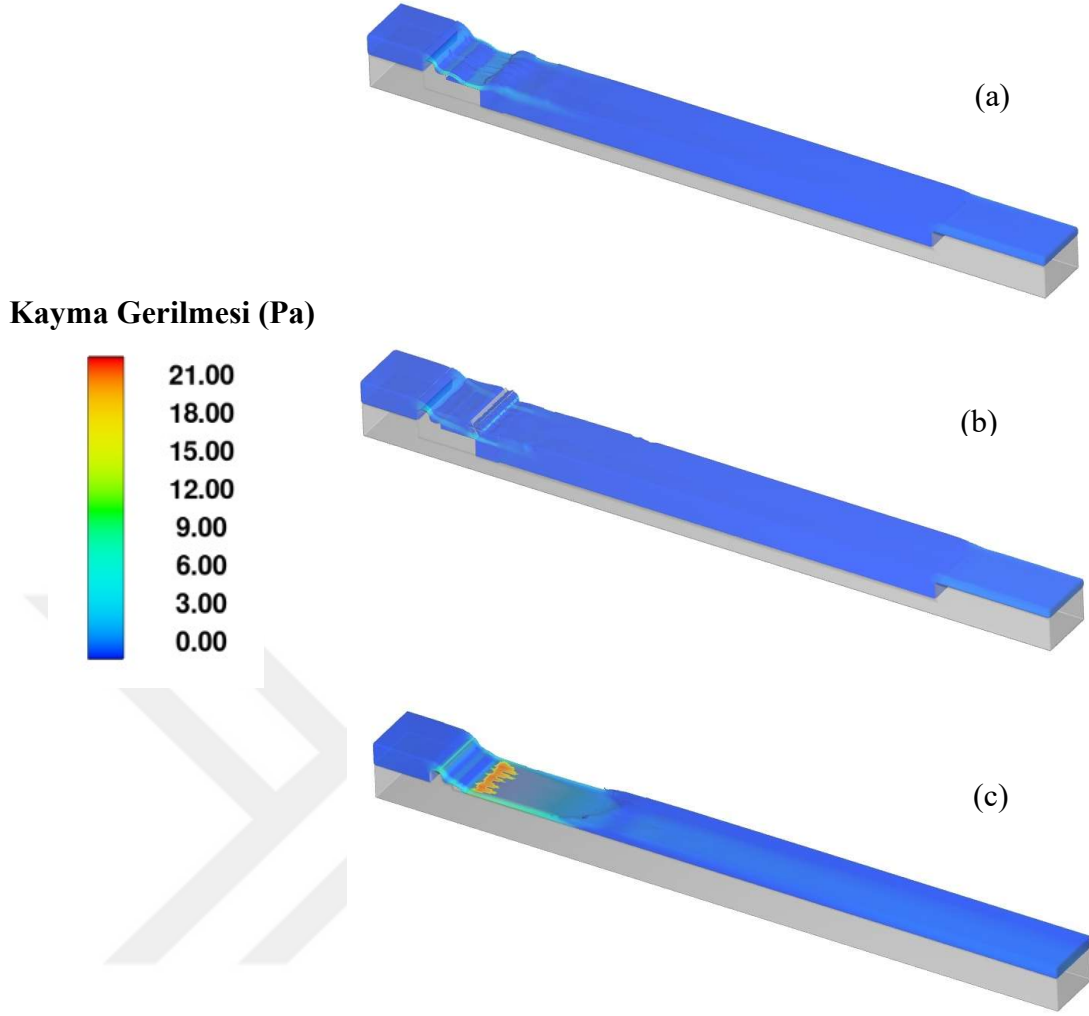
şekil 0.31. $Q=17$ L/s için 3D kayma gerilmesi dağılımı (a) 17-1 (b) 17-2 (c) 17-3

17 L/s debi koşullarında en yüksek kayma gerilmeleri yine boy kesitin değişikliğe uğramadığı 17-3 durumunda savak sonrası kritik üstü rejimin göröldüğü bölgenin ilk yarısında gözlenmektedir. Her üç modelde de kanalın son bölümünde kayma gerilmelerinin sıfıra yakın olduğu görölmektedir.



