

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**BASAMAKLI DOLUSAVAKLARIN HESAPLAMALI
AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD) YÖNTEMİ İLE
İNCELENMESİ**

Eyyüp Ensar YALÇIN

Yüksek Lisans Tezi

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Hidrolik Bilim Dalı

KASIM 2022

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

BASAMAKLI DOLUSAVAKLARIN HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD) YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Tez Yazarı

Eyyüp Ensar YALÇIN

Danışman

Doç. Dr. Nihat KAYA

İkinci Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Erdiñ İKİNCİOĞULLARI

KASIM 2022

ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Başlığı:	Basamaklı Dolusavakların Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) Yöntemi ile İncelenmesi
Yazarı:	Eyyüp Ensar YALÇIN
İlk Teslim Tarihi:	14.10.2022
Savunma Tarihi:	21.11.2022

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman:	Doç. Dr. Nihat KAYA Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	<i>İmza</i> Onayladım
Başkan:	Prof. Dr. Muhammet Emin EMİROĞLU Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Üye:	Doç. Dr. Ömerul Faruk DURSUN İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza

Prof. Dr. Burhan ERGEN
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Basamaklı Dolusavakların Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) Yöntemi ile İncelenmesi” Başlıklı Yüksek Lisans Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

21.11.2022

Eyyüp Ensar YALÇIN



ÖNSÖZ

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemi birçok bilim dalında olduğu gibi hidrolik mühendisliğinde de etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında HAD yöntemi yazılımlarından biri olan Flow-3D ile basamaklı dolusavaklarda oluşan akımın özellikleri sayısal olarak araştırılmış ve alternatif basamak tasarımları üzerinde çalışmalar yapılmıştır.

Tez çalışmasının oluşturulmasında yardım ve desteklerini esirgemeyen danışman hocalarım Doç. Dr. Nihat KAYA ve Dr. Öğr. Üyesi Erdiç İKİNCİÖĞÜLLARİ'na teşekkür ederim.

Tez çalışmasının oluşturulmasında kullanılan Antalya Gazipaşa Gökçeler Barajı basamaklı dolusavak model deney raporunun temini için gerekli kolaylığı sağlayan DSİ 13. Bölge Müdürlüğü'ne teşekkür ederim.

Tez çalışması süresince desteklerini esirgemeyen Doç.Dr. Beşir KOK, Arş. Gör. Veysi KARTAL ve İnşaat Yük. Müh. Cesur KAPLAN'a teşekkür ederim.

Yüksek lisans ders dönemim boyunca kendilerinden ders alma fırsatı bulduğum Prof. Dr. Muhammet Emin EMİROĞLU hocama teşekkür ederim.

Hayatımın her aşamasında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen kıymetli Anneme ve Babama teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim süresince, 2210-A protokol numaralı Genel Yurt İçi Yüksek Lisans Burs Programı ile beni destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) teşekkür ederim.

Eyyüp Ensar YALÇIN

ELAZIĞ, 2022

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ	1
2. BASAMAKLI DOLUSAVAKLAR.....	3
2.1. Basamaklı Dolusavakların Tarihçesi	3
2.2. Basamaklı Dolusavakların Kullanım Amaçları	5
2.3. Basamaklı Dolusavaklarda Akım Rejimleri	6
2.3.1. Nap Akımı Rejimi	6
2.3.2. Geçiş Akımı Rejimi.....	7
2.3.3. Sıçramalı Akım Rejimi.....	8
2.4. Enerji Sönümleme	10
2.5. Literatür Araştırması	11
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	23
3.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD)	23
3.2. Akışkan Akımının Temel Denklemleri	24
3.2.1. Süreklilik Denklemi	24
3.2.2. Navier Stokes Denklemi.....	24
3.3. Kullanılan HAD Yazılımı (Flow-3D).....	25
3.3.1. FAVOR (<i>Fractional area/volume obstacle represantion</i>) ve VOF (<i>Volume of Fluid</i>) Yöntemi	26
3.3.2. Türbülans Modelleri.....	27
3.4. Sayısal Modellerin Oluşturulmasında Kullanılan Fiziksel Modeller.....	33
3.4.1. Gökçeler Barajı ve Basamaklı Dolusavak Modeli [12].....	33
3.4.2. Klasik Basamaklı Dolusavak Modeli (Mero ve Mitchell [13])	38
3.5. Sayısal Modeller	39
3.5.1. Gökçeler Barajı Basamaklı Dolusavak Sayısal Modeli.....	39
3.5.2. Klasik Basamaklı [13] ve Üçgen Basamaklı Dolusavak Modelleri	43
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	49
4.1. Gökçeler Barajı Basamaklı Dolusavağı.....	49
4.1.1. Debi-Rezervuar Su Seviyelerinin Karşılaştırılması.....	49
4.1.2. Basınç Ölçümleri.....	51
4.1.3. Su yüzü profilinin incelenmesi.....	56
4.1.4. Hız Ölçümleri.....	60
4.1.5. Hava Konsantrasyonu	65
4.1.6. Enerji Sönümleme Oranları.....	67
4.2. Klasik Basamaklı [13] ve Üçgen Basamaklı Dolusavak Modelleri.....	70
4.2.1. Sayısal Çalışmanın Doğrulanması.....	70

4.2.2. Hız Dağılımları.....	71
4.2.3. Basınç Dağılımları.....	75
4.2.4. Enerji Sönümleme Oranları.....	76
5. SONUÇLAR.....	80
KAYNAKLAR.....	82
ÖZGEÇMİŞ	



ÖZET

Basamaklı Dolusavakların Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) Yöntemi ile İncelenmesi

Eyyüp Ensar YALÇIN

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Kasım 2022, Sayfa: xiv + 87

Basamaklı dolusavaklar, boşaltım kanalı boyunca yerleştirilen basamaklar sayesinde akım enerjisinin büyük kısmını sönmüleyebilmektedir. Basamakların enerji sönmülemeedeki etkisi sebebiyle yüzyıllardır kullanılan bu dolusavaklar, birçok akademik çalışmaya da konu olmuştur. Araştırmacılar, enerji sönmüleme oranında daha iyi neticeler elde edebilmek için farklı basamak geometrileri önermeye devam etmektedir.

Bu tez çalışmasında, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi yazılımlarından olan Flow-3D kullanılarak basamaklı dolusavaklardaki akım, sayısal olarak incelenmiştir. Çalışma, temel olarak iki kısımdan oluşmaktadır. İlk kısımda, DSİ TAKK (Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol) Dairesi Başkanlığı tarafından 1/40 ölçekli olarak modellenen Antalya Gökçeler Barajı basamaklı dolusavağının deney sonuçları, dört farklı türbülans modeli ($k-\varepsilon$, $k-\omega$, LES, RNG) kullanılarak sayısal olarak incelenmiş ve deneysel sonuçlarla en uyumlu türbülans modelleri tespit edilmiştir. Çalışmanın ikinci kısmında ise literatürdeki klasik basamaklı bir dolusavak modelinin deney sonuçları kullanılarak sayısal doğrulama yapılmış ve üçgen basamaklı dolusavak geometrileri önerilmiştir.

Çalışmanın ilk kısmında yürütülen analizlerin deney sonuçları ile kıyaslanması neticesinde, debi-seviye eğrilerinde en uyumlu türbülans modelinin $k-\omega$; dolusavak basınç ölçümleri, sönmülenen enerji oranları ve yaklaşım kanalı hızlarında en uyumlu türbülans modelinin $k-\varepsilon$; dolusavak su yüzü profillerinde ise en uyumlu türbülans modelinin LES (Large Eddy Simulation) olduğu görülmüştür. Çalışmanın ikinci kısmında yürütülen analizler neticesinde ise tüm modellerde debi arttıkça enerji sönmüleme oranının azaldığı, çalışmada kullanılan tüm debilerde üçgen basamaklı dolusavakların klasik basamaklı dolusavağa kıyasla daha yüksek oranda enerji sönmüleyebildiği, üçgen basamaklı modellerde basamak derinliğinin (h_t) artışıyla birlikte enerji sönmüleme oranının arttığı, üçgen basamaklı dolusavakların klasik basamaklı dolusavağa göre yaklaşık %78'e kadar daha fazla enerji sönmüleyebildiği sonuçlarına varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Basamaklı dolusavak, Flow3D, Enerji sönmüleme, Üçgen basamaklı dolusavak

ABSTRACT

Investigation of stepped spillways by computational fluid dynamics (CFD) method

Eyyüp Ensar YALÇIN

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

November 2022, Pages: xiv + 87

Stepped spillways can dissipate most of the flow energy thanks to the steps placed along the discharge channel. These spillways, which have been used for centuries due to the effect of steps on energy dissipation, have also been the subject of many academic studies. Researchers continue to propose different step geometries in order to achieve better results in the energy dissipation ratio.

In this thesis, the flow in stepped spillways was numerically investigated by using Flow-3D, which is one of the Computational Fluid Dynamics (CFD) method software. The study basically consists of two parts. In the first part, the experimental results of Antalya Gökçeler Dam stepped spillway, modeled on 1/40 scale by DSI TAKK Department, were analyzed numerically using four different turbulence models ($k-\varepsilon$, $k-\omega$, LES, RNG) and the most compatible turbulence models with the experimental results were determined. In the second part of the study, numerical verification was made using the experimental results of a classical stepped spillway model in the literature and triangular stepped spillway geometries were proposed.

As a result of the comparison of the analyses carried out in the first part of the study with the experimental results, it was observed that $k-\omega$ was the most compatible turbulence model for flow rate-levels curves; $k-\varepsilon$ was the most compatible turbulence model for spillway pressure measurements, dissipated energy ratios and approach channel velocities; and LES (Large Eddy Simulation) was the most compatible turbulence model for spillway water surface profiles. As a result of the analyses carried out in the second part of the study, it was concluded that the energy dissipation rate decreases as the flow rate increases in all models, triangular stepped spillways can dissipate more energy than conventional stepped spillways at all flow rates used in the study, the energy dissipation rate increases with the increase in step depth (h_t) in triangular stepped models, and triangular stepped spillways can dissipate up to 78% more energy than conventional stepped spillways.

Keywords: Stepped spillway, Flow3D, Energy dissipation, Triangular stepped spillway

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1.	Basamaklı dolusavaklarda akım rejimleri: a) nap akım rejimi; b) geçiş akım rejimi; c) sıçramalı akım rejimi	2
Şekil 2.1.	Aydın Adnan Menderes Barajı [20].....	4
Şekil 2.2.	Tam gelişmiş hidrolik sıçramalı nap akımı [17]	6
Şekil 2.3.	Kısmi gelişmiş hidrolik sıçramalı nap akımı [17].....	7
Şekil 2.4.	Hidrolik sıçramasız nap akımı [17].....	7
Şekil 2.5.	Geçiş akımı rejimi [28].....	8
Şekil 2.6.	Sıçramalı akım rejimi [28].....	8
Şekil 2.7.	Sıçramalı akım rejiminde akım bölgeleri [29]	9
Şekil 2.8.	Basamaklı dolusavak boykesiti.....	10
Şekil 2.9.	Zare ve Doering [35] çalışmalarında kullandıkları modeller	12
Şekil 2.10.	Felder vd. [36] çalışmalarında kullandıkları modeller	13
Şekil 2.11.	Felder vd. [37] çalışmalarında kullandıkları modeller	14
Şekil 2.12.	Mero ve Mitchell [13] çalışmalarında kullandıkları modeller	16
Şekil 2.13.	Irzooki vd.[44] çalışmalarında kullandıkları sayısal modele ait sınır şartları	17
Şekil 2.14.	Bai vd. [45] çalışmalarında kullandıkları modeller.....	17
Şekil 2.15.	Ali ve Yousif [53] çalışmalarında kullandıkları modeller	19
Şekil 2.16.	Wu vd. [56] çalışmalarında kullandıkları modeller	20
Şekil 2.17.	Zhou vd. [57] çalışmalarında kullandıkları model.....	21
Şekil 3.1.	Bir çözüm hücresine etkiyen değişkenler [66].....	26
Şekil 3.2.	Gökçeler Barajı [80]	34
Şekil 3.3.	Gökçeler Barajı basamaklı dolusavak boykesiti [12].....	34
Şekil 3.4.	Gökçeler barajı dolusavak boşaltım kanalı giriş kısmı [12].....	35
Şekil 3.5.	Gökçeler barajı basamaklı dolusavağı düşüm havuzu [12].....	35
Şekil 3.6.	Gökçeler Barajı basamaklı dolusavağı fiziksel modeli: a)Boşaltım kanalı yapısı, b)Yaklaşım kanalı yapısı [12]	36
Şekil 3.7.	Mero ve Mitchell [13] çalışmalarında kullandığı klasik basamaklı model: a) 3 boyutlu görünüm, b) 2 boyutlu görünüm	38
Şekil 3.8.	Gökçeler barajı basamaklı dolusavak sayısal modeli plan görünümü	39
Şekil 3.9.	Gökçeler barajı basamaklı dolusavak sayısal modeli 3 boyutlu görünümü	40
Şekil 3.10.	Çözüm ağı (Mesh) yapısı: a)3 boyutlu ve yakınlaştırılmış görünüm, b) 2 boyutlu görünüm ..	41
Şekil 3.11.	Enerji yüksekliğinin hücre sayısına bağlı değişimi (33.basamak)	42

Şekil 3.12.	Sınır şartları	42
Şekil 3.13.	Enerji yüksekliğinin zamana bağlı değişimi (33. Basamak)	43
Şekil 3.14.	Sayısal analizlerde kullanılan modeller (2 boyutlu görünüm)	44
Şekil 3.15.	Sayısal analizlerde kullanılan modeller (3 boyutlu görünüm)	44
Şekil 3.16.	Çözüm ağı (Mesh) yapısı: a) Perspektif ve yakınlştırılmış görünüm, b) 2 boyutlu görünüm .	46
Şekil 3.17.	Hücre sayısının savak mansabındaki enerjiye etkisi (Model 4, $Q=0.01210 \text{ m}^3/\text{s}$)	46
Şekil 3.18.	Sınır şartları	47
Şekil 3.19.	Savak mansabındaki enerjinin zamana bağlı değişimi (Model 1, $Q=0.01210 \text{ m}^3/\text{s}$)	47
Şekil 3.20.	Savak mansabındaki enerjinin zamana bağlı değişimi (Model 4, $Q=0.01210 \text{ m}^3/\text{s}$)	48
Şekil 4.1.	Gökçeler Barajı Debi-Rezervuar su seviyesi eğrileri	51
Şekil 4.2.	Dolusavak basınç ölçüm uçları: a) Fiziksel model [12], b-c) Sayısal model, d) Basamaklar üzerine yerleştirilen basınç ölçüm uçlarının konumu	52
Şekil 4.3.	Sağ eksen boyunca oluşan basınç çizgileri	54
Şekil 4.4.	Orta eksen boyunca oluşan basınç çizgileri	55
Şekil 4.5.	Sol eksen boyunca oluşan basınç çizgileri	55
Şekil 4.6.	Sol eksen su yüzü profili	59
Şekil 4.7.	Orta eksen su yüzü profili	59
Şekil 4.8.	Sağ eksen su yüzü profili	60
Şekil 4.9.	Yaklaşım kanalında akım hızı ölçüm noktalarının plan görünümeleri	60
Şekil 4.10.	Yaklaşım kanalı hız ölçümleri: a) 1.nokta, b) 2.nokta, c) 3.nokta; d) 4.nokta, e) 5.nokta	62
Şekil 4.11.	Farklı türbülans modelleri için dolusavak boyunca meydana gelen hız dağılımları: a) Perspektif görünümü, b) Plan görünümü, c) Sol eksen, d) Orta eksen, e) Sağ eksen	65
Şekil 4.12.	Farklı türbülans modelleri için dolusavak boyunca meydana gelen hava konsantrasyonu dağılımları: a) Perspektif görünümü, b) Plan görünümü, c) Sol eksen, d) Orta eksen, e) Sağ eksen	67
Şekil 4.13.	Farklı türbülans modelleri için dolusavak boyunca meydana gelen enerji dağılımları: a) Perspektif görünümü, b) Plan görünümü, c) Sol eksen, d) Orta eksen, e) Sağ eksen	70
Şekil 4.14.	Sayısal çalışmanın doğrulanması	71
Şekil 4.15.	$Q=0.0121 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik debi değerinde tüm modellerde hız dağılımları: a) Perspektif görünümü, b) Kanal ekseni	72
Şekil 4.16.	$Q=0.0083 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik debi değerinde tüm modellerde hız dağılımları: a) Perspektif görünümü, b) Kanal ekseni	73
Şekil 4.17.	$Q=0.00684 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik debi değerinde tüm modellerde hız dağılımları: a) Perspektif görünümü, b) Kanal ekseni	73
Şekil 4.18.	$Q=0.0121 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik debi değerinde tüm modellerde hız vektörü dağılımları	74
Şekil 4.19.	$Q=0.0083 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik debi değerinde tüm modellerde hız vektörü dağılımları	74

Şekil 4.20.	$Q=0.00684 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik debi değerinde tüm modellerde hız vektörü dağılımları	75
Şekil 4.21.	$Q=0.0121 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik debi değerinde tüm modellerde basınç dağılımları.....	75
Şekil 4.22.	$Q=0.0083 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik debi değerinde tüm modellerde basınç dağılımları.....	76
Şekil 4.23.	$Q=0.00684 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik debi değerinde tüm modellerde basınç dağılımları.....	76
Şekil 4.24.	Modellerdeki enerji sönümleme oranlarının kıyaslanması	77
Şekil 4.25.	$Q=0.0121 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik debi değerinde tüm modellerde enerji dağılımları.....	78
Şekil 4.26.	$Q=0.0083 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik debi değerinde tüm modellerde enerji dağılımları.....	78
Şekil 4.27.	$Q=0.00684 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik debi değerinde tüm modellerde enerji dağılımları.....	79



TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1. Gökçeler barajı karakteristikleri [12].....	33
Tablo 3.2. Prototip ve model arasındaki benzeşim bağıntıları ve ölçek oranları [12].....	37
Tablo 3.3. Gökçeler barajı basamaklı dolusavak modeli boyutları	39
Tablo 3.4. Hücre sayısının enerji yüksekliğine etkisi (33.basamak).....	41
Tablo 3.5. Analizlere ait hidrolik karakteristikler	45
Tablo 3.6. Hücre sayısının savak mansabındaki enerjiye etkisi (Model 4, $Q=0.01210 \text{ m}^3/\text{s}$).....	46
Tablo 4.1. Debi-Rezervuar su seviyelerinin karşılaştırılması	50
Tablo 4.2. Basınç ölçümleri ve bağıl hata değerleri.....	53
Tablo 4.3. Su yüzü profili ve bağıl hata değerleri	56
Tablo 4.4. Yaklaşım kanalı hız ölçümleri	61
Tablo 4.5. Gökçeler barajı basamaklı dolusavağı enerji sönümleme oranları.....	67
Tablo 4.6. Sayısal çalışmanın doğrulanması.....	71
Tablo 4.7. Modellerdeki enerji sönümleme oranlarının kıyaslanması	77

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

B	: Savak genişliği (L)
E_0	: Membadaki akım enerjisi (L)
E_1	: Mansaptaki akım enerjisi (L)
E_L	: Memba ile mansap arasındaki enerji farkı (L)
E_L / E_0	: Enerji sönümleme oranı (-)
Fr	: Froude sayısı (-)
g	: Yerçekimi ivmesi (LT^{-2})
H_{savak}	: Savak yüksekliği (L)
h_s	: Basamak yüksekliği (L)
h_t	: Üçgen basamak derinliği (L)
k	: Türbülanslı kinetik enerji (L^2T^{-2})
L_r	: Uzunluk ölçeği (-)
l_s	: Basamak uzunluğu (L)
Q	: Debi (L^3T^{-1})
q	: Birim debi (L^2T^{-1})
Q_m	: Model debisi (L^3T^{-1})
Q_P	: Prototip debisi (L^3T^{-1})
Q_r	: Debi ölçeği (-)
Re	: Reynolds sayısı (-)
u', v', w'	: Türbülans çalkantı hızları (LT^{-1})
$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$	: Zamansal ortalama hızlar (LT^{-1})
V_1	: Mansaptaki ortalama akım hızı (LT^{-1})
V_c	: Kritik akım hızı (LT^{-1})
V_m	: Modeldeki akım hızı (LT^{-1})
V_P	: Prototipteki akım hızı (LT^{-1})
V_r	: Hız ölçeği (-)
y_1	: Hidrolik sıçrama öncesi mansaptaki akım derinliği (L)
y_2	: Hidrolik sıçrama sonrası mansaptaki akım derinliği (L)
y_c	: Kritik akım derinliği (L)
α	: Şüt açısı ($^\circ$)
ρ	: Özgül kütle (ML^{-3})
ε	: Sönümleme oranı (-)
μ	: Dinamik viskozite ($ML^{-1}T^{-1}$)
ν	: Kinematik viskozite (L^2T^{-1})

Kısaltmalar

DSİ	: Devlet Su İşleri
FAVOR	: Fractional Area/Volume Obstacle Representation (Bölünmüş Alan/Hacim Gösterimi)
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
LES	: Large Eddy Simulation (Büyük Çevrinti Simülasyonu)
RANS	: Reynolds-Averaged-Navier Stokes (Reynolds Ortalamalı Navier Stokes)
RNG	: Renormalized Group (Yeniden Normalleştirilmiş Grup)
TAKK	: Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol
TLEN	: Turbulent Mixing Length (Türbülanslı Karıştırma Uzunluğu)
VOF	: Volume of Fluid (Sonlu Hacimler Yöntemi)



1. GİRİŞ

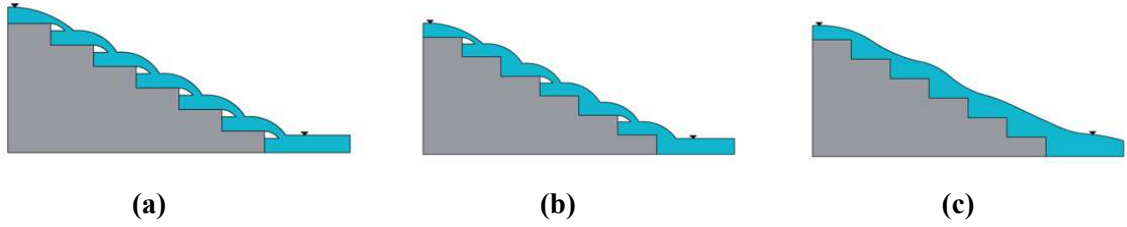
Dolusavaklar baraj rezervuarında biriken fazla suların veya feyezan debisinin, baraj gövdesine zarar vermeden mabdan mansaba iletilmesini sağlayan yapılardır. Dolusavak türlerinden biri olan basamaklı dolusavaklar yapım ve tasarım kolaylığından dolayı 3500 yıldan uzun bir süredir kullanılmaktadır. Literatüre göre, basamaklı dolusavakların dünyadaki ilk örneğinin MÖ 1300'lü yıllarda inşa edilmiş olan Yunanistan'daki Akarnian basamaklı dolusavağı olduğu tahmin edilmektedir [1]. Özellikle, 20.yüzyılın başından itibaren, basamaklı dolusavaklar akım enerjisini sönümlemek için daha kapsamlı tasarlanmaya başlanmıştır [2].

Klasik dolusavakların mansabındaki akım enerjisinin sönümlenmesinde genel olarak enerji kırıcı havuzlar veya sıçratma eşikleri kullanılmaktadır. Son zamanlarda ise genellikle küçük barajların dolusavaklarından mansaba bırakılan akımın enerjisini sönümlemek için basamak tipli dolusavaklar yaygın olarak kullanılmaktadır [3]. Basamaklı dolusavaklar, üzerinden savaklanan akımın her bir basamağa çarpması sonucunda akım enerjisinin büyük kısmını boşaltım kanalında sönümleyebilmektedir. Boşaltım kanalı boyunca sönümlenen enerji miktarı, diğer dolusavak tiplerine göre, yaklaşık olarak %70-80 civarında daha fazladır [4]. Bu nedenle basamaklı dolusavaklarda boşaltım kanalı sonuna yapılan enerji kırıcı yapılarda oluşan hidrolik sıçramanın boyunun kısılmasıyla mansaptaki enerji kırıcı yapıların boyutları %30-40 oranında küçüldüğünden, basamaklı dolusavakların geleneksel savaklara göre daha ekonomik olduğu vurgulanmaktadır [3, 5]. Ayrıca, basamaklı dolusavak boyunca meydana gelen yüksek enerji sönümleme akım momentumunu azaltır. Akım hızının azalması ve bunun sonucunda akım derinliğinin artması ile birlikte kavitasyon indeksi artar ve buna bağlı olarak kavitasyon riski azalır [6]. Basamaklı dolusavaklar su arıtma tesislerinde su içerisinde mevcut olan oksijen miktarını arttırmak amacı ile de kullanılmaktadır [7].

Basamaklı dolusavaklar daha çok uygulama kolaylığı bakımından silindire sıkıştırılmış beton (SSB) barajlarda ve birim debisi $q=10-15 \text{ m}^3/\text{s.m}'\text{ye}$ kadar olan dolusavaklarda kullanılmaktadır. Basamaklı dolusavakların kullanılmasındaki esas amaçlar, enerji sönümleme optimizasyonu ve yapının kabul edilebilir bir işletme ömrüne sahip olmasıdır [3].

Deneyisel çalışmalar [8, 9] basamaklı dolusavaklarda akımın iki rejime (nap akım rejimi ve sıçramalı akım rejimi) ayrıldığını göstermiştir. Nap akım rejimi, art arda düşen serbest naplar olarak tanımlanır ve düşük debi değerlerinde meydana gelir. Sıçramalı akım rejimi ise yüksek debi değerlerinde suyun kararlı bir şekilde akması sonucunda meydana gelir [10]. İlk kez Ohtsu ve Yasuda [11] ise bu iki akım rejimi arasında bir geçiş rejimi olduğundan bahsetmişlerdir. Geçiş rejiminde meydana gelen geçici hidrodinamik dalgalanmalar, düzensiz bir akım davranışına ve yapının gereksiz titreşimlere maruz kalmasına sebep olabilir. Bu sebeple güvenlik açısından, geçiş

akımı rejimi tasarımcılar tarafından tavsiye edilmemektedir [10]. Basamaklı dolusavaklarda oluşan akım rejimleri Şekil 1.1’de gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Basamaklı dolusavaklarda akım rejimleri: a) nap akım rejimi; b) geçiş akım rejimi; c) sıçramalı akım rejimi

Bu çalışmada, Flow-3D yazılımı kullanılarak, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi ile basamaklı dolusavaklar üzerindeki akımın özellikleri sayısal olarak incelenmiştir. Çalışma temel olarak iki kısımdan oluşmaktadır. Çalışmanın ilk kısmında, Devlet Su İşleri (DSİ) Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol (TAKK) Dairesi Başkanlığı tarafından 1/40 ölçekteki Antalya Gökçeler Barajı Basamaklı dolusavağı modelinde yapılan; dolusavak deşarj kapasitesinin belirlenmesi, yaklaşım kanalında akım hızlarının incelenmesi, dolusavak boşaltım kanalında oluşan akım koşullarının incelenmesi, dolusavak profili ve boşaltım kanalında basınç ölçümleri gibi deneysel çalışmalar, sayısal olarak modellenmiş ve elde edilen sayısal sonuçlar, deneysel sonuçlar [12] ile karşılaştırılmıştır. Sayısal modellemede dört farklı türbülans modeli ($k-\epsilon$, $k-\omega$, LES, RNG) kullanılarak her bir akım parametresi için en uygun türbülans modeli tespit edilmiştir. Çalışmanın ikinci kısmında ise literatürdeki bir klasik basamaklı dolusavak modelinin [13] deney sonuçları kullanılarak sayısal doğrulama işlemi yapılmış ve üçgen geometriye sahip basamaklı dolusavakların enerji sönmüleme oranı sayısal olarak incelenmiştir.

2. BASAMAKLI DOLUSAVAKLAR

Basamaklı dolusavaklar; baraj membasındaki suyu mansaba iletirken üzerindeki basamaklar sayesinde akım enerjisini % 70-80 oranında sönümleyen yapı elemanlarıdır [4]. İlk örneklerinin yaklaşık 3500 yıl öncesine dayandığı basamaklı dolusavaklar, son 45 yılda gelişen yeni inşaat teknikleri ve yapı malzemelerinin üretilmesiyle oldukça popüler hale gelmiştir [1].

Basamaklı dolusavakların temel özelliği, kretten topuğa kadar yapılandırılmış basamak dizisine sahip olmalarıdır. Bu basamaklar sayesinde dolusavak boyunca enerji sönümleme oranı önemli ölçüde arttığından, enerji kırıcı havuzun boyutları ve maliyeti azalmaktadır. Ayrıca dolusavak boyunca kavitasyon oluşum riski de önemli ölçüde azalır. [14]

Basamaklı dolusavaklardaki akım, dolusavak eğimine, basamak geometrisine ve debi değerine göre, nap akımı, sıçramalı akım ve geçiş akımı rejimi olmak üzere üç akım rejimine ayrılır. Hidrolik mühendisliğinde, basamaklı dolusavak tasarımları genellikle sıçramalı akım rejiminde yapılır. Nap akımı genellikle düşük debilerde meydana gelir, geçiş akım rejimi ise kararsız bir yapıya sahip olduğundan dolayı mümkün olduğunca kaçınılmalıdır [15].

2.1. Basamaklı Dolusavakların Tarihçesi

Basamaklı dolusavaklar tasarım ve uygulama kolaylığından ötürü 3500 yıldan uzun bir süredir birçok uygarlık tarafından uygulandığı kaynaklarda mevcuttur. Basamaklı dolusavakların dünyadaki ilk örneğinin M.Ö. 1300'lü yıllarda Yunanistan'da inşa edilen Akarnian basamaklı dolusavağı olduğu tahmin edilmektedir. Toplamda 14 basamağı olan ve toprak dolgudan üretilen bu dolusavağın yüksekliği 10.5 m ve kret uzunluğu 25 m'dir [16, 17].

İlk uygulamalar arasında olan Ajilah Barajları ise M.Ö. 694'te Asur Kralı Sennacherib tarafından Kuzey Irak'taki Khosr nehri üzerine inşa edilmiştir. Kret uzunluğu 150 m olan Kasserine Barajı da basamaklı dolusavakların ilk örneklerindendir. Daha küçük çaptaki basamaklı dolusavaklara örnek olarak ise Tareglat (Libya), Qasr Khubbaz (Suriye) ve Oued Gergour (Tunus) verilebilir. [18].

Müslüman inşaat mühendisleri, Irak-Adheim, Suudi Arabistan-Darwaish, İran-Khajou köprüsü, İspanya-Mestella gibi basamaklı dolusavaklı barajlar inşa etmişlerdir [18]. Romalılar da geçmişte birçok basamaklı dolusavak inşa etmişlerdir ve bunların kalıntılarını Suriye ve Tunus'ta hala rastlanmaktadır. [1].

İspanyol mühendisler; Romalılar ve Müslüman mühendisler tarafından inşa edilen yapıların tasarımlarından yararlanarak o günün şartlarına göre oldukça üst düzey olan, Almansa, Alicante ve Barrarueco de Abajo gibi basamaklı savaklar ve basamaklı dolusavaklı barajlar tasarlamışlardır.

Orta Meksika'da da, 18. ve 19. yüzyıllarda birkaç basamaklı dolusavaklı baraj inşa edilmiş ve bunların bazıları 20. yüzyılın başına kadar kullanılmıştır [18].

18. yüzyılın sonunda ve 19. yüzyılın başlarında, Fransa, İngiltere, İspanya, Orta Amerika ve ABD'de basamaklı dolusavaklı taş duvar barajlar inşa edilmiştir. Orta Avrupa ve Rusya'da ise basamaklı dolusavaklı ahşap barajlar inşa edilmiştir. 1800-1920 yılları arasında Amerika, Avustralya ve Yeni Zelanda'da ahşap barajlar oldukça sık kullanılmıştır. Birçok ahşap barajın yüksekliği 10 m'nin altında olmasına rağmen daha yüksek olanları da başarılı şekilde inşa edilmiştir [18].

1970'lerde basamaklı dolusavaklar yeni inşaat malzemeleri ve tasarım teknikleri ile (Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB), polimer telli gabyonlar vb.) yeniden popüler hale gelmeye başlamıştır [18]. Günümüzde de basamaklı dolusavakların inşasında çoğunlukla SSB ve Gabyonlar kullanılmaktadır [19].

Ülkemizde de basamaklı dolusavağa sahip barajlar bulunmaktadır. Bu barajlardan biri olan Adnan Menderes Barajı (Şekil 2.1), Aydın'ın Çine ilçesi Çine Çayı üzerinde; enerji, sulama ve taşkın koruma amaçlarıyla 2010 yılında hizmete açılmıştır. SSB barajlar kategorisinde yer alan bu baraj, membasındaki taşkın sularını basamaklı dolusavak aracılığıyla mansaba iletmektedir [20]. İzmir İlyas Çayı üzerinde 2011 yılında inşası tamamlanan Çaltıkoru Barajı da SSB tipi bir baraj olup gövdesi üzerine yerleştirilen basamaklı dolusavak ile taşkın sularını mansaba iletmektedir [21]. Antalya'nın Gazipaşa ilçesi merkezinin 13 km kuzeydoğusunda bulunan Gökçeler Barajı, Gökçeler deresi üzerinde sulama ve içme-kullanma suyu amaçlı planlanmış bir tesistir. Baraj tipi ön yüzü beton kaplı kaya dolgu olup gövdesi üzerine yerleştirilen basamaklı dolusavak ile su tahliyesi yapmaktadır ve 2017 yılında hizmete açılmıştır [12].



Şekil 2.1. Aydın Adnan Menderes Barajı [20]

2.2. Basamaklı Dolusavakların Kullanım Amaçları

Taşkın sularının ya da baraj rezervuarlarında biriken fazla suların tahliyesi sırasında baraj mansabında olası muhtemel tahribatların önlenmesi için uygulanan basamaklı dolusavaklar, akım enerjisini henüz dolusavak üzerinde iken sönümlendiğinden düşüm havuzu maliyetlerini önemli ölçüde azaltmaktadır [17].

Basamaklı dolusavaklarla akımın enerjisini sönümlemeye ilaveten akım içerisine büyük oranda hava girişi sağlanır. Böylelikle hem basıncın buhar basıncına kadar düşmesi sağlanır hem de eğer kavitasyon oluşumu varsa buhar kabarcıklarının yoğunlaşması sırasında oluşacak büyük basınç şoklarını sönümleyerek yapı yüzeylerinde kavitasyon hasarlarının oluşumu önlenir. Basamaklı dolusavakların projelendirilmesi safhasında hava konsantrasyonunun kavitasyonu engelleyecek düzeyde olmasına dikkat edilmelidir. Yüksek hızlı akımlarda hava, savakta meydana gelebilecek kavitasyon zararlarını en aza indirmeye yardımcı olabilir. Basamaklar üzerinde de kavitasyon oluşumu gözlenebilir fakat havalanma sayesinde bu hasarlar azaltılabilir. Basamaklı dolusavaklarda klasik savaklara oranla daha yüksek oranda enerji sönümlendiğinden akımın hızı ve gücü savak boyunca azaltılabilir. Böylelikle akım hızının azaltılması ve bunun sonucunda akım derinliğinin artması ile bu tip savaklarda kavitasyon riski önemli ölçüde azalır [3].

Barajlarda bulunan kanallar ve savaklar, su-hava transferi dinamiğini doğrudan etkiler. Bu yapılardaki akımın durumu ile mansaptaki su içerisinde çözülmüş oksijen miktarı doğru orantılı olarak değişir. Yavaş ve derin bir akıma sahip bir barajın mansabındaki gaz transferi, bir açık kanala oranla daha azdır. Bazı hidrolik yapılar (dinlendirme havuzu; savak vb.) suyun bırakılması esnasında oksijen miktarını artırabilirler fakat bu tip yapıların projelendirilmesi esnasında havalanma ile birlikte oluşturulacak yeni hacimdeki çözülmüş oksijen miktarının canlı hayatını tehlikeye atmayacak oranda olmasına dikkat edilmesi gerekmektedir [3].

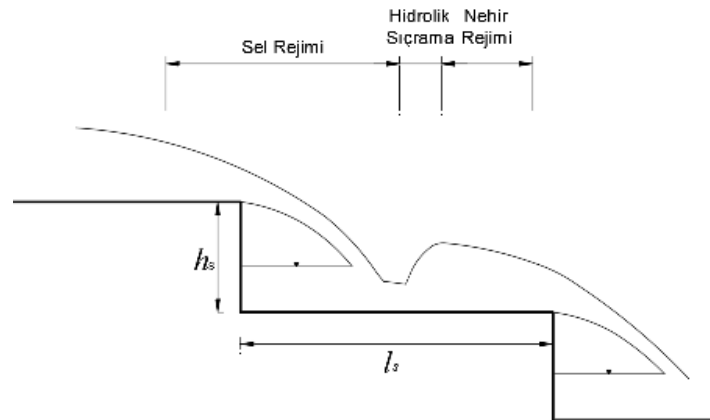
Nehir ve derelerdeki en önemli su kalite parametrelerinden birisi su içerisinde çözülmüş oksijen miktarıdır. Nehir ve derelerde çözülmüş oksijen miktarını artırmak amacıyla nehir yataklarına suni olarak kanallar ve basamaklı düşümler (kaskatlar) yapılmaktadır. Bu uygulamalara kirli ve çözülmüş oksijen miktarı az olan yerlerde başvurulabilir. Bu tip tasarımlara örnek olarak ABD’de bulunan Tennessee Valley Authority nehrinde yapılan kaskat ve düşüm yapıları verilebilir. Ayrıca, içme suyu arıtımında basamak kullanımı (kaskat havalanması) ile su içerisindeki bazı gazların çıkarılması ve su içinde istenmeyen tat ve kokuların giderilmesi veya azaltılması sağlanır [3].

