

**T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BASAMAKLI DOLUSAVAKLARDA FARKLI TİP BASAMAK
TASARIMLARININ ENERJİ SÖNÜMLEME PERFORMANSINA
ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ABDULKADİR DEMİRÇELİK**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TEZ DANIŞMANI
Doç. Dr. Erdinç İKİNCİOĞULLARI**

BİNGÖL-2025

**BASAMAKLI DOLUSAVAKLARDA FARKLI TİP BASAMAK
TASARIMLARININ ENERJİ SÖNÜMLEME PERFORMANSINA
ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

Doç. Dr. Erdiñ İKİNCİÖĞÜLLARİ danışmanlığında, Abdulkadir DEMİRÇELİK tarafından hazırlanan bu çalışma/...../..... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak **oybirliği/oy çokluğu (.../...)** ile kabul edilmiştir.

Başkan	: Dr. Öğr. Üyesi Enes GÜL	İmza	:
Üye	: Doç. Dr. Erdiñ İKİNCİÖĞÜLLARİ	İmza	:
Üye	: Doç. Dr. Sadık ALASHAN	İmza	:

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulunun// tarih ve/ nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Zafer ŞİAR
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimime başlamama sebep olan ve her anlamda maddi ve manevi destek olan değerli danışmanım sayın Doç. Dr. Erdinç İKİNCİOĞULLARI hocama sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez yazım sürecinde kendisinden ilham aldığım sayın Arş. Gör. Eyyüp Ensar YALÇIN hocama müteşekkirim.

Bingöl Üniversitesi lisans ve yüksek lisans eğitimlerimde derslerimi yürüten bütün hocalarıma ve çalışanlarına sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu yolculukta maddi ve manevi desteklerini bir an olsun esirgemeyen Anneme, Babama, aileme ve herkese sonsuz teşekkür ederim.

Bu araştırmada yer alan tüm nümerik hesaplamalar TÜBİTAK ULAKBİM, Yüksek Başarım ve Grid Hesaplama Merkezi'nde (TRUBA kaynaklarında) gerçekleştirilmiştir.

Abdulkadir DEMİRÇELİK

Bingöl 2025

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	x
ABSTRACT.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Basamaklı Dolusavaklarda Akım Rejimleri.....	3
1.1.1. Nap Akımı Rejimi.....	4
1.1.2. Geçiş Akımı Rejimi.....	5
1.1.3. Sıçramalı Akım Rejimi.....	6
1.2. Basamaklı Dolusavaklarda Enerji Sönümleme	9
2. KAYNAK ÖZETLERİ	12
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	24
3.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD).....	24
3.2. Akışkan Akımının Temel Denklemleri.....	25
3.2.1. Süreklilik Denklemi.....	25
3.2.2. Navier Stokes Denklemi.....	26
3.3. Kullanılan HAD Yazılı (OpenFOAM).....	26
3.3.1. VOF (<i>Volume of Fluid</i>) Yöntemi.....	26
3.3.2. OpenFOAM’da Bulunan Türbülans Yöntemleri.....	27
3.4. Geometrik Modeller.....	28
3.5. ARF Hesaplama Kümersi.....	31
4. SAYISAL MODEL.....	32
4.1. Çözüm Ağı ve Sınır Şartları.....	34

4.1.1. 26,6°'lik Kanal İçin Doğrulama Sonuçları.....	34
4.1.2. 8,9°'lik Kanal İçin Doğrulama Sonuçları.....	37
4.2. Mesh Hassasiyeti ve Analiz Süresi.....	39
4.2.1. 26,6°'lik Kanal için Mesh Hassasiyeti	40
4.2.2. 14,6°'lik Kanal için Mesh Hassasiyeti	41
4.2.3. 8,9°'lik Kanal için Mesh Hassasiyeti	42
4.2.4. Analiz Süresi	44
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	46
5.1. Basamaklı Dolusavaklarda Farklı Tip Basamak Tasarımlarının Enerji Sönümleme Oranlarına Etkisi.....	46
5.1.1. Kanal Açısı 26,6° Olan Basamaklı Dolusavaklarda Sayısal Modellerin Enerji Sönümleme Performansları	47
5.1.2. Kanal Açısı 14,6° Olan Basamaklı Dolusavaklarda Sayısal Modellerin Enerji Sönümleme Performansları	50
5.1.3. Kanal Açısı 8,9° Olan Basamaklı Dolusavaklarda Sayısal Modellerin Enerji Sönümleme Performansları	53
5.2. Sayısal Modellerde Basamak Tiplerinin ve Dolusavak Açısının Enerji Sönümleme Performansına Etkisi.....	55
5.3. Sayısal Modellerin Enerji Sönümleme Performanslarının Karşılaştırılması.....	58
5.4. Sayısal Modellerin Enerji Sönümleme Performanslarının Literatürdeki Bazı Dolusavak Modelleri ile Karşılaştırılması.....	60
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	61
KAYNAKLAR.....	63