Şekil 0.32. $Q=22$ L/s için 3D kayma gerilmesi dağılımı (a) 22-1 (b) 22-2 (c) 22-3

Debi 22 L/s iken en yüksek kayma gerilmeleri yine boy kesitte değişiklik olmayan 22-3 modelinde sel rejiminde akan bölgede hidrolik sıçramaya kadar görülmektedir. Sadece düşü olan kanalda ise çark olan duruma göre savak üzeri akış esnasında savak tabanındaki açık mavi renk yoğunluğunun arttığı yani burada kayma gerilmesinin çark olan duruma göre daha fazla olduğu söylenebilir.



Şekil 0.33. $Q=27$ L/s için 3D kayma gerilmesi dağılımı (a) 27-1 (b) 27-2 (c) 27-3

27 L/s debi koşullarında da boy kesit boyunca düz devam eden 27-3 kanalında savak sonrası kayma gerilmesinin yüksek olduğu görülmektedir. Sadece eşik bulunan kanal durumunda da savak sonrası kısa bir mesafede akımın sıçradığı ve bu sıçrama öncesinde kayma gerilmesinin bir miktar arttığı izlenmektedir

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Akarsu içerisine yerleştirilen su çarklarının suyun kanatlara çarpması sayesinde enerjiyi önemli ölçüde azalttığı görülmektedir. Akarsu içerisine yerleştirilen su çarkları ile akarsu debisinin arttığı dönemlerde yüksek enerji nedeniyle nehir yatağının ve nehir içerisinde bulunan köprüler, boru hatları, su alma yapıları, akış kontrol yapıları gibi su yapılarının emniyetleri artabilecektir. Ayrıca sisteme çark ilave edilmesi ile elektrik enerjisi elde edilebileceği gibi üretilen enerji akarsu yakınında bulunan yapıların elektrik ihtiyacını karşılamakta da değerlendirilebilecektir.

Deneylerden ölçülen ve modellerden hesaplanan su derinlikleri ve akış hızları kıyaslandığında bütün koşullarda kabul edilebilir farklar elde edilmiştir. Kanal boyunca ortalama hız ve seviye değerlerinin %10'un altında kaldığı görülmektedir. Sadece düşüye ilk giriş esnasında oluşan ikincil akımlar, çarkın bıçaklarından ayrılan akımlar, y ve z doğrultusunda hızların etkisinin fazla olması, sel rejiminde akımın yüksek hızlara ulaşması ve çalkantılar dolayısıyla akımın karmaşıklaşması dolayısıyla modelden elde edilen değerlerle ölçülen değerler arasında farkın biraz yüksek olduğu görülmüşse de bu noktada da bağıl farkın %15'in altında kaldığı ifade edilebilir. Sonuç olarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımları ile benzer akış problemlerinin simule edilerek hem zaman hem de ekonomik kazanç elde edilebileceği söylenebilir. Böylelikle farklı savak türleri, çark çeşitleri, düşü yüksekliği, debiler, kanal kesit özellikleri gibi parametrelerin sayısı artırılarak çok sayıda veriye ulaşılabilecek, problemler optimize edilebilecektir.

Kayma gerilmelerinin özellikle kanalda düşü ve çarkın bulunmadığı durumda savak sonrası oluşan yüksek hız ve düşük su yüksekliği nedeniyle oldukça yükseldiği görülmektedir. Bu durum bu bölgede kanal tabanının oyulmasına neden olacağı için savak sonrasında bulunan düşü ve su çarkı kayma gerilmelerinin azalmasına da sebep olacağını göstermektedir. Özellikle aşınma özelliği yüksek yataklarda ve hareketli taban malzemesine sahip kanallarda kayma gerilmesi önem arz edecektir. Savak sonrası bölge ve düşü olan durumlarda düşü başlangıcından itibaren oyulmaya karşı güçlendirilmiş yatak malzemesi kullanılması kayma kuvvetleriyle yatağın oyulmasına engel olabilecektir.

Akım doğrultusundaki hız bileşeni sonuçlarına göre düşü olmayan kanal kesitinde savak sonrası hidrolik sıçrama olduğu gözlemlenmiştir. Düşünün mansabına düşen bölgede

($x > 4m$) basınç değerleri 1. (sadece düşü) ve 2. (düşü ve çark birlikte) durumda düz kanal olması durumuna göre daha düşük olmaktadır. Bütün durumlarda sistemde düşü ve çarkın beraber kullanılması durumunda savak öncesi ile kanal sonu arasında basınç farkı en yüksek olmaktadır.