2.3. Basamaklı Dolusavaklarda Akım Rejimleri

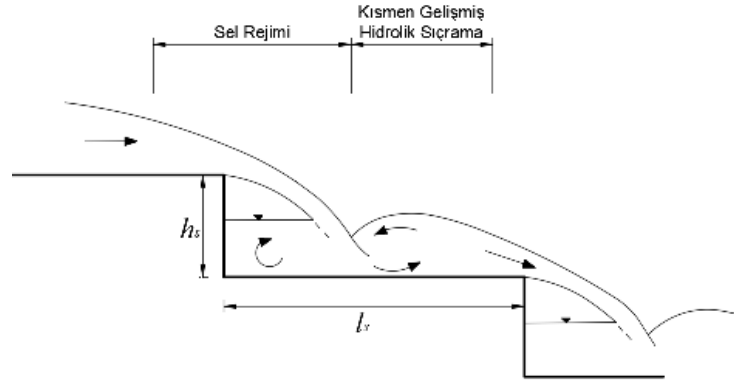
Basamaklı dolusavaklarda akım yapısı oldukça karmaşıktır. Geçmişte yapılan deneysel çalışmalara [8, 9, 11] göre basamaklı dolusavaklar üzerindeki akım; dolusavak eğimine, basamak geometrisine ve debi değerine göre nap akımı rejimi, sıçramalı akım rejimi ve geçiş akımı rejimi olmak üzere üçe ayrılır. [15]. Nap akımı rejimi, her bir basamakta oluşan napların art arda düştüğü serbest naplar dizisi şeklindedir ve düşük debi değerlerinde meydana gelir. Sıçramalı akım rejiminde su kararlı bir şekilde akar ve yüksek debi değerlerinde meydana gelir [10]. Hidrolik mühendisliğinde, basamaklı dolusavak tasarımları genellikle en kararlı yapıya sahip olan sıçramalı akım rejiminde yapılır [15]. Geçiş akımı rejiminde ise meydana gelen düzensiz akım koşulları sebebiyle güvenlik açısından tavsiye edilmemektedir [10].

2.3.1. Nap Akımı Rejimi

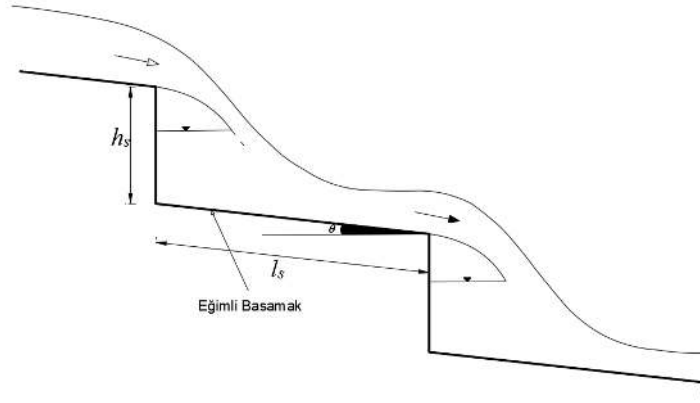
Nap akımı genellikle uzun basamaklarda ve düşük debili akımlarda görülür [22–24]. Akımın her bir basamağa çarparak içerisine hava girmesiyle veya basamaklar uzun olduğu takdirde, basamaklar üzerinde tam veya kısmi olarak gelişen hidrolik sıçrama oluşumu ile akımın enerjisi sönmülenebilmektedir [25, 26]. Nap akımı üç alt rejime ayrılır. Bunlar: düşük akım oranlarında oluşan hidrolik sıçramalı nap akımı (Şekil 2.2), kısmi gelişen hidrolik sıçramalı nap akımı (Şekil 2.3), ve hidrolik sıçramasız nap akımıdır (Şekil 2.4) [17]. Nap akımı rejiminde, sabit dolusavak yüksekliği ve debisi için, basamak sayısı azaldıkça sönmölenen enerji miktarı artarken, basamak sayısının artması ile sönmöleme miktarı azalır. Geniş basamaklı ve düşük yükseklikli barajlarda nap akımı, sıçramalı akıma göre daha fazla enerjiyi sönmöleyebilir [22, 27].



Şekil 2.2. Tam gelişmiş hidrolik sıçramalı nap akımı [17]



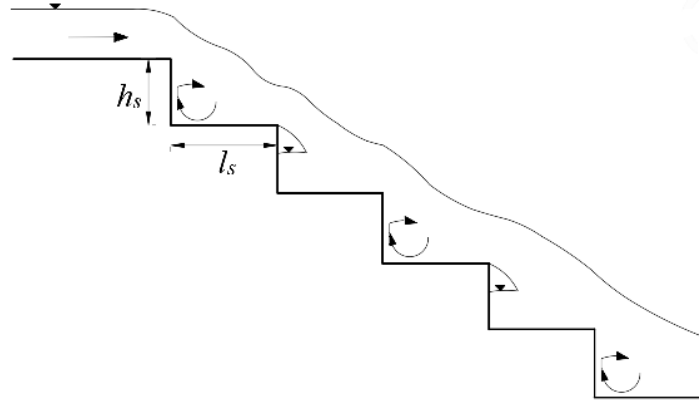
Şekil 2.3. Kısmi gelişmiş hidrolik sıçramalı nap akımı [17]



Şekil 2.4. Hidrolik sıçramasız nap akımı [17]

2.3.2. Geçiş Akımı Rejimi

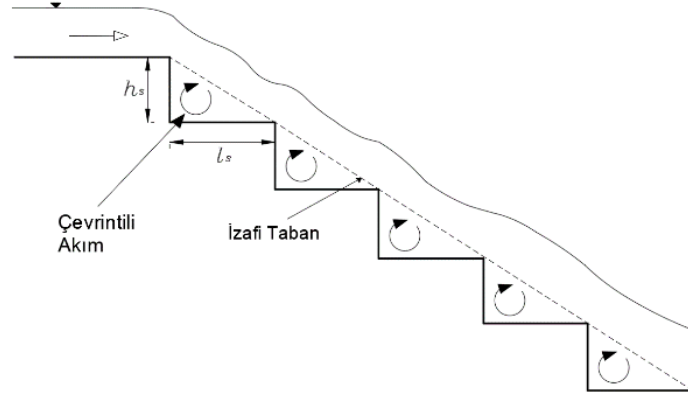
İlk kez Ohtsu ve Yasuda [11] tarafından bahsedilen geçiş akımı rejimi, nap akımı ile sıçramalı akım rejimi arasında meydana gelen bir rejimdir (Şekil 2.5). Bu akım rejimi, nap akımının meydana gelmesi için gereken maksimum debi değerinden daha yüksek ve sıçramalı akımın başlaması için gereken debiden daha düşük debi değerlerinde meydana gelir. Geçiş rejiminde, nap akımında gözlenen art arda düşen serbest naplar dizisi veya sıçramalı akımdaki izafi taban oluşumu görülmez [14]. Geçiş akım rejiminde meydana gelen geçici hidrodinamik dalgalanmalar, düzensiz bir akım davranışına ve yapıda gereksiz titreşimlere sebep olabilir. Dolayısı ile geçiş akım rejimi, güvenlik açısından, tasarımcılar tarafından tavsiye edilmemektedir [10].



Şekil 2.5. Geçiş akımı rejimi [28]

2.3.3. Sıçramalı Akım Rejimi

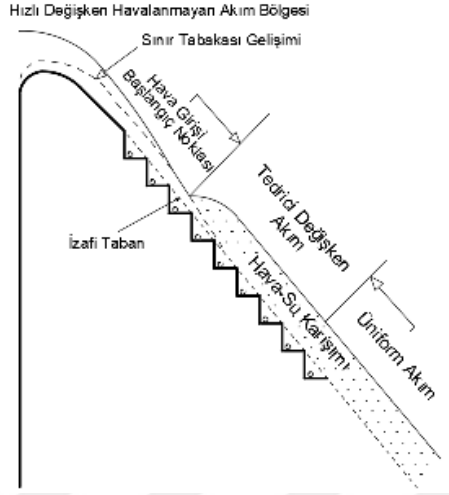
Sıçramalı akım rejimi, yüksek debilerde ve yüksek açılı şüt kanallarında akımın basamaklar üzerinden sıçrayarak aktığı akım rejimidir (Şekil 2.6). Bu akım rejiminde, akımın basamak uçlarından sıçrayarak geçeceği izafi bir taban oluşur. Oluşan bu izafi taban sayesinde basamak üzerlerinde oluşan çevrimsel akımlar ile akım enerjisinin büyük çoğunluğu sönmülenir [28–30] .



Şekil 2.6. Sıçramalı akım rejimi [28]

Sıçramalı akım rejimine sahip basamaklı bir dolusavakta, ilk basamaklarda akımın serbest yüzeyi düzgündür ve bu bölgede akım içerisine hava girişi gözlenmez. Bu bölge, havalanmayan akım bölgesi olarak adlandırılır ve berrak su görünümü ile ayırt edilebilir. Ancak bu bölge boyunca türbülanslı sınır tabakası gelişimi gözlenir. Türbülanslı sınır tabakasının dış kenarı serbest yüzeye ulaştığında, türbülans nedeniyle serbest yüzeyde hava girişi meydana gelir. Bu olayın meydana geldiği nokta, başlangıç noktası olarak bilinir. Bu noktanın ilerisinde, hava-su karışımını içeren

akım, tedrici olarak değişen bir akım bölgesi oluşturur, ilerleyen kısımlarda ise akım üniform hale gelir ve bu bölge üniform akım bölgesi olarak tanımlanır (Şekil 2.7) [14].



Şekil 2.7. Sıçramalı akım rejiminde akım bölgeleri [29]

Basamaklı dolusavaklarda oluşan akım rejimlerinin belirlenmesi için yürütülen çalışmalar neticesinde Chanson [31], nap akım rejimi ile geçiş akım rejimi arasındaki sınırı (nap akım rejiminin üst sınırını) Eşitlik (2.1) ile tanımlarken yine aynı çalışmasında geçiş akım rejimi ile sıçramalı akım rejimi arasındaki sınırı (sıçramalı akım rejiminin alt sınırını) ise Eşitlik(2.2) ile tanımlamıştır. Boes ve Hager [5] ise geçiş akım rejimi ile sıçramalı akım rejimi arasındaki sınırı (sıçramalı akım rejiminin alt sınırını) Eşitlik(2.3) ile tanımlamışlardır.

$$\frac{y_c}{h_s} = 0.89 - 0.4 \left(\frac{h_s}{l_s} \right) \quad \text{Nap akımı-Geçiş akımı} \quad (2.1)$$

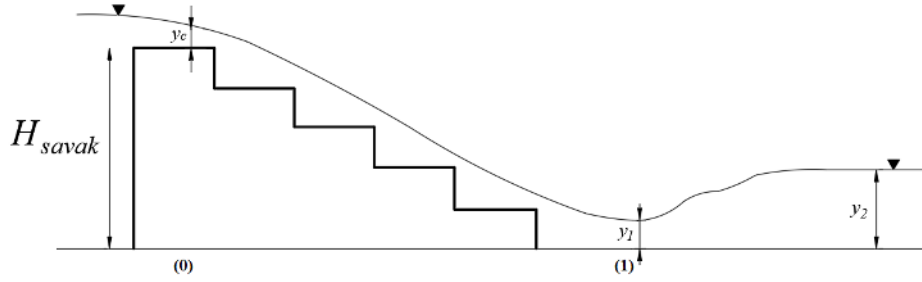
$$\frac{y_c}{h_s} = 1.2 - 0.325 \left(\frac{h_s}{l_s} \right) \quad \text{Geçiş akımı-Sıçramalı Akım} \quad (2.2)$$

$$\frac{y_c}{h_s} = 0.91 - 0.14 \tan(\alpha) \quad \text{Geçiş akımı-Sıçramalı Akım} \quad (2.3)$$

Bu eşitliklerde, h_s = basamak yüksekliği(m), l_s = basamak genişliği (m), y_c = kritik akım derinliği (m) ve α = şüt açısıdır. Bu eşitliklerden de anlaşılacağı üzere basamaklı dolusavaklarda akım rejiminin türü, basamak geometrisine, debiye ve kanal eğimine bağlıdır [15].

2.4. Enerji Sönümleme

Basamaklı dolusavaklarda, enerji sönümleme oranı dolusavağın memba (E_0) ve mansabındaki enerji (E_1) değerleri ile hesaplanabilir (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Basamaklı dolusavak boykesiti

Membadaki enerji (E_0), Eşitlik (2.4) ile bulunabilir.

$$E_0 = H_{savak} + y_c + \frac{v_c^2}{2g} \quad (2.4)$$

Dikdörtgen kanallar için kritik akım derinliği Eşitlik (2.5)'teki gibi ifade edilebilir.

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad \text{ve} \quad q = \frac{Q}{B} \quad (2.5)$$

E_0 'daki hız değeri Eşitlik (2.6)'daki şekilde yazılabilir.

$$\frac{v_c^2}{2g} = \frac{Q^2}{2g \cdot A^2} = \frac{q^2 B^2}{2g y_c^2 B^2} = \frac{q^2}{2g y_c^2} \quad (2.6)$$

Eşitlik (2.5)'teki q^2 , Eşitlik (2.6)'da yerine yazılırsa E_0 'daki hız değişkeni aşağıdaki şekilde elde edilebilir.

$$\frac{v_c^2}{2g} = \frac{q^2}{2g y_c^2} = \frac{g y_c^3}{2g y_c^2} = \frac{y_c}{2} \quad (2.7)$$

Son olarak membaki enerji (E_0) Eşitlik (2.8)'deki gibi ifade edilebilir.

$$E_0 = H_{savak} + y_c + \frac{v_c^2}{2g} = H_{savak} + 1.5y_c \quad (2.8)$$

Bu eşitliklerde; H_{savak} , Savak yüksekliğini (m); B , Savak genişliğini (m); y_c , kritik akım derinliğini(m); v_c , kritik akım hızını (m/s) ve g = yerçekimi ivmesini (m/s^2) ifade etmektedir.

Mansaptaki enerji (E_1), Eşitlik (2.9) ile bulunabilir.

$$E_1 = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} \quad (2.9)$$

Burada, V_1 , mansaptaki ortalama hızını (m/s) ve y_1 , hidrolik sıçrama öncesi mansaptaki akım derinliğini (m) ifade eder.

Memba ile mansap arasındaki enerji farkı (E_L) Eşitlik (2.10)'da gösterildiği gibi hesaplanabilir.

$$E_L = E_0 - E_1 \quad (2.10)$$

Enerji sönümleme oranı ise Eşitlik (2.11) ile hesaplanabilir.

$$\text{Enerji sönümleme oranı} = \frac{E_L}{E_0} \quad (2.11)$$

2.5. Literatür Araştırması

Basamaklı dolusavaklarda enerjinin büyük bir kısmı, dolusavak boşaltım kanalında bulunan basamaklar ile sönümlenmektedir [4]. Basamakların enerji sönümleme üzerindeki etkisi sebebiyle son yıllarda birçok araştırmacı, basamaklı dolusavaklarda farklı basamak sayıları ve geometrileri ile farklı şüt açıları kullanarak deneysel ve sayısal çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Rice ve Kadavy [32], Salado Creek Site Barajı basamaklı dolusavağının 1/20 ölçekte 2 boyutlu modelini oluşturarak dolusavak üzerindeki akımı, tasarlamış oldukları düşüm havuzu performansını ve basamaklarla sönümlenen enerji miktarlarını 5.81-14.50 m³/s.m arasındaki birim debi değerlerinde incelemişlerdir. Oluşturmuş oldukları bu model 0.61 m yüksekliğinde, 1.52 m uzunluğunda olup ve 10 basamaktan oluşmaktadır. Araştırmacılar model ile prototipteki ölçek oranını Froude benzeşimi ile hesaplamışlardır. Araştırmacılar, yapmış oldukları deneysel çalışmalarda, düşüm havuzu sonuna eşik eklenen modellerin eşiksiz modellere kıyasla akımda daha az çalkantı oluşturduğunu, bu nedenle düşüm havuzu sonuna eşik eklemenin dolusavak güvenliği açısından önemli olduğunu ve eklenecek eşğin dolusavak topuğundan itibaren 12.19 m ileride olması gerektiğini vurgulamışlardır. Ayrıca enerji sönümleme bakımından basamaklı dolusavakların klasik dolusavaklara oranla 2-3 kat civarında daha fazla enerji sönümleyebildiğini ve basamaklı dolusavak kullanımının klasik dolusavaklara kıyasla düşüm havuzu boyutlarını %30 civarında azalttığını vurgulamışlardır.

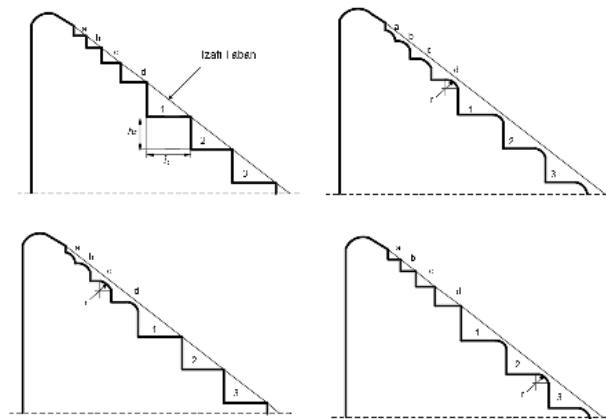
Peyras vd. [9], kutu gabyonlar kullanarak basamaklı dolusavakların akım karakteristiklerini incelemişlerdir. Doğru inşa uygulamaları kullanıldığı takdirde kutu gabyonlardan oluşturulmuş basamaklı dolusavakların, 3 m³/m.s'ye kadar olan akımlarda hasar görmeden çalışabileceğini ve

klasik dolusavaklara kıyasla %10-30 arasında daha fazla akımın enerjisini sönümlendiğini dolayısıyla bunun da enerji kırıcı yapıların maliyetini %5-10 kadar azaltacağını ifade etmişlerdir.

Tabbara vd. [33], farklı basamak konfigürasyonları kullanarak basamaklı dolusavaklardaki akımı HAD yöntemi ile çalışan ADINA yazılımını kullanarak sayısal olarak incelemişlerdir. Araştırmacılar çalışmalarında su yüzü profili, enerji sönümleme oranı, basınç ve hız dağılımı gibi akım parametrelerini $k-\varepsilon$ türbülans modelini kullanarak incelemişlerdir. Elde ettikleri sayısal sonuçların deney sonuçlarıyla oldukça uyumlu olduğunu belirtmişlerdir.

Carvalho ve Amador [34], Basamaklı dolusavaklardaki hız dağılımlarını ve türbülans yoğunluklarını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Araştırmacıların çalışmalarında kullandıkları basamaklı dolusavak modeli; 0,50 m genişliğe, 2,0 m yüksekliğe ve 0,05 m basamak yüksekliğine sahip olup 1:0,8'lik (D:Y) bir taban eğimine sahiptir. Sayısal modellemede, sonlu hacimler yöntemi VOF (*Volume of Fluid*), FAVOR (*Fractional Area-Volume Obstacle Representation*) yöntemi ve 2 boyutlu Navier-Stokes denklemlerini kullanarak sayısal sonuçları, deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Araştırmacılar, sayısal sonuçlar ile deneysel sonuçların birbirine oldukça yakın olduğunu belirtmişlerdir.

Zare ve Doering [35], klasik basamaklı dolusavaklar ile farklı konfigürasyonlar kullanarak oluşturdukları uçları yuvarlatılmış basamaklı dolusavakları; enerji sönümleme, havalanmaya başlama noktası, yan duvar yüksekliği ve ana akım özelliklerine göre karşılaştırmışlardır (Şekil 2.9). Araştırmacılar, debi değerleri 0.012281-0.225965 m³/s arasında değişen 26 adet deney yürütmüşlerdir. Bu deneyleri 0.94 m genişliğinde, 0.75 m derinliğinde ve 14.0 m uzunluğunda bir deney setinde gerçekleştirmişlerdir. Deneyler neticesinde, basamak uçlarını yuvarlatmanın yaklaşık %3 civarında klasik basamağa göre daha fazla enerji sönümleyebildiği ve %20 oranında daha az yan duvar yüksekliğine ihtiyaç duyulduğu sonuçlarına varmışlardır. Araştırmacılar ayrıca, sadece giriş kısmındaki ilk birkaç basamağın yuvarlatılmasının enerji sönümlemede kayda değer bir artış sağlamadığı sonucuna varmışlardır.



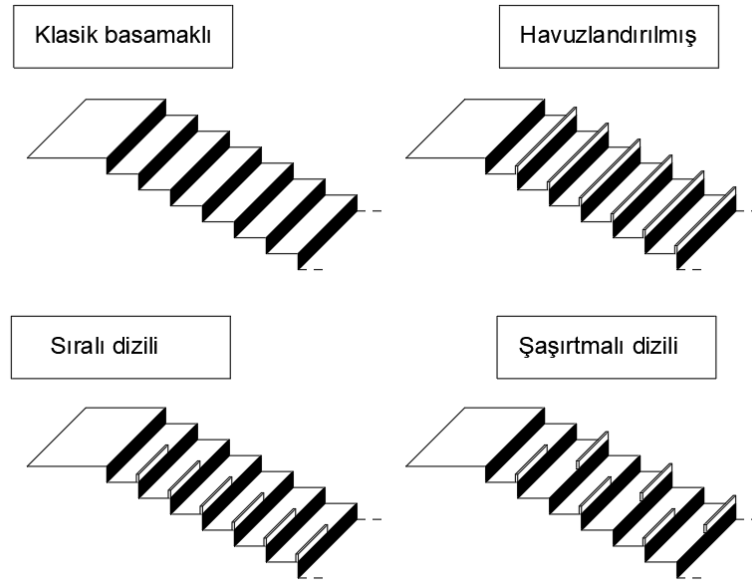
Şekil 2.9. Zare ve Doering [35] çalışmalarında kullandıkları modeller

Felder vd. [36], çalışmalarında klasik ve havuzlandırılmış basamaklı dolusavak modellerine ilaveten, hem klasik hem de havuzlandırılmış basamaklara sahip olan bir model daha kullanarak deneylerini 3 farklı dolusavak modelinde gerçekleştirmişlerdir (Şekil 2.10). Araştırmacılar, kanal açısı 8.9° , kanal genişliği 0.50 m, basamak genişliği 0.318 m ve basamak yüksekliği 0.05 m olan bir deney setinde, 0.02 ile 0.117 m³/s arasında değişen debi için 21 adet deney gerçekleştirmişlerdir. Yapmış oldukları bu deneyler neticesinde en düşük enerji sönümleme oranının klasik basamaklı dolusavaklarda olduğunu, en yüksek enerji sönümleme oranının ise klasik ve havuzlandırılmış basamaklardan oluşan kombinasyon modelinde olduğunu gözlemlemişlerdir. Araştırmacılar en yüksek enerji sönümleme oranının kombine modelde olduğunu gözlemlemesine rağmen, bu modelde dolusavak yapısının güvenli bir şekilde çalışması için uygun olmayan bazı akım düzensizlikleri meydana geldiğinden, bu modelin kullanımını tavsiye etmemektedirler.



Şekil 2.10. Felder vd. [36] çalışmalarında kullandıkları modeller

Felder vd. [37], klasik basamaklı dolusavak modelinin yanı sıra 3 farklı model (Şekil 2.11) daha kullanarak bu modellerin havalandırma oranlarını ve enerji sönümleme performanslarını incelemişlerdir. Araştırmacılar deneyleri, kanal genişliği 0,52 m, basamak genişliği 0,20 m, basamak yüksekliği 0,10 m olan $26,6^\circ$ açılı kanalda, 0,02 ile 0,155 m³/s aralığındaki debiler için gerçekleştirmişlerdir. Basamakları havuzlandırma amacıyla basamak uçlarına yerleştirilen eşikler; 0.031 m yüksekliğinde ve 0.015 m genişliğindedir. Araştırmacılar, deneylerden elde ettiği sonuçlara göre, havuzlandırılmış basamaklı dolusavak modellerinin enerji sönümle oranının, klasik basamaklı dolusavaklara göre daha düşük olduğunu ve yapılan tasarımların havalandırma açısından da bir avantaj sağlamadığını belirtmişlerdir. Ayrıca araştırmacılar, sıralı ve şaşırtmalı kombine modellerde kanalın enkesiti boyunca akımda büyük farklılıklar olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 2.11. Felder vd. [37] çalışmalarında kullandıkları modeller

Attarian vd. [38], farklı basamak yüksekliklerinde (3.8 cm ve 7.6 cm) enerji sönümleme , havalanma başlangıç noktası ve dolusavak boyunca hız profilini sayısal olarak incelemişlerdir. Gerçek akım türbülanslı olduğundan türbülansı modellemede $k-\varepsilon$ türbülans modelini kullanmışlardır. Elde ettikleri sayısal sonuçları literatürden elde ettikleri deneysel sonuçlarla [39] karşılaştırmaları neticesinde hız değerlerinde %3.20 ve enerji sönümleme oranlarında % 5’lik bir hata olduğunu ve yüksek basamak yüksekliğinde daha fazla enerji sönümlendiği sonuçlarına varmışlardır.

Felder ve Chanson [40], basamak uçlarına ekledikleri farklı boşluk oranlarında (boşluksuz, %5 boşluklu ve %31 boşluklu), 0.015 m genişlikli ve 0.031 m yükseklikli eşikler kullanılarak havuzlandırılmış basamaklı dolusavakların enerji sönümleme oranlarını klasik basamaklı dolusavaklarla karşılaştırmışlardır. Araştırmacılar, çalışmalarını 0.52 m genişlikli, 0.90 m yükseklikli ve basamak boyutları 0.10/0.20 m (Düşey/yatay) olan 10 basamaklı modellerde yürütmüşlerdir. Araştırmacılar yapmış oldukları çalışmalar neticesinde, boşluklu eşikler kullanılarak havuzlandırılmış modellerin enerji sönümle oranlarının kullanılan diğer modellere göre daha düşük olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

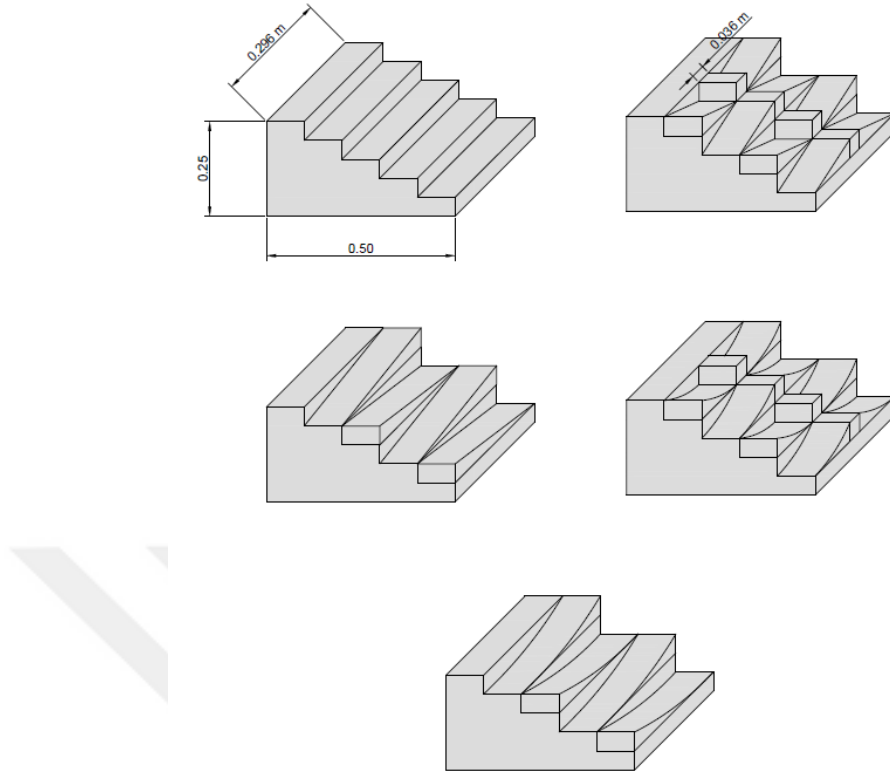
Tabari vd. [41], basamak sayısı, basamak yüksekliği ve debi gibi parametrelerin basamaklı dolusavaklarda enerji sönümlemeye olan etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. Araştırmacılar, çalışmalarında Flow-3D yazılımını ve türbülans modeli olarak $k-\varepsilon$ türbülans modelini kullanmışlardır. Araştırmacılar, 10, 15 ve 20 basamaklı olmak üzere üç farklı basamaklı dolusavak modeli kullanmışlardır. Modellerin basamak yükseklikleri sırasıyla 0.10, 0.067 ve 0.05 m olup üç farklı debi için (0.01236, 0.01952 ve 0.0282 m³/s) toplam dokuz analiz gerçekleştirmişlerdir.

Yapmış oldukları analizler neticesinde akımın debisi arttıkça enerji sönümleme oranının azaldığı, basamak sayısı arttıkça ve dolayısıyla basamak yüksekliği azaldıkça enerji sönümleme oranının azaldığı sonuçlarına varmışlardır.

Hamedi vd. [42], uçlarına eşik eklenmiş eğimli basamaklı dolusavakların enerji sönümleme performanslarını incelemek amacıyla deneysel ve 2 boyutlu sayısal çalışmalar yapmışlardır. Deneysel çalışmayı 60 basamaklı, her bir basamak yüksekliği 0.0466 m, her bir basamak genişliği 0.14 m olan ve kanal genişliği 1.33 m olan bir deney setinde gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarındaki akım nap rejiminde olup debi değeri 30 lt/s dir. Sayısal çalışmada ise FLUENT yazılımını ve standart $k-\epsilon$ türbülans modelini kullanmışlardır. Araştırmacılar, toplam 12 adet deney yaparak deneysel ve sayısal çalışmalar neticesindeki enerji sönümleme oranlarını karşılaştırarak ortalama %5.55 civarında bir fark olduğunu gözlemlemişlerdir. Sadece 4 basamağa (39-42 arası) farklı derecede eğimler vererek ve bu basamakların uçlarına farklı boyutlarda eşikler ekleyerek önceki duruma göre yaptıkları kıyaslamada, enerji sönümleme için ortalama % 14.52 civarında bir artış olduğunu gözlemlemişlerdir.

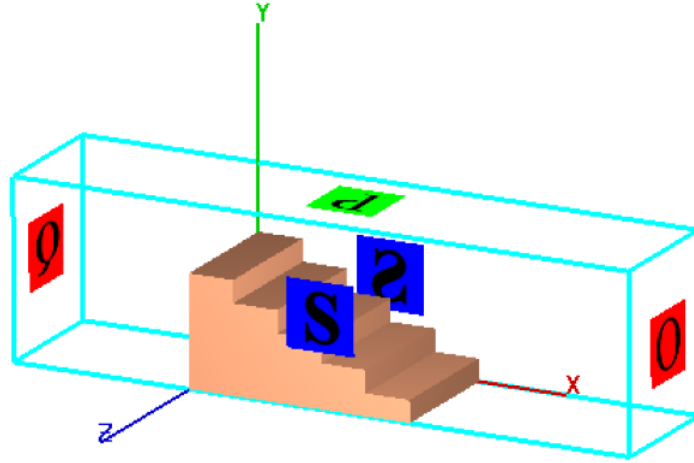
Krisnayanti vd. [43], farklı basamak sayılarında klasik basamaklı dolusavakların ve basamak uçlarına eşikler eklenerek oluşturulan havuzlandırılmış basamaklı dolusavakların enerji sönümleme oranlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışmalar, 45° eğimli, 0.50 m kanal genişliğine sahip ve basamak sayısı 20 ile 40 olan deney setinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler, 1.12 ile 9.91 arasında değişen 10 Froude sayısı (Fr) için yapılmıştır. Araştırmacılar, deneyler sonucunda, basamak sayısının artması durumunda enerji sönümleme oranının arttığını, Froude sayısı ve kritik derinliğin artmasıyla klasik ve havuzlandırılmış basamaklı dolusavaklarda enerji sönümleme oranının azaldığını, havuzlandırılmış basamaklı dolusavakların klasik basamaklı dolusavaklara göre daha fazla enerji sönümlediğini ve basamak uçlarına eklenen eşik yüksekliğinin havuzlandırılmış basamaklı dolusavaklarda enerji sönümleme miktarını etkilediğini vurgulamışlardır.

Mero ve Mitchell [13], basamak geometrileri farklı olan 5 model (Şekil 2.12) oluşturarak, bu modeller için enerji sönümleme oranlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Araştırmacılar, deneyleri 0.296 m genişliğinde, 4 m uzunluğunda ve 0.32 m derinliğinde bir kanala yerleştirdikleri 0.25 m yükseklikli, 0.50 m uzunluklu ve 5 basamaklı bir savakta gerçekleştirmişlerdir. Savakta bulunan basamakların yatay uzunluğu 0.10 m iken düşey uzunluğu 0.05 m dir. Debi değerlerinin 0.00213-0.0121 m³/s aralığında değiştiği çalışma sonucunda, klasik basamaklı savaklara kıyasla reflektör kullanılarak oluşturulan basamaklı savak modellerinin daha yüksek miktarda enerji sönümlediğini ve ayrıca tüm modellerde debi değerlerinin artmasıyla birlikte enerji sönümleme oranının azaldığı sonucuna ulaşmışlardır. Araştırmacılar, reflektör kullanımı ile birlikte akıma giren hava miktarındaki artışın enerji sönümleme oranını arttırdığını düşündüklerini ifade etmişlerdir.



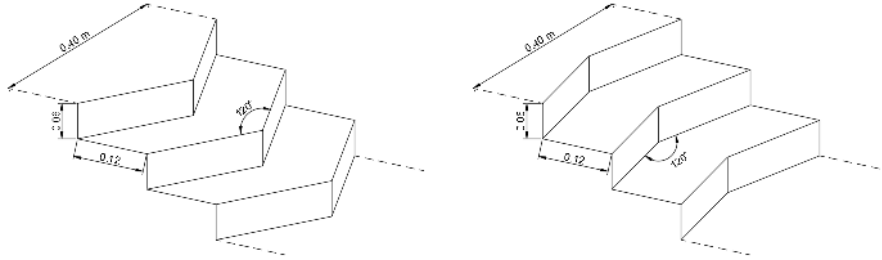
Şekil 2.12. Mero ve Mitchell [13] çalışmalarında kullandıkları modeller

Irzooki vd. [44], Flow-3D yazılımını ve $k-\varepsilon$ türbülans modelini kullanarak basamaklı dolusavaklardaki enerji sönümlenme oranlarını sayısal olarak incelemişlerdir. Araştırmacılar çalışmalarında üç farklı dolusavak yüksekliği (15, 20 ve 25 cm) kullanılmışlardır. Bu modellerin her biri için üç farklı basamak sayısı (5, 10 ve 25) ve üç farklı dolusavak eğimi (0.5, 1 ve 1.25) kullanmışlardır. Bu modellerin her biri için 600-8500 cm³/s arasında değişen sekiz farklı debi kullanarak, toplamda 216 çalışma yürütmüşlerdir. Bazı modellerde, yatay ve düşey doğrultudaki basamaklar üzerindeki basınç dağılımlarını da incelemişlerdir. Fiziksel modellerde sönümlenen enerjinin miktarını, aynı koşullar altında sayısal sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre sayısal ve deneysel sonuçlar arasındaki hata oranının maksimum % 11.13 olduğunu ve sonuçların birbiriyle uyum içerisinde olduğunu gözlemlemişlerdir. Çalışmalarında kullanmış oldukları sınır şartları Şekil 2.13'te verilmiştir.



Şekil 2.13. Irzooki vd.[44] çalışmalarında kullandıkları sayısal modele ait sınır şartları

Bai vd. [45], 0.40 m genişliğinde ve 5.40 m yüksekliğindeki bir kanalda, ilk 28 basamağı geçiş basamağı olarak tasarlanan, 0.12 m genişlikli ve 0.06 m yükseklikli 56 basamaklı 2 farklı modelde (dışbukey ve içbukey) (Şekil 2.14) deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Her iki modelde de 3 farklı birim debi değerinde (0.313, 0.425 ve 0.489 m³/s.m). deneyler gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar yapmış oldukları deneyler neticesinde, her iki modelde de enerji sönümleme oranının klasik basamaklı savaklara oranla daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir.



Şekil 2.14. Bai vd. [45] çalışmalarında kullandıkları modeller

Jabbar [22], klasik basamaklı dolusavaklarda farklı basamak sayılarına ve boyutlarına sahip modellerde farklı debi değerleri kullanarak dolusavak su yüzü profilini ve enerji sönümleme oranlarını sayısal olarak incelemiştir. Sayısal çalışmada Flow-3D yazılımını ve RNG türbülans modelini kullanmışlardır. Çalışma kapsamında 27 adet analiz yürüten araştırmacı, elde ettiği sayısal sonuçları deneysel sonuçlar ile kıyaslaması neticesinde su yüzü profilinde ortalama %3.50 ve enerji sönümleme oranında ise ortalama % 2.75'lik bir hata olduğunu gözlemlemiştir. Ayrıca araştırmacı, basamaklı dolusavaklarda enerji sönümleme oranının basamak sayısı ve akım debisi ile ters orantılı olduğunu vurgulamıştır.

Salmasi ve Samadi [46], basamaklı dolusavaklarda enerji sönümleme, hız vektörleri, kayma gerilmesi ve basınç gibi parametreleri sayısal olarak incelemişler ve çalışmalarında FLUENT yazılımı ile RNG türbülans modelini kullanmışlardır. Araştırmacılar, 0.60 m uzunluklu, 0.30 m genişlikli dolusavakta, basamak uzunluğu 0.20 m ve basamak yüksekliği 0.10 m olan 3 basamaklı modeller oluşturarak, her bir modelde 10 farklı debi için çalışmalarını yürütmüşlerdir. Araştırmacılar, yapmış oldukları sayısal çalışmanın sonuçlarını deneysel sonuçlarla karşılaştırmaları neticesinde yaklaşık %3'lük bir hata tespit etmişlerdir

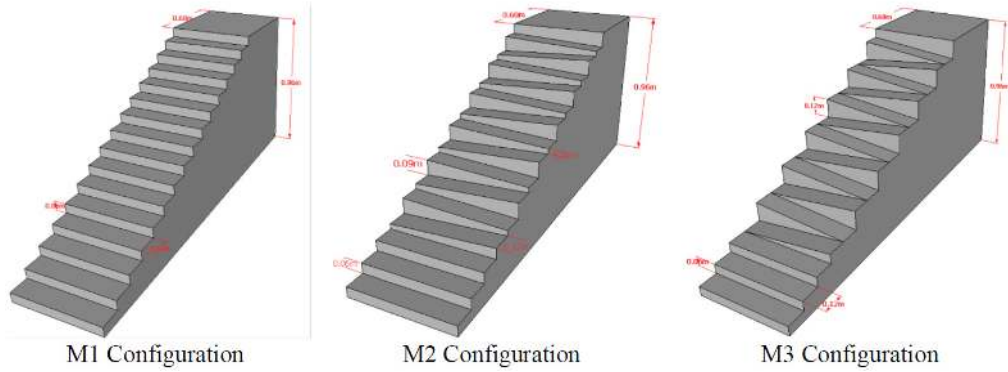
Reeve vd. [47], Farklı geometrili gabyonlardan (klasik, bindirmeli, eğimli, havuzlandırılmış) oluşturulan basamaklı dolusavakların hidrolik özelliklerini RANS (Reynolds Ortalamalı Navier Stokes) denklemlerini iki boyutta çözeabilen NEWFLUME [48] modeli ile sayısal olarak incelemişlerdir. Sayısal modelin doğrulanmasında Wuthrich ve Chanson [49] tarafından gerçekleştirilen deneysel verileri kullanmışlardır. Araştırmacılar yapmış oldukları analizler neticesinde, enerji sönümleme oranı ve akıma hava girişinin başlangıç noktasının konumu bakımından klasik gabyon geometrili basamaklardan oluşturulmuş basamaklı dolusavakların en iyi performansı gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca araştırmacılar, havalanmayan akım bölgesi uzunluğunu bir dizi basamak yüksekliği, dolusavak eğimi, gabyon porozitesi ve farklı çakıl boyutları için araştırmışlardır. Havalanmayan akım bölgesi uzunluğunun, basamak yüksekliği ve dolusavak eğiminin azalmasıyla birlikte arttığını ve boşluk oranı ile dane boyutunun hava girişi başlangıç noktasını çok fazla etkilemediğini ifade etmişlerdir.