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

B	: Savak genişliği
E_0	: Membadaki akım enerjisi
E_1	: Mansaptaki akım enerjisi
E_L	: Memba ile mansap arasındaki enerji farkı
E_L/E_0	: Enerji sönümleme oranı (-)
Fr	: Froude sayısı (-)
g	: Yerçekimi ivmesi
H_{savak}	: Savak yüksekliği
h	: Basamak yüksekliği
k	: Türbülanslı kinetik enerji
l	: Basamak uzunluğu
L_r	: Uzunluk ölçeği (-)
Q	: Debi
q	: Birim debi
Re	: Reynolds sayısı (-)
u', v', w'	: Türbülans çalkantı hızları
$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$	: Zamansal ortalama hızlar
V	: Akım hızı
V_{90}	: %90 hava konsantrasyonuna sahip hücrenin karakteristik akım hızı
V_1	: Mansaptaki ortalama akım hızı
V_c	: Kritik akım hızı
y	: Basamak üzerindeki ölçüm yüksekliği
y_{90}	: %90 hava konsantrasyonuna sahip hücrenin yüksekliği
y_1	: Hidrolik sıçrama öncesi mansaptaki akım derinliği
y_2	: Hidrolik sıçrama sonrası mansaptaki akım derinliği
y_c	: Kritik akım derinliği
p	: Basınç

ρ	: Özgöl kütle
ν	: Kinematik viskozite
θ	: Şüt açısı (-)
Δz	: Kret yüksekliği ile son basamak yüksekliği arasındaki fark
DSİ	: Devlet Su İşleri
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
LES	: Large Eddy Simulation (Büyük Çevrinti Simölasyonu)
RAS	: Reynolds Averaged Simulation (Reynolds Ortalamalı Simölasyonu)
RNG	: Renormalized Group (Yeniden Normalleştirilmiş Grup)
DES	: Detached Eddy Simulation (Ayrılmış Türbölans Simölasyonu)
TAKK	: Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol
VOF	: Volume of Fluid (Sonlu Hacimler Yöntemi)

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Basamaklı dolusavaklarda akım rejimleri: a) nap akım rejimi; b) geçiş akım rejimi; c) sıçramalı akım rejimi (İkinciogulları, 2023).....	3
Şekil 1.2.	Tam gelişmiş hidrolik sıçramalı nap akımı (Dursun, 2009).....	4
Şekil 1.3.	Kısmi gelişmiş hidrolik sıçramalı nap akımı (Dursun, 2009)	5
Şekil 1.4.	Hidrolik sıçramasız nap akımı (Dursun, 2009)	5
Şekil 1.5.	Geçiş akımı rejimi (Tuna, 2011)	6
Şekil 1.6.	Sıçramalı akım rejimi (Tuna, 2011)	7
Şekil 1.7.	Sıçramalı akım rejiminde akım bölgeler (Emiroğlu, 2014)	8
Şekil 1.8.	Basamaklı dolusavak boykesiti (Felder vd., 2012).....	9
Şekil 2.1.	Zare ve Doering (2012) çalışmalarında kullandıkları modeller	13
Şekil 2.2.	Felder vd. (2012) çalışmalarında kullandıkları modeller	14
Şekil 2.3.	Felder vd. (2012) çalışmalarında kullandıkları modeller	15
Şekil 2.4.	Mero ve Mitchell (2017) çalışmalarında kullandıkları modeller	16
Şekil 2.5.	Farklı basamak konfigürasyonlarının Ali ve Yousif (2019) tarafından deneysel incelenmesi: a) M1 Konfigürasyonu; b) M2 Konfigürasyonu; c) M3 Konfigürasyonu	19
Şekil 2.6.	Ghaderi vd. (2023) çalışmalarında kullandıkları modeller.....	21
Şekil 3.1.	HAD yöntemi için simülasyon aşamaları (Uzol, 2021)	25
Şekil 4.1.	Felder vd. (2012)'in deneysel çalışmalarında kullanmış oldukları 26,6° açıya sahip klasik basamaklı dolusavak modeli	32
Şekil 4.2.	Felder ve Chanson (2014b)'nin deneysel çalışmalarında kullanmış oldukları 8,9° açıya sahip klasik basamaklı dolusavak modeli.....	33
Şekil 4.3.	Thorwarth (2009)'ın deneysel çalışmasında kullanmış olduğu 14,6° açıya sahip klasik basamaklı dolusavak modeli	33
Şekil 4.4.	Kanal geometrisi	34
Şekil 4.5.	Sınır koşulları	34
Şekil 4.6.	Çözüm ağları ve basamak detayları: a) kaba; b) orta; c) ince	35