Bütün debi durumlarında savak öncesi ile kanalın son bölümü arasında özgül enerjiler arasında fark karşılaştırıldığında enerji azaltımı en fazladan en aza doğru sırayla çark ve düşünün beraber kullanıldığı (2. Durumlar), sadece düşünün kullanıldığı (1. Durumlar) ve kanal boyunca kesitin sabit olduğu (3. Durumlar) şartlarda olmaktadır. Debinin küçük olduğu durumlarda su çark bıçağının sadece alt bölgesine temas ederek geçmektedir. Bu durumda hem çarkın devir sayısının fazla olduğu (dolayısıyla daha fazla enerji üretilebileceği) hem de en fazla hidrolik enerji azaltımının bu durumlarda olduğu görülmektedir. Debi değeri yükseldikçe çarkın mansap tarafında su basıncı olduğu için çarkın dönüşü kısıtlanmaktadır. İleride yapılacak çalışmalarda çarkın merkezinin su seviyesine göre düşeyde (z doğrultusunda) yükselip alçalmasıyla verimliliğin daha da artabileceği öngörülmektedir.

Kanal içerisinde çark öncesinde canlı geçişini engellemek amacıyla ızgara halinde engeller yapılması, balıkların yapılacak balık geçitlerine yönlendirilmesi, çarkın dönüşüne engel olabilecek malzemelerin uzaklaştırılabileceği yan savaklar ile tahliye edilmesi sistemin uygulanabilirliği ve sürdürülebilirliği açısından ayrıca değerlendirilmelidir.

Sonuç olarak gerekli önlemler alındıktan sonra savak sonrası düşü ile birlikte kullanılan yüksek kurulum maliyeti gerektirmeyen küçük boyutlu su çarkları, akarsuyun hidrolik enerjisini azaltmak amacıyla, basıncı düşürmek amacıyla ve enerji üretimi amacıyla faydalanılabilecek alternatif bir yöntem şeklinde kullanılabilir olarak değerlendirilmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Abay O., Yaşar M., Baykan N.O., 2011, Türkiye'nin Mikro Su Kuvveti Potansiyelinin Belirlenmesi, 2011, *II. Su Yapıları Sempozyumu* - 16-18 Eylül, Diyarbakır
- Acar, Ş., Bir, A., Kaçar, M., 2010. Datça'nın su ve yel değirmenleri, *Yapı Dergisi*, 341, 94-102
- Al-Dabbagh, (2018) M. A. Investigation the Performance of Stream Water Wheel Turbines using CFD Techniques. *The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics*, (2), 354-360.
- Bal, H., (2011). Geniş Başlıklı Savak İçeren Açık Kanal Akımının Sayısal Modellenmesi. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana
- Batten WM, Weichbrodt F, Müller GU, Hadler J, Semlow C, Hochbaum M, Dimke S, (2011, June). Design and stability of a floating free stream energy converter. In Proceedings of the 34th World Congress of the International Association for Hydro-Environment Research and Engineering: 33rd Hydrology and Water Symposium and 10th Conference on Hydraulics in Water Engineering (pp. 2372-2379).
- Batten, W. M. J., & Müller, G. U. (2012). HYLOW end of project publishable summary. Project report. HYLOW.
- Bektaşoğlu, M., (2013), *Anadolu Şehrinin Su Yapıları*, Aski Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara, s:149
- Bir, A. Kayral, M., 1998, Osmanlı döneminde Anadolu'da kullanıldığı bilinen alttan çevirmeli su değirmenleri ve su kaldırma düzenleri. <http://istanbul-universitesi.beta.dergipark.gov.tr/download/articlefile/13370>
- Bir, A., Acar, M.Ş., Kaçar, M., 2012. Anadolu'nun Değirmenleri, YEM Yayın, İstanbul.
- Birici, S., (2007). Klasik Türk Edebiyatında Asiyâ, *Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, Elazığ. C: 17, Sayı: 1, Sayfa: 99.
- Bresse, J. (1876), *Water Wheels or Hydraulic Motors*, reprint 2003, University Press of the Pacific.
- Capecchi D. Over and undershot waterwheels in the 18th century. *Sciencetechnology controversy. Adv Hist Stud* 2013;2(3):131-139.
- Chen, Q., (2008). Performance of Air-Air Ejectors with Multi-ring Entraining Diffusers. Doktora Tezi, Kanada: Queen's University.
- Cleynen, O., Engel, S., Hoerner, S., & Thévenin, D. (2021). Optimal design for the free-stream water wheel: A two-dimensional study. *Energy*, 214, 118880.