Zhang ve Chanson [50], basamaklı dolusavaklarda basamaklara yaptıkları pahların akımdaki hava miktarına ve enerji sönümleme oranlarına etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarını 45° eğimli, 1 metre genişlikli ve basamak boyutları 0.10 m olan 12 basamaklı savakta gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında, 0.057–0.216 m³/s arasında değişen debi değerleri kullanmışlardır. Araştırmacılar, yapmış oldukları çalışmalar sonucunda, pah yapılan modellerin enerji sönümleme değerlerinin daha düşük olduğu ve akımın havalanmaya başlangıç noktasında mansaba doğru bir kayma olduğunu gözlemlemişlerdir.

Torabi vd. [51], 0.55 m derinlikli ve 0,30 m genişlikli kanala yerleştirdikleri basamaklı dolusavak modellerinde, basamaklar üzerine düzensiz ve düzenli şekilde uygulanan enerji kırıcı bloklar ile modellerdeki basamakları pürüzlü hale getirmişlerdir ve bu modellerin enerji sönümleme oranlarını klasik basamaklı dolusavaklarla kıyaslamışlardır. Deneyler sonucunda, nap akımı rejiminde, düzensiz ve düzenli şekilde uygulanan bloklarla pürüzlü hale getirilen basamaklı savak modellerinin enerji sönümleme oranlarının klasik basamaklı savaklara göre yaklaşık olarak %15-20 daha fazla olduğunu ve enerji sönümleme açısından düzenli şekilde uygulanan blok kullanımının, dağınık olarak uygulanan blok kullanımına oranla daha verimli olduğunu gözlemlemişlerdir.

Ashoor ve Riazi [52], sabit yükseklikli (0.10 m) 12 adet basamakta, üniform, üniform olmayan ve yarı üniform basamak uzunlukları kullanarak oluşturulan modellerin enerji sönümleme oranlarını OpenFOAM yazılımı ile sayısal olarak incelemişlerdir. Araştırmacılar yapmış oldukları analizler neticesinde, basamak uzunluğunun artışıyla birlikte akıma dahil olan hava miktarının arttığı, basamak geometrisi 1D:2.2Y oranında tasarlanan modelin enerji sönümleme açısından en başarılı model olduğu, konkav modelden savaklanan akımdaki hava miktarının konveks modeldekinden daha yüksek olduğu ve bundan dolayı konkav modeldeki kavitasyon riskinin daha düşük olduğu sonuçlarına varmışlardır.

Ali ve Yousif [53], enine doğrultuda farklı eğimlere sahip basamaklı dolusavak modelleri ile klasik basamaklı modellerin enerji sönümleme performansını kıyaslamışlardır. Çalışmalarında toplam 3 adet model (Şekil 2.15) ve 0.03-0.005 m³/s arasında değişen debi değerleri kullanmışlardır. Tüm modeller 0.90 m yükseklikli, 0.60 m genişlikli, 1.92 m uzunluklu ve 26.6° eğimlidir. İlk model (M1) 16 adet 0.06 m yatay ve 0.12 m düşey boyutlu basamaklara sahiptir. İkinci ve üçüncü modelde ise ilk basamak ve son üç basamak düz yapıda iken geriye kalan 12 basamak ise enine doğrultuda eğimlidir. İkinci modelde bu eğim 2.84° iken üçüncü modelde 5.86°'dir. Araştırmacılar yapmış oldukları çalışmalar neticesinde, basamakların enine eğimi ile doğru orantılı olarak enerji sönümleme oranının arttığını, en büyük enerji sönümlemenin 5.7° eğimli modellerde meydana geldiğini ve her bir modelde debi değerleri arttıkça enerji sönümleme oranının azaldığını gözlemlemişlerdir.



Şekil 2.15. Ali ve Yousif [53] çalışmalarında kullandıkları modeller

Güven ve Mahmood [54], basamaklı dolusavaklardaki ani eğim değişiminin akım özelliklerine (akıma giren hava miktarı, hız dağılımı ve basınç dağılımı) etkisini, sıçramalı akım rejiminde iki farklı model ve iki farklı debi kullanarak Flow-3D yazılımı ile sayısal olarak incelemişlerdir. Akımdaki türbülansı modellemek için RNG türbülans yöntemini kullanmışlardır. Sayısal modelden elde ettikleri sonuçları, Ostad Mirza vd. [55] tarafından yapılan deneysel çalışma ile karşılaştırmışlardır. Araştırmacılar yapmış oldukları analizler neticesinde, sayısal sonuçlar ile

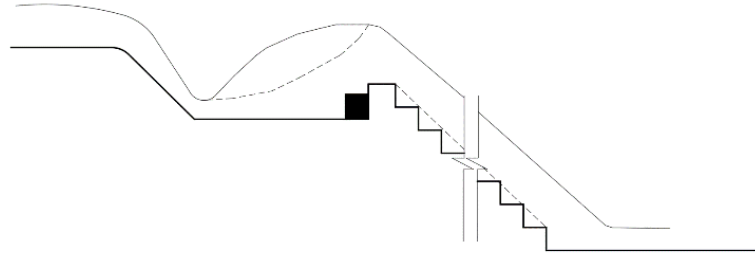
deneysel sonuçların oldukça uyumlu olduğu ve deneysel sonuçlarda olduğu gibi sayısal sonuçlarda da, ani eğim değişiminden dolayı akıma giren hava miktarı, hız dağılımı ve basınç dağılımının büyük ölçüde etkilendiğini gözlemlemişlerdir.

Wu vd. [56], hem klasik basamaklı dolusavaklarda hem de dolusavak boşaltım kanalı üzerinde havalandırma alanı oluşturulan basamaklı dolusavaklarda (Şekil 2.16), düz basamaklar, farklı derecelerde eğimli basamaklar ve farklı yüksekliklerde eşikler kullanılarak havuzlandırılmış basamaklar kullanarak 8 farklı modelde enerji sönümleme oranlarını incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, havalandırma alanı oluşturulan basamaklı dolusavakların klasik basamaklı dolusavaklara oranla daha fazla enerji sönümlendiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca havalandırma alanlı basamaklı dolusavaklarda, eğimli ve havuzlandırılmış basamak kullanımının özellikle büyük debi değerlerinde daha fazla enerji sönümleyebildiğini vurgulamışlardır.



Şekil 2.16. Wu vd. [56] çalışmalarında kullandıkları modeller

Zhou vd. [57], klasik bir basamaklı dolusavağın giriş kısmında bir havalandırma alanı oluşturarak akımın hidrolik sıçrama ile enerjisinin bir kısmını sönümledikten sonra basamaklı dolusavağa geçiş yapmasını sağlayıp bu modelin (Şekil 2.17) enerji sönümle oranını klasik basamaklı dolusavakla kıyaslamışlardır. Araştırmacılar yapmış oldukları çalışmalar neticesinde, havalandırma alanı kullanılan basamaklı savaklarda meydana gelen hidrolik sıçramadan dolayı akım derinliğinin klasik basamaklı savağa kıyasla daha kısa bir zamanda uniform olduğunu belirtmişlerdir. Dolayısıyla, giriş kısmında hidrolik sıçrama oluşan basamaklı dolusavaklardaki enerji sönümleme oranının, özellikle büyük debi değerlerinde, klasik basamaklı savaklara oranla daha fazla olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 2.17. Zhou vd. [57] çalışmalarında kullandıkları model

İkincioğulları [25], basamak uçlarına eklediği ters basamaklı eşiklerin, akımın enerjisini sönümleme oranına etkisini Flow-3D yazılımı ve $k-\varepsilon$ türbülans modeli ile sayısal olarak incelemiştir. Araştırmacı, çalışmalarında üç farklı model ve altı farklı debi kullanarak toplam 18 adet sayısal analiz yürütmüştür. Elde ettiği sonuçlara göre, her bir basamağın ucuna eklenen ters basamak geometrilili eşiklerin, sıçramalı akım şartlarında, klasik basamaklı savaklara göre %18'e kadar daha fazla enerji sönümleyebildiğini, bu değerin nap akımı rejimine geçildikçe azaldığını gözlemlemiştir.

Ghaderi vd. [58], klasik basamaklı dolusavaklar ile normal ve çentikli eşikler kullanılarak havuzlandırılmış basamaklı dolusavakların akım özelliklerini Flow-3D yazılımı ve RNG türbülans modeli ile incelemiştir. Sayısal çalışmanın doğrulanmasında Felder vd. [37] tarafından kullanılan fiziksel model sonuçları kullanılmıştır. 0.52 m genişlikli bu modelde, 0.10 m düşey ve 0,2 m yatay uzunluklu toplam 10 basamak bulunmaktadır. Araştırmacılar yapmış oldukları analizler neticesinde, tüm modeller arasında en iyi enerji sönümleme performansının klasik basamaklı dolusavaklarda olduğunu, çentikli eşikler ile havuzlandırılmış modellerde akımın kararlı olduğunu ve çentikli modellerin normal olarak havuzlandırılmış modellere göre yaklaşık %5.80 oranında daha fazla enerji sönümleyebildiğini gözlemlemiştir.

İkincioğulları [59], trapez basamaklı dolusavakların, enerji sönümleme performanslarını Flow-3D yazılımını ve $k-\varepsilon$ türbülans modelini kullanarak sayısal olarak incelemiştir. Dört farklı model ve üç farklı debi değeri ile toplam 12 analiz gerçekleştirmiştir. Araştırmacı sayısal modelini doğrulamak için Mero ve Mitchell [13] tarafından yürütülen klasik basamaklı dolusavak deney sonuçlarını kullanmıştır. Araştırmacı yapmış olduğu analizler neticesinde, debi değerlerinin artışıyla birlikte enerji sönümleme oranının azaldığı, trapez derinliği ve trapezin alt taban uzunluğu artışının enerji sönümleme oranını artırdığı ve trapez basamaklı dolusavakların klasik basamaklı dolusavaklara oranla %30'a kadar daha fazla enerji sönümleyebildiğini gözlemlemiştir.

Saqib vd. [60], basamaklı dolusavaklarda boşaltım kanalı bitiminde yer alan düşüm havuzunun klasik veya farklı eğrilik çaplarında kavisli olmasının akım özelliklerine olan etkisini sayısal olarak incelemiştir. Araştırmacılar, Tabbara vd. [33] tarafından yapılan çalışmanın sonuçlarını Flow-3D yazılımı ve RNG türbülans modelini kullanarak doğruladıktan sonra Pakistan

Islamad'ta bulunan Khonpur Barajı basamaklı dolusavağını Froude benzeşimi ile 1/50 ölçekte sayısal olarak modellemişlerdir. Bu barajın dolusavak boşaltım kanalı düşüm havuzunu klasik veya farklı açılarda (30, 60 ve 90) kavisli olması durumlarındaki akım özelliklerini (hız profili, basınç profili; enerji sönümleme oranları) 0.0208 ile 0.068 aralığındaki 5 farklı debi için incelemişlerdir. Araştırmacılar yapmış oldukları analizler neticesinde, basamaklı dolusavaklarda kavisli düşüm havuzu kullanımının enerji sönümleme oranında kayda değer bir artış sağlamadığını, tüm modellerde debi değerleri arttıkça sönümleme oranının azaldığını ve klasik düşüm havuzlu basamaklı dolusavaklarda, kavislilere göre daha fazla negatif basınç oluştuğunu ve enerji sönümleme oranları bütün modellerde aynı olduğundan basamaklı dolusavaklarda kavisli düşüm havuzu kullanımının kavitasyon riskini azaltabileceğini vurgulamışlardır.

Ma vd. [61], aralıklı olarak havuzlandırılmış basamaklı dolusavakların enerji sönümleme performanslarını sayısal olarak incelemişlerdir. Sayısal analizlerinde VOF yöntemi ve RNG türbülans modelin kullanmışlardır. Sayısal sonuçların doğrulanmasında Felder vd. [37] tarafından yapılan çalışmayı dikkate alarak, basamakların havuzlandırılmasında dört farklı eşik yüksekliği (0.025, 0.05, 0.075 ve 0.1 m) kullanmışlardır. Araştırmacılar yapmış oldukları analizler neticesinde, aralıklı olarak havuzlandırılmış basamaklı dolusavakların, normal havuzlandırılmış basamaklı dolusavaklar ve klasik basamaklı dolusavaklara göre daha yüksek miktarda enerji sönümlediğini gözlemlemişlerdir.

Roushangar vd. [62], basamakları üzerine üçgen prizmatik bloklar yerleştirilmiş basamaklı dolusavaklarda, enerji sönümleme oranları, basamak yüzeylerindeki hız dağılımları ve basınç profilleri gibi parametreleri deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında üçgen prizmatik blokların farklı şekil ve yerleşimleri ile elde edilen 9 farklı model kullanmışlardır. Sayısal modellemede Flow-3D yazılımı ve $k-\varepsilon$ ile RNG türbülans modellerini kullanmışlardır. Araştırmacılar yapmış oldukları çalışmalar neticesinde, Flow-3D yazılımından elde edilen sonuçların deney sonuçlarına oldukça yakın olduğunu, basamaklar üzerine yerleştirilen üçgen prizmatik blokların kullanımının kavitasyon etkilerini azaltmada etkili olabileceğini ve klasik basamaklı dolusavaklara göre enerji sönümleme oranını %54 civarında daha fazla enerji sönümleyebildiğini gözlemlemişlerdir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD)

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), akışkan akımını ifade eden Navier-Stokes ve Süreklilik denklemleri gibi temel denklemler ile akışkanlar mekaniği problemlerini analiz edebilen bir bilim dalıdır. Son yıllarda bilgisayar teknolojilerinde meydana gelen hızlı gelişmelerle birlikte birçok HAD yazılımı geliştirilmiştir. Bu yazılımlar birçok bilim dalında olduğu gibi hidrolik mühendisliğinde de yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [63].

Günümüzde HAD yöntemi ile geliştirilmiş birçok yazılım mevcuttur. Bu yazılımlar, akım alanını ve sınır koşullarını kolayca tanımlamak için gelişmiş kullanıcı arayüzlerine sahiptir. Tüm HAD yazılımları bir problemi çözerken üç aşamadan geçirir. Bu aşamalar sırasıyla ön süreç (pre-processing), analiz (processing) ve son işlemci (post-processing) aşamalarıdır. İlk olarak, analizlerde kullanılacak olan akışkanın hidrolik parametreleri programa tanıtılır. Ardından hidrolik model ve çözüm ağı yapısı oluşturulur. Çözüm ağının kalitesi, sonuçların doğruluğunu etkilemektedir. Çözüm ağı boyutları küçüldükçe daha gerçekçi ve hassas sonuçlar elde edilirken analiz süreci artmaktadır. Fakat bir çözüm ağı boyutları belirli bir aşamadan sonra küçültülse bile sonuçlar üzerinde etkisi kalmamaktadır. Bu nedenle analiz süresinin gereksiz uzamaması için optimum çözüm ağı boyutunun belirlenmesi, sayısal modellemede önemli bir aşamadır. Çözüm ağı için optimum boyutlar seçildikten sonra akım bölgesinin sınır şartları belirlenir, akım koşulları ve özelliklerini tanımlayan parametrelerin değerleri girilir. Daha sonra türbülans modelinin, çözüm yönteminin ve yakınsama kriterinin belirlenmesiyle ön süreç aşaması tamamlanır. Analiz aşamasında, her bir sonlu elemanda akışkan akımını yöneten denklemlerle akım parametreleri hesaplanır. Simülasyon sürecinin ardından son süreç kısmında analiz sonuçları alınarak görselleştirme yapılır. [63–65].

HAD yöntemi ile yapılan sayısal modellemeler sayesinde fiziksel modellemelere kıyasla hem zaman hem de maliyet açısından tasarruf sağlanmaktadır. Aynı zamanda fiziksel modelleme ile oluşturulması mümkün olmayan veya zor olan modeller sayısal modellemeler ile oldukça rahat bir şekilde oluşturulabilir. Fakat HAD yazılımlarında sayısal model, incelenen problem için uygun bir şekilde oluşturulamazsa elde edilen sonuçlar yanıltıcı olabilir. Bu nedenle sayısal analiz sonuçlarının deneysel sonuçlar ile doğrulanması gerekmektedir [63, 65].

3.2. Akışkan Akımının Temel Denklemleri

3.2.1. Süreklilik Denklemi

Üç boyutlu, sıkışmaz akışkanlar için kullanılan süreklilik denklemi, Eşitlik (3.1) ile ifade edilebilir.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.1)$$

Burada u ; x yönündeki hızı, v ; y yönündeki hızı ve w ; z yönündeki hızı ifade etmektedir.

Türbülanslı akışkanlarda $u = \bar{u} + u'$ yerine yazılarak;

$$\frac{\partial}{\partial x} (\bar{u} + u') + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{v} + v') + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{w} + w') = 0 \quad (3.2)$$

denklemi elde edilir. Burada $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$: x, y , ve z yönündeki zaman ortalama hızları, u', v', w' ise türbülans çalkantı hızlarını ifade etmektedir. Buradan zaman ortalama süreklilik denklemi;

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (3.3)$$

şeklinde yazılabilir.

3.2.2. Navier Stokes Denklemi

Navier-Stokes denklemleri, sıkıştırılmaz akışkan akımının hareketini tanımlamak için kullanılan akışkanlar mekaniğinin temel bünye denklemleridir. Üç boyutlu bir akış için Navier-Stokes denklemleri şöyle ifade edilebilir,

x yönünde;

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + X + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (3.4)$$

y yönünde;

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + Y + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3.5)$$

z yönünde;

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + Z + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (3.6)$$

Bu denklemler Eşitlik (3.7)'te ise vektörel formda gösterilmiştir.

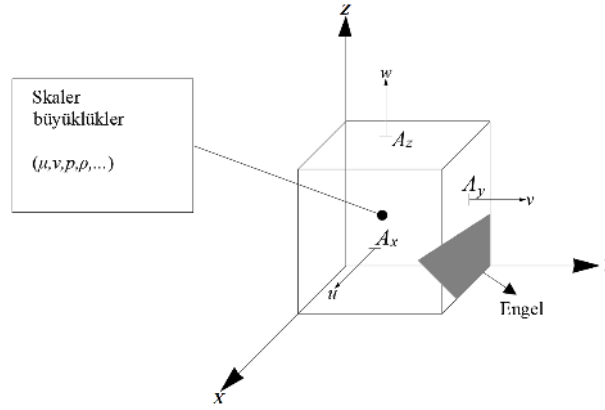
$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \text{grad } \vec{V} = - \frac{1}{\rho} \text{grad } p + \vec{F} + \nu \nabla^2 \vec{V} \quad (3.7)$$

Yukarıdaki eşitliklerde (Eşitlik 3.4, 3.5 ve 3.6), x , y ve z kartezyen koordinatlarına göre Navier-Stokes denklemlerinin açılımları verilmiştir. Burada ρ , akışkanın özgül kütlesi, p , basınç ve ν , kinematik viskozitedir. Bu denklemlerde belirtilen X , Y ve Z ilgili eksenlerdeki kütleli ivmeyi ifade etmektedir. Düşey eksen (Z eksen) yerçekimi ivmesi etki ettiğinden $Z = 9.81 \text{ m/s}^2$ olarak alınırken diğer eksenlerde düşey yük olmadığından bu değerlerin denkleme etkisi olmamaktadır.

3.3. Kullanılan HAD Yazılımı (Flow-3D)

Flow-3D, Flow Science Inc. tarafından, akışkanların dinamik hareketlerini sayısal olarak inceleyen ve birçok bilim dalı (işlem mühendisliği, havacılık ve uzay, hidrolik mühendisliği, çevre, deniz bilimleri, vd.) için geliştirilmiş bir yazılımdır. Bu yazılım en genel haldeki enerji, süreklilik ve momentum temel kanunlarına dayalı olacak şekilde geliştirildiğinden neredeyse tüm akışkanlar mekaniği problemlerine uygulanabilmektedir. Bu yazılım ile akışkanların 3 boyutlu ve 2 boyutlu hareketlerini, akışkanların akımını ifade eden Navier-Stokes ve süreklilik denklemleri ile türbülanslı akımlarda çeşitli türbülans kapama denklemleri kullanılarak analiz edebilir [66, 67].

Flow-3D yazılımı, Reynolds Ortalamalı Navier Stokes (RANS) ve süreklilik denklemlerinin çözümünde sonlu hacimler yöntemini kullanmaktadır. Flow-3D yazılımında sonlu hacim yönteminin geliştirilmiş bir versiyonu olan ve serbest yüzey akışlarının son derece hassas bir şekilde modellenmesini sağlayan TruVOF kullanılmaktadır [65, 66]. Bu yazılımda hesaplamalar, dikdörtgen geometrilili uniform hücrelerden oluşan çözüm ağlarında yürütülmektedir. Bu yapıdaki bir ağ başlangıçta bir sorun veya kısıtlama gibi gözükse de kolay üretimi, daha az miktarda hafızaya ihtiyaç duyması ve VOF ile FAVOR gibi iki kullanışlı yöntemin kullanılması nedenleriyle bu çözüm ağı tipinin kullanımı bir avantaj oluşturmaktadır [67]. Çözüm ağlarında bulunan kontrol hacmi olarak da ifade edilen hücrelerin her birinin merkezinde akışkana ait yoğunluk, basınç, viskozite gibi skaler büyüklükler yer alırken, hücre yüzeylerinde ise sadece hızlar (u , v , w) hesaba katılmaktadır (Şekil 3.1) [66].



Şekil 3.1. Bir çözüm hücresine etkiyen değişkenler [66]

3.3.1. FAVOR (*Fractional area/volume obstacle resapantion*) ve VOF (*Volume of Fluid*) Yöntemi

Bir hidrolik problemin sayısal olarak modellenmesinde çözüm bulunması gereken iki temel unsur vardır. Bunlardan birisi problemde serbest su seviyesinin belirlenmesi, diğeri ise mevcut katı sınırların yazılıma tanıtılmasıdır. Flow-3D yazılımında bu problemler VOF(*Volume of Fluid*) ve FAVOR (*Fractional area/volume obstacle resapantion*) yöntemleri ile çözülmektedir [64].

Flow-3D yazılımında, problem geometrisi diğeri yazılımların aksine, bazı hücrelerin kapatılmasıyla elde edilmektedir. FAVOR olarak adlandırılan bu yöntemde, kontrol hacminde bulunan bir engelin kontrol hacminin ne kadarını kapladığı ve bu engelin kontrol hacminin her bir yüzeyinde ne kadar alan kapattığı hesaplanarak elde edilen bu iki değer oranlanır. Bu metot aslında problemde bulunan engelleri tanımlamak için kullanılan bir boşluk tekniğidir. Çözüm hücresi tamamen boş ise bu değer 1, tamamen engel ile dolu ise bu değer 0 olur. Eğer bir hücre kısmen engel ile dolu ise bu değer engelin hücrede kapladığı hacime bağlı olarak 0 ile 1 arasında bir değer alır. Bu yöntem sayesinde karmaşık geometrili modeller kaba çözüm ağırları ile modellenirse bile çözüm hassasiyeti sağlanmaktadır [66].

Flow-3D yazılımında, su-hava arakesitine sahip serbest yüzeylerin belirlenmesinde ise akışkan hacmi (VOF) yöntemi kullanılmaktadır. VOF yöntemi ile çözüm hücrelerinin boş, tamamen veya kısmen akışkan ile dolu olması durumları belirlenir. Örneğin, hücre tamamen akışkanla dolu ise 1 değerini almakta, tamamen boş ise 0 değerini almakta ve kısmen dolu ise akışkanın hücrede kapladığı hacimce yüzdeye göre 0 ile 1 arasında değer alacaktır. Serbest yüzey eğer eğimli ise bu hücredeki yüzeyin eğimini ve hücrenin yerini belirleyebilmek amacıyla ilgili hücreyi çevreleyen hücreleri dikkate alan bir algoritma kullanılmaktadır. Serbest yüzey, VOF yöntemi ile üç aşamada incelenmektedir. İlk olarak serbest yüzeyin yeri tespit edilir. Ardından bu serbest yüzey, su ve hava arasında keskin bir ara yüzey olarak belirlenir. Son olarak bu ara yüzeye

sınır şartları uygulanır. Ara yüzey üzerinde sıfır kayma gerilmesi ve sabit basınç koşulları sınır şartları olarak uygulanır [66].

3.3.2. Türbülans Modelleri

Türbülans, akımı stabilize etmek için yeterli viskoz kuvvetler olmadığında meydana gelen, akışkanların kararsız ve düzensiz hareketidir. Yüksek Reynolds sayılarında, akımda oluşan doğal kararsızlıklar sönümlenmez ve çeşitli boyutlarda girdapların oluşumuyla kendilerini gösterirler. Doğadaki birçok akım türbülanslıdır, bu nedenle türbülansın sayısal akım modellemelerinde de göz ardı edilmesi mümkün değildir. İdeal olarak, kütle ve momentum korunum denklemleri ile türbülanslı dalgalanmaların tamamı simüle edilebilir olsa da bu durum, sayısal modellemede kullanılan ağ çözünürlüğünün bu tür ayrıntıları yakalamak için yeterli olması durumunda mümkündür. Ancak, bilgisayar belleği ve işlem süresi sınırlamaları nedeniyle yüksek çözünürlükte modelleme genellikle mümkün olmamaktadır. Bu nedenle, türbülansın ortalama akım özellikleri üzerindeki etkilerini tanımlayan basitleştirilmiş modellemeler kullanılmaktadır [68].

Flow-3D yazılımında 6 adet türbülans modeli bulunmaktadır. Bu modeller;

- Tek denklemlili (k) türbülans enerji modeli
- Büyük Eddy Simülasyonu (LES) modeli
- Renormalized Group (RNG) modeli
- İki denklemlili ($k-\varepsilon$ ve $k-\omega$) modelleri
- Prandtl karıştırma uzunluğu modeli

şeklinde sıralanabilir [68].

Prandtl karıştırma uzunluğu modeli, üç boyutlu türbülans etkilerini tanımlamaya yönelik olarak geliştirilen ilk modellerden biridir. En basit modeldir ve günümüzde yaygın olarak kullanılmamaktadır [69].

Tek denklemlili (k) türbülans enerji modeli zaman ortalamalı türbülans kinetik enerjiyi (k) hesaplar ve tüm konumlarda türbülanslı karıştırma uzunluğunun (TLEN-Turbulent Mixing Length) bilinmesini gerektirir. TLEN genellikle önceden bilinmediğinden, bu model karmaşık yapıya sahip akımları modellemek için uygun değildir [69].

İki denklemlili $k-\varepsilon$ modeli, türbülanslı kinetik enerji (k) ve sönümlenme oranını (ε) hesaplayan ve dinamik olarak TLEN'i bulan bir modeldir. Bu modelin birçok farklı akımda kullanımı uygun bulunmuştur [70, 71]. Renormalized Group (RNG) modeli ise iki denklemlili $k-\varepsilon$ modelinin geliştirilmiş bir versiyonudur ve çoğunlukla endüstriyel problemlerde kullanılması önerilmektedir [69, 72, 73].

İki denklemlili $k-\omega$ modelinde [74–76] ikinci değişken ε olarak değil, $\omega \equiv \varepsilon/k$ olarak tanımlanır [69, 74–77].

LES modeli, ortalama türbülanslı kinetik enerjiyi temsil etmek için skaler değer kullanmak yerine türbülanslı dalgalanmaların birçoğunu doğrudan çözerek türbülanslı akımlar hakkında kapsamlı veriler elde etmektedir. İki denklemlili modellere ($k-\varepsilon$ ve $k-\omega$) oranla çok daha kaliteli çözüm ağırları ve yüksek bilgisayar donanımı gerektirir [69].

Bu tez kapsamında literatürde yaygın olarak kullanılan $k-\varepsilon$, $k-\omega$, RNG ve LES türbülans modelleri kullanılmıştır.

3.3.2.1. Tek denklemlili (k) türbülans enerji modeli

Tek denklemlili türbülans modeli, akımdaki türbülanslı hız dalgalanmalarından kaynaklı kinetik enerji (türbülanslı kinetik enerji) için bir taşıma denkleminde oluşur [68].

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (3.8)$$

Burada, u' , v' , w' türbülanslı çalkantılardan kaynaklı akım hızının x, y, z bileşenleridir. Türbülans yoğunluğu aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$I = \sqrt{\frac{k}{K}} \quad (3.9)$$

Burada $\bar{K}$, etki alanındaki kütle ortalamalı ortalama kinetik enerjidir.

Bu modelde türbülanslı kinetik enerji (k) için taşıma denklemi, türbülanslı kinetik enerjinin taşınımı ve difüzyonunu, kesme ve kaldırma kuvveti etkilerinden kaynaklanan türbülanslı kinetik enerjinin üretimini, türbülanslı girdaplar içindeki viskoz kayıplardan kaynaklanan difüzyonu ve sönmeyi içerir. Kaldırma kuvveti oluşumu yalnızca akımda üniform olmayan yoğunlukta bir akışkan varsa meydana gelir ve yerçekimi ile atalet dışı ivmelerin etkilerini içerir. Taşıma denklemi:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial k}{\partial x} + v A_y \frac{\partial k}{\partial y} + w A_z \frac{\partial k}{\partial z} \right\} = P_T + G_T + Diff_k - \varepsilon \quad (3.10)$$

Burada, V_F , A_x , A_y ve A_z FAVOR'un fonksiyonlarıdır, k türbülansın kinetik enerjisi olup, P_T ise türbülans kinetik enerjisinin oluşumunu ifade etmektedir [68].

$$P_T = C_{SPRO} \left\{ \frac{\mu}{\rho V_F} \right\} \left\{ \begin{aligned} & 2A_x \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2A_y \left(R \frac{\partial v}{\partial y} + \xi \frac{u}{x} \right)^2 + 2A_z \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \\ & \left(\frac{\partial v}{\partial x} + R \frac{\partial u}{\partial y} - \xi \frac{v}{x} \right) \left[A_x \frac{\partial y}{\partial x} + A_y \left(R \frac{\partial u}{\partial y} - \xi \frac{v}{x} \right) \right] + \\ & \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \left(A_z \frac{\partial u}{\partial z} + A_x \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + R \frac{\partial w}{\partial y} \right) \left(A_z \frac{\partial v}{\partial z} + A_y R \frac{\partial w}{\partial y} \right) \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

Burada, CSPRO varsayılan değeri 1 olan bir türbülans parametresi olup, R ve ξ silindirik koordinat sistemi ile ilgili parametrelerdir.

Kaldırma kuvveti oluşumunu ifade eden denklem ise aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$G_T = -CRHO \left(\frac{\mu}{\rho^3} \right) \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{\partial P}{\partial x} + R^2 \frac{\partial \rho}{\partial y} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial \rho}{\partial z} \frac{\partial P}{\partial z} \right) \quad (3.12)$$

Burada, μ moleküler dinamik viskoziteyi, ρ akışkan yoğunluğunu, P basıncı ifade eder. Başka bir türbülans parametresi olan CRHO'nun varsayılan değeri 0'dır. Fakat termal su yüzeyinde bulunan akışkan problemleri için yaklaşık değeri 2.5'tur [68].

Difüzyon terimi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$Diff_k = \frac{1}{v_F} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(u_k A_x \frac{\partial k}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left(u_k A_y R \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(u_k A_z \frac{\partial k}{\partial z} \right) + \xi \frac{u_k A_x k}{x} \right] \quad (3.13)$$

Burada, u_k k 'nin difüzyon katsayısıdır ve türbülans viskozitesinin yerel değerine göre hesaplanır. Kullanıcı tarafından belirlenen RMTKE parametresi, viskozite katsayısıdır ve türbülans katsayısını belirlemede kullanılır (Varsayılan değeri 1'dir.).

Tek denklemlili modelde türbülanslı enerjinin sönümle oranı ε , türbülanslı kinetik enerji k ile ifade edilmektedir.

$$\varepsilon = CNU^{3/4} \frac{k^{3/2}}{TLEN} \quad (3.14)$$

Burada, CNU varsayılan değeri 0.09 olan bir parametredir. Flow-3D TLEN değerini varsayılan olarak, en küçük etki alanı boyutunun %7'si olarak seçer. Fard ve Boyaghchi [78] tarafından ise bu değer yerine TLEN değerinin hidrolik çapın %7'si olmasını önermektedirler [68].

3.3.2.2. İki Denklemlili k - ε türbülans modeli

Tek denklemlili (k) türbülans enerji modeline göre daha karmaşık bir yapıya sahip olan ve birçok akım türünde yaygın bir şekilde kullanılan k - ε modeli, türbülanslı kinetik enerji k ve enerji sönümleme oranı ε için kullanılan iki taşıma denkleminde oluşur [68, 70, 71].

Bu modelde türbülanslı kinetik enerjinin sönümleme oranı (ε) için taşıma denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{1}{v_F} \left\{ u A_x \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + w A_z \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right\} = \frac{CDIS1 \cdot \varepsilon}{k} (P_T + CDIS3 \cdot G_T) + Diff_\varepsilon - CDIS2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.15)$$

Burada, CDIS1, CDIS2 ve CDIS3 boyutsuz ve kullanıcı tarafından ayarlanabilen parametrelerdir ve k - ε modeli için sırasıyla 1.44, 1.92 ve 0.20 değerlerine sahiptirler. Akım alanının büyük kısmında, bu modelde Eşitlik (3.15), Eşitlik (3.14)'ün yerine kullanılır ve böylece etki alanı boyunca kullanıcı tarafından belirlenen bir TLEN değerine olan ihtiyacı azaltır [68].

Difüzyon sönümleme ($Diff_\varepsilon$) aşağıdaki şekilde ifade edilebilir,

$$Diff_\varepsilon = \frac{1}{v_F} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(u_\varepsilon A_x \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left(u_\varepsilon A_y R \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(u_\varepsilon A_z \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + \xi \frac{u_\varepsilon A_x \varepsilon}{x} \right] \quad (3.16)$$

3.3.2.3. RNG türbülans modeli

RNG türbülans modelinde, iki denklemlili k - ε modelindeki denklemlere benzer denklemler kullanılmaktadır. Ancak iki denklemlili k - ε modelinde ampirik olarak bulunan denklem sabitleri, RNG modelinde açıkça türetilmiştir. Genel olarak, RNG modeli k - ε modeline kıyasla daha geniş uygulama alanına sahiptir. Özellikle, RNG modelinin düşük yoğunluklu türbülanslı akımları daha doğru bir şekilde tanımladığı bilinmektedir. Ayrıca, RMTKE, CDIS1 ve CNU'nun varsayılan değerleri k - ε modelinde kullanılanlardan farklıdır; bu değerler sırasıyla 1.39, 1.42 ve 0.085'tir. CDIS2 türbülanslı kinetik enerji (k) ve türbülans oluşumu (P_T) terimlerinden hesaplanmaktadır [68].

Tüm türbülans modellerinde, kinematik türbülans viskozitesi aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\nu_T = CNU \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.17)$$

burada ν_T , türbülanslı kinematik viskozitedir.

Hem iki denklemlili k - ε hem de RNG modellerinin sayısal zorluğu, ε değerini minimum bir değerde sınırlamaya gerek duymalarıdır. Eşitlik (3.15) sıfıra yakın ε değerleri oluşturabilir ve fiziksel olarak k 'nin bu gibi durumlarda da sıfıra yaklaşması gerekse de, sayısal nedenlerden dolayı bunu yapamayabilir ve Eşitlik (3.17) 'de fiziksel olarak mümkün olmayacak derecede büyük ν_T değerlerine neden olabilir. Bu probleme çözüm üretebilmek için, ε değeri, Eşitlik (3.18) ile sınırlandırılmıştır [68].

$$\varepsilon_{min} = CNU^{3/4} \frac{k^{3/2}}{TLEN} \quad (3.18)$$

Burada, TLEN değeri, kullanıcı tarafından tanımlanabilir veya otomatik olarak sınırlandırılır [68].

3.3.2.4. k - ω türbülans modeli

Belirli akış koşullarında, özellikle duvar sınırlarına yakın jetler ve çevrıntiler gibi akım yönünde basınç gradyanlarına sahip akımları modellemede k - ω türbülans modeli, k - ε veya RNG modellerine kıyasla daha başarılıdır. $\omega \equiv \varepsilon/k$ değişkeni 1/zaman boyutundadır. k - ω aşağıdaki Eşitlikler (Eşitlik 3.19-3.26) ile ifade edilebilir [68, 75, 77] :

$$\frac{\partial k}{\partial T} + \frac{1}{v_F} \left\{ u A_x \frac{\partial k}{\partial x} + v A_y \frac{\partial k}{\partial y} + w A_z \frac{\partial k}{\partial z} \right\} = P_T + G_T + Diff_T - \beta * k \omega \quad (3.19)$$

Burada:

$$\beta^* = \beta_0^* f_{\beta^*} \quad (3.20)$$

Eşitlik 3.20'de $\beta_0^* = 0.09$ ' dur ve

$$x_k \leq 0 \text{ ise } f_{\beta^*} = 1 \text{ ve } x_k > 0 \text{ ise } f_{\beta^*} = \frac{1+680x_k^2}{1+400x_k^2} \quad (3.21)$$

burada,

$$x_k \equiv \frac{1}{\omega^3} \left\{ \frac{\partial k}{\partial x} \frac{\partial \omega_T}{\partial x} + \frac{\partial k}{\partial y} \frac{\partial \omega_T}{\partial y} + \frac{\partial k}{\partial z} \frac{\partial \omega_T}{\partial z} \right\} \quad (3.22)$$

Difüzyon terimi RMTKE 1/2'dir.