Şekil 4.7.	Boyutsuz akım hızının boyutsuz akım derinliğine göre değişimi: a) Basamak 8; b) Basamak 9; c) Basamak 10	36
Şekil 4.8.	8,9° kanal açısına sahip klasik basamaklı dolusavak modeli.....	37
Şekil 4.9.	8,9° kanal açısına sahip Felder ve Chanson (2014b)'ın klasik basamaklı dolusavak modelinin 21. basamaktaki doğrulama sonuçları: a) 0,076 m ³ /s'lik debi için; b) 0,105 m ³ /s'lik debi için c) 0,113 m ³ /s'lik debi için	38
Şekil 4.10.	Mesh hassasiyetleri için son basamaktaki ölçüm noktası	39
Şekil 4.11.	26,6° kanal açısına sahip Model 5 için orta çözüm ağı	40
Şekil 4.12.	26,6° kanal açısına sahip Model 5'te mesh hassasiyeti için $V-y$ grafiği.	40
Şekil 4.13.	26,6° kanal açısına sahip Model 5 için orta ve ince mesh sistemleri arasında oluşan hata çubuğu grafiği	41
Şekil 4.14.	14,6° kanal açısına sahip Model 10 için orta çözüm ağı	41
Şekil 4.15.	14,6° kanal açısına sahip Model 10'da mesh hassasiyeti için $V - y$ grafiği.....	42
Şekil 4.16.	14,6° kanal açısına sahip Model 10 için orta ve ince mesh sistemleri arasında oluşan hata çubuğu grafiği.....	42
Şekil 4.17.	8,9° kanal açısına sahip Model 15 için orta çözüm ağı	43
Şekil 4.18.	8,9° kanal açısına sahip Model 15'te mesh hassasiyeti için $V-y$ grafiği..	44
Şekil 4.19.	8,9° kanal açısına sahip Model 15 için orta ve ince mesh sistemleri arasında oluşan hata çubuğu grafiği.....	44
Şekil 4.20.	Analiz süresinin belirlenmesinde dikkate alınan hızın zamana bağlı değişimi	45
Şekil 5.1.	İkinciöğulları (2024)'nın yöntemine göre tasarlanan modellerdeki ölçüm noktaları	47
Şekil 5.2.	26,6° açıya sahip sayısal modellerde enerji sönümleme oranının kıyaslanması.....	48
Şekil 5.3.	26,6° açıya sahip sayısal modellerde enerji sönümleme yüzdesinin kıyaslanması	49
Şekil 5.4.	Kanal açısı 26,6° olan basamaklı modellerin akım çizgileriyle birlikte hız dağılımları.....	50

Şekil 5.5.	14,6° açığa sahip sayısal modellerde enerji sönümleme oranının kıyaslanması	51
Şekil 5.6.	14,6° açığa sahip sayısal modellerde enerji sönümleme yüzdesinin kıyaslanması	51
Şekil 5.7.	Kanal açısı 14,6° olan basamaklı modellerin akım çizgileriyle birlikte hız dağılımları.....	52
Şekil 5.8.	8,9° açığa sahip sayısal modellerde enerji sönümleme oranının kıyaslanması	53
Şekil 5.9.	8,9° açığa sahip sayısal modellerde enerji sönümleme yüzdesinin kıyaslanması	54
Şekil 5.10.	Kanal açısı 8,9° olan basamaklı modellerin akım çizgileriyle birlikte hız dağılımları.....	55
Şekil 5.11.	Aynı basamak tipine sahip sayısal modellerin farklı dolusavak açılarında ortalama artık enerji değerleri ve veri setlerinin standart sapması: a) Model 1-6-11, b) Model 2-7-12, c) Model 3-8-13, d) Model 4-9-14, e) Model 5-10-15	56
Şekil 5.12.	Tüm sayısal modellerin farklı dolusavak açılarında ortalama artık enerji değerleri ve veri setlerinin standart sapması	58
Şekil 5.13.	Tüm sayısal modellerin enerji sönümleme performansları bakımından birbirleriyle kıyaslanması.....	59
Şekil 5.14.	Çalışma kapsamında tasarlanan modellerin klasik basamaklı dolusavak modelleri ile enerji sönümleme performansları bakımında kıyaslanması	59
Şekil 5.15.	Tasarlanan sayısal modellerin literatürdeki bazı modeller ile kıyaslanması.....	60