- Cleynen, O., Kerikous, E., Hoerner, S., & Thévenin, D. (2018). Characterization of the performance of a free-stream water wheel using computational fluid dynamics. *Energy*, 165, 1392-1400.
- Çorapçıoğlu, G.Ö., (2015). Doğu Karadeniz Örneğinde Su Değirmenlerinin Belgelenmesi ve Korunması Konusunda Bir Yöntem Araştırması, Doktora Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Danışman, G., (1997). A Survey of turbine-type water-mills in the Bolu Region of the Central Anatolian Plateau, *ODTÜ Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Ankara, 1/3, 17-37.
- Davidson, L., (2005) Numerical Method for Turbulent Flow, MTF071 Lecture Notes, Department of Thermo and Fluid Dynamics, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
- Demir, Necati, (2003) “Su Değirmenlerinin Müzelenmesi”, *Türkiye’de Halkbilimi Müzeciliği ve Sorunları Sempozyumu Bildirileri*, Ankara: Gazi Üniversitesi THBMER Yayını: 148-163.
- Denny, M. (2003). The efficiency of overshoot and undershot waterwheels. *European journal of physics*, 25(2), 193.
- Dündar, O., Polat, M., Özölçer, İ., Tanış, M., Adal Dündar, R. ve Sekmen, F. , 2017. Water Mills and Their Technical Specifications-Zonguldak Province. Uluslararası Katılımlı 6.Tarihi Yapıların Korunması ve Güçlendirilmesi Sempozyumu Bildiri Kitapçığı, Trabzon, 2-4 Kasım.
- Gemici, E., Kocaman N., Vural, T., Züngör, M., (2022) Experimental and Numerical Analysis of Energy Dissipation with Sluice Gate and Weirs in Trapezoidal Channel. *Osmaniye Korkut Ata University Journal of the Institute of Science and Technology*, 5:156-169.
- Erkek, C., Ağırlioğlu N., (2013) Su Kaynakları Mühendisliği. 7.baskı Yazın Basın Yayın Matbaacılık, İstanbul, 103 s.
- Erkek, C., Ağırlioğlu N., (2013) Su Kaynakları Mühendisliği. 7.baskı Yazın Basın Yayın Matbaacılık, İstanbul, 183-185 s.
- ESHA. (2014). Small and micro hydropower restoration handbook. Athens: National Technical University of Athens.
- Franco, W., Ferraresi, C., Revelli, R., 2019, Power Transmission and Mechanisms of an Old Water Mill, G. Carbone and A. Gasparetto (Eds.): *IFTOMM ITALY*, MMS 68, pp. 29–37.
- GIBSON, M.M. and Lounder, B.E., 1978 Ground Effects on Pressure Fluctuations in the atmospheric boundary layer. *J.Fluid. Mech.*, 86,491-511.
- Gül, E., (2015) Dolusavak ve Enerji Kırıcı Yapı Tip Seçiminin Uzman Sistemler İle