ω için taşınım denklemi Eşitlik (3.23) ile ifade edilebilir

$$\frac{\partial \omega_T}{\partial T} + \frac{1}{v_F} \left\{ u A_x \frac{\partial \omega_T}{\partial x} + v A_y \frac{\partial \omega_T}{\partial y} + w A_z \frac{\partial \omega_T}{\partial z} \right\} = \alpha \frac{\omega_T}{k_T} (P_T + \text{CDIS3} \cdot G_T + \text{Diff}_\omega - \beta \omega_T^2) \quad (3.23)$$

burada, $\alpha = 13/25$, RMDKTE=1/2 ve

$$\beta = \beta_0 f_{\beta} \quad (3.24)$$

burada, $\beta_0 = 9/125$ ' dir ve

$$f_{\beta} = \frac{1+70x_w}{1+80x_w} \quad (3.25)$$

burada,

$$x_w \equiv \left| \frac{\Omega_{ij} \Omega_{jk} S_{ki}}{(\beta_0^* \omega)^3} \right| \quad (3.26)$$

burada, Ω_{ij} ve S_{ij} sırasıyla ortalama dönüş ve ortalama deformasyon hızı tensörleridir. $k - \omega$ türbülans modelinde, $\varepsilon = \beta^* \omega k$ ve $v_T = k/\omega$ olarak ifade edilir [68].

Türbülans modellerinin temel amacı, türbülanslı dalgalanmaların ortalama akış miktarları üzerindeki etkisini tahmin etmeyi sağlayan bir mekanizma oluşturmaktır. Bu genellikle ortalama kütle, momentum ve enerji aktarımı denklemlerinde ek difüzyon terimlerinin kullanılmasıyla sağlanmaktadır. Türbülans momentumun difüzyonunu arttırdığından, viskoziteyi azımsanmayacak derecede artırmaktadır. Eşitlik (3.27)'de ifade edildiği gibi denklemlerde kullanılan dinamik viskozite katsayısının, moleküler ve türbülanslı viskozitelerin toplamı olduğu varsayılmaktadır [68].

$$\mu = \rho(\nu + \nu_T) \quad (3.27)$$

3.3.2.5. LES türbülans modeli

Bu modelin temel fikri, hesaplamalı ağ kullanılarak çözülebilen tüm türbülanslı akım yapılarının doğrudan hesaplanması ve çözümlenemeyecek kadar küçük olanların ise yaklaşık olarak (modellenerek, tahmin edilerek) hesaplanması gerektiğidir [68, 79]. LES modelini kullanırken, modelin doğası gereği üç boyutlu ve zamana bağlı olduğuna dikkat edilmelidir. Ayrıca, dalgalanmalar başlatılmalı ve/veya giriş sınırlarında tanımlanmalıdır. LES modeli diğer modellere kıyasla daha küçük boyutlu çözüm ağları ve dolayısıyla daha yüksek CPU kullanımı gerektirmektedir ancak LES modelinde Reynolds ortalamasına dayalı modellere oranla daha kapsamlı sonuçlar elde edilmektedir. Örneğin, büyük yapıların etrafındaki türbülanslı akımı hesaplamak için LES modeli kullanıldığında, yalnızca ortalama rüzgar gerilmeleri değil, aynı zamanda türbülanslı akımla ilişkili kuvvet dalgalanmalarının büyüklüğü ve standart sapması da elde edilebilir.

Smagorinsky [79], uzunluk ölçeği için, bir çözüm ağı hücresinin boyutlarının geometrik ortalamasını kullanır,

$$L = (\delta_x \delta_y \delta_z)^{1/3} \quad (3.28)$$

ve hız dalgalanmalarını, ortalama kayma gerilmesinin L katı büyüklüğünde ölçeklendirir. Bu nicelikler, LES kinematik girdap viskozitesinde birleştirilir,

$$\nu_T = (cL)^2 \sqrt{2e_{ij}2e_{ij}} \quad (3.29)$$

Burada, c 0,1 ila 0,2 aralığında bir değere sahip olan Smagorinsky katsayısıdır ve e_{ij} , deformasyon hızı tensör bileşenlerini belirtir. Elde edilen bu kinematik girdap viskozitesi, türbülans taşıma modellerinde olduğu gibi (Eşitlik 3.27) Flow-3D’de kullanılan dinamik viskoziteye dahil edilmiştir [67, 68].

$$\mu = \rho(\nu + \nu_T) \quad (3.30)$$

3.4. Sayısal Modellerin Oluşturulmasında Kullanılan Fiziksel Modeller

3.4.1. Gökçeler Barajı ve Basamaklı Dolusavak Modeli [12]

3.4.1.1. Gökçeler Barajı

Gökçeler Barajı (Şekil 3.2), Antalya İli Gazipaşa ilçe merkezinin 13 km kuzeydoğusunda, Gökçeler Deresi üzerinde sulama ve içme-kullanma suyu temin amacıyla inşa edilmiş bir tesistir. Gökçeler Barajı projesi ile 36,245 hm³/yıl su Gazipaşa Ovasına sulama suyu ve Gazipaşa İlçesine içme-kullanma suyu olarak verilmektedir [12]. Baraja ait karakteristikler Tablo 3.1’de sunulmuştur.

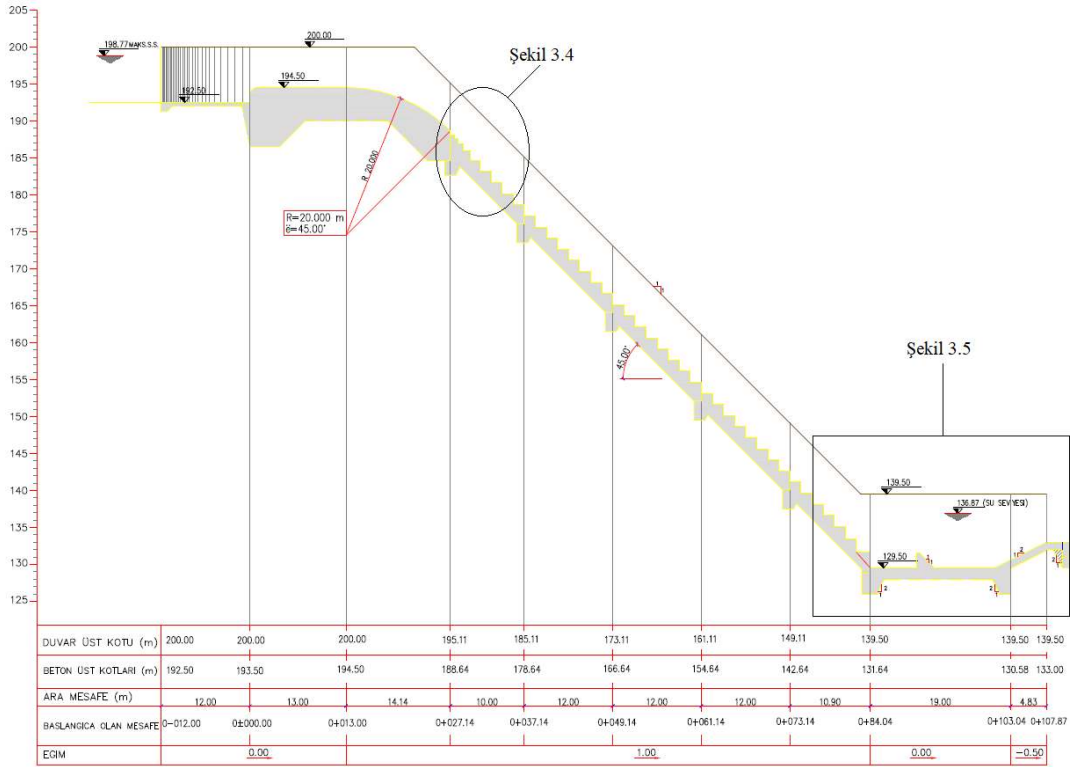
Tablo 3.1. Gökçeler barajı karakteristikleri [12]

Genel	
Yeri	Gazipaşa/Antalya
Tesis edildiği akarsu	Gökçeler Deresi
Amacı	Sulama ve içme-kullanma suyu
Baraj Gölü	
Minimum Su Seviyesi	148.50 m
Maksimum Feyezan Su Seviyesi	198.77 m
Normal İşletme Su Seviyesi	194.50 m
Aktif Göl Hacmi	50,38 hm ³
Normal Su Seviyesinde Göl Alanı	1.82 km ²
Baraj Gövdesi	
Tipi	Ön yüzü beton kaplı kaya dolgu
Talveg Kotu	102.00 m
Temel Kotu	99.00 m
Kret Kotu (Parapet duvarı ile)	199.00 m
Gövde Dolgusu Üst Kotu	197.00 m
Talvegden Yükseklik (Parapet duvarı ile)	97.00 m
Temelden Yükseklik (Parapet duvarı ile)	100.00 m
Kret Uzunluğu	363.18 m
Kret Genişliği	8.00 m
Dolusavak	
Tipi	Kontrolsüz, karşıdan alıslı, basamaklı
Yeri	Sağ sahil
Kapasitesi	592.85 m ³ /s
Muhtemel Maksimum Feyezan	775.85 m ³ /s
Yaklaşım Kanalı Kotu	192.50 m
Eşik Kotu	194.50 m
Su Yüğü- H_o	4.41 m
Maksimum Su Seviyesi	198.91 m
Boşaltım Kanalı Genişliği	40 m
Boşaltı Kanalı Eğini	45°
Enerji Kırıcı Yapı	
Tipi	Havuz (Tip)
Taban Kotu	129.50 m
Uzunluk	19.00 m

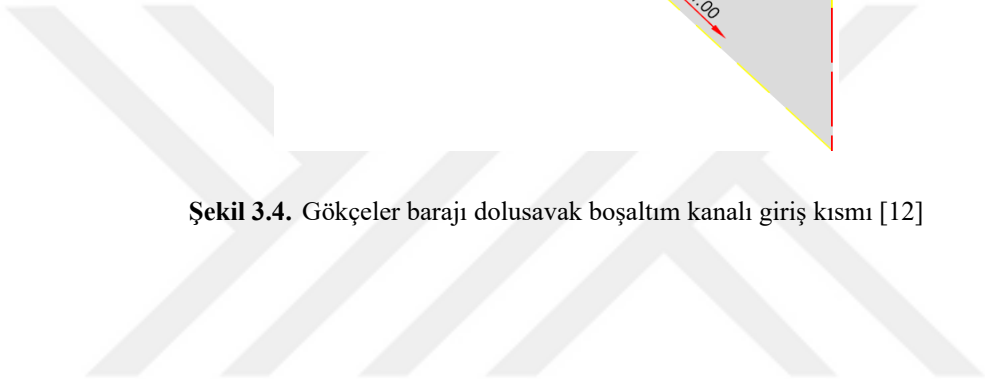
Gökçeler Barajı dolusavağı, baraj gövdesinin sağ sahiline yerleştirilmiş, kısa bir yaklaşım kanalına sahip kontrolsüz bir dolusavaktır. Basamaklı yapıda olan bu dolusavakta 39 adet basamak bulunmaktadır. Bu basamaklardan ilk ikisi 0.50 m yatay ve düşey boyuta, üçüncüsü 0.75 m yatay ve düşey boyuta, dördüncüsü 1.00 m yatay ve düşey boyuta, beşincisi 1.25 m yatay ve düşey boyuta, sonuncusu 1.50 m yatay ve 1.75 m düşey boyuta sahip iken geriye kalan 33 basamak ise 1.50 m yatay ve düşey boyutundadır [12]. Gökçeler barajı dolusavağı boykesit ve detay görüntüleri aşağıda verilmiştir (Şekil 3.3-3.5).



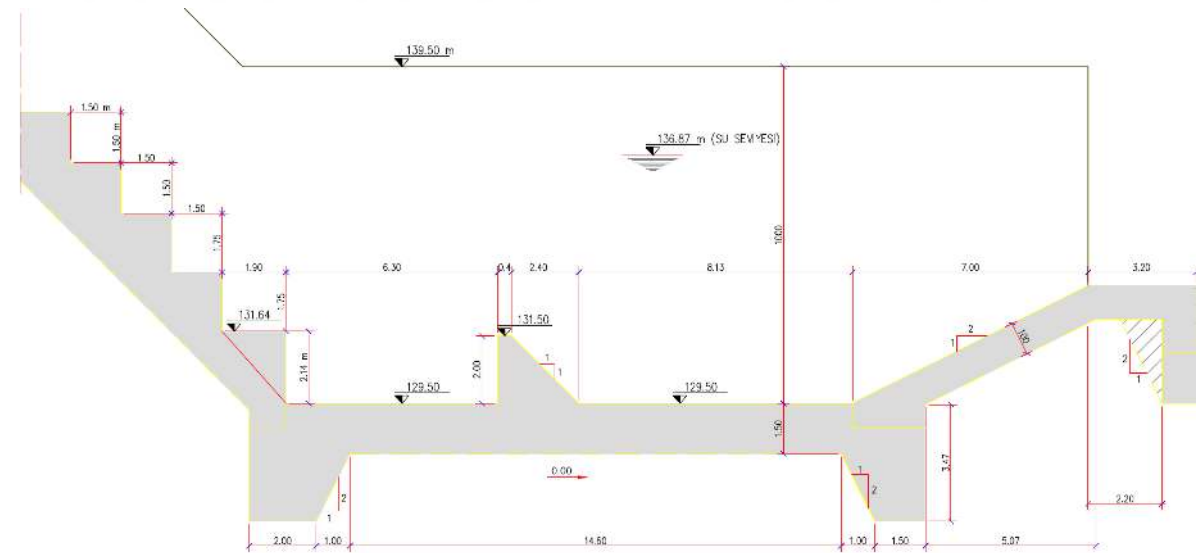
Şekil 3.2. Gökçeler Barajı [80]



Şekil 3.3. Gökçeler Barajı basamaklı dolusavak boykesiti [12]



Şekil 3.4. Gökçeler barajı dolusavak boşaltım kanalı giriş kısmı [12]



Şekil 3.5. Gökçeler barajı basamaklı dolusavağı düşüm havuzu [12]

3.4.1.2. Gökçeler Barajı Basamaklı Dolusavak Modeli [12]

Gökçeler Barajı Basamaklı dolusavağı, DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı tarafından 1/40 ölçekte modellenmiştir. Oluşturulan bu fiziksel modelde (Şekil 3.6), deşarj kapasitesinin belirlenmesi, yaklaşım kanalında akım hızlarının incelenmesi, dolusavak boşaltım kanalında oluşan akım koşullarının incelenmesi, dolusavak profili ve boşaltım kanalında basınç ölçümleri gibi çalışmalar yürütmüşlerdir [12].



Şekil 3.6. Gökçeler Barajı basamaklı dolusavağı fiziksel modeli: a)Boşaltım kanalı yapısı, b)Yaklaşım kanalı yapısı [12]

Hidrolik modelleme ile elde edilen sonuçların güvenilir olması için model ile prototip arasında dinamik benzeşimin sağlanması gerekmektedir. Dinamik benzeşimin olabilmesi için model ile prototipin tam olarak geometrik uyum içerisinde olması ve aynı noktalardaki dinamik basınç oranının sabit olması gerekmektedir. Başka bir deyişle akım hatlarının geometrik olarak benzer olması gerekmektedir. Geometrik benzeşimin sağlanması ve Froude sayısının model ile prototipte aynı olması dinamik benzeşim için gerekli koşulların sağlanması açısından iyi bir yaklaşımdır [12].

Hız (V) Ölçeği

Froude benzeşimine göre hız ölçeği, modeldeki ve prototipteki Froude sayılarının birbirlerine eşitlenmesiyle elde edilir.

$$\frac{V_m}{\sqrt{g \cdot L_m}} = \frac{V_p}{\sqrt{g \cdot L_p}} \rightarrow \frac{V_m}{V_p} = \sqrt{\frac{L_m}{L_p}} \rightarrow V_r = L_r^{1/2} \quad (3.31)$$

Burada V_m modeldeki hızı, V_p prototipteki hızı, L_r uzunluk ölçeğini, g yerçekimi ivmesini ifade etmektedir.

Debi (Q) ölçeği

Froude benzeşimine göre debi ölçeği, hız ölçeği ve uzunluk ölçeğine bağlı olarak aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$Q_r = \frac{Q_m}{Q_p} = \frac{V_m \cdot L_m^2}{V_p \cdot L_p^2} = \sqrt{L_r} \frac{L_m^2}{L_p^2} \rightarrow Q_r = L_r^{5/2} \quad (3.32)$$

Burada Q_m modeldeki debiyi, Q_p prototipteki debiyi ifade etmektedir.

Sonuç olarak Froude benzeşim kuralları ve laboratuvar olanakları da göz önünde tutularak DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı tarafından Gökçeler Barajı Basamaklı dolusavağı modelinde ölçek 1/40 olarak seçilmiştir. Model ile prototip arasında geometrik benzeşim ve dinamik benzeşimin (Froude benzeşimi) sağlanması için gerekli uzunluk, hız, debi, zaman ve pürüzlülük ölçekleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2. Prototip ve model arasındaki benzeşim bağıntıları ve ölçek oranları [12]

Fiziksel Büyüklük	Birim	Benzeşim Bağıntısı	Ölçek
Uzunluk- L	m	$L_r = L_m/L_p$	1/40
Hız- V	m/s	$V_r = V_m/V_p = L_r^{1/2}$	1/6.325
Debi- Q	m ³ /s	$Q_r = Q_m/Q_p = L_r^{5/2}$	1/10119.289

Akım rejimi sınırları

Gökçeler barajı basamaklı dolusavağı için akım rejimi sınırları, Chanson [31] tarafından belirlenen Eşitlik (3.33) ve Eşitlik (3.34) ile Boes ve Hager [5] tarafından belirlenen Eşitlik (3.35) ile belirlenmiştir.

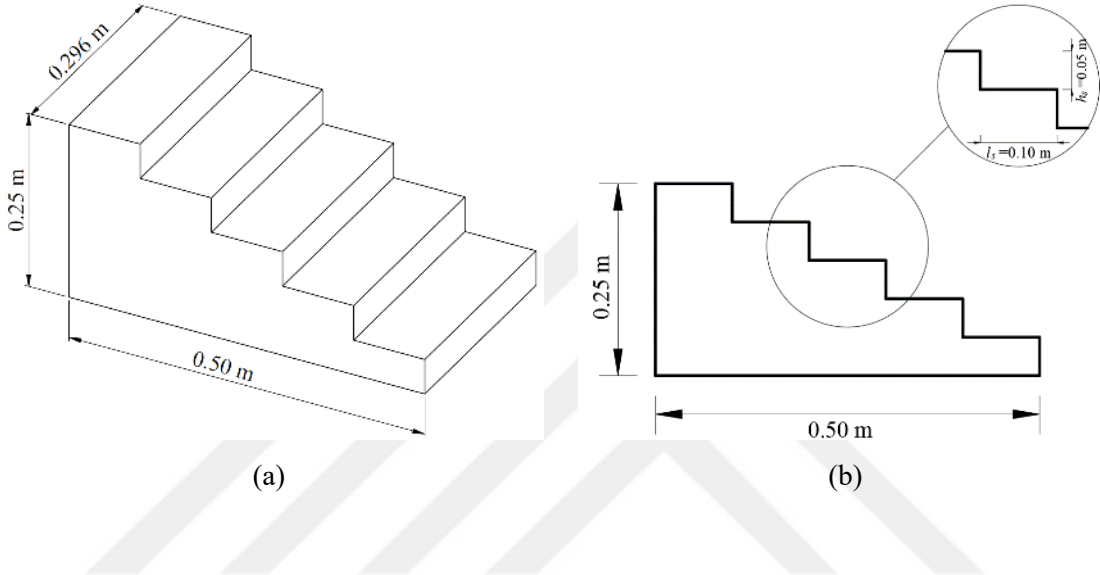
$$\frac{y_c}{h_s} = 0.89 - 0.4 \left(\frac{h_s}{l_s} \right) \rightarrow \frac{y_c}{h_s} = 0.89 - 0.4 \left(\frac{1.50}{1.50} \right) = 0.49 \quad \text{Nap akımı-Geçiş akımı} \quad (3.33)$$

$$\frac{y_c}{h_s} = 1.2 - 0.325 \left(\frac{h_s}{l_s} \right) \rightarrow \frac{y_c}{h_s} = 1.2 - 0.325 \left(\frac{1.50}{1.50} \right) = 0.875 \quad \text{Geçiş akımı-Sıçramalı Akım} \quad (3.34)$$

$$\frac{y_c}{h_s} = 0.91 - 0.14 \tan(\alpha) \rightarrow \frac{y_c}{h_s} = 0.89 - 0.14 \tan(45) = 0.75 \quad \text{Geçiş akımı-Sıçramalı Akım} \quad (3.35)$$

3.4.2. Klasik Basamaklı Dolusavak Modeli (Mero ve Mitchell [13])

Mero ve Mitchell [13] tarafından 0.296 m genişlikli, 0.25 m yükseklikli, 0.5 m uzunluklu, 26.6° açılı klasik basamaklı dolusavakta (Şekil 3.7) gerçekleştirilen deneylere ait veriler sayısal çalışmanın doğrulanmasında kullanılmıştır. Dolusavakta bulunan basamakların yatay uzunluğu 0.10 m iken düşey uzunluğu 0.05 m dir.



Şekil 3.7. Mero ve Mitchell [13] çalışmalarında kullandığı klasik basamaklı model: a) 3 boyutlu görünüm, b) 2 boyutlu görünüm

Akım rejimi sınırları

Mero ve Mitchell [13] tarafından kullanılan basamaklı dolusavak modeli için akım rejimi sınırları, Chanson [31] tarafından belirlenen Eşitlik (3.36) ve Eşitlik (3.37) ile Boes ve Hager [5] tarafından belirlenen Eşitlik(3.38) ile belirlenmiştir.

$$\frac{y_c}{h_s} = 0.89 - 0.4 \left(\frac{h_s}{l_s} \right) \rightarrow \frac{y_c}{h_s} = 0.89 - 0.4 \left(\frac{0.05}{0.10} \right) = 0.690 \quad \text{Nap akımı-Geçiş akımı} \quad (3.36)$$

$$\frac{y_c}{h_s} = 1.2 - 0.325 \left(\frac{h_s}{l_s} \right) \rightarrow \frac{y_c}{h_s} = 1.2 - 0.325 \left(\frac{0.05}{0.10} \right) = 1.038 \quad \text{Geçiş akımı-Sıçramalı Akım} \quad (3.37)$$

$$\frac{y_c}{h_s} = 0.91 - 0.14 \tan(\alpha) \rightarrow \frac{y_c}{h_s} = 0.89 - 0.14 \tan(26.6) = 0.82 \quad \text{Geçiş akımı-Sıçramalı Akım} \quad (3.38)$$

3.5. Sayısal Modeller

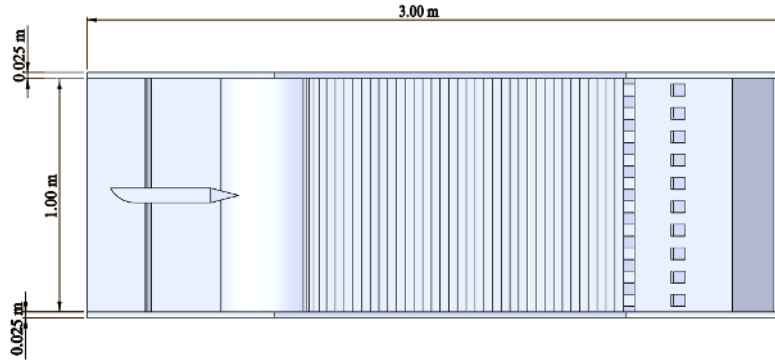
Bu çalışma kapsamında Gökçeler Barajı basamaklı dolusavağının laboratuvar sonuçları [12] ve literatürdeki klasik basamaklı bir dolusavak modelinin [13] laboratuvar sonuçları kullanılarak iki farklı fiziksel model için sayısal doğrulama yapılmıştır. Ayrıca, üç farklı geometriye sahip üçgen basamaklı dolusavak geometrisi önerilmiştir. Sayısal modeller için ilk etapta Solidworks programı yardımıyla üç boyutlu katı modeller oluşturulmuştur. Oluşturulan katı modeller, .stl uzantılı kaydedilerek Flow-3D yazılımına aktarılmıştır. Ardından, oluşturulan katı modellere çözüm blokları ve sınır şartları tanımlanmıştır. Çözüm ağlarında bulunan hücrelerin boyutlarının seçimi, analiz süresini uzatmayacak ve fiziksel modelin geometrisini doğru bir biçimde yansıtacak şekilde seçilmiştir. Çözüm bloğuna tanımlanan sınır şartları ise deneysel çalışmaların fiziksel şartlarına [12, 13] uygun olacak şekilde seçilmiştir.

3.5.1. Gökçeler Barajı Basamaklı Dolusavak Sayısal Modeli

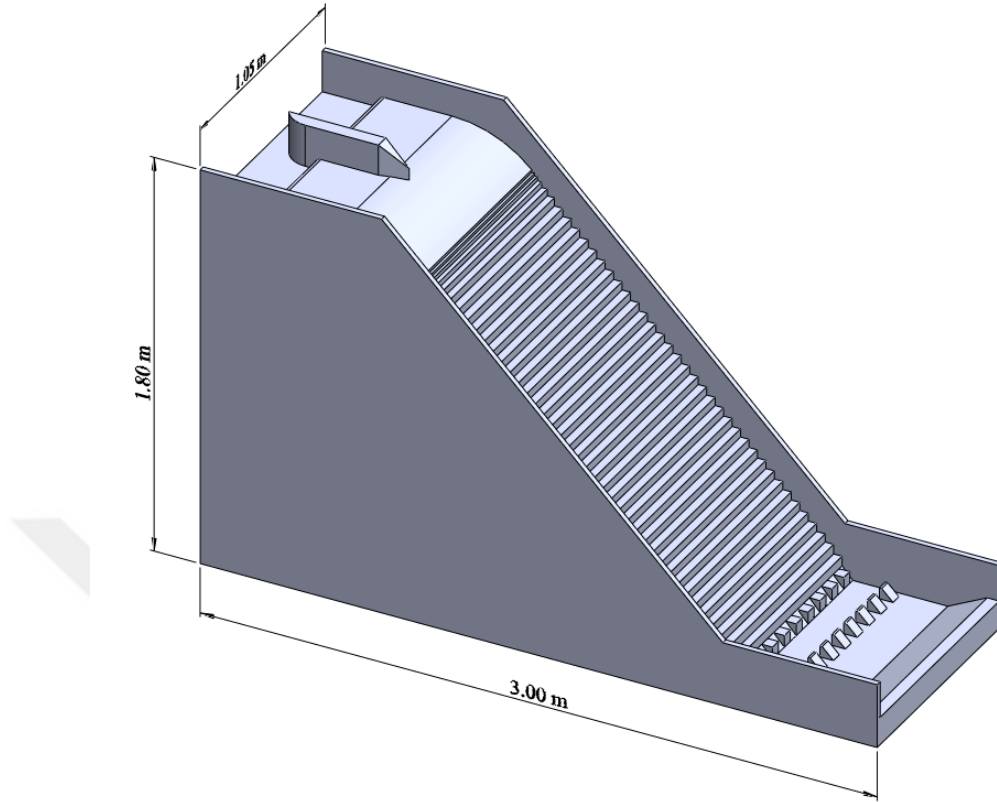
DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı tarafından oluşturulan 1/40 ölçekteki Gökçeler Barajı Basamaklı dolusavak modeli sayısal olarak aynı ölekte tasarlanmıştır (Şekil 3.8 ve 3.9). Sayısal model boyutları Tablo 3.3'te verilmiştir. Sayısal modelde farklı türbülans modelleri ($k-\varepsilon$, $k-\omega$, LES, RNG) kullanılarak elde edilen sonuçlar, fiziksel model sonuçları ile kıyaslanarak her bir parametre için en uygun türbülans modeli belirlenmeye çalışılmıştır. Sayısal modelde yapılan analizler sonucunda elde edilen veriler ve ölçüm yerleri, Gökçeler Barajı basamaklı dolusavak modeli raporunda [12] olduğu gibi bu tez çalışmasında da Froude benzeşimi kullanılarak prototip ölçeğinde verilmiştir.

Tablo 3.3. Gökçeler barajı basamaklı dolusavak sayısal modeli boyutları

Model Yüksekliği (m)	Model Genişliği (m)	Model Uzunluğu (m)
1.80	1.05	3.00



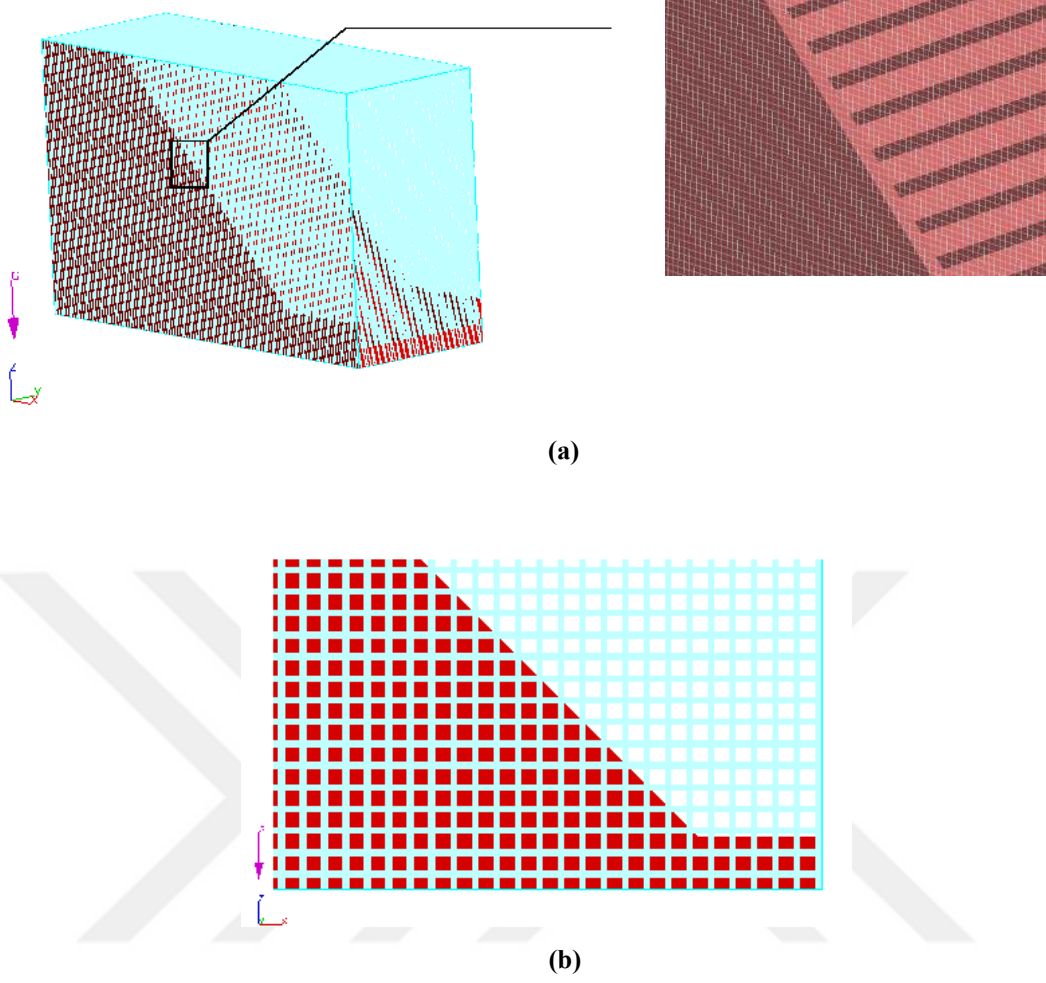
Şekil 3.8. Gökçeler barajı basamaklı dolusavak sayısal modeli plan görünümü



Şekil 3.9. Gökçeler barajı basamaklı dolusavak sayısal modeli 3 boyutlu görünümü

3.5.1.1. Çözüm Ağı (Mesh)

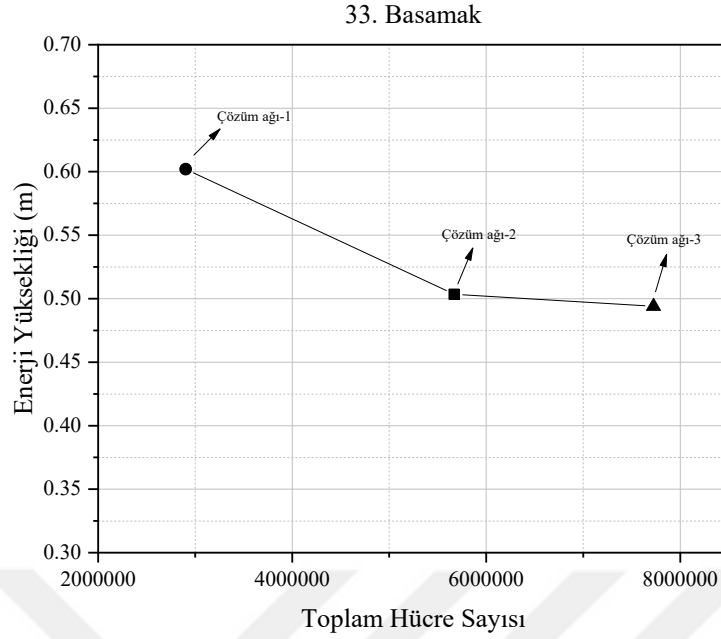
Gökçeler Barajı basamaklı dolusavak modeli için en uygun çözüm ağının tespiti amacıyla $k-\varepsilon$ türbülans modeli kullanılarak yürütülen deneme analizlerinde, üniform yapıda kare prizmatik hücreler kullanılarak çözüm ağları oluşturulmuştur (Şekil 3.10). İlk etapta 1.25 cm boyutlu 2,903,040 adet çözüm hücresi kullanılarak analizler yürütülmüştür. Son olarak, çözüm ağının boyutu 0.90 cm'ye kadar küçültülerek toplam hücre sayısı 7,725,600'e kadar arttırılmıştır. Tablo 3.4 ve Şekil 3.11'de görüldüğü üzere, belli bir değerden sonra hücre sayısını arttırmak, enerji yüksekliğini çok fazla etkilemediğinden 0.90 cm hücre boyutlu ve 7,725,600 adet çözüm hücresinden oluşan Çözüm Ağı-3'ün bu çalışma için yeterli olduğu kanaatine varılmıştır.



Şekil 3.10. Çözüm ağı (Mesh) yapısı: a)3 boyutlu ve yakınlaştırılmış görünüm, b) 2 boyutlu görünüm

Tablo 3.4. Hücre sayısının enerji yüksekliğine etkisi (33.basamak)

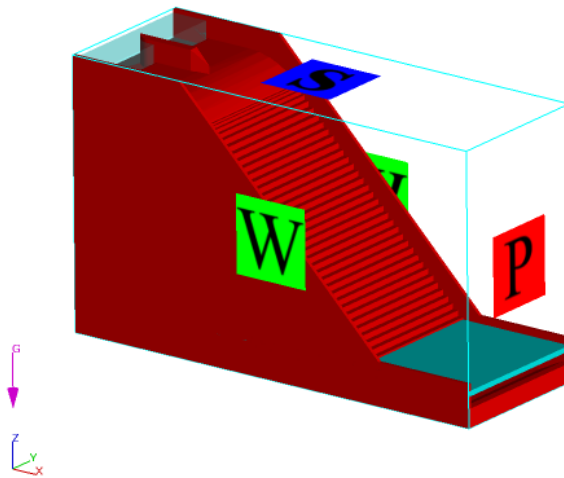
Çözüm Ağı	Hücre Boyutları (cm)	Toplam Hücre Sayısı	33. Basamaktaki enerji yüksekliği (m)
1	1.25	2,903,040	0.602
2	1.00	5,670,000	0.503
3	0.90	7,725,600	0.494



Şekil 3.11. Enerji yüksekliğinin hücre sayısına bağlı değişimi (33.basamak)

3.5.1.2. Sınır Şartları

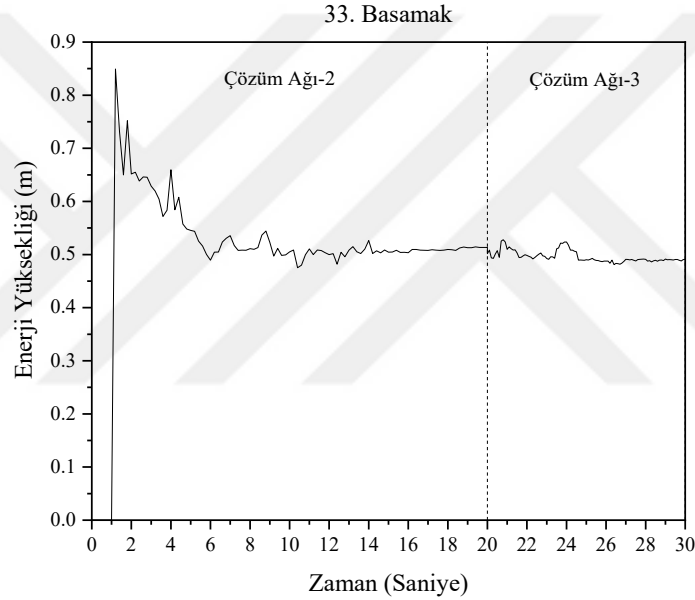
Analizlerde kullanılan sınır şartları, Gökçeler Barajı fiziksel modeli [12] için yürütülen deney düzeneğine uygun olacak şekilde belirlenmiştir. Çözüm bloğunda x_{min} yüzeyinde kullanılan P : Basınç girişi (Specified Pressure) sınır şartı ile model raporunda [12] verilmiş olan Debi-Seviye eğrisi kullanılarak ilgili debiye denk gelen memba su seviyesi, x_{max} yüzeyinde ise yine P sınır şartı ile model raporunda [12] verilen kuyruk suyu seviyesi sayısal modele tanımlanmıştır. Model tabanı ile, modelin sağ ve sol yüzeylerine (y_{min} ve y_{max}) W : Duvar (Wall) sınır şartı tanımlanmıştır. Modelin üst bölgesine ise (z_{max}) S : Simetri (Symmetry) olarak tanımlanmıştır (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Sınır şartları

3.5.1.3. Analiz Süresi

Gökçeler Barajı basamaklı dolusavağı için oluşturulan sayısal modelde en uygun analiz süresinin tespiti amacıyla $k-\epsilon$ türbülans modeli kullanılarak deneme analizleri yürütülmüştür. Yapılan deneme analizlerinde, ilk etapta model Çözüm Ağı-2 (Tablo 3.4) kullanılarak 0-20 sn aralığında analiz edilmiştir. Ardından analiz süresini gereksiz uzatmamak amacıyla Flow-3D yazılımında bulunan “Restart” seçeneğiyle 20-30 sn aralığında Çözüm Ağı-3 (Tablo 3.4) kullanılarak analize kaldığı yerden devam edilmiştir. Şekil 3.13’te, basamaklı dolusavak boşaltım kanalının çıkış kısmına yakın olan 33. Basamaktaki enerji yüksekliğinin zamana bağlı değişimi verilmiştir. Şekil 3.13’te de görüldüğü üzere, seçilen analiz süresinin fazlasıyla yeterli olduğu kanaatine varılmıştır.