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1.	Sayısal modellerde basamak planları ($a= 13$ cm, $b= 10.4$ cm, $c= 8.66$ cm, $d= 7.42$ cm, $e= 6.5$ cm).....	29
Tablo 3.2.	Tasarlanan zigzag labirent basamaklı dolusavak modelleri	30
Tablo 4.1.	$y/y_0 = 0,65$ için V/V_{90} değeriinde oluşın hata yüzdeleri	37
Tablo 4.2.	Felder vd. (2012) $26,6^\circ$ açılı klasik basamaklı dolusavak modelinin sayısal model ile karşılaştırılması sonucu oluşın enerji sönümleme performansı ve hata oranları	37
Tablo 4.3.	Felder ve Chanson (2014b)'nın $8,9^\circ$ açılı klasik basamaklı dolusavak modelinin sayısal model ile karşılaştırılması sonucu oluşın enerji sönümleme performansı ve hata oranları	39
Tablo 5.1.	Akım rejimi parametreleri	46

BASAMAKLI DOLUSAVAKLARDA FARKLI TİP BASAMAK TASARIMLARININ ENERJİ SÖNÜMLEME PERFORMANSINA ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

ÖZET

Basamaklı dolusavaklar, boşaltım kanalı boyunca yerleştirilen basamaklar sayesinde suyun sahip olduğu enerjinin büyük bir kısmını sönmüleyebilen yapılardır. Basamakların enerji sönmülemeedeki etkisi sebebiyle uzun yıllardır kullanılan bu dolusavaklar, birçok akademik çalışmaya da konu olmuştur. Araştırmacılar, enerji sönmüleme performansında daha iyi neticeler elde edebilmek amacıyla farklı basamak geometrileri önermeye devam etmektedirler.

Bu çalışmada, HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) yöntemi ile çalışan OpenFOAM yazılımı kullanılarak, farklı tip basamak tasarımlarının basamaklı dolusavaklardaki enerji sönmüleme performansına etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmanın doğrulaması, literatürde yer alan iki farklı açıya sahip klasik basamaklı dolusavak modellerine ait deneysel verilerle yapılmış, ardından üç farklı açı (8,9°, 14,6°, 26,6°), altı farklı debide zigzag labirent geometriye sahip yeni basamak tipleri üzerinden sayısal modellerin analizleri gerçekleştirilmiştir.

Analizler sonucunda, debi arttıkça tüm modellerde enerji sönmüleme oranının azaldığı, zigzag modellerde göz sayısı azaldıkça enerji sönmüleme performansının arttığı ve düşük kanal açılarında genel olarak daha yüksek enerji sönmüleme performansı elde edildiği gözlenmiştir. Özellikle 14,6° kanal açılı Model 7, maksimum debide %73,85 oranında enerji sönmüleme ile öne çıkarken; 26,6° kanal açılı Model 1'in, klasik basamaklı dolusavak modeline göre %20 oranında daha iyi performans sergilediği tespit edilmiştir. 8,9° kanal açılı modellerde ise 26,6° Model 1 ile aynı basamak tipine sahip olan Model 11'in enerji sönmüleme performansı açısından iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca hız profilleri incelendiğinde, önerilen modellerin dolusavak üzerinde akım hızını azaltmada oldukça etkili olduğu gözlenmiştir. Çalışma sonucunda; yeni geometrik tasarımların, basamaklı dolusavaklarda enerji sönmüleme performansı açısından önemli faydalar sağlayabileceği düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Basamaklı dolusavak, Enerji sönmüleme, HAD, OpenFOAM, Zigzag labirent basamaklı dolusavak.

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF DIFFERENT STEP DESIGNS ON ENERGY DISSIPATION PERFORMANCE FOR STEPPED SPILLWAYS

ABSTRACT

Stepped spillways are hydraulic structures capable of dissipating a significant portion of the flow energy through steps arranged along the discharge channel. Due to their high energy dissipation capacity, these structures have been used for centuries and have become a frequent subject of academic research. In order to enhance energy dissipation performance, researchers continue to propose different step geometries and investigate their hydraulic efficiency.

In this study, the effects of different step geometries on the energy dissipation performance of stepped spillways were investigated numerically using the OpenFOAM software based on the Computational Fluid Dynamics (CFD) method. Firstly, the numerical model was validated using experimental data from classical stepped spillway designs with two different slopes reported in the literature. Then, new step configurations with zigzag labyrinth geometries were analyzed under three different channel slopes (8.9° , 14.6° , 26.6°) and six different flow rates.

The results showed that as the discharge increased, the energy dissipation efficiency decreased for all models. It was also concluded that reducing the number of cycle enhanced the energy dissipation performance, and lower channel slopes generally provided higher energy dissipation. Notably, Model 7 with a 14.6° channel slope achieved the highest performance, dissipating 73.85% of the energy at maximum discharge. Model 1, with a 26.6° slope, performed approximately 20% better than the classical stepped spillway model. Among the models with an 8.9° slope, Model 11—which shares the same step geometry as Model 1—also showed promising results. Furthermore, velocity profile analyses demonstrated that the newly designed models were effective in reducing flow velocity on spillway. Ultimately, the study concluded that novel step geometries could offer significant improvements in energy dissipation performance for stepped spillways.