- Belirlenmesi. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ.
- Gürses, R. Taşkın, E. B., 2007, Anadolu’da Kaybolmakta Olan Bir Maddi Kültür Unsuru: Su Değirmenleri (Beypazarı Örneği). Uluslararası Asya ve Kuzey Afrika Çalışmaları Kongresi Bildirileri (38: 2007: Ankara) Atatürk Kültür, Dil ve Tarih Yüksek Kurumu Yayınları: 4/2) ISBN 978-975-16-2103- 0
- Hadler, J., & Broekel, K. (2011, November). Low Head Hydropower-Its Design and Economic Potential. In World Renewable Energy Congress-Sweden; 8-13 May; 2011; Linköping; Sweden (No. 057, pp. 1464-1471). Linköping University Electronic Press.
- Irimie,C. Bucur,C. Ruşdea,H., 1981. Istorie A Civilizatiei Populare Din Romania, *Consiliul Culturii Şi Educatiei Socialiste*, Sibiu
- İlkentapar, M.,(2015) Açık Kanallarda Geniş Başlıklı Savaklar Üzerindeki Akımın Deneysel ve Sayısal Modellenmesi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri.
- Jiménez, F.J., González, J.A., 2018, Watermills: The Origin of the Use of Renewable Hydraulic Energy in Spain, *Industrial Archaeology Review*, 2018 VOL. 40, NO. 1, 2–10.
- Kılıç, Z., (2020) Piyano Tuşu Yan Savakların Hidrolik Karakteristiklerinin Sayısal ve Deneysel Analizi. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Elazığ.
- Kıray, U., (2014) Gemilerde Baca Formunun Gaz Akışına Etkileri. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Kolekar N, Banerjee A. Performance characterization and placement of a marine hydrokinetic turbine in a tidal channel under boundary proximity and blockage effects. *Appl Energy* 2015;148:121-133.
- Kougias, I., Aggidis, G., Avellan, F., Deniz, S., Lundin, U., Moro, A., Theodossiou, N. (2019). Analysis of emerging technologies in the hydropower sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113, 109257.
- Landels, J.G., (1996). Eski Yunan ve Roma’da Mühendislik, Tübitak Yayınları.
- Launder, B.E. 1989 Second-Moment Closure Present and Future; *Int. J. Heat Fluid Flow*, 10(4), 282-300.
- Lazdane, L., (2011). The Historical Development of Watermills and small-scale Hydroelectric Power Plants Landscape in Latvia, in *Researchfor Rural Development 20II. Annual 17th International Scientific Conference Proceedings*. Vol. 2: 200-206. Latvia, Jelgava: Latvia Utiiversity of Agriculture.
- Lewis, M.J.T., (2000), Theoretical hydraulics, automata and water clocks' in Wikander (ed.), *Handbook of Ancient Water Technology (Technology and Change in History 2)*. Leiden, Boston, Koln: 343-70.

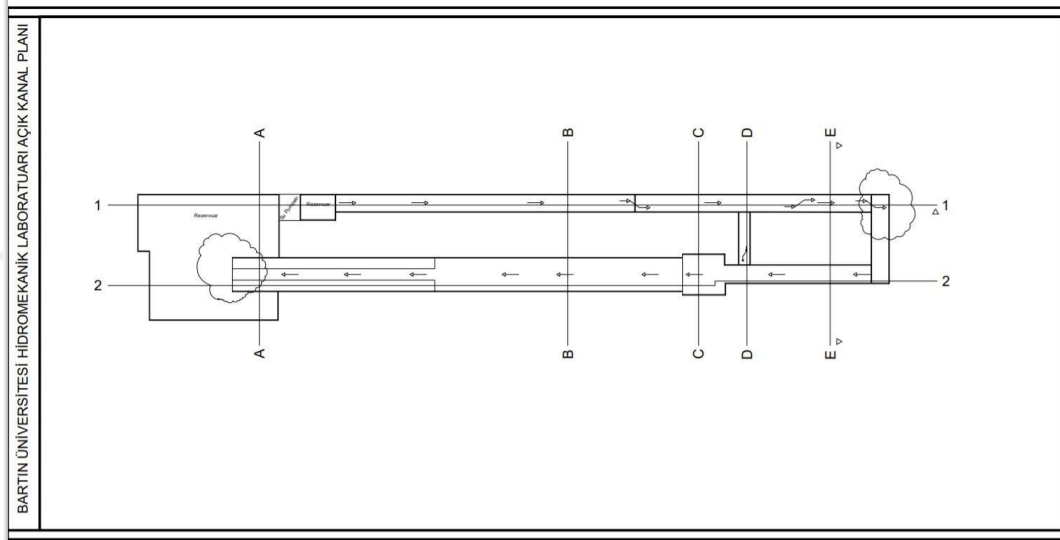
- Lien, F.S. ve Leschziner, M.A. 1994. Assesment of Turbulence-Transport Models Including non-linear RNG Eddy-Viscosity Formulation and Second Moment Closure for Flow Over a Backward-Facing Step, *Computers and Fluids*, 23(8), 983-1004.
- Liu, I. H., Riglin, J., Schleicher, W. C., & Oztekin, A. (2016). Flow past a plate in the vicinity of a free surface. *Ocean Engineering*, 111, 323-334.
- Maşalı, D., (2006). Boyabat'ın Geleneksel Mimarisinde Endüstri Yapıları: Değirmenler ve Şamlılar Çeltik Fabrikası . Yüksek Lisans Tezi, İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi
- Medioli, A., Özkan, S., Plunz, R., 1997. The grain cycle and a windmill at a village on the Aegean, *ODTÜ Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 1/3 ,39-62.
- Menter, F.R., 1992a Influence of Freestream Values on k-w Turbulence Model Predictions American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal: Technical Notes;30(6), 1657-1659
- Menter, F.R., 1992b Performance of Popular Turbulence Models For Attached and Separated Adverse Pressure Gradient Flows, *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, 30(8), 2066-2072
- Menter, F.R., 1993. Zonal Two-Equation k-w Turbulence Models for Aerodynamics Flows, American Institute of Aeronautics and Astronautics Report, AIAA-93-2906, Orlando, Florida, USA.
- Menter, F.R., 1994 Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models For Engineering Applications, *AIAA Journal*, 32(8), 1598-1605
- Moritz, L.A., (1958), *Grain-mills and Flour in Classical Antiquity*. Oxford.
- Müller G, Denchfield S, Marth R and Shelmerdine R. Stream wheels for applications in shallow and deep water. *Proceedings of 32nd IAHR Congress, Venice, Italy, Theme C2c, paper 291; 2007.*
- Müller, G., & Kauppert, K. (2004). Performance characteristics of water wheels. *Journal of Hydraulic Research*, 42, 451– 460.
- Ögel,, B. (1988), *İslâmiyet'ten Önce Türk Kültür Tarihi*. Ankara: Türk Tarih Kurumu Yayınları: 89.
- Paudel, S., & Saenger, N. (2015, July). Experimental and numerical study of Dethridge wheel. In *3rd International Symposium on Energy Challenges and Mechanics: Towards a Big Picture*.
- Paudel, S., Linton, N., Zanke, U. C., & Saenger, N. (2013). Experimental investigation on the effect of channel width on flexible rubber blade water wheel performance. *Renewable energy*, 52, 1-7.
- Paudel, S., Weber, M., Geyer, D., & Saenger, N. (2021, November). Experimental and