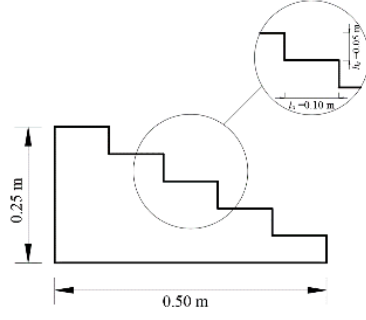


Şekil 3.13. Enerji yüksekliğinin zamana bağlı değişimi (33. Basamak)

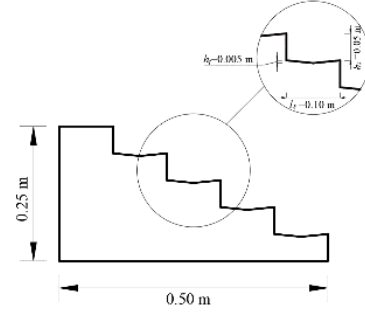
3.5.2. Klasik Basamaklı [13] ve Üçgen Basamaklı Dolusavak Modelleri

Sayısal çalışmanın doğrulanması amacıyla kullanılan Mero ve Mitchell [13] klasik basamaklı dolusavak modeli ve farklı basamak derinliklerinde (0.005, 0.010 ve 0.015 m) tasarlanan üçgen basamaklı dolusavak modelleri (Şekil 3.14 ve 3.15) $k-\epsilon$ türbülans modeli ile 3 farklı debi değerinde (0.00684, 0.00830 ve 0.0121 m³/s) analiz edilmiştir. Yapılan analizlere ait hidrolik karakteristikler Tablo 3.5’te gösterilmiştir.

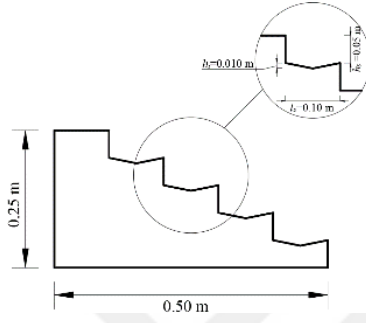
Model-1 [13]



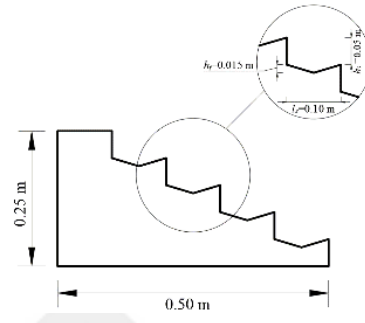
Model-2



Model-3

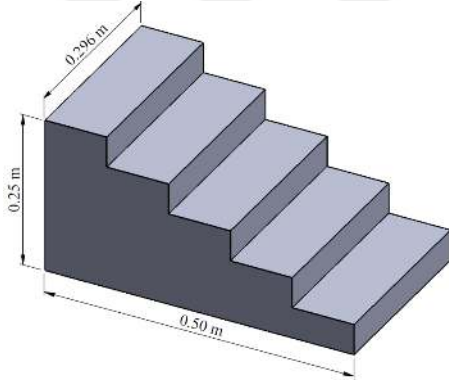


Model-4

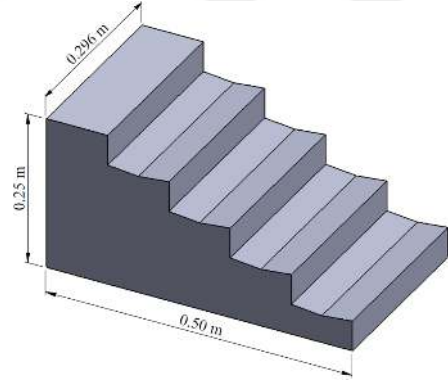


Şekil 3.14. Sayısal analizlerde kullanılan modeller (2 boyutlu görünüm)

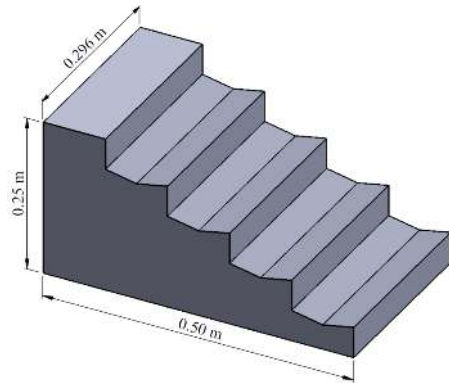
Model-1 [13]



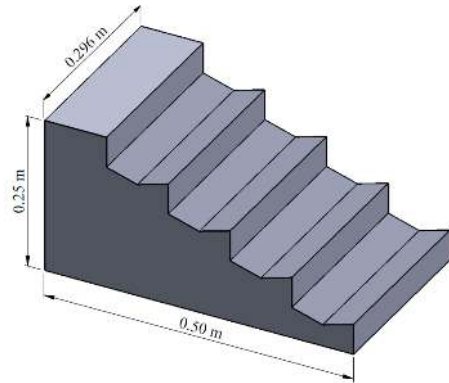
Model-2



Model-3



Model-4



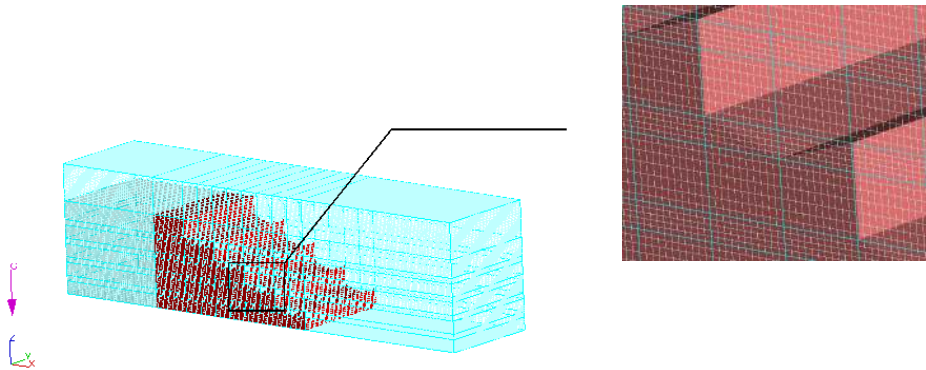
Şekil 3.15. Sayısal analizlerde kullanılan modeller (3 boyutlu görünüm)

Tablo 3.5. Analizlere ait hidrolik karakteristikler

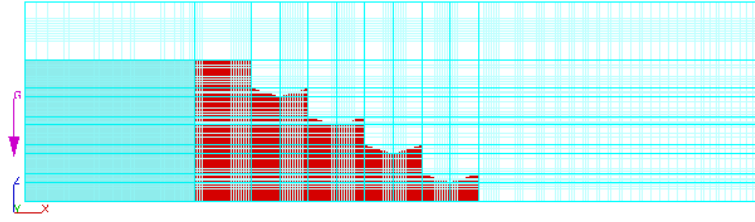
Analiz Numarası	Model Numarası	Q (m ³ /s)	Basamak Yüksekliği (h_s) (m)	Basamak Genişliği (l_s) (m)	y_c/h_s	Üçgen basamak derinliği h_t (m)	Akım Rejimi [5]
1	Model 1	0.01210	0.05	0.10	1.109	-	Sıçramalı
2	Model 1	0.00830	0.05	0.10	0.862	-	Sıçramalı
3	Model 1	0.00684	0.05	0.10	0.758	-	Geçiş
4	Model 2	0.01210	0.05	0.10	1.109	0.005	Sıçramalı
5	Model 2	0.00830	0.05	0.10	0.862	0.005	Sıçramalı
6	Model 2	0.00684	0.05	0.10	0.758	0.005	Geçiş
7	Model 3	0.01210	0.05	0.10	1.109	0.010	Sıçramalı
8	Model 3	0.00830	0.05	0.10	0.862	0.010	Sıçramalı
9	Model 3	0.00684	0.05	0.10	0.758	0.010	Geçiş
10	Model 4	0.01210	0.05	0.10	1.109	0.015	Sıçramalı
11	Model 4	0.00830	0.05	0.10	0.862	0.015	Sıçramalı
12	Model 4	0.00684	0.05	0.10	0.758	0.015	Geçiş

3.5.2.1. Çözüm Ağı (Mesh)

Bu çalışma için en uygun çözüm ağının tespiti amacıyla Model 4'te deneme analizleri yürütölmüştür. Oluşturulan çözüm ağında geometrinin daha iyi şekilde algılanabilmesi için x doğrultusunda on adet ve z doğrultusunda dokuz adet ekstra çözüm katmanı yerleştirilmiştir (Şekil 3.16). Optimum çözüm ağının tespiti amacıyla üç farklı çözüm ağı denenmiştir. İlk aşamada 761,985 adet çözüm hücresi kullanılarak analizler yürütölmüştür. Son olarak boyutlar küçöltölerek toplam hücre sayısı 1,958,040'a kadar arttırılmıştır. Tablo 3.6'da ve Şekil 3.17'de göröldüğü üzere, belli bir değerdan sonra hücre sayısının artırmanın sonucu çok fazla etkilememesi sebebiyle en büyük hücre boyutu 1,03 cm ve en küçük hücre boyutu 0,45 cm olan 1,316,250 adet çözüm hücresinin bu model için yeterli olduğu kanaatine varılmıştır.



(a)

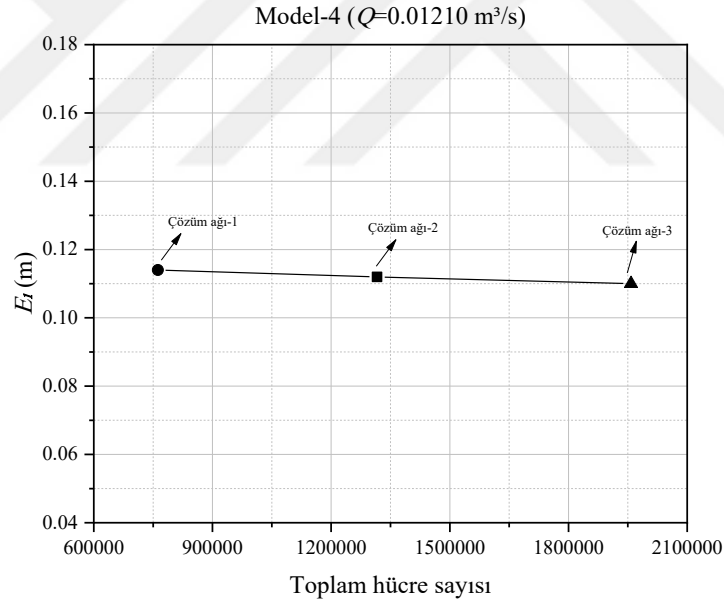


(b)

Şekil 3.16. Çözüm ağı (Mesh) yapısı: a) Perspektif ve yakınlaştırılmış görünüm, b) 2 boyutlu görünüm

Tablo 3.6. Hücre sayısının savak mansabındaki enerjiye etkisi (Model 4, $Q=0.01210 \text{ m}^3/\text{s}$)

Çözüm Ağı	Çözüm ağı hücre boyutları (Maksimum-Minimum) (cm)	Toplam Hücre Sayısı	Savak mansabındaki enerji (E_I) (m)
1	1.47-0.50	761,985	0.114
2	1.03-0.45	1,316,250	0.112
3	0.92-0.38	1,958,040	0.110

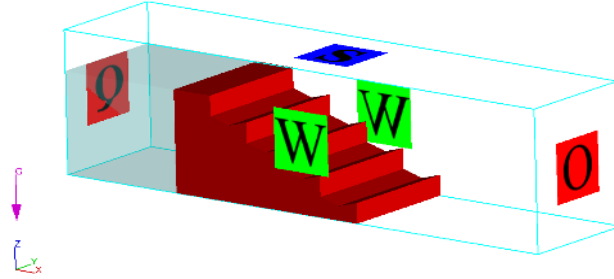


Şekil 3.17. Hücre sayısının savak mansabındaki enerjiye etkisi (Model 4, $Q=0.01210 \text{ m}^3/\text{s}$)

3.5.2.2. Sınır Şartları

Analizlerde kullanılan sınır şartları, Mero ve Mitchell [13] tarafından yürütülen deney düzeneğine uygun olacak şekilde belirlenmiştir. Çözüm bloğunda x_{min} yüzeyine, savak üzerinden birim zamanda sabit bir akımın geçebilmesini sağlamak amacıyla debi (Q) ve savak yüksekliği kadar su tanımlanmıştır. Memba kısmındaki akım yüksekliği tanımlanan debiye göre yazılım vasıtasıyla otomatik olarak hesaplanmaktadır. Savaklanan akımın sistemi terk etmesini sağlamak

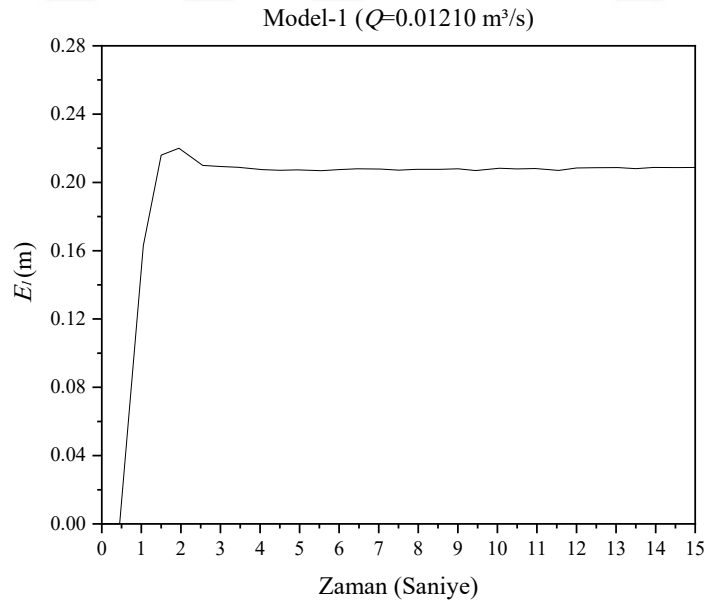
için x_{max} yüzeyine çıkış (O), kanal tabanı ile, kanalın sağ ve sol yüzeylerine (y_{min} ve y_{max}) duvar (W) sınır şartı tanımlanmıştır (Şekil 3.18).



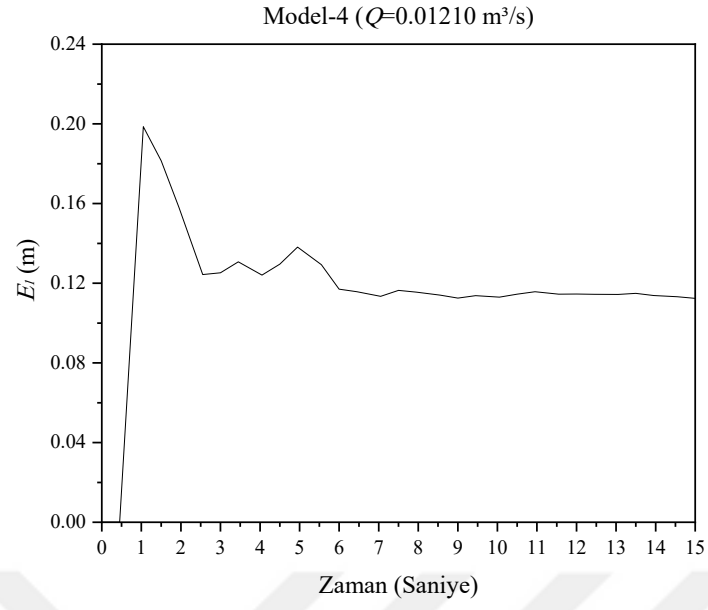
Şekil 3.18. Sınır şartları

3.5.2.3. Analiz Süresi

Bu çalışma için en uygun analiz süresinin tespiti amacıyla deneme analizleri yürütülmüştür. Model-1 ve Model-4'ün mansabındaki enerji yüksekliğinin analiz süresine göre değişimleri incelendiğinde, her iki analiz için de 15 saniyenin fazlasıyla yeterli olduğu görülmektedir (Şekil 3.19 ve 3.20). Yapılan tüm analizler 15 sn analiz süresinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.19. Savak mansabındaki enerjinin zamana bağlı değişimi (Model 1, $Q=0.01210 \text{ m}^3/\text{s}$)



Şekil 3.20. Savak mansabındaki enerjinin zamana bağlı değişimi (Model 4, $Q=0.01210 \text{ m}^3/\text{s}$)

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Gökçeler Barajı Basamaklı Dolusavağı

DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı tarafından 1/40 ölçekte oluşturulan Gökçeler Barajı Basamaklı dolusavağı modeli sayısal olarak aynı ölçekte tasarlanmıştır. Fiziksel model üzerinde [12] gerçekleştirilen deşarj kapasitesinin belirlenmesi, yaklaşım kanalında akım hızlarının incelenmesi, dolusavak boşaltım kanalında oluşan su yüzü profilinin incelenmesi, dolusavak profili ve boşaltım kanalında basınç ölçümleri gibi çalışmalar sayısal modelde dört farklı türbülans modeli ($k-\varepsilon$, $k-\omega$, RNG, LES) ile incelenip, elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla [12] karşılaştırılarak en uygun türbülans modelleri belirlenmeye çalışılmıştır. Sayısal model ile yapılan analizler sonucunda elde edilen veriler ve ölçüm yerleri, Gökçeler Barajı basamaklı dolusavak model raporunda [12] olduğu gibi Froude benzeşimi kullanılarak prototip ölçeğinde verilmiştir.

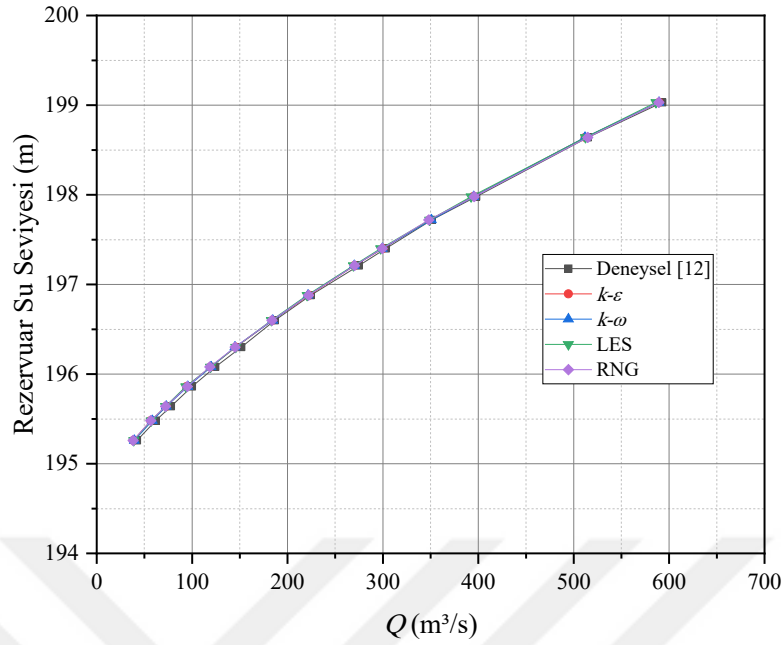
4.1.1. Debi-Rezervuar Su Seviyelerinin Karşılaştırılması

DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı tarafından gerçekleştirilen fiziksel model çalışmalarında [12] Froude benzeşimi kullanılarak prototip ölçeğine çevrilen 42.25-592.85 m³/s aralığında değişen 14 farklı debi için rezervuar su seviyeleri ölçülmüştür. Ölçülen rezervuar su seviyeleri, sayısal analizlerde çözüm bloğu giriş yüzeyine (x_{min}) tanımlanarak dolusavaktan deşarj edilen debiler hesaplanmıştır. Deneysel sonuçlar [12] ve farklı türbülans modelleri ile yürütülen analizler neticesinde elde edilen sonuçlar Tablo 4.1’de, debi-seviye eğrileri ise Şekil 4.1’de verilmiştir. Elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla kıyaslanması neticesinde, tüm türbülans modellerinin deneysel sonuçlarla oldukça uyumlu olduğu ve debi-seviye hesaplaması için en uygun türbülans modelinin ortalama % 2.76’lık bağıl hata ile $k-\omega$ olduğu görülmektedir. Ayrıca tüm türbülans modellerinde yüksek rezervuar su seviyeleri için elde edilen debi değerlerinin deneysel sonuçlara daha yakın olduğu görülmektedir (Tablo 4.1). Elde edilen sonuçlar, literatürdeki çalışmalarla da [81–83] uyumludur. Kumcu ve Uçar [81], DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı Hidrolik Model Laboratuvarında 1/60 ölçekli fiziksel modeli inşa edilen Köprü Barajı dolusavağını Flow-3D yazılımı ve RNG türbülans modeli ile sayısal olarak incelerken ölçülen rezervuar su seviyelerini, oluşturdukları sayısal modelde çözüm bloğunun giriş kısmına tanımlamışlardır. Sayısal modelden elde ettikleri debi değerleriyle oluşturdukları anahtar eğrisi ile DSİ TAKK Dairesi’nin elde ettiği anahtar eğrisinin birebir örtüştüğünü ve ortalama bağıl hata değerinin %2.01 olduğunu ifade etmişlerdir. Soysal [82], DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı Hidrolik Model Laboratuvarında 1/50 ölçekli fiziksel modeli inşa edilen Silvan Barajı dolusavağını Flow-3D yazılımı ile sayısal olarak incelemiştir. Fiziksel modelde, prototip ölçeğine çevrilerek elde edilen debiler için ölçülen rezervuar su seviyelerini, sayısal modelde çözüm bloğu girişine tanımlayarak deşarj edilen debi

değerlerini hesaplamıştır. Yapmış olduğu analizler neticesinde, fiziksel model sonuçları ve sayısal sonuçların çok yakın olduğunu, bağıl hata değerinin % 0.038 ile % 4.28 arasında değiştiğini ve ortalama bağıl hata değerinin % 0.94 olduğunu ifade etmiştir. Usta [83], Karakurt Barajı dolusavağını Flow-3D yazılımı ve RNG türbülans modeli ile sayısal olarak incelemiştir. Araştırmacı, çalışmasında 200-4550 m³/s arasında değişen 9 farklı debi değeri bulunan rezervuar su seviyelerini, sayısal modelde çözüm bloğu girişine tanımlayarak dolusavaktan deşarj edilen debi değerlerini hesaplamıştır. Yapmış olduğu analizler neticesinde, Hidrolik denklemler ve sayısal modelleme ile elde edilen debi değerlerinin birbirleri ile oldukça uyumlu olduğunu gözlemlemiştir.

Tablo 4.1. Debi-Rezervuar su seviyelerinin karşılaştırılması

Rezervuar su seviyesi (m)	Debi (m ³ /s)					Bağıl hata (%)			
	Deneysel sonuçlar [12]	<i>k-ε</i>	<i>k-ω</i>	LES	RNG	<i>k-ε</i>	<i>k-ω</i>	LES	RNG
195.26	42.25	38.45	39.45	38.71	38.21	8.99	6.64	8.37	9.57
195.48	61.82	56.67	58.22	57.12	56.65	8.33	5.82	7.60	8.37
195.64	77.83	72.86	72.88	72.12	72.11	6.39	6.36	7.33	7.34
195.86	99.90	94.11	95.37	93.38	94.93	5.80	4.54	6.53	4.98
196.08	124.3	119.46	119.93	119.32	118.66	3.89	3.52	4.00	4.54
196.30	151.59	145.72	144.97	145.76	145.03	3.87	4.37	3.85	4.33
196.60	186.75	184.17	184.47	183.14	183.67	1.38	1.22	1.93	1.65
196.88	224.4	222.62	221.55	220.50	221.96	0.79	1.27	1.74	1.09
197.21	274.79	270.18	270.11	269.07	270.20	1.68	1.70	2.08	1.67
197.40	303.12	300.04	299.48	297.71	299.23	1.02	1.20	1.78	1.28
197.72	351.27	349.12	350.79	349.01	348.12	0.61	0.14	0.64	0.90
197.98	397.95	394.65	395.23	392.47	395.67	0.83	0.68	1.38	0.57
198.64	514.94	512.03	511.76	512.34	514.73	0.57	0.62	0.50	0.04
199.03	592.85	589.55	589.38	586.18	589.23	0.56	0.58	1.13	0.61
Ortalama bağıl hata (%)						3.19	2.76	3.49	3.35

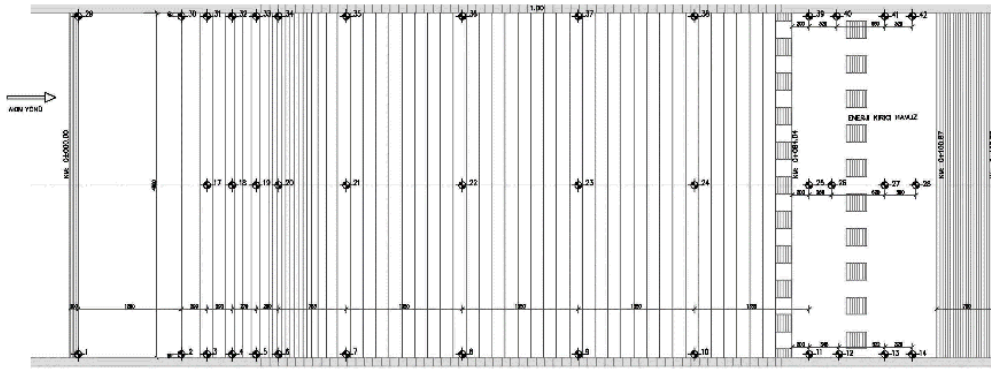


Şekil 4.1. Gökçeler Barajı Debi-Rezervuar su seviyesi eğrileri

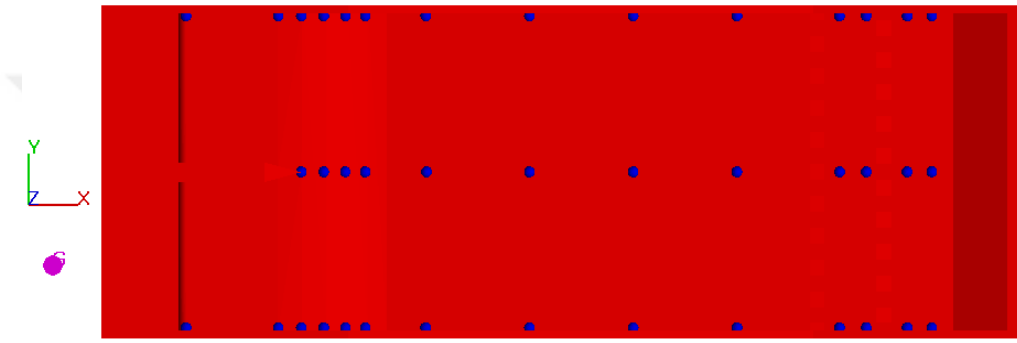
4.1.2. Basınç Ölçümleri

DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı tarafından, Gökçeler Barajı basamaklı dolusavağı fiziksel modelinin inşası sırasında modelin sağ kenarı, orta ekseni ve sol kenarı boyunca toplam 42 adet basınç ölçüm ucu yerleştirilmiştir. Sonradan revize edilen proje ile dolusavak eşiği üzerine eklenen köprü ayağı altında iki basınç ucu iptal edilerek basınç ölçümü alınan nokta sayısı 40 adete düşmüştür. Bu noktaların konumları Şekil 4.2.a'da gösterilmiştir [12]. Fiziksel model üzerine yerleştirilen basınç ölçüm uçları, sayısal modelde de birebir aynı noktalara yerleştirilmiştir (Şekil 4.2.b ve 4.2.c). Basınç ölçüm uçları basamaklarda Şekil 4.2.d'de gösterilen noktaya yerleştirilmiştir. Tüm noktalar için basınç ölçümleri 592.85 m³/s'lik maksimum debi değerinde gerçekleştirilmiştir.

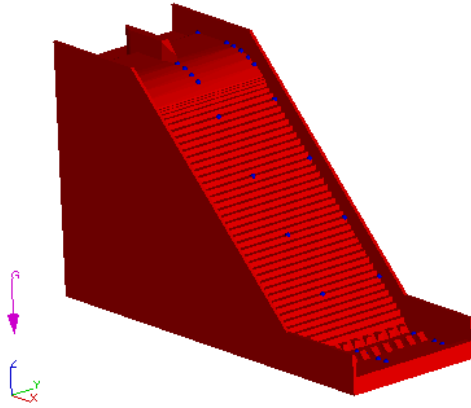
Farklı türbülans modelleri ile yürütülen analizler neticesinde elde edilen basınç yüksekliklerinin deney sonuçları [12] ile karşılaştırılması neticesinde elde edilen bağıl hata oranları Tablo 4.2'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, tüm türbülans modelleri için elde edilen sayısal sonuçların deneysel sonuçlarla [12] uyumlu olduğu ve en uyumlu türbülans modelinin % 13.36'lık ortalama bağıl hata ile $k-\varepsilon$ olduğu görülmektedir (Tablo 4.2).



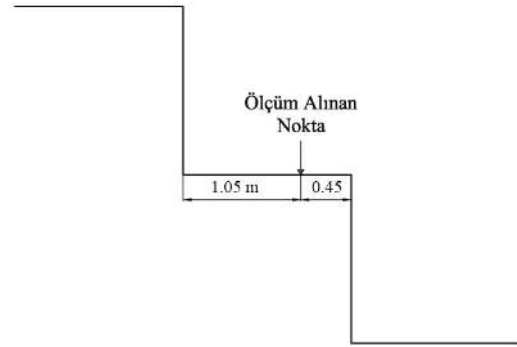
(a)



(b)



(c)



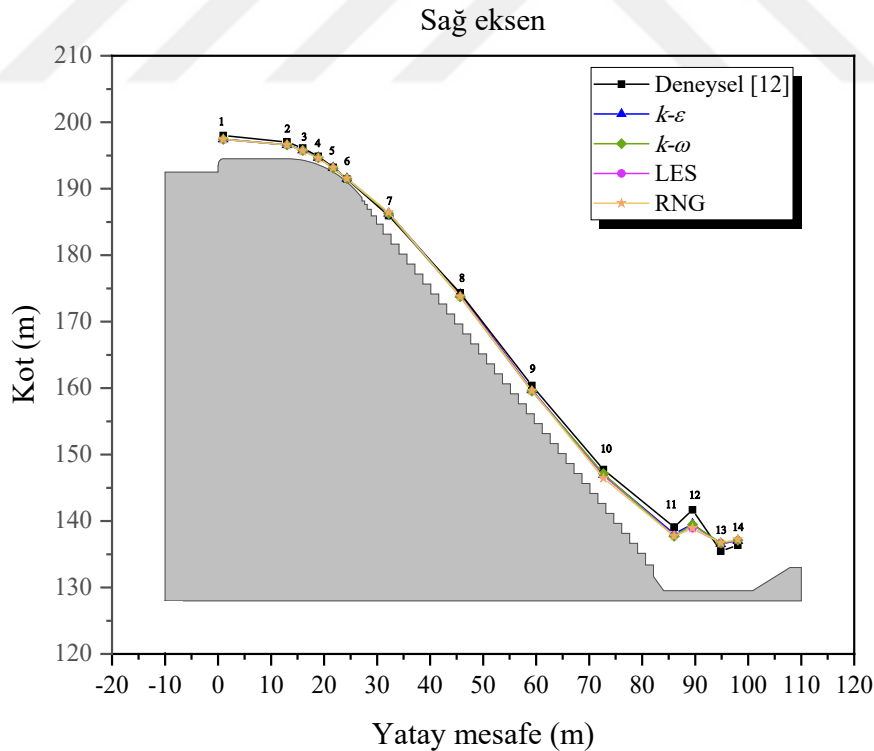
(d)

Şekil 4.2. Dolusavak basınç ölçüm uçları: a) Fiziksel model [12], b-c) Sayısal model, d) Basamaklar üzerine yerleştirilen basınç ölçüm uçlarının konumu

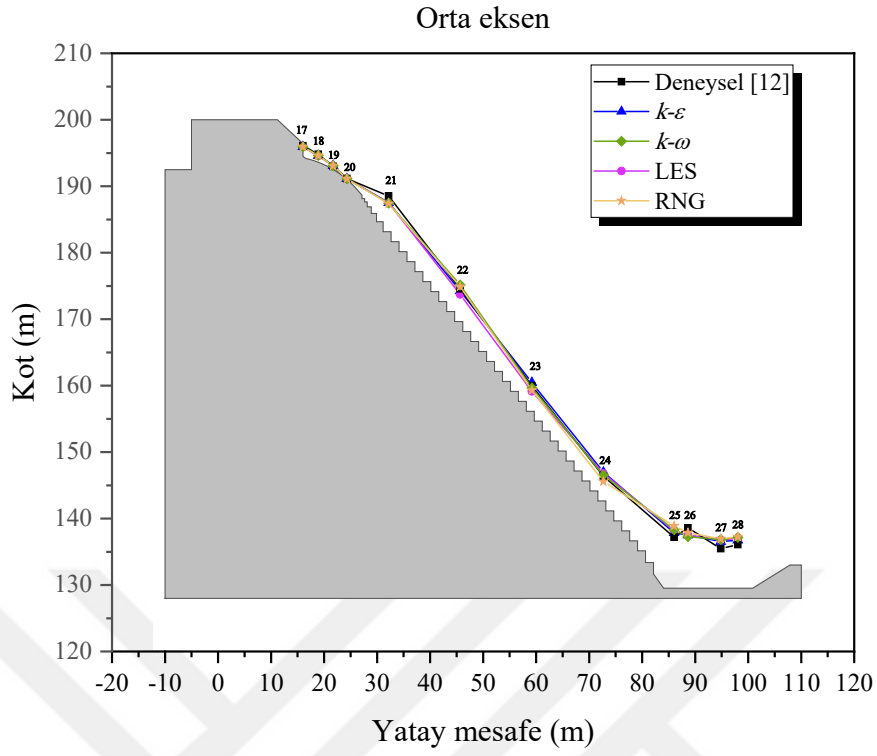
Tablo 4.2. Basınç ölçümleri ve bağıl hata değerleri

Eksen	Yatay mesafe (m)	Piyezometre ucu numarası	Basınç yüksekliği (mSS)					Bağıl hata (%)			
			Deney Sonuçları [12]	$k-\varepsilon$	$k-\omega$	LES	RNG	$k-\varepsilon$	$k-\omega$	LES	RNG
SAĞ EKSEN	1.00	1	3.53	2.99	2.96	2.98	2.98	15.30	16.15	15.58	15.58
	13.00	2	2.56	2.14	2.14	2.13	2.13	16.41	16.41	16.80	16.80
	15.99	3	1.84	1.53	1.50	1.49	1.43	16.85	18.48	19.02	22.28
	18.92	4	1.25	1.05	1.03	1.03	0.96	16.00	17.60	17.60	23.20
	21.71	5	0.87	0.82	0.75	0.82	0.82	5.75	13.79	5.75	5.75
	24.31	6	0.56	0.66	0.63	0.65	0.67	17.86	12.50	16.07	19.64
	32.19	7	2.85	3.18	3.14	2.87	3.34	11.58	10.18	0.70	17.19
	45.69	8	4.71	4.53	4.13	4.40	4.16	3.82	12.31	6.58	11.68
	59.19	9	4.25	3.60	3.41	3.56	3.47	15.29	19.76	16.24	18.35
	72.69	10	5.15	4.43	4.55	4.28	3.88	13.98	11.65	16.89	24.66
	86.04	11	9.58	8.57	8.20	8.36	8.24	10.54	14.41	12.73	13.99
	89.52	12	12.18	10.05	9.97	9.40	9.44	17.49	18.14	22.82	22.50
	94.84	13	5.98	7.06	7.20	7.20	7.23	18.06	20.40	20.40	20.90
	98.04	14	6.86	7.54	7.62	7.54	7.72	9.91	11.08	9.91	12.54
ORTA EKSEN	15.99	17	1.82	1.68	1.68	1.68	1.68	7.69	7.69	7.69	7.69
	18.92	18	1.16	0.95	0.96	0.93	0.95	18.10	17.24	19.83	18.10
	21.71	19	0.68	0.80	0.79	0.78	0.79	17.65	16.18	14.71	16.18
	24.31	20	0.28	0.26	0.25	0.32	0.25	7.14	10.71	14.29	10.71
	32.19	21	5.43	4.44	4.35	4.41	4.27	18.23	19.89	18.78	21.36
	45.69	22	4.97	4.67	5.56	4.14	5.30	6.04	11.87	16.70	6.64
	59.19	23	3.85	4.35	3.55	3.02	3.17	12.99	7.79	21.56	17.66
	72.69	24	3.78	4.40	3.95	4.22	2.99	16.40	4.50	11.64	20.90
	86.04	25	7.70	8.36	8.82	8.68	9.39	8.57	14.55	12.73	21.95
	88.64	26	9.10	8.01	7.79	8.03	8.36	11.98	14.40	11.76	8.13
	94.84	27	5.98	7.04	7.34	7.30	7.44	17.73	22.74	22.07	24.41
	98.04	28	6.58	7.25	7.67	7.50	7.75	10.18	16.57	13.98	17.78
SOL EKSEN	1.00	29	3.09	2.91	2.81	2.91	2.91	5.83	9.06	5.83	5.83
	13.00	30	2.35	2.08	2.08	2.08	2.08	11.49	11.49	11.49	11.49
	15.99	31	1.83	1.43	1.44	1.44	1.44	21.86	21.31	21.31	21.31
	18.92	32	1.30	1.08	0.99	1.01	0.98	16.92	23.85	22.31	24.62
	21.71	33	0.91	0.84	0.80	0.81	0.82	7.69	12.09	10.99	9.89
	24.31	34	0.70	0.58	0.55	0.56	0.54	17.14	21.43	20.00	22.86
	32.19	35	4.77	3.82	3.86	3.87	3.75	19.92	19.08	18.87	21.38
	45.69	36	4.49	4.8	4.85	3.95	4.73	6.90	8.02	12.03	5.35
	59.19	37	4.35	3.67	3.74	3.63	3.15	15.63	14.02	16.55	27.59
	72.69	38	6.09	4.95	4.83	4.95	5.09	18.72	20.69	18.72	16.42
	86.04	39	9.18	8.56	8.58	9.15	7.60	6.75	6.54	0.33	17.21
	88.64	40	10.78	8.36	8.55	8.62	8.33	22.45	20.69	20.04	22.73
	94.84	41	6.10	7.08	7.03	7.20	7.44	16.07	15.25	18.03	21.97
	98.04	42	6.78	7.16	7.52	7.42	7.54	5.60	10.91	9.44	11.21
Ortalama bağıl hata (%)								13.36	14.78	14.72	16.91

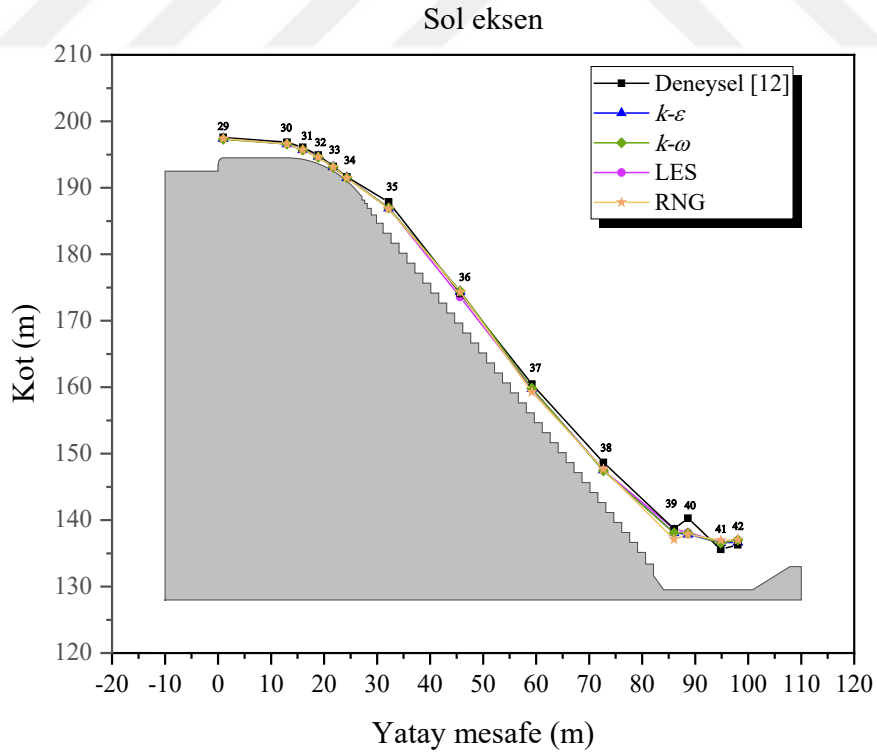
Şekil 4.3-4.5’de; deneysel çalışmalar [12] neticesinde sağ, orta ve sol eksen boyunca elde edilen basınç yükseklikleri, farklı türbülans modellerine göre elde edilen basınç yükseklikleri ile kıyaslanmıştır. Analizler neticesinde elde edilen basınç yükseklikleri, dolusavak boşaltım kanalı boyunca deneysel basınç yükseklikleri ile uyumlu iken, düşüm havuzundaki noktalarda bir miktar farklılık olduğu görülmektedir. Bu durum literatürdeki çalışmalarda da [65, 84] gözlenmiştir. Usta [65], Laleli Barajı dolusavağını Flow-3D yazılımı ve RNG türbülans modeli ile sayısal olarak incelemiştir. Farklı çözüm ağları kullandığı çalışmada dolusavak merkezinde bulunan 30 farklı noktada basınç ölçümü yapmıştır. Elde ettiği sonuçları, ODTÜ Hidromekanik laboratuvarında yapılan fiziksel model sonuçları ile kıyaslamıştır. Fiziksel model ve sayısal model sonuçlarının kıyaslanması neticesinde, tüm çözüm ağlarında dolusavak boşaltım kanalı boyunca basınç ölçümleri deneysel sonuçlarla genel olarak uyumlu iken dolusavağın sıçratma ucu bölgesinde deneysel sonuçlara göre oldukça yüksek sapmalar elde ettiğini vurgulamıştır. Yang vd. [84], basamaklı dolusavaklar boyunca VOF yöntemi ve RNG türbülans modeli ile sayısal olarak basınç ölçümleri yapmışlardır. Elde ettikleri sayısal basınç değerlerini deneysel basınç değerleri ile kıyaslamaları neticesinde, sayısal basınç değerlerinde deneysel basınç değerlerine göre maksimum % 30 ve ortalama % 7.10’luk bir hata gözlemlediklerini ifade etmişlerdir.