Keywords: CFD, Energy dissipation, OpenFOAM, Stepped spillway, Zigzag labyrinth stepped spillway.

1. GİRİŞ

Barajlar; enerji üretimi, içme ve sulama suyu temini, taşkın kontrolü gibi çeşitli amaçlarla inşa edilen, mühendisliğin en karmaşık ve stratejik yapı sistemlerinden biridir. Söz konusu yapıların güvenli ve sürdürülebilir işletilmesi, yalnızca baraj gövdesinin sağlamlığına değil, aynı zamanda yardımcı yapı elemanlarının etkinliğine de bağlıdır. Bu bağlamda, dolusavaklar, baraj sistemlerinin en kritik bileşenlerinden biri olarak öne çıkmaktadır.

Dolusavaklar; baraj rezervuarında biriken fazla suyun veya taşkın (feyezan) anındaki akımın, kontrollü bir şekilde membadan mansaba aktarılmasını sağlayan yapılardır. Bu yapıların temel amacı, aşırı su birikimini önleyerek baraj gövdesinin ve diğer hidrolik yapıların güvenliğini korumaktır. Dolusavaklar, akımın potansiyel enerjisini kademeli olarak düşürmek, yapıya zarar verebilecek hidrolik etkileri sönmölemek ve erozyonu en aza indirmek için çeşitli tiplerde tasarlanmaktadır. Bunlar arasında serbest yüzeyli dolusavaklar, radyal kapaklı dolusavaklar ve basamaklı (kademeli) dolusavaklar öne çıkan türlerdir.

Özellikle basamaklı dolusavaklar, akım enerjisinin sönmölenmesini doğal olarak sağlayan yapıları sayesinde hidrolik verimlilik açısından büyük avantaj sunmaktadır. Arkeolojik ve tarihsel kayıtlara göre, basamaklı dolusavakların ilk örnekleri M.Ö. 1300'lü yıllarda Yunanistan'da inşa edilen Akarnian dolusavağı ile ortaya çıkmıştır (Chanson, 2000). Bu durum, insanlık tarihinin erken dönemlerinden itibaren su yönetimi ve taşkın kontrolüne dair bilinçli mühendislik uygulamalarının varlığını göstermektedir.

Modern anlamda basamaklı dolusavakların hidrolik performansı üzerine bilimsel çalışmalar ise 20. yüzyılın başlarında ivme kazanmıştır. Bu çalışmaların temelinde, basamaklar üzerinde gelişen türbölanslı akım yapılarının enerji kırıcı etkisi yatmaktadır. Özellikle Chanson (2004) tarafından yapılan kapsamlı deneysel ve analitik çalışmalar, basamaklı dolusavakların hem yapısal güvenlik hem de enerji sönmöleme açısından oldukça etkili olduğunu ortaya koymuştur.

Barajlarda, dolusavaklar aracılığıyla bırakılan suyun yüksek kinetik enerjisi, mansapta erozyon ve yapı hasarı oluşturmaması için çeşitli hidrolik yapılarla sönümlenmektedir. Klasik dolusavaklarda, bu amaçla genellikle enerji kırıcı havuzlar (stilling basin) veya sıçratma eşikleri (flip bucket) kullanılmaktadır. Bu yapılar, akımın türbülans ve iç sürtünme yoluyla enerji kaybetmesini sağlar (Chow, 1959; Novak vd., 2007).

Son yıllarda ise özellikle küçük ve orta ölçekli baraj projelerinde basamaklı dolusavaklar yaygınlaşmıştır. Bu yapılarda enerji, akımın her bir basamaktan geçerken oluşturduğu hava-yutulması, türbülans ve içsel sürtünme etkileriyle kademeli olarak sönümlenir (Chanson, 2002; Berkün, 2007).

Dolusavak yapılarında kullanılan başlıca enerji sönümleme sistemleri şunlardır:

- **Enerji kırıcı havuz:** Akımın genişleyen kesitte ani şekilde yavaşlaması ve ters akım oluşturmamasıyla enerji kaybı sağlanır (USACE, 1990).
- **Sıçratma eşiği:** Akımı serbest atlayışla havaya fırlatarak kinetik enerjinin yayılmasını sağlar (Novak vd., 2007).
- **Roller bucket:** Eğrisel yapısı sayesinde akıma dönme hareketi kazandırarak enerji, iç sürtünme ve türbülans ile sönümlenir (Khatsuria, 2005).
- **Basamaklı dolusavak:** Her basamakta oluşan lokal türbülanslar ve hava kabarcıkları sayesinde akım enerjisi kademeli olarak düşürülür (Felder ve Chanson, 2012).