- numerical study of Zuppinger water wheel model. In Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management (pp. 1-11). Thomas Telford Ltd.
- Pujol, T., Vashisht, A. K., Ricart, J., Culubret, D., & Velayos, J. (2015). Hydraulic efficiency of horizontal waterwheels: Laboratory data and CFD study for upgrading a western Himalayan watermill. *Renewable energy*, 83, 576-586.
- Quaranta, E., & Müller, G. (2018). Sagebien and Zuppinger water wheels for very low head hydropower applications. *Journal of Hydraulic Research*, 56(4), 526–536.
- Quaranta, E., & Müller, G. (2020). Optimization of undershot water wheels in very low and variable flow rate applications. *Journal of Hydraulic Research*, 58(5), 845-849.
- Quaranta, E., & Revelli, R. (2015). Performance characteristics, power losses and mechanical power estimation for a breastshot water wheel. *Energy*, 87, 315-325.
- Quaranta, E., & Revelli, R. (2018). Gravity water wheels as a micro hydropower energy source: A review based on historic data, design methods, efficiencies and modern optimizations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 97, 414–427.
- Senior, James Alexander (2009) Hydrostatic Pressure Converters for the Exploitation of Very Low Head Hydropower Potential. University of Southampton, School of Civil Engineering and the Environment, Doctoral Thesis, 204 pp.
- Shih, T.-W., Liou, W.W., Shabbir, A., Yang Z., Zhu, J.(1995). ‘A new k- ϵ Eddy-Viscosity model for high Reynolds Number Turbulent Flows- Model Development and Validation’, *Computers and Fluids*, 24(3) 227-238.
- Singh, S.P., Goel, A.K., Vatsa, D. K., 2001, Evaluation of water mills as a source of renewable energy, *Energy sources*, 23: 235-243.
- Süme V., (2019), Derepaazarı Civarındaki Geleneksel Su Değirmenlerinin (GSD), Enerji Üretim Potansiyellerinin Belirlenmesi, *Türk Hidrolik Dergisi* Cilt 3, Sayı 1, Sayfa 31-36.
- Süme, V., (2014), Salarha Vadisi Civarındaki Geleneksel Su değirmenlerinin Enerji Üretim Potansiyellerinin Belirlenmesi, *Uluslararası Hakemli Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, Sayı 01, Cilt 0. www.hmfdergisi.com, İstanbul
- Süme, V., (2018), Micro Water Structures as A Renewable Energy Source: A Case Study in Maçka Trabzon in Turkey, *GÜFBED/GUSTIJ*, 8(2): 325-334. DOI: 10.177714.
- Süme, V., Koçyiğit, N., 2012. The Determination Of Energy Production Potential of Traditional Water Mills in The District of Kalkandere in Turkey, *Energy Education Science and Technology Part A: Energy science and Research*, Volume Special Issue: 661-666.
- TDK , (2005), Türkçe Sözlük, 484.