Şekil 4.3. Sağ eksen boyunca oluşan basınç çizgileri



Şekil 4.4. Orta eksen boyunca oluşan basınç çizgileri



Şekil 4.5. Sol eksen boyunca oluşan basınç çizgileri

4.1.3. Su yüzü profilinin incelenmesi

Dolusavak boyunca oluşan su yüzü profillerini belirlemek amacıyla, deneysel çalışmalarda [12] olduğu gibi yaklaşım kanalından enerji kırıcı havuzun sonuna kadar sol eksen, orta eksen ve sağ eksen boyunca su yüzü ölçümleri 592.85 m³/s'lik debi için yapılmıştır. Farklı türbülans modelleri ile yürütülen analizler neticesinde elde edilen su yüzü profilleri ile deneysel sonuçların [12] karşılaştırılması neticesinde elde edilen bağıl hata oranları Tablo 4.3'te verilmiştir. Sol eksen, orta eksen ve sağ eksen boyunca oluşan su yüzü profilleri için en uyumlu türbülans modelinin % 0.159'luk ortalama bağıl hata ile LES olduğu görülmektedir.

Tablo 4.3. Su yüzü profili ve bağıl hata değerleri

Eksen	Yatay mesafe (m)	Su yüzü profili değerleri					Bağıl hata (%)			
		Deneysel Sonuçlar [12]	$k-\epsilon$	$k-\omega$	LES	RNG	$k-\epsilon$	$k-\omega$	LES	RNG
SOL EKSEN	-8.00	198.32	198.65	198.59	198.57	198.59	0.166	0.136	0.126	0.136
	-4.00	198.22	198.68	198.66	198.64	198.66	0.232	0.222	0.212	0.222
	0.00	197.92	198.45	198.47	198.44	198.46	0.268	0.278	0.263	0.273
	4.00	197.68	197.90	197.88	197.87	197.88	0.111	0.101	0.096	0.101
	8.00	197.18	197.48	197.38	197.37	197.38	0.152	0.101	0.096	0.101
	12.00	196.88	197.12	197.02	197.00	197.00	0.122	0.071	0.061	0.061
	16.00	196.34	196.32	196.33	196.33	196.33	0.010	0.005	0.005	0.005
	18.00	195.84	195.75	195.76	195.76	195.78	0.046	0.041	0.041	0.031
	20.00	195.14	195.00	194.98	195.00	194.98	0.072	0.082	0.072	0.082
	22.00	194.20	193.99	193.96	194.00	194.00	0.108	0.124	0.103	0.103
	24.00	193.00	192.77	192.79	192.82	192.81	0.119	0.109	0.093	0.098
	26.00	191.48	191.20	191.23	191.23	191.22	0.146	0.131	0.131	0.136
	27.14	190.36	190.10	190.13	190.15	190.12	0.137	0.121	0.110	0.126
	31.14	186.28	186.08	186.08	186.28	186.08	0.107	0.107	0.000	0.107
	38.14	178.64	179.00	178.82	178.80	178.80	0.202	0.101	0.090	0.090
	46.14	171.40	171.47	171.45	171.82	171.33	0.041	0.029	0.245	0.041
	61.14	156.60	156.48	156.84	157.20	156.83	0.077	0.153	0.383	0.147
	68.64	149.28	148.99	149.32	149.69	149.33	0.194	0.027	0.275	0.033
	76.14	141.68	141.52	141.48	141.48	141.35	0.113	0.141	0.141	0.233
	82.54	136.00	135.51	135.65	135.70	136.17	0.360	0.257	0.221	0.125
	86.54	137.00	136.56	136.28	136.65	136.38	0.321	0.526	0.255	0.453
	90.54	138.68	137.58	137.87	138.01	137.73	0.793	0.584	0.483	0.685
	94.54	138.00	137.42	137.47	137.54	137.23	0.420	0.384	0.333	0.558
	98.54	137.48	137.44	137.37	137.29	137.18	0.029	0.080	0.138	0.218
	102.54	137.48	137.38	137.26	137.27	137.17	0.073	0.160	0.153	0.225
	106.54	136.92	137.20	137.14	137.17	137.08	0.204	0.161	0.183	0.117
	110.00	136.12	136.71	136.67	136.71	136.66	0.433	0.404	0.433	0.397

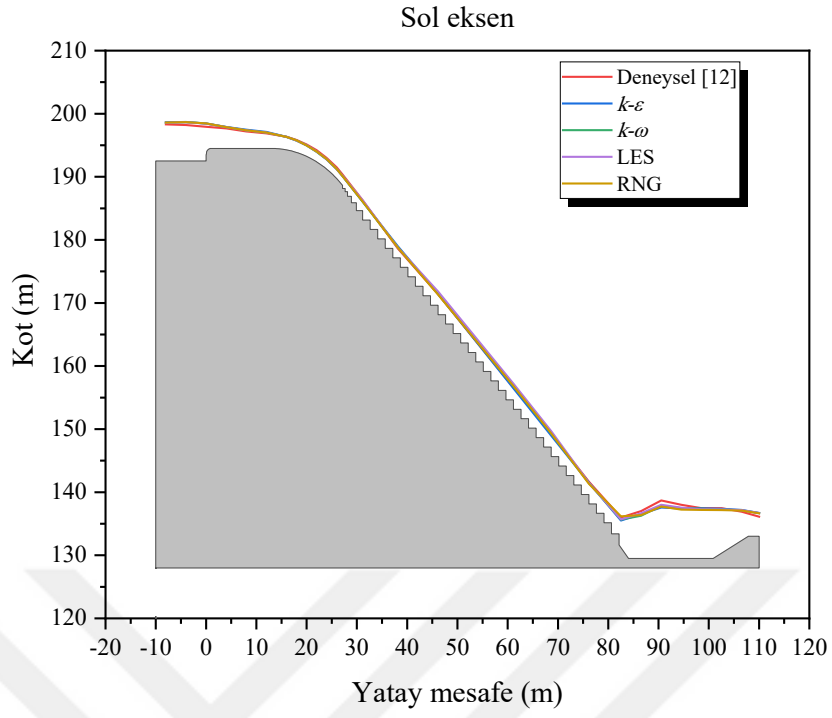
Tablo 4.3. Devamı

Eksen	Yatay mesafe (m)	Su yüzü profili değerleri					Bağıl hata (%)			
		Deneysel Sonuçlar [12]	$k-\varepsilon$	$k-\omega$	LES	RNG	$k-\varepsilon$	$k-\omega$	LES	RNG
ORTA EKSEN	16.00	195.74	195.64	195.70	195.71	195.70	0.051	0.020	0.015	0.020
	18.00	195.74	195.71	195.77	195.78	195.78	0.015	0.015	0.020	0.020
	20.00	195.36	195.33	195.21	195.31	195.30	0.015	0.077	0.026	0.031
	22.00	194.56	194.42	194.35	194.36	194.34	0.072	0.108	0.103	0.113
	24.00	193.44	193.23	193.16	193.16	193.00	0.109	0.145	0.145	0.227
	26.00	191.96	191.68	191.60	191.60	191.59	0.146	0.188	0.188	0.193
	27.14	191.06	190.80	190.47	190.48	190.46	0.136	0.309	0.304	0.314
	31.14	187.32	186.88	186.85	186.85	186.85	0.235	0.251	0.251	0.251
	38.14	178.84	178.85	179.15	179.15	179.15	0.006	0.173	0.173	0.173
	46.14	171.40	171.30	171.45	171.47	171.45	0.058	0.029	0.041	0.029
	61.14	156.80	156.53	156.83	156.84	156.84	0.172	0.019	0.026	0.026
	68.64	149.00	148.65	148.83	148.97	148.98	0.235	0.114	0.020	0.013
	76.14	141.80	141.84	141.86	141.56	141.52	0.028	0.042	0.169	0.197
	82.54	135.88	135.62	135.77	135.83	135.46	0.191	0.081	0.037	0.309
	86.54	136.64	136.13	136.32	136.52	136.23	0.373	0.234	0.088	0.300
	90.54	138.56	137.61	137.92	137.81	137.66	0.686	0.462	0.541	0.650
	94.54	138.40	137.54	137.90	137.97	137.71	0.621	0.361	0.311	0.499
	98.54	137.68	137.26	137.39	137.43	137.40	0.305	0.211	0.182	0.203
	102.54	137.68	137.28	137.28	137.32	137.42	0.291	0.291	0.261	0.189
	106.54	137.28	137.23	137.17	137.17	137.34	0.036	0.080	0.080	0.044
	110.00	136.35	136.80	136.72	136.72	136.86	0.330	0.271	0.271	0.374
SAĞ EKSEN	-8.00	198.76	198.65	198.62	198.59	198.62	0.055	0.070	0.086	0.070
	-4.00	198.72	198.68	198.67	198.66	198.68	0.020	0.025	0.030	0.020
	0.00	198.48	198.48	198.47	198.46	198.48	0.000	0.005	0.010	0.000
	4.00	197.92	197.91	197.90	197.88	197.91	0.005	0.010	0.020	0.005
	8.00	197.42	197.49	197.41	197.40	197.41	0.035	0.005	0.010	0.005
	12.00	197.08	197.12	197.04	197.02	197.04	0.020	0.020	0.030	0.020
	16.00	196.44	196.32	196.34	196.33	196.34	0.061	0.051	0.056	0.051
	18.00	195.90	195.78	195.75	195.75	195.76	0.061	0.077	0.077	0.071
	20.00	195.12	194.99	195.00	195.00	195.02	0.067	0.062	0.062	0.051
	22.00	194.10	193.98	194.00	194.00	194.01	0.062	0.052	0.052	0.046
	24.00	192.80	192.77	192.82	192.83	192.82	0.016	0.010	0.016	0.010
	26.00	191.32	191.20	191.23	191.22	191.20	0.063	0.047	0.052	0.063
	27.14	190.34	190.12	190.09	190.16	190.12	0.116	0.131	0.095	0.116
	31.14	186.16	186.12	186.08	185.93	186.08	0.021	0.043	0.124	0.043
	38.14	179.14	179.80	180.17	180.17	179.81	0.368	0.575	0.575	0.374
	46.14	171.56	171.32	171.46	171.81	171.46	0.140	0.058	0.146	0.058
	61.14	156.64	156.98	156.83	156.48	156.48	0.217	0.121	0.102	0.102
	68.64	149.11	149.09	149.32	149.34	149.32	0.013	0.141	0.154	0.141
	76.14	141.78	141.52	141.84	141.48	141.48	0.183	0.042	0.212	0.212

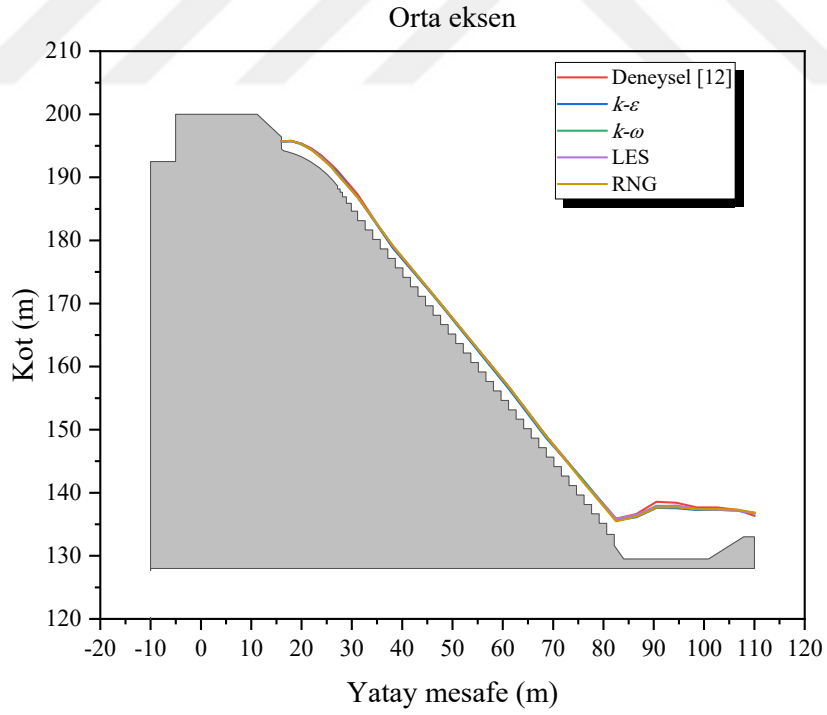
Tablo 4.3. Devamı

Eksen	Yatay mesafe (m)	Su yüzü profili değerleri					Bağıl hata (%)			
		Deneysel Sonuçlar [12]	$k-\varepsilon$	$k-\omega$	LES	RNG	$k-\varepsilon$	$k-\omega$	LES	RNG
SAĞ EKSEN	82.54	136.00	135.47	135.30	135.60	135.76	0.390	0.515	0.294	0.176
	86.54	137.08	136.48	136.42	136.86	136.94	0.438	0.481	0.160	0.102
	90.54	138.80	137.82	138.09	137.85	137.78	0.706	0.512	0.684	0.735
	94.54	137.60	137.51	137.39	137.54	137.49	0.065	0.153	0.044	0.080
	98.54	137.40	137.55	137.31	137.52	137.43	0.109	0.066	0.087	0.022
	102.54	137.40	137.58	137.22	137.46	137.39	0.131	0.131	0.044	0.007
	106.54	137.00	137.43	137.12	137.35	137.23	0.314	0.088	0.255	0.168
	110.00	136.11	136.78	136.60	136.75	136.65	0.492	0.360	0.470	0.397
	Ortalama Bağıl Hata (%)						0.178	0.160	0.159	0.163

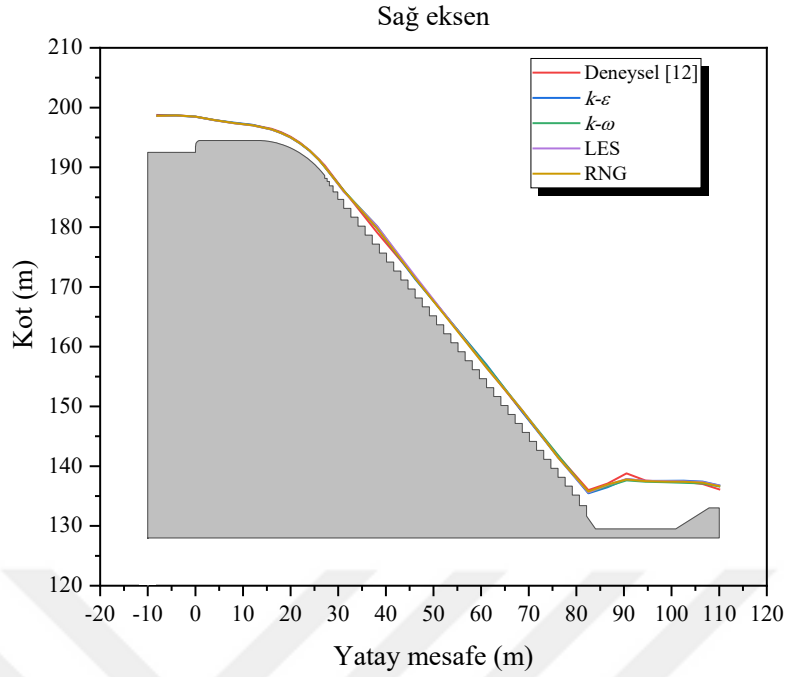
Şekil 4.6-4.8’de sol, orta ve sağ eksen boyunca oluşan deneysel [12] ve sayısal su yüzü profilleri gösterilmiştir. Sol, orta ve sağ eksenlerde oluşan su yüzü profilleri incelendiğinde, tüm türbülans modelleri ile elde edilen sayısal su yüzü profilleri, dolusavak boşaltım kanalı boyunca neredeyse deneysel sonuçlarla [12] birebir aynı iken düşüm havuzunda bir miktar farklılık olduğu görülmektedir. Literatürde konu ile ilgili Flow-3D yazılımı ve farklı türbülans modelleri ile yapılmış olan çalışmalar [22, 85] mevcuttur. Bu çalışmalarda da araştırmacıların sayısal olarak elde ettikleri su yüzü profili, boşaltım kanalı boyunca deneysel su yüzü profili ile neredeyse birebir uyumlu iken düşüm havuzu bölgesinde ise bir miktar farklılık göstermektedir. Jabbar [22], basamaklı dolusavaklarda Flow-3D yazılımını ve RNG türbülans modelini kullanarak kullanarak dolusavak su yüzü profilini ve enerji sönmüleme oranlarını sayısal olarak incelemiştir. Çalışma kapsamında 27 adet analiz yürüten araştırmacı, elde ettiği sayısal sonuçları deneysel sonuçlar ile kıyaslaması neticesinde su yüzü profilinde ortalama % 3.50’luk bir hata değeri olduğunu ifade etmiştir. Ayrıca araştırmacı analizlerde genel olarak sayısal su yüzü profillerinin boşaltım kanalı boyunca deneysel su yüzü profilleri ile oldukça uyumlu iken bazı analizlerde düşüm havuzundaki birkaç noktada % 50’ye varan hata değerleri oluştuğunu ifade etmiştir. Aydın vd. [85], Köprü Barajı dolusavağının 5223 m³/s’lik debi değerinde oluşan su yüzü profillerini Flow-3D yazılımı ve $k-\varepsilon$ türbülans modeli ile sayısal olarak incelemişlerdir. Araştırmacılar, dolusavağın hem orta eksenini hem de kenar duvarı boyunca elde ettikleri su yüzü profillerini, DSİ TAKK dairesi başkanlığı tarafından gerçekleştirilen deneysel su yüzü profilleri ile yükseklikleri ile karşılaştırmışlardır. Yapmış oldukları karşılaştırmalar neticesinde dolusavağın hem orta eksenini hem de kenar duvarı boyunca elde ettikleri su yüzü profillerinin boşaltım kanalı boyunca neredeyse deneysel sonuçlarla birebir uyumlu olduğunu, akımın kuyruk suyuna daldığı sıçratma ucu bölgesinde ise deneysel ve sayısal su yüzü profilleri arasında bir miktar fark olduğunu ifade etmişlerdir.



Şekil 4.6. Sol eksen su yüzü profili



Şekil 4.7. Orta eksen su yüzü profili

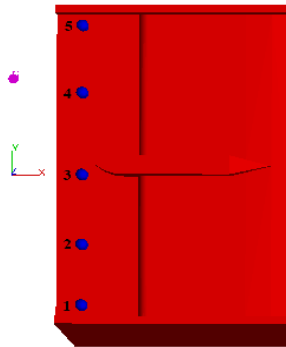


Şekil 4.8. Sağ eksen su yüzü profili

4.1.4. Hız Ölçümleri

4.1.4.1. Dolusavak yaklaşım kanalında akım hızlarının incelenmesi

Dolusavak yaklaşım kanalında hızlar, deneysel çalışmalarda [12] yapıldığı gibi sayısal model çalışmalarında da 5 farklı noktada ve her bir noktada yaklaşım kanalı tabanından itibaren 5 farklı akım yüksekliği (0, 1.20, 2.40, 3.60 ve 4.80 m) olmak üzere 25 adet hız ölçümü yapılmıştır. Ölçüm yapılan noktaların konumları Şekil 4.9’da verilmiştir. Yaklaşım kanalında yapılan akım hızı ölçümleri 592.85 m³/s’lik debi değerinde gerçekleştirilmiştir. Sayısal sonuçlarla deneysel sonuçların [12] kıyaslanması neticesinde elde edilen akım hızı değerleri ve bağlı hata oranları Tablo 4.4’te verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, en uyumlu türbülans modelinin % 7.80’lik ortalama bağlı hata ile $k-\varepsilon$ olduğu görülmektedir.

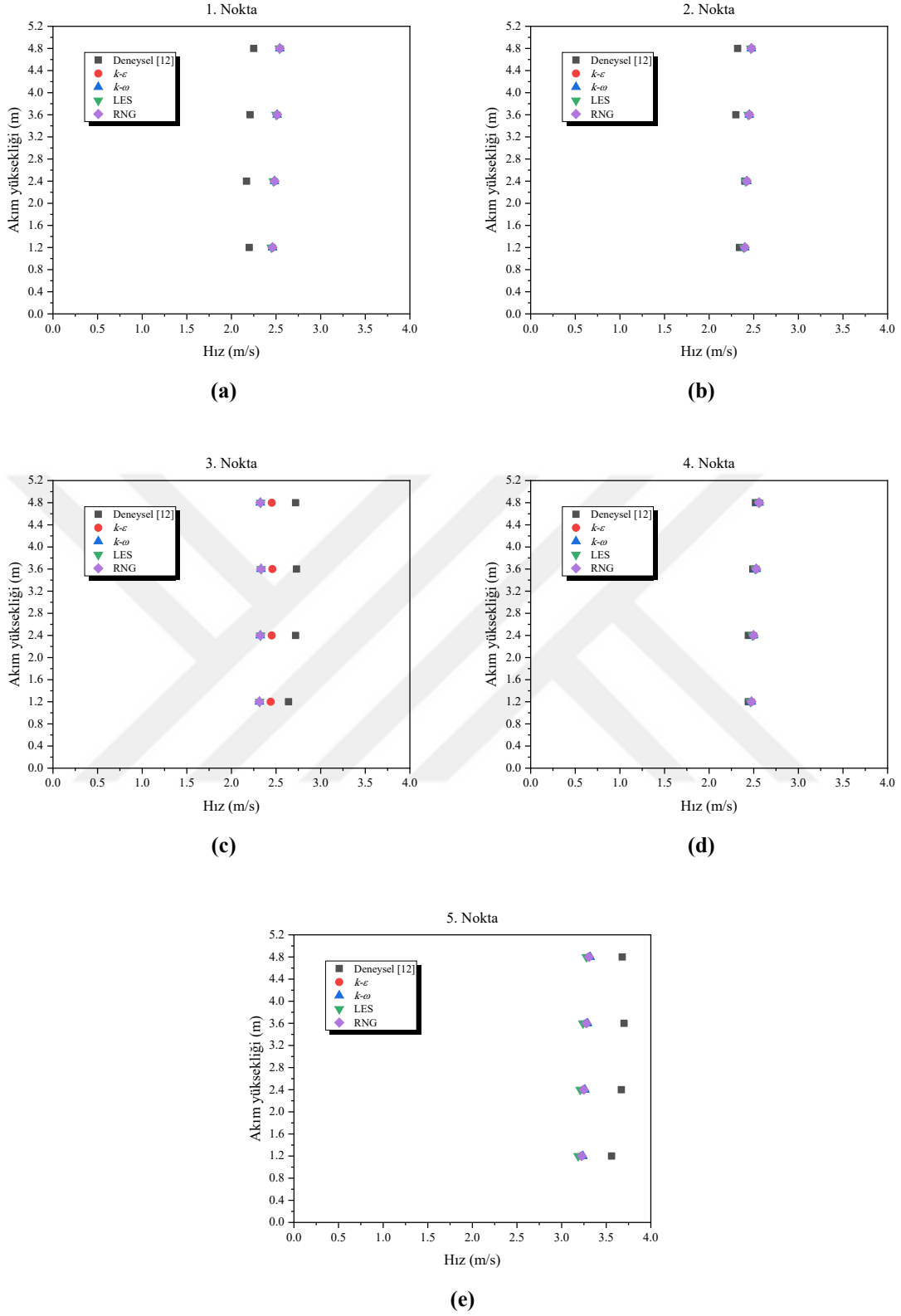


Şekil 4.9. Yaklaşım kanalında akım hızı ölçüm noktalarının plan görünümü

Tablo 4.4. Yaklaşım kanalı hız ölçümleri

Nokta numarası	Akım yüksekliği (m)	Hız (m/s)					Bağıl hata (%)			
		Deneysel sonuçlar [12]	$k-\epsilon$	$k-\omega$	LES	RNG	$k-\epsilon$	$k-\omega$	LES	RNG
1.NOKTA	1.20	2.20	2.46	2.46	2.45	2.46	11.82	11.82	11.36	11.82
	2.40	2.17	2.48	2.48	2.47	2.48	14.29	14.29	13.82	14.29
	3.60	2.21	2.51	2.51	2.50	2.51	13.57	13.57	13.12	13.57
	4.80	2.25	2.54	2.54	2.54	2.54	12.89	12.89	12.89	12.89
2.NOKTA	1.20	2.34	2.40	2.40	2.39	2.40	2.56	2.56	2.14	2.56
	2.40	2.40	2.42	2.42	2.41	2.42	0.83	0.83	0.42	0.83
	3.60	2.30	2.45	2.45	2.44	2.45	6.52	6.52	6.09	6.52
	4.80	2.32	2.47	2.47	2.47	2.47	6.47	6.47	6.47	6.47
3.NOKTA	1.20	2.64	2.44	2.31	2.32	2.31	7.58	12.50	12.12	12.50
	2.40	2.72	2.45	2.32	2.33	2.32	9.93	14.71	14.34	14.71
	3.60	2.73	2.46	2.33	2.33	2.33	9.89	14.65	14.65	14.65
	4.80	2.72	2.45	2.32	2.33	2.32	9.93	14.71	14.34	14.71
4.NOKTA	1.20	2.44	2.48	2.47	2.46	2.47	1.64	1.23	0.82	1.23
	2.40	2.44	2.50	2.50	2.49	2.50	2.46	2.46	2.05	2.46
	3.60	2.49	2.53	2.53	2.52	2.53	1.61	1.61	1.20	1.61
	4.80	2.52	2.56	2.56	2.56	2.56	1.59	1.59	1.59	1.59
5. NOKTA	1.20	3.56	3.22	3.24	3.19	3.23	9.55	8.99	10.39	9.27
	2.40	3.67	3.25	3.26	3.21	3.25	11.44	11.17	12.53	11.44
	3.60	3.70	3.28	3.29	3.24	3.28	11.35	11.08	12.43	11.35
	4.80	3.68	3.31	3.32	3.28	3.31	10.05	9.78	10.87	10.05
Ortalama bağıl hata (%)							7.80	8.67	8.68	8.73

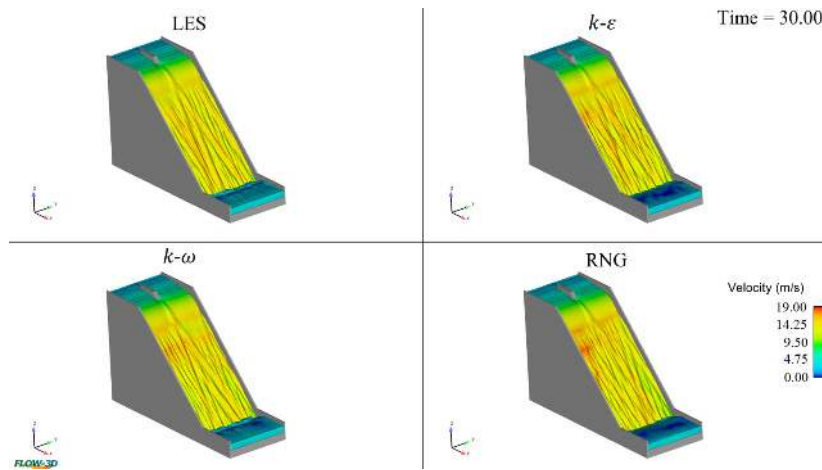
Deneysel [12] ve sayısal çalışma neticesinde elde edilen akım hızı profilleri Şekil 4.10'da verilmiştir. Akım hızı profilleri incelendiğinde, 2. ve 4.noktada elde edilen sayısal sonuçların deneysel sonuçlarla oldukça uyumlu olduğu, 1, 3 ve 5.noktalardaki ölçümlerin ise deneysel sonuçlarla bir miktar farklı olduğu görülmektedir. Ayrıca 3.nokta ölçümleri hariç tüm türbülans modellerinin birbirlerine oldukça yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. 3. noktadaki ölçümlerde ise $k-\epsilon$ türbülans modelinin diğer modellere kıyasla deneysel sonuçlarla daha uyumlu olduğu görülmektedir. Deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki farklılığın duvar bölgelerine yakın noktalarda görülmesinin y^+ değerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Sayısal simülasyonlarda duvar bölgelerinde oluşan viskoz etkileri daha net görebilmek için bu bölgelere çok daha hassas çözüm ağlarının kullanılması gerekmektedir [86]. Ancak mevcut çalışmada kullanılan toplam hücre sayısının 7 milyon civarında olması ve geometrinin kapsamlı olması nedeniyle daha hassas çözüm ağı için çok daha kapsamlı iş istasyonuna gereksinim olduğu düşünülmektedir.



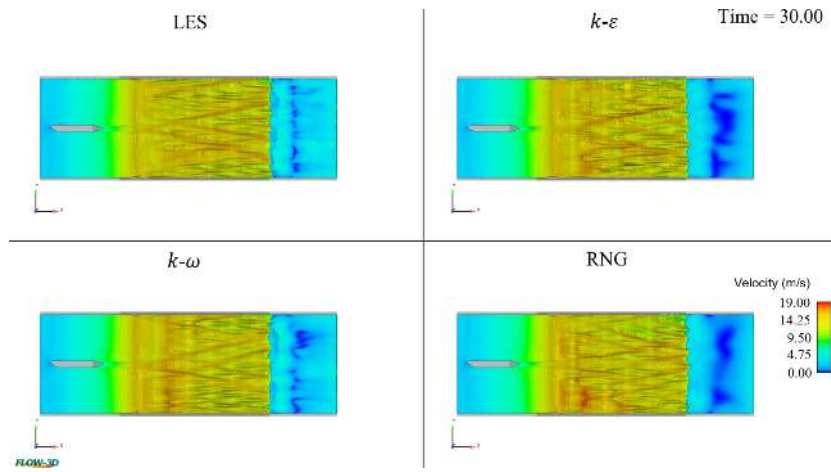
Şekil 4.10. Yaklaşım kanalı hız ölçümleri: a) 1.nokta, b) 2.nokta, c) 3.nokta; d) 4.nokta, e) 5.nokta

4.1.4.2. Dolusavak hız dağılımları

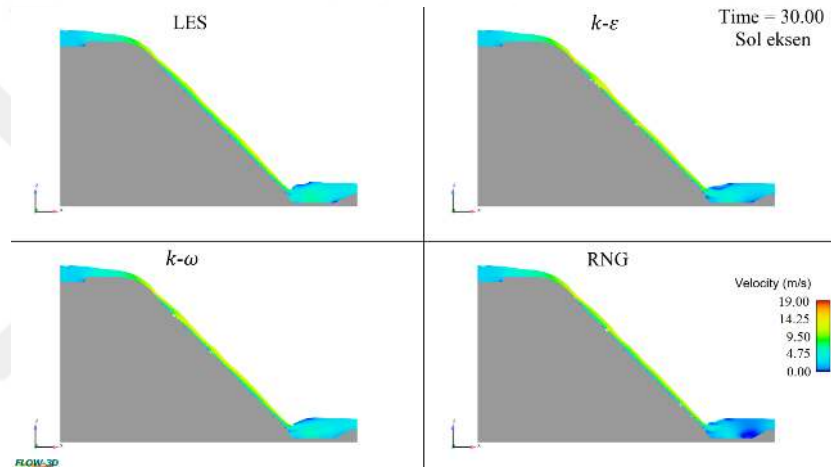
Dolusavak boyunca 592.85 m³/s'lik debi değerinde oluşan hız dağılımları Şekil 4.11'de verilmiştir. Elde edilen sonuçların genel olarak tüm türbülans modelleri için hız dağılımlarında küçük farklılıklar olsa da sonuç aralıklarının birbirlerine oldukça yakın olduğu, düşüm havuzundaki hız dağılımlarında ise $k-\varepsilon$ ve RNG türbülans modelinin diğer modellere kıyasla daha düşük hız değerleri verdiği görülmektedir (Şekil 4.11.b). Literatürde yapılan çalışmalar ile kıyaslama yapıldığında, Attarian vd. [38], basamaklı dolusavaklar boyunca hız profilini sayısal olarak $k-\varepsilon$ türbülans modeli ile incelemişler ve elde ettikleri sayısal sonuçları deneysel sonuçlarla [39] karşılaştırmaları neticesinde hız değerlerinde maksimum %13.40 ve ortalama %3.20'lik bir hata gözlemlediklerini ifade etmişlerdir. ZhongDong [87], basamaklı dolusavaklar boyunca hız profilini dört farklı türbülans modeli (Realizable $k-\varepsilon$, SST $k-\omega$, v^2-f ve LES) ile sayısal olarak incelemişlerdir. Dört farklı türbülans modeli ile elde edilen sonuçları deneysel sonuçlar ile kıyaslamaları neticesinde, deneysel sonuçlarla en uyumlu sonuçlar veren türbülans modelinin Realizable $k-\varepsilon$ olduğu sonucuna varmışlardır. Yang vd. [84], basamaklı dolusavaklarda VOF yöntemi ve RNG türbülans modeli ile sayısal olarak hız ölçümleri yapmışlardır. Elde ettikleri sayısal sonuçları deneysel sonuçlarla kıyaslamaları neticesinde, hız değerlerinde maksimum %14.80 ve ortalama % 5'lik bir hata gözlemlediklerini ifade etmişlerdir.