Son zamanlarda küçük barajların dolusavaklarından mansaba bırakılan akımın enerjisini sönümlemek için yaygın olarak basamaklı dolusavaklar kullanılmaktadır (Berkün, 2007). Basamaklı dolusavaklar, üzerinden savaklanan akımın basamaklara çarpması sonucunda akım enerjisinin çoğunu boşaltım kanalında sönümleyebilmektedir. Basamaklı dolusavaklarda sönümlenen enerji miktarının oranı diğer dolusavak tiplerine göre yaklaşık %70-80 oranında daha fazladır (Boes vd., 2003). Bundan dolayı basamaklı dolusavaklarda boşaltım kanalı sonuna yapılan enerji kırıcı yapılarda oluşan hidrolik sıçramanın boyunun kısalmasıyla mansaptaki enerji kırıcı yapıların boyutları %30-40 oranında küçülmesiyle birlikte basamaklı dolusavakların geleneksel savaklara nazaran daha ekonomik olduğu vurgulanmaktadır (Berkün, 2007; Boes ve Hager, 2003). Ek olarak, basamaklı dolusavak boyunca oluşan yüksek miktardaki enerji sönümleme sayesinde akım momentumu azalır.

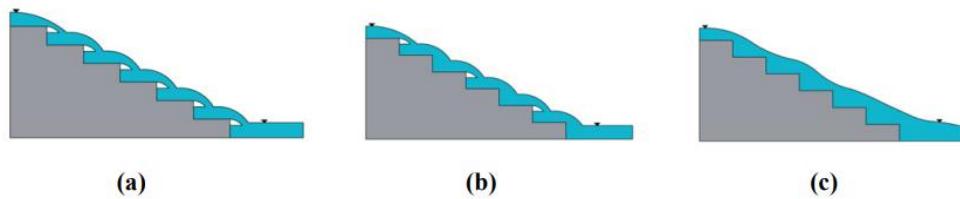
Buna bağılı olarak, akım hızının düşmesi sonucunda akım derinliği ile birlikte kavitasyon indeksi de artar ve kavitasyon riski azalır (Chanson, 1993). Su arıtma tesislerinde, su içerisindeki oksijen miktarını artırmak için de basamaklı dolusavaklar kullanılmaktadır (Chanson, 1998).

Uygulama kolaylığı bakımından basamaklı dolusavaklar, daha çok silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) barajlarda ve birim debisi $q=10-15 \text{ m}^3/\text{s.m'ye}$ kadar olan dolusavaklarda kullanılmaktadır. Ayrıca birim debinin $q=30 \text{ m}^3/\text{s.m'ye}$ çıkarılabileceği de ileri sürülmüştür (Boes 2012). Basamaklı dolusavakların kullanılmasındaki esas gaye, enerji sönmüleme optimizasyonu ve yapının kabul edilebilir düzeyde bir işletim ömrüne sahip olmasıdır (Berkün, 2007).

1.1. Basamaklı Dolusavaklarda Akım Rejimleri

Basamaklı dolusavaklarda akım yapısı oldukça karmaşıktır. Geçmişte gerçekleştirilen deneysel çalışmalar (Sorensen, 1985; Peyras vd., 1992; Ohtsu ve Yasuda, 1991) doğrultusunda, basamaklı dolusavaklardaki akım dolusavak eğimi, basamak geometrisi ve debi değerine göre üç ana rejime ayrılmaktadır: nap akımı rejimi, sıçramalı akım rejimi ve geçiş akımı rejimi (Şekil 1.1) (Ma vd., 2021).

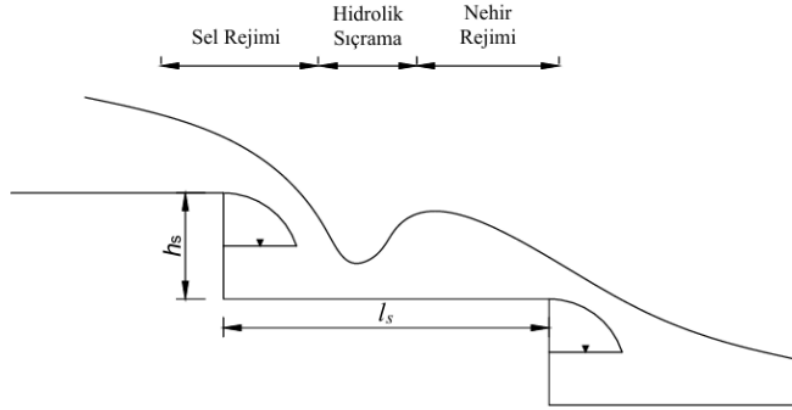
Nap akımı rejiminde, her basamağın oluşturduğu naplar birbirinin peşinden serbest nap dizisi şeklinde sıralanır ve bu durum düşük debi değerlerinde görülür. Sıçramalı akım rejiminde, su; kararlı bir şekilde akar ve bu durum yüksek debi değerlerinde meydana gelir (Chanson, 1996). Hidrolik mühendisliği açısından, basamaklı dolusavak tasarımları genellikle en kararlı akım düzenine sahip olan sıçramalı akım rejimi temel alınarak yapılır (Ma vd., 2021).