- Tian, W., VanZwieten, J. H., Pyakurel, P., & Li, Y. (2016). Influences of yaw angle and turbulence intensity on the performance of a 20 kW in-stream hydrokinetic turbine. *Energy*, 111, 104-116.
- Tosun Soyel, N., (2009). Kuzey Kıbrıs'taki Tarihi Su Değirmenleri ve Kırsal Peyzajın Parçası Olarak Korunmaları İçin Öneriler, Doktora tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Turnock S, Müller GU, Nicholls-Lee R, Denchfield S, Hindley S, Shelmerdine R, Stevens S. (2007). Development of a floating tidal energy system suitable for use in shallow water, *Proceedings of the 7th European Wave and Tidal Energy Conference*.
- URL-1
https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/99042/mod_resource/content/1/TSY_Blm5.pdf, (18.07.2022)
- Von Harten, M., Paudel, S., & Saenger, N. (2013). Nutzung kleiner fallhöhen: aus forschung und entwicklung [Utilisation of small head differences: Research and development]. *Proc., Tagung Kleinwasserkraft*.
- Wikander, Ö., (2000), "The water-mill" in Wikander (ed.), *Handbook of Ancient Water Technology (Technology and Change in History 2)*. Leiden, Boston, Köln: 371-400
- Wilcox, D.C., (1988) 'Reassessment Of the Scale-Determining Equation For Advanced Turbulence Models', *AIAA Journal*, 26(11), 1299-1310
- Wilcox, D.C., (1991) A Half Century Historical Review of the k-w Model, *American Institute of Aeronautics and Astronautics Paper*, AIAA-1991-615, Reno, Nevada, USA.
- Wilcox, D.C., (1998) 'Turbulence Modeling for CFD', *DCW Industries, Inc., California*

EKLER

EK 1: Su yüksekliklerine ait tablolar.



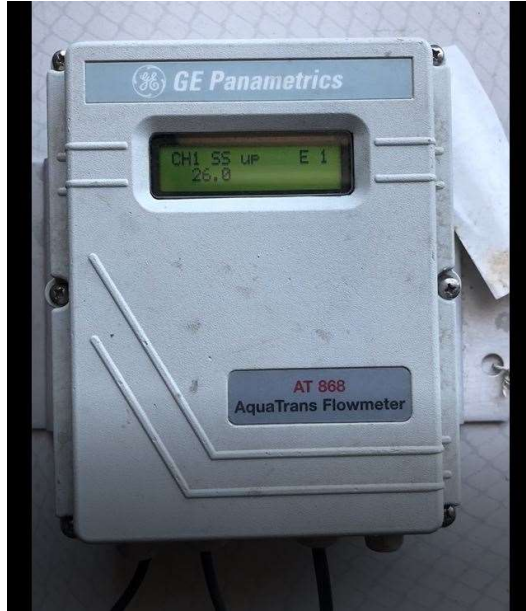
Ek 1. Bartın Üniversitesi Hidro-Mekanik Laboratuvarı Şematik Planı



Ek 2. Akustik Doppler Hızölçer Cihazı



Ek 3. Hidro-Mekanik Laboratuvarından bir görüntü



Ek 4. Ultrasonik Debi Ölçer Cihazı



Ek 5. Bartın Üniversitesi hidro-mekanik labaratuvarı Akustik dopler velocity yardımıyla ölçümlerin alınması

ÖZGEÇMİŞ