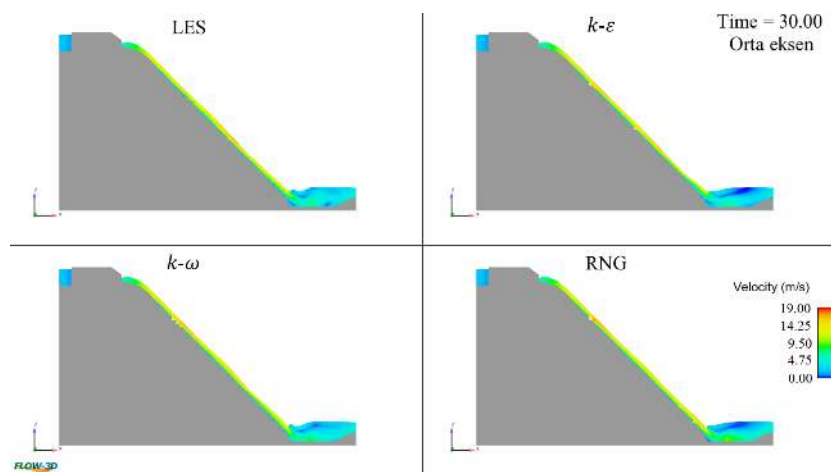
(a)



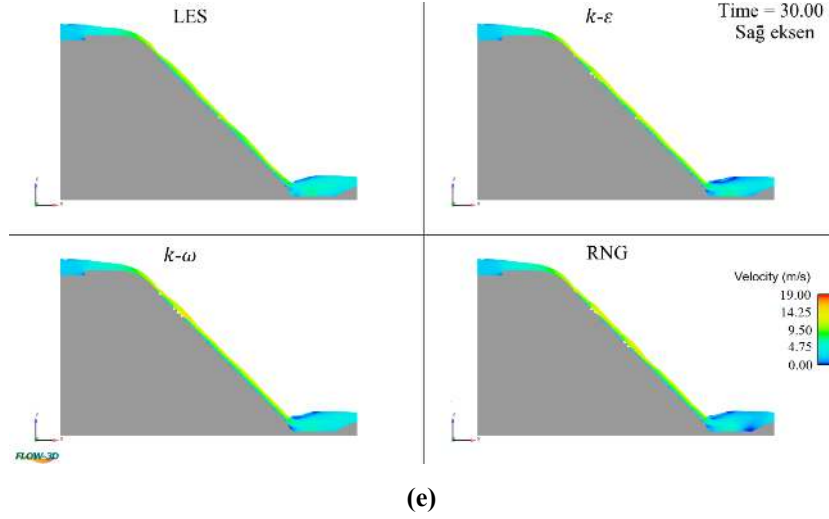
(b)



(c)



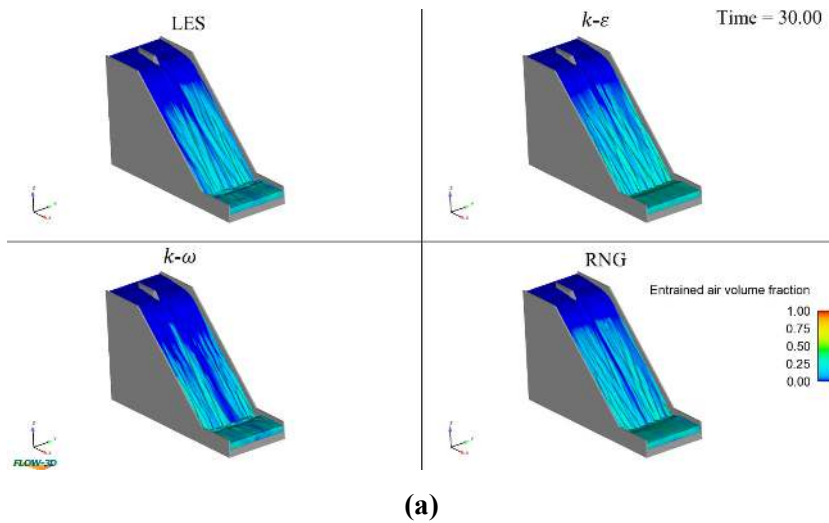
(d)

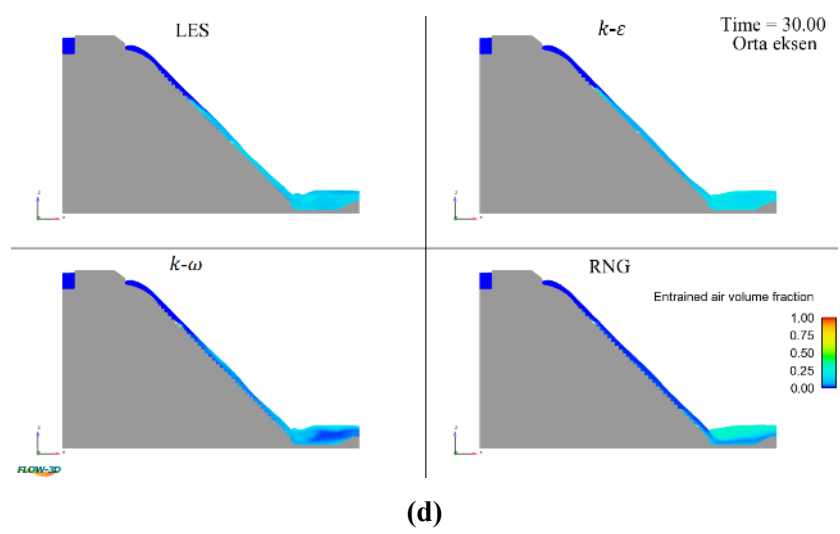
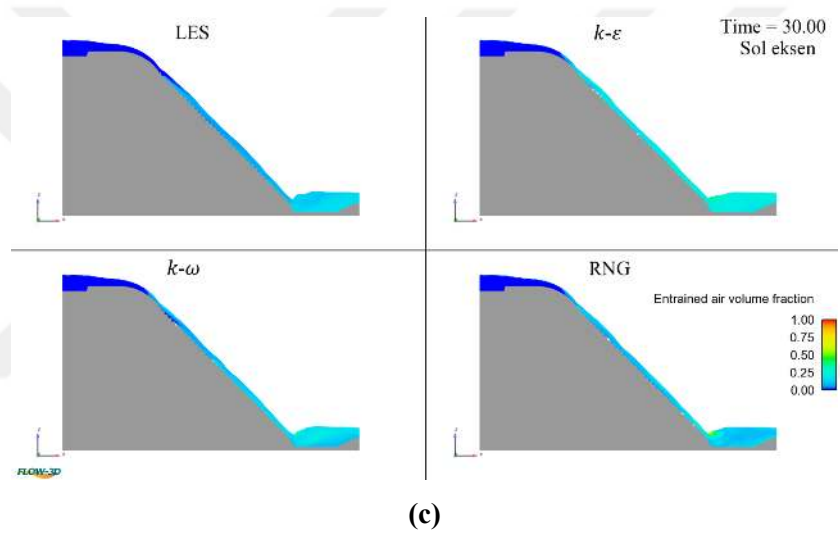
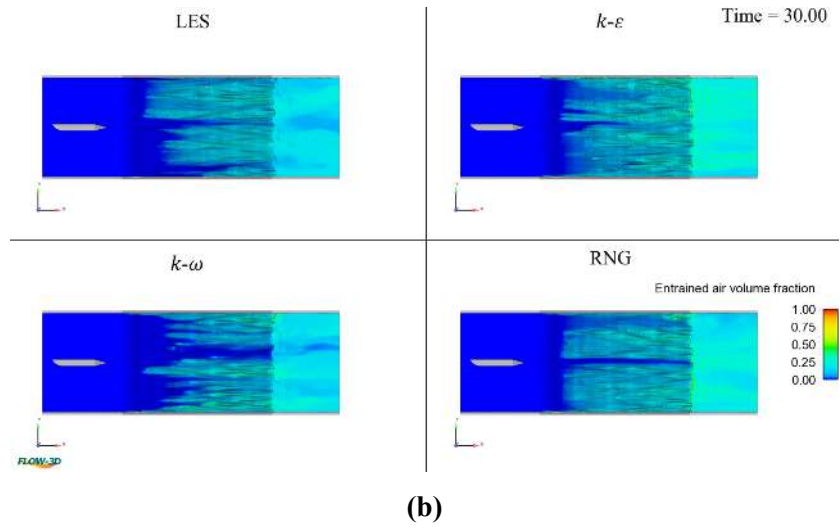


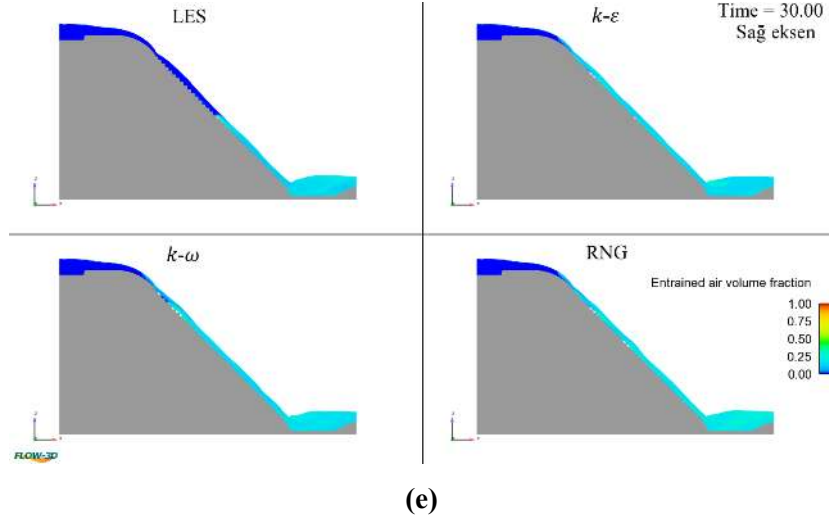
Şekil 4.11. Farklı türbülans modelleri için dolusavak boyunca meydana gelen hız dağılımları: a) Perspektif görünümü, b) Plan görünümü, c) Sol eksen, d) Orta eksen, e) Sağ eksen

4.1.5. Hava Konsantrasyonu

Çift fazlı akım kullanılarak yürütülen analizler neticesinde $592.85 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik debi için dolusavak boyunca elde edilen hava konsantrasyonu dağılımları Şekil 4.12'de verilmiştir. Genel olarak, elde edilen hava konsantrasyonu değerlerinin tüm türbülans modellerinde yaklaşık olarak aynı aralıkta değiştiği görülmektedir. Dolusavak membasına yerleştirilen köprü ayağı sebebiyle ayrılan akım içerisine giren hava miktarı, $k-\epsilon$ ve RNG için başlangıç bölgesinde simetrik bir görüntü oluştururken LES ve $k-\omega$ için asimetrik bir görüntü elde edilmiştir (Şekil 4.12.a).







Şekil 4.12. Farklı türbülans modelleri için dolusavak boyunca meydana gelen hava konsantrasyonu dağılımları: a) Perspektif görünümü, b) Plan görünümü, c) Sol eksen, d) Orta eksen, e) Sağ eksen

4.1.6. Enerji Sönümleme Oranları

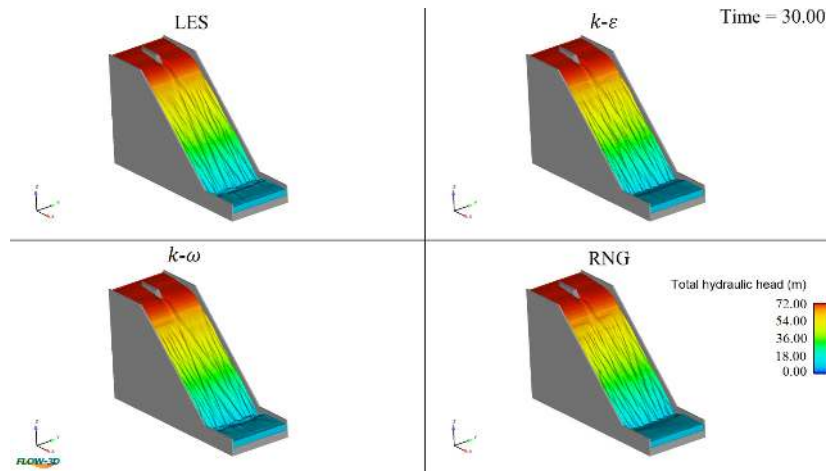
Gökçeler Barajı basamaklı dolusavağı üzerinde 592.85 m³/s'lik debi için oluşan enerji sönümleme oranları, farklı türbülans yöntemleri kullanılarak sayısal olarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla [12] kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre hesaplanan enerji sönümleme oranları ile bağıl hata oranları Tablo 4.5'te verilmiştir. Genel olarak, farklı türbülans yöntemleri kullanılarak yürütülen analiz sonuçları deney sonuçlarına [12] oldukça yakınken, %0.127'lik bağıl hata oranı ile $k-\epsilon$ türbülans modelinin deney sonuçlarına daha yakın olduğu görülmektedir (Tablo 4.5). Tablo 4.5'te de görüldüğü üzere Gökçeler Barajı basamaklı dolusavağı, %86 gibi oldukça yüksek bir enerji sönümleme oranına sahip olduğundan bu sebeple tez kapsamında herhangi bir alternatif tasarım oluşturma gereği duyulmamıştır.

Tablo 4.5. Gökçeler barajı basamaklı dolusavağı enerji sönümleme oranları

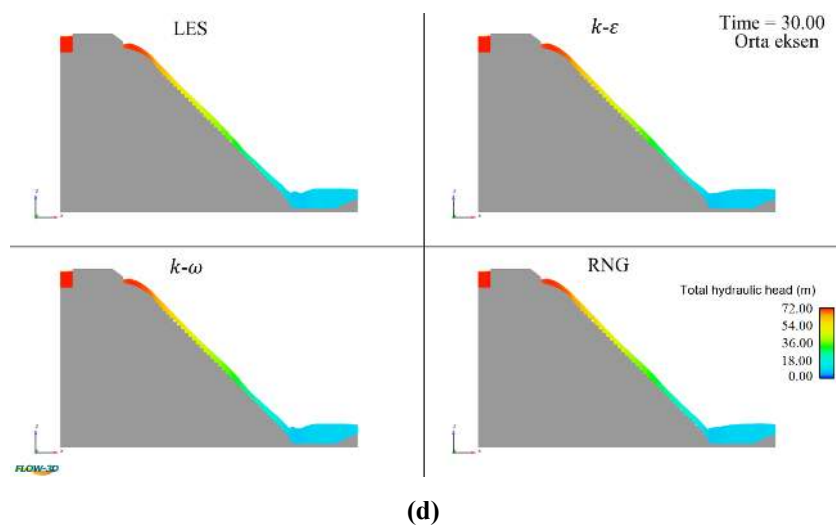
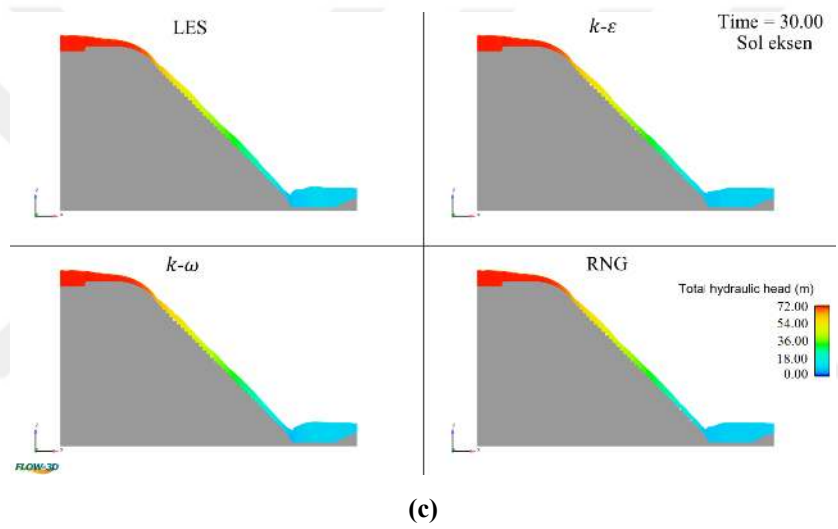
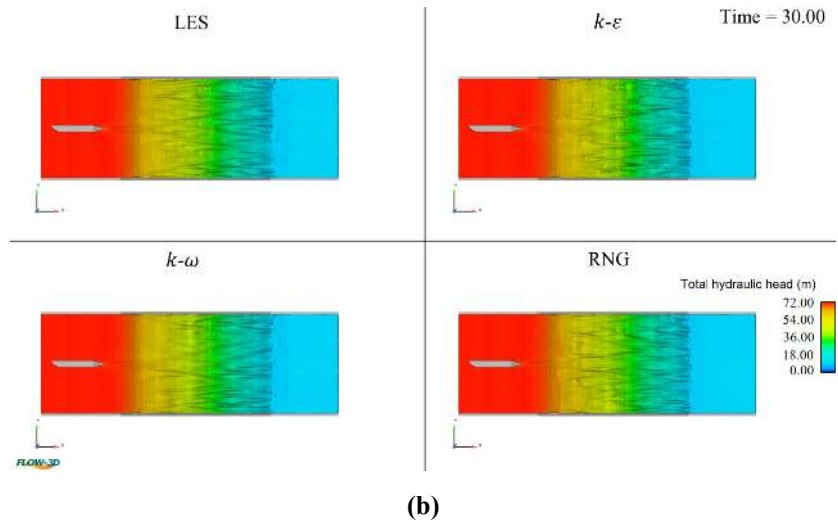
Enerji sönümleme oranı (E_L/E_0) (%)					Bağıl hata (%)			
Deneysel sonuçlar[12]	$k-\epsilon$	$k-\omega$	LES	RNG	$k-\epsilon$	$k-\omega$	LES	RNG
86.45	86.56	87.10	86.81	87.11	0.127	0.752	0.416	0.763

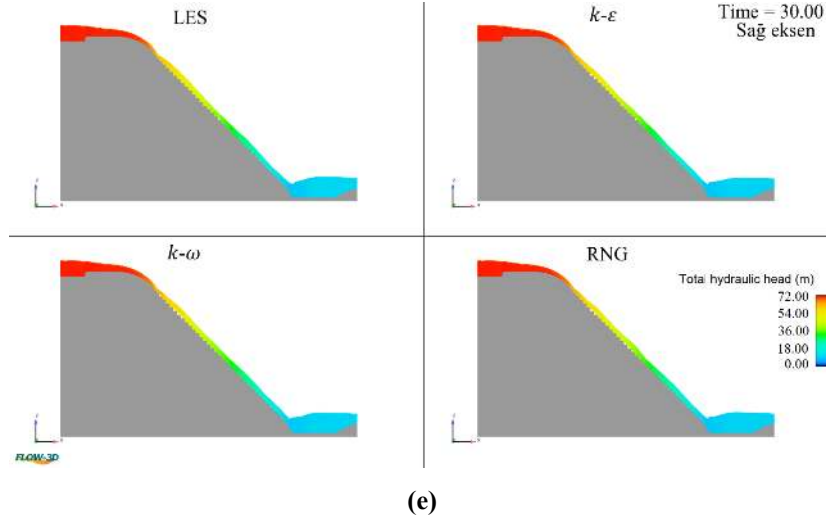
Dolusavak boyunca oluşan enerji dağılımları; perspektif, plan ve üç eksen (sol, orta ve sağ) için oluşturulan boykesitler halinde Şekil 4.13'te verilmiştir. Genel olarak tüm türbülans modellerinin enerji dağılımlarının küçük farklılıklar olsa da birbirlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Literatürdeki çalışmalarda da farklı türbülans modelleri ve yazılımlar kullanılarak basamaklı dolusavakların enerji sönümleme oranları sayısal olarak incelenmiştir. Literatürdeki

çalışmalarda da farklı türbülans modelleri ve yazılımlar kullanılarak basamaklı dolusavakların enerji sönümlenme oranları sayısal olarak incelenmiştir. Attarian vd. [38], basamaklı dolusavaklarda sönümlenen enerji sönümlenme oranlarını sayısal olarak $k-\varepsilon$ türbülans modeli ile incelemiştir. Elde ettikleri sayısal sonuçları deneysel sonuçlarla [39] karşılaştırmaları neticesinde, sayısal enerji sönümlenme oranlarında deneysel enerji sönümlenme oranlarına göre ortalama % 5'lik bir hata gözlemlediklerini ifade etmişlerdir. Hamedi vd. [42], basamaklı dolusavaklarda enerji sönümlenme oranlarını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Sayısal çalışmalarında FLUENT yazılımını ve standart $k-\varepsilon$ türbülans modelini kullanmışlardır. Araştırmacılar, yapmış oldukları deneysel ve sayısal çalışmalarda enerji sönümlenme oranlarını karşılaştırmaları neticesinde, her iki sonuç arasında ortalama % 5.55 civarında bir fark olduğunu gözlemlemişlerdir. Irzooki vd. [44], Flow-3D yazılımı ve $k-\varepsilon$ türbülans modelini kullanarak basamaklı dolusavaklarda enerji sönümlenme Elde ettikleri sonuçlara göre sayısal ve deneysel sonuçlar arasında % 0.15-11.13 aralığında değişen bağıl hata değerleri gözlemlemişlerdir. Jabbar [22], basamaklı dolusavaklarda Flow-3D yazılımını ve RNG türbülans modelini kullanarak enerji sönümlenme oranlarını sayısal olarak incelemiştir. Çalışma kapsamında 27 adet analiz yürüten araştırmacı, elde ettiği sayısal sonuçları deneysel sonuçlar ile kıyaslaması neticesinde deneysel enerji sönümlenme oranları ile sayısal enerji sönümlenme oranları arasında ortalama % 2.75'lik bir hata değeri olduğunu ifade etmiştir.



(a)





Şekil 4.13. Farklı türbülans modelleri için dolusavak boyunca meydana gelen enerji dağılımları: a) Perspektif görünümü, b) Plan görünümü, c) Sol eksen, d) Orta eksen, e) Sağ eksen

4.2. Klasik Basamaklı [13] ve Üçgen Basamaklı Dolusavak Modelleri

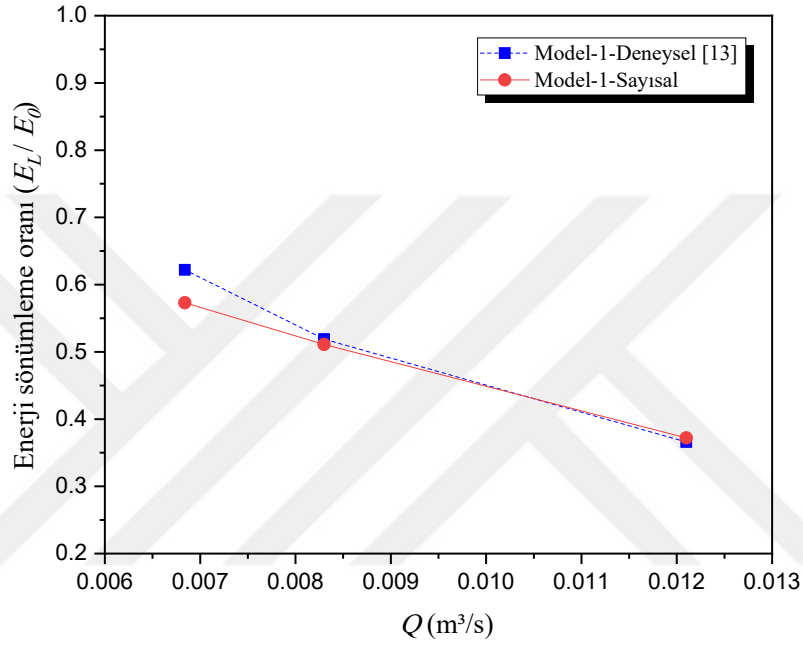
Sayısal çalışmanın doğrulanmasında kullanılan Mero ve Mitchell [13] klasik basamaklı dolusavak modeli ve farklı basamak derinliklerinde (0.005, 0.010 ve 0.015 m) tasarlanan üçgen basamaklı dolusavak modellerinin hız dağılımları, basınç dağılımları ve enerji sönümleme oranları 3 farklı debi için (0.00684, 0.00830 ve 0.01210 m³/s) sayısal olarak incelenmiştir. Gökçeler basamaklı dolusavağı için yürütülen analizlerde, enerji sönümleme oranı için deneysel sonuçlara [12] daha yakın sonuç verdiği için (Tablo 4.5) bu bölümdeki analizlerde $k-\varepsilon$ türbülans modeli kullanılmıştır.

4.2.1. Sayısal Çalışmanın Doğrulaması

Yukarıda bahsedildiği gibi sayısal sonuçları doğrulama amacıyla Mero ve Mitchell [13] tarafından gerçekleştirilen deneysel veriler kullanılmıştır. Deneysel çalışmada [13] olduğu gibi sayısal çalışmada da enerji sönümleme oranının hesabı için mansap kanalındaki akım derinliği kullanılmıştır. Sayısal çalışmada, kanal kesitinde tek bir noktadan ölçüm almak yerine kanal kesiti boyunca cidar bölgeleri çıkarılarak geri kalan bölgeden ortalama değerler okunmuştur. Nitekim Felder vd. [37], yürüttükleri deneysel çalışmada kanal kesitini 4 eşit parçaya bölerek kesitin 1/4-1/2-3/4 noktalarından aldıkları ölçümlerin ortalamaları ile hesaplama yapmışlardır. Deneysel sonuçlar [13] ile sayısal sonuçlar kıyaslandığında, iki çalışma arasında iyi bir uyum olduğu (Şekil 4.14), hesaplanan bağıl hataların %1.54 ile %7.88 aralığında değiştiği görülmektedir (Tablo 4.6). Ortaya çıkan bu bağıl hatalar literatürde yapılan benzer çalışmalarla [22, 38, 42, 44] kıyaslandığında, elde edilen bağıl hataların oldukça makul sonuçlar olduğu görülmektedir.

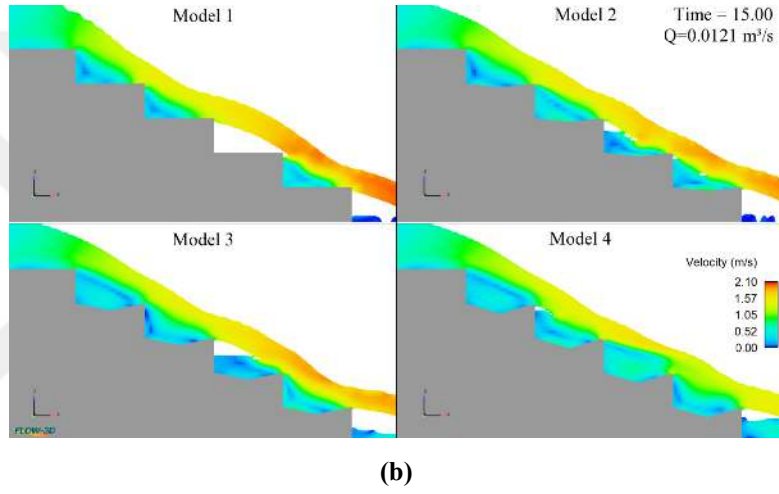
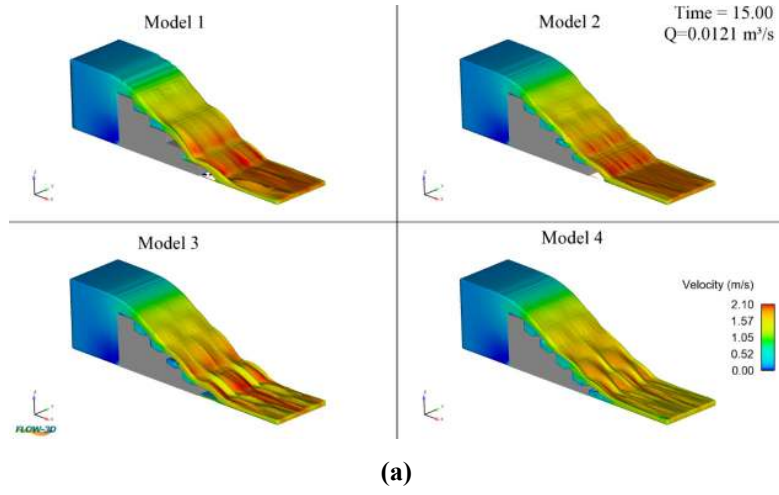
Tablo 4.6. Sayısal çalışmanın doğrulanması

Q (m ³ /s)	Enerji Sönümleme oranı (E_L/E_0) Deney sonuçları [13]	Enerji Sönümleme oranı (E_L/E_0) Sayısal Model	Bağıl hata (%)
0.01210	0.366	0.372	1.64
0.00830	0.519	0.511	1.54
0.00684	0.622	0.573	7.88

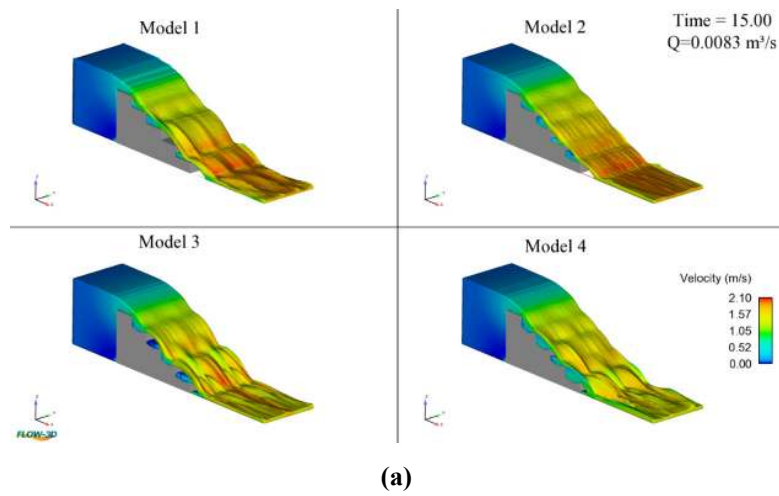
**Şekil 4.14.** Sayısal çalışmanın doğrulanması

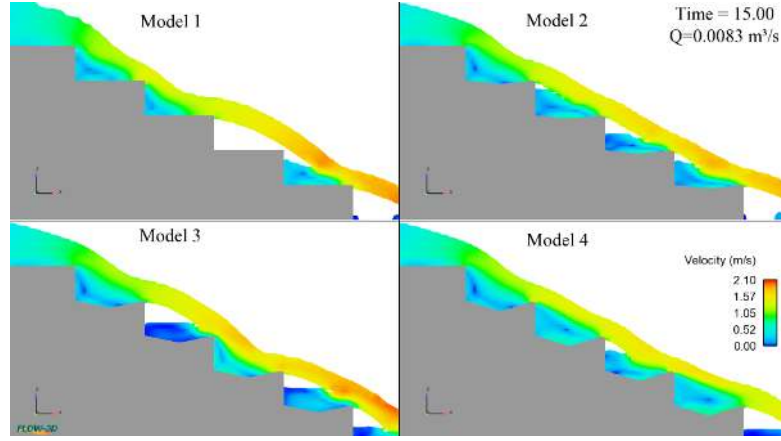
4.2.2. Hız Dağılımları

Üçgen basamaklı dolusavak modelleri ve klasik basamaklı dolusavak modelinde 3 farklı debi için (0.00684, 0.0083 ve 0.0121 m³/s) oluşan hız dağılımları Şekil 4.15-4.17’de verilmiştir. Genel olarak üçgen basamaklı dolusavaklarda, klasik basamaklı dolusavaklara göre dolusavak mansabında daha düşük hız değerleri gözlenmektedir. Ayrıca üçgen basamaklı modellerde basamak derinliği (h_i) arttıkça, dolusavak mansabındaki akım hızının azaldığı görülmektedir (Şekil 4.15-4.17). Bu durumun, basamak derinliğinin artışına bağlı olarak akım içerisine karışan hava miktarının artmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir.



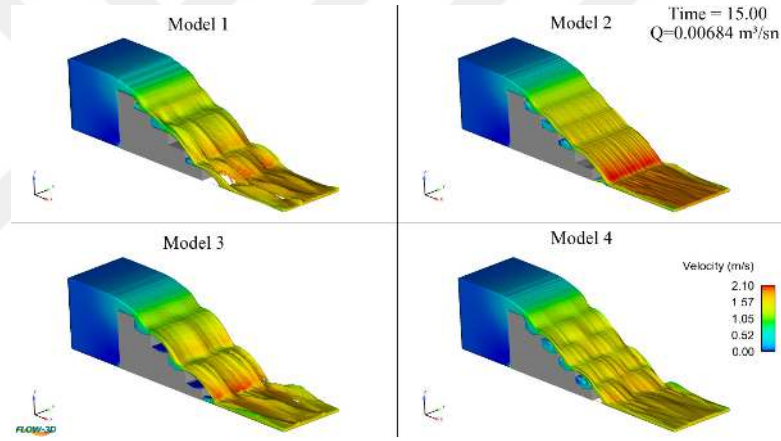
Şekil 4.15. $Q=0.0121 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik debi değerinde tüm modellerde hız dağılımları: a) Perspektif görünümü, b) Kanal eksenli



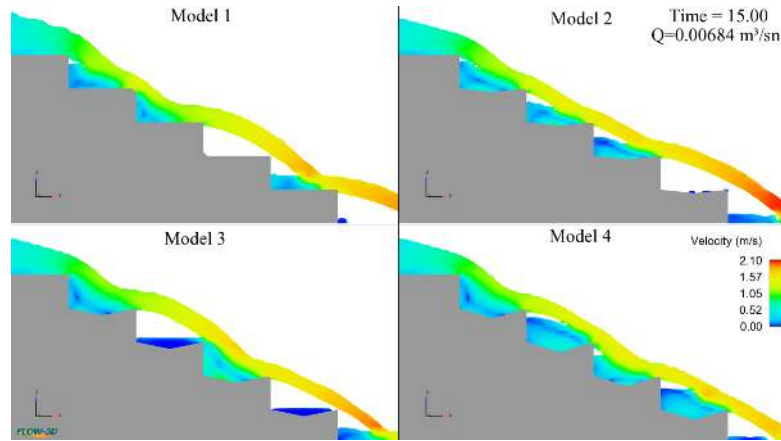


(b)

Şekil 4.16. $Q=0.0083 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik debi değerinde tüm modellerde hız dağılımları: a) Perspektif görünümü, b) Kanal ekseni



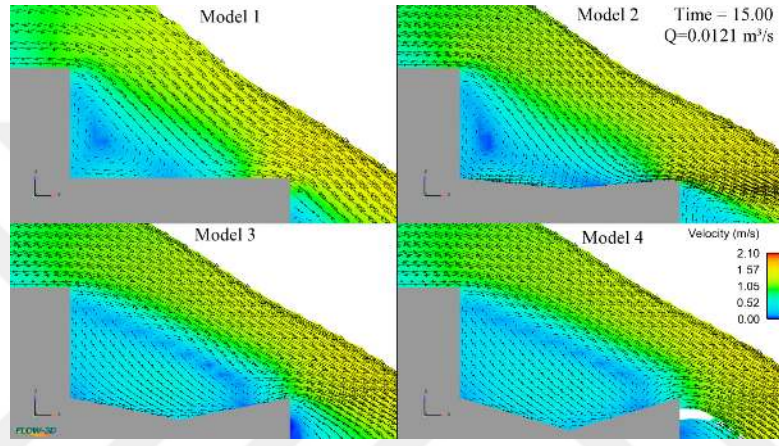
(a)



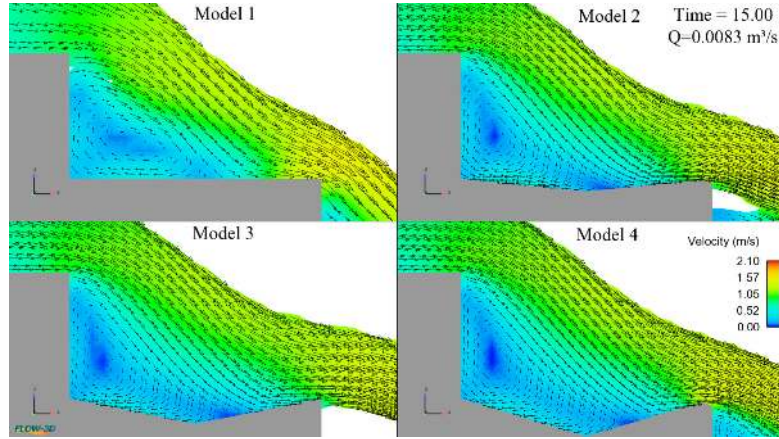
(b)

Şekil 4.17. $Q=0.00684 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik debi değerinde tüm modellerde hız dağılımları: a) Perspektif görünümü, b) Kanal ekseni

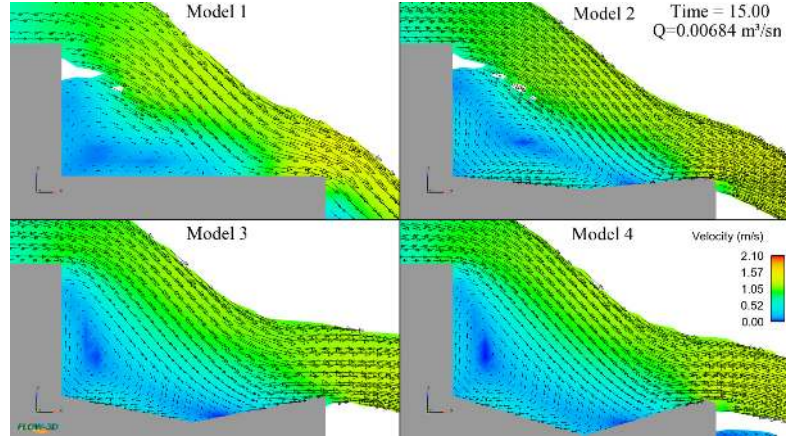
Şekil 4.18-4.20’da klasik basamaklı dolusavak modeli ve üçgen basamaklı dolusavak modellerinde 3 farklı debi için (0.00684, 0.0083 ve 0.0121 m³/s) ikinci basamak üzerinde oluşan hız vektörleri verilmiştir. Klasik basamaklı model ve üçgen basamaklı modellerin tümünde, basamak uçlarında en yüksek hız değerleri gözlenirken, basamak tabanına doğru hız değerleri azalmaktadır. Hız vektörleri incelendiğinde izafi taban altında çevrinti bölgelerinin oluştuğu görülmektedir. Ayrıca üçgen basamaklı dolusavak modellerinde, klasik basamaklı dolusavağa göre daha büyük bir alanda çevrinti oluştuğu görülmektedir (Şekil 4.18-4.20).