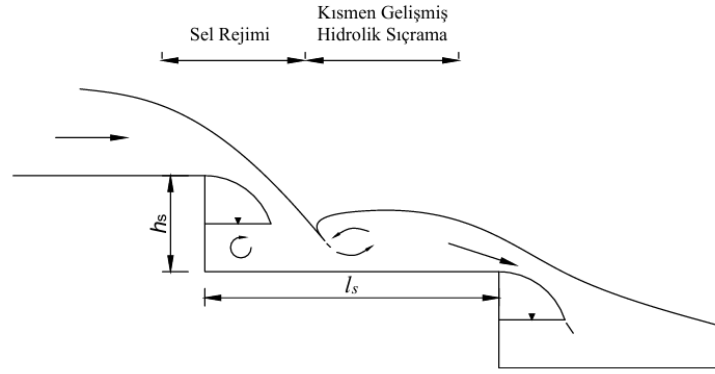
Şekil 1.1. Basamaklı dolusavaklarda akım rejimleri: a) nap akım rejimi; b) geçiş akım rejimi; c) sıçramalı akım rejimi (İkinciogulları, 2023)

1.1.1. Nap Akımı Rejimi

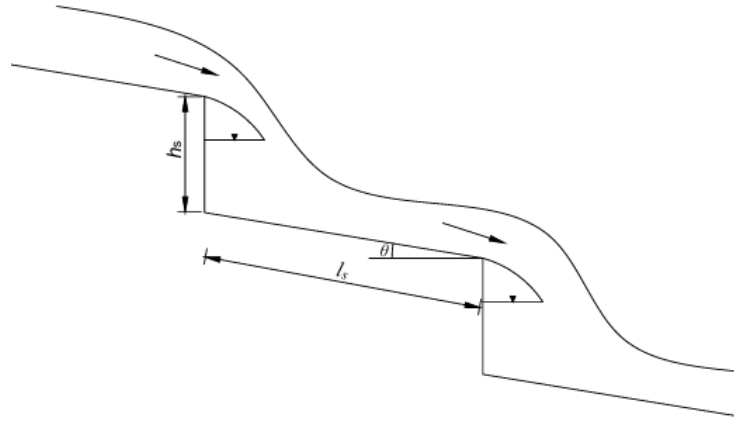
Nap akımı, genellikle uzun basamaklarda, basamak yüksekliği $h \leq 0,2$ m ve kritik akım derinliğininin bu yüksekliğe oranı $y_c/h < 0,8$ olan dolusavaklarda ve düşük debili akımlarda görülür (Jabbar, 2018; Roshan vd., 2010). Akımın her bir basamağa çarpmasıyla içerisine hava girmesi veya basamakların uzun olması durumunda, basamaklar üzerinde tam ya da kısmi olarak gelişen hidrolik sıçramalar sayesinde akımın enerjisi azaltılabilir (İkinciogulları, 2021; Chanson, 1994). Nap akımı üç alt rejime ayrılır: düşük akım oranlarında oluşan hidrolik sıçramalı nap akımı (Şekil 1.2), kısmi hidrolik sıçramalı nap akımı (Şekil 1.3) ve hidrolik sıçramasız nap akımı (Şekil 1.4) (Dursun, 2009). Nap akımı rejiminde, sabit bir dolusavak yüksekliği ve debisi için, basamak sayısı azaldıkça sönmölenen enerji miktarı artar, fakat basamak sayısı arttıkça sönmöleme miktarı azalır. Geniş basamaklı ve düşük yükseklikli (basamak yüksekliği 0,2 m'nin altı) barajlarda, nap akımı sıçramalı akıma kıyasla daha fazla enerjiyi sönmöleyebilir (Jabbar, 2018; Kositgittiwong, 2012).