Şekil 4.18. $Q=0.0121 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik debi değerinde tüm modellerde hız vektörü dağılımları



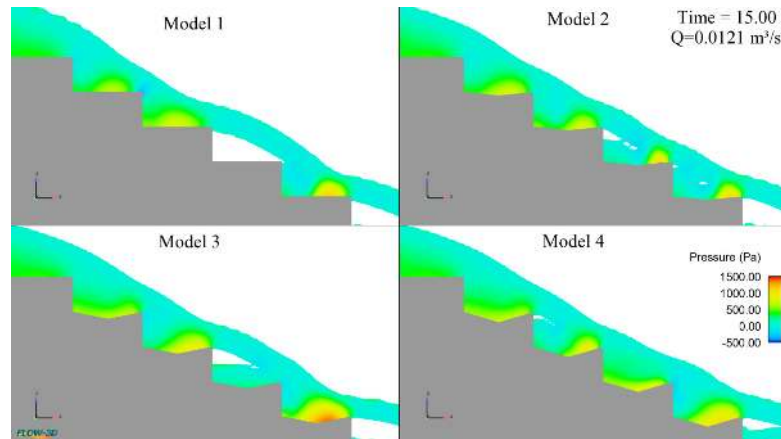
Şekil 4.19. $Q=0.0083 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik debi değerinde tüm modellerde hız vektörü dağılımları



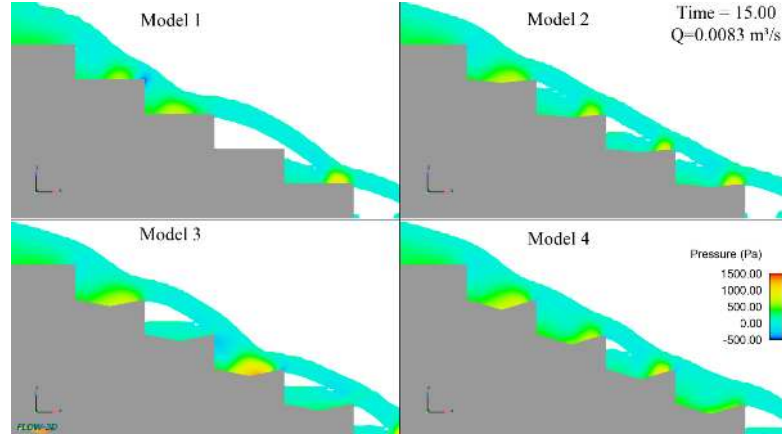
Şekil 4.20. $Q=0.00684 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik debi değerinde tüm modellerde hız vektörü dağılımları

4.2.3. Basınç Dağılımları

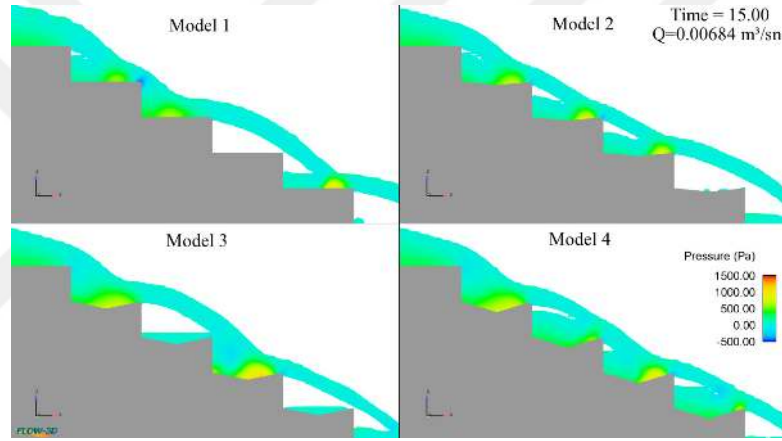
Klasik basamaklı dolusavak modeli ve üçgen basamaklı dolusavak modellerinde 3 farklı debi için (0.00684 , 0.0083 ve $0.0121 \text{ m}^3/\text{s}$) kanal ekseninde oluşan basınç dağılımları Şekil 4.21-4.23'te verilmiştir. Klasik basamaklı ve üçgen basamaklı modellerde genel olarak en düşük basınç değerleri basamak başlangıçlarında görülürken, en yüksek basınç değerleri ise basamak uçlarına doğru görülmektedir. Üçgen basamaklı modellerin hiçbirinde negatif basınç oluşumu gözlenmediğinden üçgen basamaklı dolusavaklarda kavitasyon riski görülmemiştir.



Şekil 4.21. $Q=0.0121 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik debi değerinde tüm modellerde basınç dağılımları



Şekil 4.22. $Q=0.0083 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik debi değerinde tüm modellerde basınç dağılımları



Şekil 4.23. $Q=0.00684 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik debi değerinde tüm modellerde basınç dağılımları

4.2.4. Enerji Sönümlleme Oranları

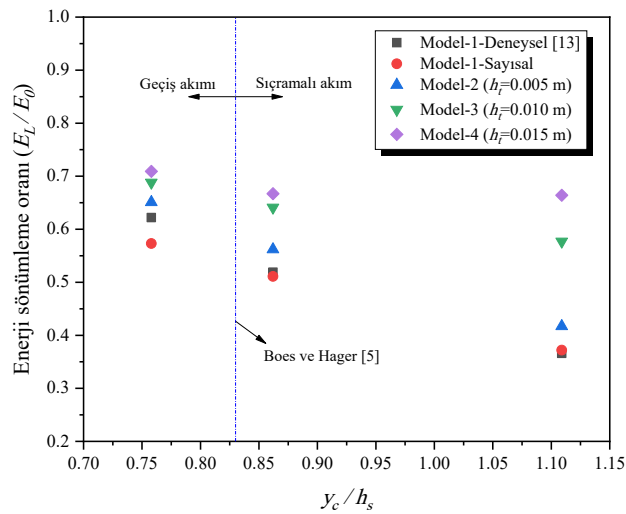
Çalışmada kullanılan tüm modellerin enerji sönümlleme oranları ve akım rejimleri Tablo 4.7'de verilmiştir. Tablo 4.7'de verilen akım rejimleri Boes ve Hager [5] tarafından verilen Eşitlik (2.3) ile belirlenmiştir. Tablo 4.7 incelendiğinde tüm modellerde debi değeri arttıkça enerji sönümlleme oranının azaldığı görülmektedir. Literatürde basamaklı dolusavaklarla ilgili yapılan benzer çalışmalarda da [13, 22, 41, 60, 88], debi değerinin artışıyla birlikte enerji sönümlleme oranının azaldığı görülmektedir.

Çalışmada kullanılan tüm modellerin enerji sönümlleme oranları boyutsuz kritik akım derinliğinin (y_c/h_s -kritik akım derinliği/basamak yüksekliği) bir fonksiyonu olarak Şekil 4.24'te verilmiştir. Tablo 4.7 ve Şekil 4.25 incelendiğinde, tüm debi değerlerinde; üçgen basamaklı dolusavak modellerinin klasik basamaklı dolusavak modeline (Model-1) göre daha yüksek oranda enerji sönümleyebildiği, üçgen basamaklı modellerde basamak derinliğinin (h_t) artışıyla birlikte

enerji sönümleme oranının arttığı ve üçgen basamaklı dolusavak modelleri arasında en yüksek sönümleme oranına sahip olan Model-4'ün klasik basamaklı dolusavak modeline (Model-1) göre 0.0121 m³/s'lik debide yaklaşık %78, 0.00830 m³/s'lik debide yaklaşık %31 ve 0.00684 m³/s'lik debide yaklaşık %24 oranında daha fazla enerji sönümleyebildiği görülmektedir. Ayrıca yine Tablo 4.7 ve Şekil 4.24'e göre, üçgen basamaklı dolusavakların sıçramalı akım rejiminde daha verimli çalıştığı görülmektedir.

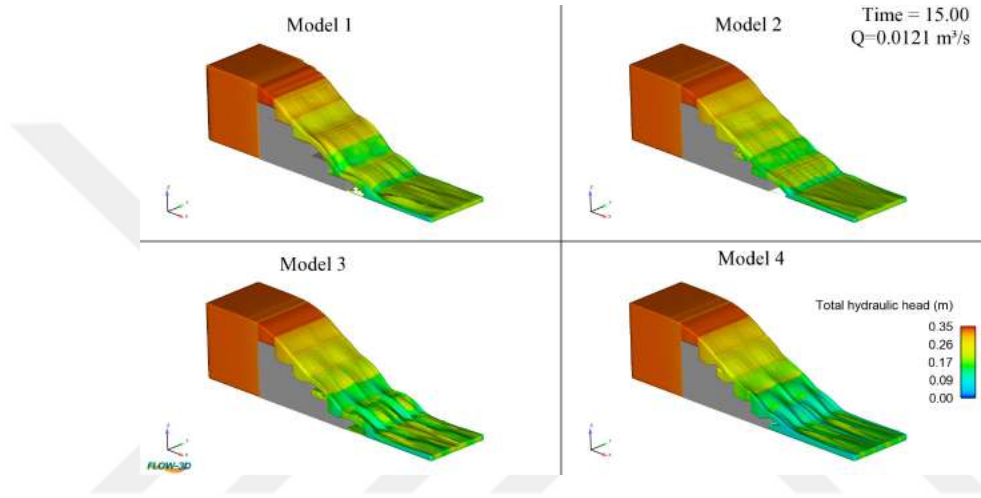
Tablo 4.7. Modellerdeki enerji sönümleme oranlarının kıyaslanması

Model	Q (m ³ /s)	Enerji sönümleme oranı (E_L/E_0)	y_c/h_s	Üçgen basamak derinliği (h_t) (m)	Akım Rejimi [5]
Model 1-Deneysel [13]	0.01210	0.366	1.109	-	Sıçramalı
	0.00830	0.519	0.862	-	Sıçramalı
	0.00684	0.622	0.758	-	Geçiş
Model 1-Sayısal	0.01210	0.372	1.109	-	Sıçramalı
	0.00830	0.511	0.862	-	Sıçramalı
	0.00684	0.573	0.758	-	Geçiş
Model 2	0.01210	0.417	1.109	0.005	Sıçramalı
	0.00830	0.562	0.862	0.005	Sıçramalı
	0.00684	0.651	0.758	0.005	Geçiş
Model 3	0.01210	0.577	1.109	0.010	Sıçramalı
	0.00830	0.641	0.862	0.010	Sıçramalı
	0.00684	0.688	0.758	0.010	Geçiş
Model 4	0.01210	0.664	1.109	0.015	Sıçramalı
	0.00830	0.667	0.862	0.015	Sıçramalı
	0.00684	0.709	0.758	0.015	Geçiş

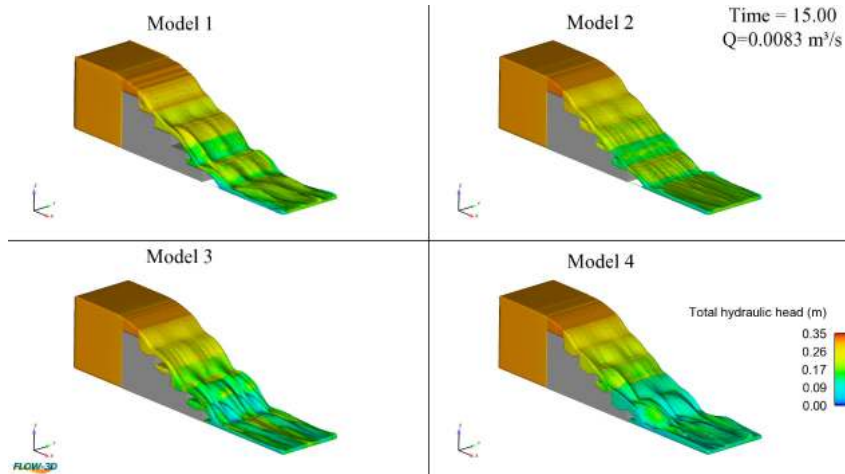


Şekil 4.24. Modellerdeki enerji sönümleme oranlarının kıyaslanması

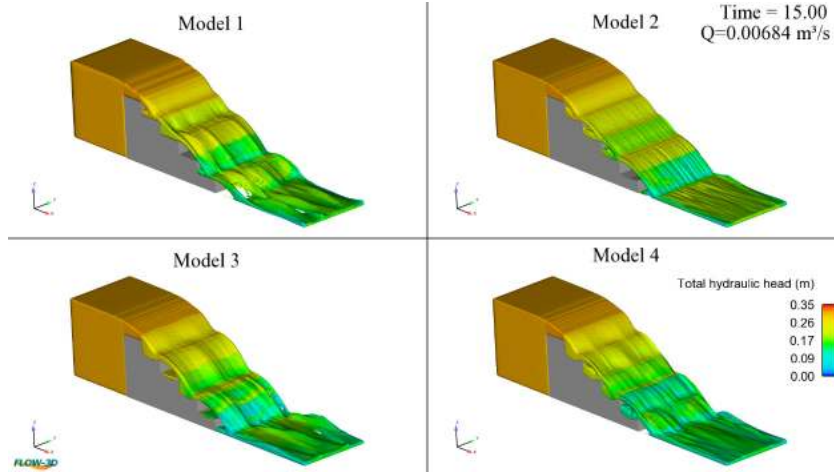
Üçgen basamaklı dolusavak modelleri ve klasik basamaklı dolusavak modeli için 3 farklı debi değerinde (0.00684, 0.0083 ve 0.0121 m³/s) oluşan enerji dağılımları Şekil 4.25-4.27’de verilmiştir. Genel olarak üçgen basamaklı dolusavaklarda, klasik basamaklı dolusavağa göre dolusavak mansabında daha düşük enerji değerleri gözlenmiştir. Ayrıca üçgen basamaklı modellerde h_t arttıkça, dolusavak mansabındaki enerjinin azaldığı görülmektedir (Şekil 4.25-4.27). Bu durumun, basamak derinliği artışına bağlı olarak artan çevrinti alanlarının, akım içerisinde karışan hava miktarını artırmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.25. $Q=0.0121$ m³/s’lik debi değerinde tüm modellerde enerji dağılımları



Şekil 4.26. $Q=0.0083$ m³/s’lik debi değerinde tüm modellerde enerji dağılımları



Şekil 4.27. $Q=0.00684 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik debi değerinde tüm modellerde enerji dağılımları

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi ile çalışan ve hidrolik problemlerin çözümünde yaygın bir şekilde kullanılan Flow-3D yazılımı ile basamaklı dolusavaklar üzerindeki akım sayısal olarak incelenmiştir. İki bölüm şeklinde yürütülen sayısal çalışmanın ilk bölümünde, Antalya Gökçeler Barajı Basamaklı dolusavağı modelinin deney sonuçları [12] kullanılarak, akım parametreleri için en uygun türbülans modellerinin belirlenebilmesi amacıyla dört farklı türbülans modeli ($k-\varepsilon$, $k-\omega$, LES, RNG) ile doğrulama yapılmıştır. Yürütülen çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- 199.03 ve 195.26 m aralığında değişen 14 farklı rezervuar su seviyesine denk gelen debi değerleri için deneysel [12] ve sayısal sonuçların kıyaslanması neticesinde: tüm türbülans modellerinin deneysel sonuçlarla oldukça uyumlu olduğu ve % 2.76'lık bağıl hata değeri ile fiziksel model sonuçları ile en uyumlu türbülans modelinin $k-\omega$ olduğu görülmüştür. Ayrıca tüm türbülans modellerinde yüksek rezervuar su seviyelerinde elde edilen debi değerlerinin deneysel sonuçlarla daha uyumlu olduğu gözlenmiştir.
- Dolusavak sağ ekseni, orta ekseni ve sol ekseni boyunca yerleştirilen toplam 40 adet basınç ölçüm ucunda, 592,85 m³/s'lik debi için ölçülen deneysel [12] ve sayısal basınç yüksekliklerinin tüm türbülans modelleri için yakın sonuçların elde edildiği gözlenmiştir. Ancak en uygun türbülans modelinin % 13.36'lık ortalama bağıl hata ile $k-\varepsilon$ olduğu görülmüştür. Ayrıca tüm türbülans modellerinde, dolusavak boşaltım kanalı boyunca sayısal ve deneysel sonuçlar [12] oldukça uyumlu iken düşüm havuzunda bir miktar farklılıklar olduğu gözlenmiştir.
- Dolusavak sol ekseni, orta ekseni ve sağ ekseni boyunca 592.85 m³/s'lik debide oluşan deneysel [12] ve sayısal su yüzü profillerinin kıyaslanması neticesinde, tüm türbülans modelleri ile elde edilen su yüzü profillerinin dolusavak boşaltım kanalı boyunca neredeyse birebir aynı olduğu, düşüm havuzunda bir miktar farklılık olduğu ve % 0.159'luk ortalama bağıl hata ile en uyumlu türbülans modelinin LES olduğu görülmüştür.
- Dolusavak yaklaşım kanalı enkesitinde 5 farklı noktada ve her bir noktada yaklaşım kanalı tabanından itibaren 5 farklı akım yüksekliğinde (0, 1.20, 2.40, 3.60 ve 4.80 m) ölçülen deneysel [12] ve sayısal hız değerlerinin kıyaslanması neticesinde: 3. noktadaki ölçümler hariç tüm türbülans modellerinin birbirlerine oldukça yakın sonuçlar verdiği ve % 7.80'lik ortalama bağıl hata ile deney sonuçları ile en uyumlu türbülans modelinin $k-\varepsilon$ olduğu görülmüştür.

- Basamaklı Dolusavak boyunca sönümlenen deneysel [12] ve sayısal enerji oranlarının kıyaslanması neticesinde: tüm türbülans modellerinin deneysel sonuçlarla [12] yakın sonuçlar verdiği ve % 0.127'lik ortalama bağıl hata ile deney sonuçları ile en uyumlu türbülans modelinin $k-\varepsilon$ olduğu görülmektedir.

Çalışmanın ikinci bölümünde ise literatürdeki bir klasik basamaklı dolusavak modelinin [13] deney sonuçları kullanılarak, bir önceki bölümde enerji sönümleme parametresi için en uygun olduğu belirlenen $k-\varepsilon$ türbülans modeli ile sayısal doğrulama işlemi yapılmış ve üç farklı basamak derinliğine sahip üçgen basamaklı dolusavak modelleri için enerji sönümleme oranları sayısal olarak incelenmiştir. Yapılan analizler neticesinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Çalışmada kullanılan tüm modellerde debi değeri arttıkça enerji sönümleme oranının azaldığı görülmüştür.
- Çalışmada kullanılan tüm debi değerlerinde: üçgen basamaklı dolusavak modellerinin klasik basamaklı dolusavaklara oranla daha yüksek oranda enerji sönümleyebildiği, üçgen basamaklı modellerde basamak derinliğinin (h_t) artışıyla birlikte enerji sönümleme oranının arttığı gözlenmiştir.
- Üçgen basamaklı dolusavak modelleri arasında en yüksek sönümleme oranına sahip olan Model-4'ün klasik basamaklı dolusavak modeline (Model-1) göre 0.0121 m³/s'lik debide yaklaşık %78, 0.0083 m³/s'lik debide yaklaşık %31 ve 0.00684 m³/s'lik debide ise yaklaşık %24 daha fazla enerji sönümleyebildiği görülmüştür.
- Üçgen basamaklı dolusavak modellerinin sıçramalı akım rejiminde enerji sönümleme açısından daha verimli çalıştığı görülmüştür.
- Üçgen basamaklı dolusavak modellerinin hiçbirinde negatif basınç oluşumu ve dolayısıyla kavitasyon oluşum riski görülmemiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Chanson, H. (2000). Hydraulics of Stepped Spillways: Current Status, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 126, No. 9, 636–637. doi:10.1061/(asce)0733-9429(2000)126:9(636)
- [2] Chanson, H. (2004). Drag reduction in skimming flow on stepped spillways by aeration, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 42, No. 3, 316–322. doi:10.1080/00221686.2004.9728397
- [3] Berkün, M. (2007). *Su Yapıları*, Birsen Yayınevi, İstanbul
- [4] Boes, R. M.; Chanson, H.; Matos, J.; Ohtsu, I.; Yasuda, Y.; Takahasi, M.; Tatewar, S. P.; Ingle, R. N.; Porey, P. D.; Chamani, M. R.; Rajaratnam, N. (2000). Characteristics of Skimming Flow over Stepped Spillways, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125, No. November, 860–873
- [5] Boes, R. M.; Hager, W. H. (2003). Hydraulic Design of Stepped Spillways for RCC Dams, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 129, 671–679
- [6] Chanson, H. (1993). Stepped Spillway Flows and Air Entrainment, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 20, No. 3, 422–435. doi:10.1139/193-057
- [7] Chanson, H. (1998). Review of Studies on Stepped Channel Flows, *Workshop on Flow Characteristics around Hydraulic Structures and River Environment*, 25
- [8] Sorensen, R. M. (1985). Stepped Spillway Hydraulic Model Investigation, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 111, No. 12, 1461–1472
- [9] Peyras, L.; Royet, P.; Degoutte, G. (1992). Flow and Energy Dissipation over Stepped Gabion Weirs, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 118, No. 5, 707–717. doi:10.1061/(asce)0733-9429(1992)118:5(707)
- [10] Chanson, H. (1996). Prediction of the transition nappe/skimming flow on a stepped channel, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 34, 421–429
- [11] Ohtsu, I.; Yasuda, Y. (1991). Transition from supercritical to subcritical flow at an abrupt drop, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 29, No. 2, 309–328. doi:10.1080/00221689109498436
- [12] *Gökçeler Barajı Basamaklı Dolusavak Model Raporu* (2009). DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı, Ankara
- [13] Mero, S.; Mitchell, S. (2017). Investigation of energy dissipation and flow regime over various forms of stepped spillways, *Water and Environment Journal*, Vol. 31, No. 1, 127–137. doi:10.1111/wej.12224
- [14] Murillo, R. E. (2006). *Experimental Study of the development Flow Region ob Stepped Chutes* PhD Thesis, University of Manitoba, Department of Civil Engineering
- [15] Ma, P.; Hu, Y.; Liu, H. (2021). Study on Energy Dissipation Characteristics of Skimming Flow on Stepped Spillways, *Taiwan Water Conservancy*, Vol. 69, No. 2, 89–102. doi:10.6937/TWC.202106/PP_69(2).0008
- [16] Knauss, J. (1995). Computation of Maximum Discharge at Overflow Rockfill Dams (a comparison of different model test results), *13th ICOLD Congress*, New Delhi
- [17] Dursun, Ö. F. (2009). *Basamaklı Dolusavaklar Üzerinde Oluşan Akımlarının Sayısal Analizi*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [18] Chanson, H. (2000). Historical Development of Stepped Cascades for the Dissipation of Hydraulic

- Energy, *Transactions of the Newcomen Society*, Vol. 72, No. 2, 295–318. doi:10.1080/03720187.2000.12023617
- [19] Aras, E.; Berkün, M. (2006). Barajlarda Basamaklı Dolusavak Uygulamaları ile Oluşan Havalanmanın Nehir Reaerasyonu Üzerine Etkileri, *GAP V. Mühendislik Kongresi Bildiriler Kitabı*, 26-28 Nisan 2006, Şanlıurfa
- [20] URL-1, https://tr.wikipedia.org/wiki/Adnan_Menderes_Barajı, Erişim: 18.07.2022
- [21] URL-2, https://tr.wikipedia.org/wiki/Çaltıköy_Barajı, Erişim: 18.07.2022
- [22] Jabbar, I. N. (2018). *Numerical Analysis of Flow over Stepped Spillways*, M.Sc. Thesis, Gaziantep University, Civil Engineering Department
- [23] Frizell, K. H. (2006). *Research State-of-the-Art and Needs for Hydraulic Design of Stepped Spillways* Denver
- [24] Roshan, R.; Azamathulla, H. M.; Marosi, M.; Sarkardeh, H.; Pahlavan, H.; Ab Ghani, A. (2010). Hydraulics of stepped spillways with different numbers of steps, *Dams and Reservoirs*, Vol. 20, No. 3, 131–136
- [25] İkinciogulları, E. (2021). Ters Basamaklı Eşikler Kullanılarak Tasarlanan Basamaklı Savakların Enerji Sönümleme Oranlarının Sayısal Olarak İncelenmesi, *European Journal of Science and Technology*, No. 23, 189–196. doi:10.31590/ejosat.859116
- [26] Chanson, H. (1994). Hydraulics of nappe flow regime above stepped chutes and spillways, *Transactions of the Institution of Engineers, Australia. Civil Engineering*, Vol. 36, No. 1, 69–76
- [27] Kositgittiwong, D. (2012). *Validation of numerical model of the flow behaviour through smooth and stepped spillways using large-scale physical model* PhD Thesis, King Mongkut's University of Technology Thonburi
- [28] Tuna, M. C. (2011). Eşikli ve Basamaklı Düşülerde Eşik Geometrisinin Akım Tipi ve Oksijen Transferine Etkisi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Vol. 27, No. 3, 260–264
- [29] Emiroğlu, M. E. (2014). Basamaklı Dolusavakların Tasarımı, *IV. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu*, Elazığ, 641–651
- [30] Bombar, G. (2004). *Basamaklı Dolusavaklar Boyunca Oluşan Akımların Teorik ve Deneyisel Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [31] Chanson, H. (2001). Hydraulic Design of Stepped Spillways and Downstream Energy Dissipators, *Dam Engineering*, Vol. 11, No. 15, 205–242
- [32] Rice, C. E.; Kadavy, K. C. (1996). Model Study of a Roller Compacted Concrete Stepped Spillway, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 122, No. 6, 292–297. doi:10.1061/(asce)0733-9429(1996)122:6(292)
- [33] Tabbara, M.; Chatila, J.; Awwad, R. (2005). Computational Simulation of Flow over Stepped Spillways, *Computers and Structures*, Vol. 83, No. 27, 2215–2224. doi:10.1016/j.compstruc.2005.04.005
- [34] Carvalho, R. F. de; Amador, A. T. (2009). Physical and Numerical Investigation of the Skimming Flow over A Stepped Spillway, *Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering*, 1767–1772. doi:10.1007/978-3-540-89465-0_304
- [35] Zare, H. K.; Doering, J. C. (2012). Effect of rounding edges of stepped spillways on the flow

- characteristics, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 39, No. 2, 140–153. doi:10.1139/L11-121
- [36] Felder, S.; Chanson, H.; Fromm, C. (2012). *Air Entrainment and Energy Dissipation on a 8.9° Slope Stepped Spillway with Flat and Pooled Steps*, Brisbane
- [37] Felder, S.; Guenther, P.; Chanson, H. (2012). *Air-Water Flow Properties and Energy Dissipation on Stepped Spillways: A Physical Study of Several Pooled Stepped Configurations*, Brisbane
- [38] Attarian, A.; Hosseini, K.; Abdi, H.; Hosseini, M. (2014). The Effect of the Step Height on Energy Dissipation in Stepped Spillways Using Numerical Simulation, *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 39, No. 4, 2587–2594. doi:10.1007/s13369-013-0900-y
- [39] Hunt, S. L.; Kadavy, K. C. (2009). The effect of step height on energy dissipation in stepped spillways., *World Environmental and Water Resources Congress. ASCE, Great Rivers*, 3061–3071
- [40] Felder, S.; Chanson, H. (2014). Effects of Step Pool Porosity upon Flow Aeration and Energy Dissipation on Pooled Stepped Spillways, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 140, No. 4, 04014002. doi:10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000858
- [41] Mohammad Rezapour Tabari, M.; Tavakoli, S. (2016). Effects of Stepped Spillway Geometry on Flow Pattern and Energy Dissipation, *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 41, No. 4, 1215–1224. doi:10.1007/s13369-015-1874-8
- [42] Hamed, A.; Hajigholizadeh, M.; Mansoori, A. (2016). Flow Simulation and Energy Loss Estimation in the Nappe Flow Regime of Stepped Spillways with Inclined Steps and End Sill: A Numerical Approach, *Civil Engineering Journal*, Vol. 2, No. 9, 426–437. doi:10.28991/cej-2016-00000047
- [43] Krisnayanti, D. S.; Suhardjono; Dermawan, V.; Sholichin, M. (2016). Flow and Energy Dissipation over on Flat and Pooled Stepped Spillway, *Jurnal Teknologi*, Vol. 8, 79–86
- [44] Irzooki, R. H.; Mohammed, J. R.; Ameen, A. S. (2016). Computational Fluid Dynamics Modeling of Flow over Stepped Spillway, *Tikrit Journal of Engineering Science (TJES)*, Vol. 23, No. 3, 1–11. doi:10.25130/tjes.23.3.2016.01
- [45] Bai, Z. L.; Peng, Y.; Zhang, J. M. (2017). Three-Dimensional Turbulence Simulation of Flow in a V-Shaped Stepped Spillway, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 143, No. 9, 06017011. doi:10.1061/(asce)hy.1943-7900.0001328
- [46] Salmasi, F.; Samadi, A. (2018). Experimental and numerical simulation of flow over stepped spillways, *Applied Water Science*, Vol. 8, No. 8. doi:10.1007/s13201-018-0877-5
- [47] Reeve, D. E.; Zuhaira, A. A.; Karunaratna, H. (2019). Computational investigation of hydraulic performance variation with geometry in gabion stepped spillways, *Water Science and Engineering*, Vol. 12, No. 1, 62–72. doi:10.1016/j.wse.2019.04.002
- [48] Lin, P.; Xu, W. (2006). NEWFLUME: A numerical water flume for two-dimensional turbulent free surface flows, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 44, No. 1, 79–93. doi:10.1080/00221686.2006.9521663
- [49] Wuthrich, D.; Chanson, H. (2015). Aeration performances of a gabion stepped weir with and without capping, *Environmental Fluid Mechanics*, Vol. 15, No. 4, 711–730. doi:10.1007/s10652-014-9377-9
- [50] Zhang, G.; Chanson, H. (2018). Effects of Step and Cavity Shapes on Aeration and Energy

- Dissipation Performances of Stepped Chutes, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 144, No. 9, 04018060. doi:10.1061/(asce)hy.1943-7900.0001505
- [51] Torabi, H.; Parsaie, A.; Yonesi, H.; Mozafari, E. (2018). Energy Dissipation on Rough Stepped Spillways, *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, Vol. 42, No. 3, 325–330. doi:10.1007/s40996-018-0092-5
- [52] Ashoor, A.; Riazi, A. (2019). Stepped spillways and energy dissipation: A non-uniform step length approach, *Applied Sciences (Switzerland)*, Vol. 9, No. 23. doi:10.3390/app9235071
- [53] Ali, A. S.; Yousif, O. S. Q. (2019). Characterizations of flow over stepped spillways with steps having transverse slopes, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 344, No. 1. doi:10.1088/1755-1315/344/1/012019
- [54] Güven, A.; Mahmood, A. H. (2021). Numerical investigation of flow characteristics over stepped spillways, *Water Science and Technology: Water Supply*, Vol. 21, No. 3, 1344–1355. doi:10.2166/ws.2020.283
- [55] Ostad Mirza, M. J.; Matos, J.; Pfister, M.; Schleiss, A. J. (2017). Effect of an abrupt slope change on air entrainment and flow depths at stepped spillways, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 55, No. 3, 362–375. doi:10.1080/00221686.2016.1255263
- [56] Wu, J.; Qian, S.; Wang, Y.; Zhou, Y. (2020). Residual Energy on Ski-Jump-Step and Stepped Spillways with Various Step Configurations, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 146, No. 4, 1–5. doi:10.1061/(asce)hy.1943-7900.0001710
- [57] Zhou, Y.; Wu, J.; Ma, F.; Hu, J. (2020). Uniform flow and energy dissipation of hydraulic-jump-stepped spillways, *Water Science and Technology: Water Supply*, Vol. 20, No. 4, 1546–1553. doi:10.2166/ws.2020.056
- [58] Ghaderi, A.; Abbasi, S.; Di Francesco, S. (2021). Numerical study on the hydraulic properties of flow over different pooled stepped spillways, *Water (Switzerland)*, Vol. 13, No. 5, 1–25. doi:10.3390/w13050710
- [59] İkinciogulları, E. (2021). Energy dissipation performance of the trapezoidal stepped spillway, *Journal of Engineering Research*, 1–15. doi:10.36909/jer.13649
- [60] Saqib, N. U.; Akbar, M.; Pan, H.; Ou, G.; Mohsin, M.; Ali, A.; Amin, A. (2022). Numerical Analysis of Pressure Profiles and Energy Dissipation across Stepped Spillways Having Curved Risers, *Applied Sciences (Switzerland)*, Vol. 12, No. 1. doi:10.3390/app12010448
- [61] Ma, X.; Zhang, J.; Hu, Y. (2022). Analysis of Energy Dissipation of Interval-Pooled Stepped Spillways, *Entropy*, Vol. 24, No. 1, 1–13. doi:10.3390/e24010085
- [62] Roushangar, K.; Akhgar, S.; Shahnazi, S. (2022). The effect of triangular prismatic elements on the hydraulic performance of stepped spillways in the skimming flow regime: an experimental study and numerical modeling, *Journal of Hydroinformatics*, Vol. 24, No. 2, 243–258. doi:10.2166/hydro.2022.031
- [63] İkinciogulları, E. (2019). *Serbest Düşümlü Savakların Mansabında Oluşan Yerel Oyulmanın Analizi*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [64] Kılıç, Z. (2020). *Piyano Tuşu Yan Savakların Hidrolik Karakteristiklerinin Sayısal ve Deneyisel Analizi*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

- [65] Usta, E. (2014). *Numerical Investigation of Hydraulic Characteristics of Laleli Dam Spillway and Comparison with Physical Model Study*, M.Sc. Thesis, Middle East Technical University, Civil Engineering Department
- [66] Kocaman, S. (2007). *Baraj Yıkılması Probleminin Deneysel ve Teorik Olarak İncelenmesi*, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [67] Ghasemlouunia, R. (2021). *Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliğinde FLOW-3D*, Nobel Yayınevi, Ankara
- [68] *Flow-3D User Manual*. (2022), Flow Science Inc.
- [69] URL-3, <https://www.flow3d.com/modeling-capabilities/turbulence>, Erişim: 18.07.2022
- [70] Harlow, F. H.; Nakayama, P. I. (1967). Turbulence-Transport-Equations, *The Physics of Fluid*, Vol. 10, No. 11, 2323–2332
- [71] Rodi, W. (1980). Turbulence models and their application in hydraulics: a state of the art review, *International Association for Hydraulic Research (IAHR)*, Delft, The Netherlands.
- [72] Yakhot, V.; Orszag, S. A. (1986). Renormalization-Group-Analysis-of-Turbulence. I.-Basic-Theory, *Journal of Scientific Computing*, Vol. 1, No. 1, 3–51
- [73] Yakhot, V.; Smith, L. M. (1992). The renormalization group, the ϵ -expansion and derivation of turbulence models, *Journal of Scientific Computing*, No. 7, 35–61
- [74] Wilcox, D. C. (1988). Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models, *AIAA Journal*, Vol. 26, No. 11, 1299–1310. doi:10.2514/3.10041
- [75] Wilcox, D. C. (1998). *Turbulence Modeling for CFD* (2nd ed.), DCW Industries, La Canada, California
- [76] Wilcox, D. C. (2008). Formulation of the $k-\omega$ turbulence model revisited, *AIAA Journal*, Vol. 46, No. 11, 2823–2838. doi:10.2514/1.36541
- [77] Kolmogorov, A. N. (1942). Equations of turbulent motion in an incompressible fluid, *Izvestia Academy of Sciences, USSR; Physics*, Vol. 6, 56–58
- [78] Shojaee Fard, M. H.; Boyaghchi, F. A. (2007). Studies on the influence of various blade outlet angles in a centrifugal pump when handling viscous fluids, *American Journal of Applied Sciences*, 718–724. doi:10.3844/ajassp.2007.718.724
- [79] Smagorinsky, J. (1963). General Circulation Experiments with the Primitive Equations, *Monthly Weather Review*, Vol. 91, No. 3, 99–164. doi:10.1126/science.12.306.731-a
- [80] URL-4, <https://www.gazipasahaberler.com/HaberDetay/10507/Gokceler-Baraji-Tarimsal-Sulamaya-Acildi---.html>, Erişim: 25.07.2022
- [81] Kumcu, Ş. Y.; Uçar, M. (2020). Köprü Barajı Dolusavak Yapısının Deneysel Çalışma Ve Sayısal Modelleme İle Analizi, *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Vol. 9, No. 1, 350–357. doi:10.28948/ngumuh.515220
- [82] Soysal, G. (2020). Dolusavak Havalandırıcı Performansının Teorik ve Sayısal Olarak İncelenmesi, *DSİ Teknik Bülteni*, Vol. 136, 1–8
- [83] Usta, E. (2017). Karakurt Barajı Dolusavak Yapısı Hidrolik Karakteristiklerinin 3- Boyutlu Sayısal Analizlerle Belirlenmesi, *Hidro Dizayn Mühendislik*
- [84] Yang, J. R.; Hou, X. X.; Zhang, Q. Y. (2014). The 3D numerical simulation of flow field on Y-shape

- flaring gate piers combined with stepped spillway, *Advanced Materials Research*, Vols 864–867, 2200–2206. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.864-867.2200
- [85] Aydın, M. C.; Işık, E.; Ulu, A. E. (2019). Yüksek Düşülü Dolusavaklarda Su Yüzü Profillerinin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğiyle Belirlenmesi, *DSİ Teknik Bülteni*, Vol. 133, 1–11
- [86] URL-5, <https://www.simscale.com/forum/t/what-is-y-plus/82394/1>, Erişim: 10.10.2022
- [87] Qian, Z.; Hu, X.; Huai, W.; Amador, A. (2009). Numerical simulation and analysis of water flow over stepped spillways, *Science in China, Series E: Technological Sciences*, Vol. 52, No. 7, 1958–1965. doi:10.1007/s11431-009-0127-z
- [88] Moghadam, M. K.; Amini, A.; Moghadam, E. K. (2021). Numerical study of energy dissipation and block barriers in stepped spillways, *Journal of Hydroinformatics*, Vol. 23, No. 2, 284–297. doi:10.2166/HYDRO.2020.245



ÖZGEÇMİŞ

Eyyüp Ensar YALÇIN

[illegible]