Şekil 1.2. Tam gelişmiş hidrolik sıçramalı nap akımı (Dursun, 2009)



Şekil 1.3. Kısmi gelişmiş hidrolik sıçramalı nap akımı (Dursun, 2009)

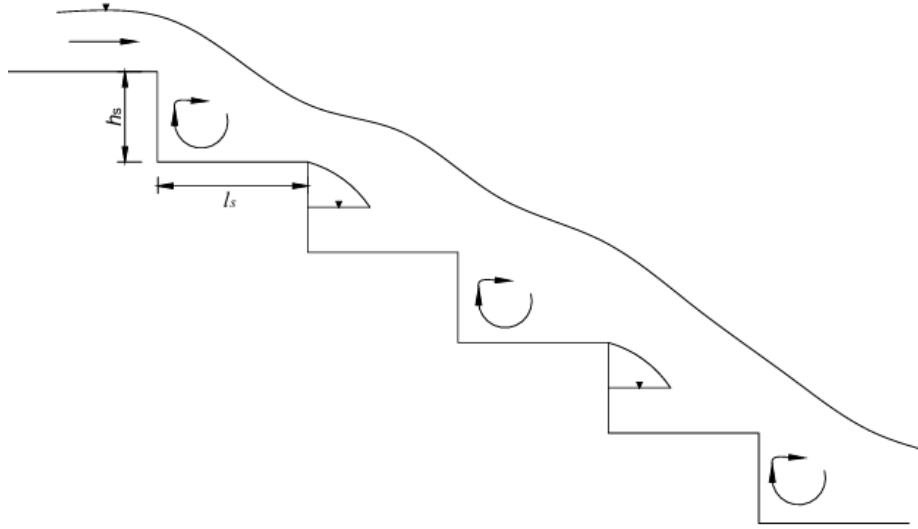


Şekil 1.4. Hidrolik sıçramasız nap akımı (Dursun, 2009)

1.1.2. Geçiş Akımı Rejimi

Ohtsu ve Yasuda (1991) tarafından tanımlanan geçiş akımı rejimi, basamaklı dolusavaklarda nap akımı (serbest nap akımı) ile sıçramalı (skimming) akım rejimleri arasında meydana gelen, akışın kararsız ve düzensiz olduğu ara rejimdir (Şekil 1.5). Bu rejimde, akış karakteristikleri hem nap akımına hem de sıçramalı akıma ait özellikler göstermektedir. (Şekil 1.5). Bu rejim, nap akımının oluşması için gereken maksimum debi değerinin üzerinde ve sıçramalı akımın başlaması için gereken debi değerinin altında kalan debi aralığında görülür. Geçiş rejiminde, nap akımındaki art arda düşen serbest naplar dizisi veya sıçramalı akımdaki izafi taban oluşumu gözlemlenmez (Murillo, 2006). Bu rejimde meydana gelen geçici hidrodinamik dalgalanmalar, düzensiz akım davranışına ve yapıda

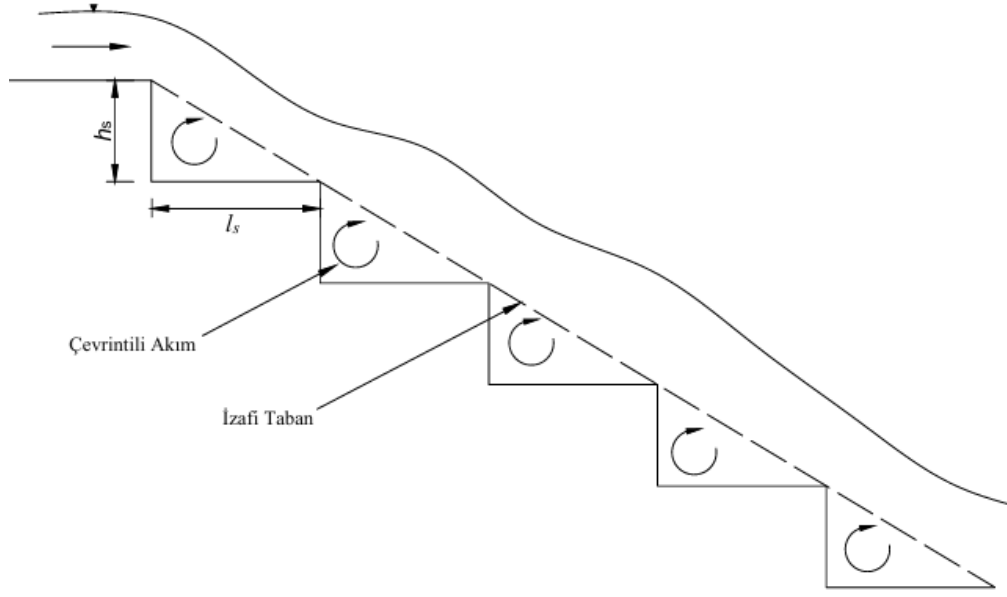
meydana gelecek gereksiz titreşimlere neden olabilir. Bu nedenle, geçiş akım rejimi güvenlik açısından tasarımcılar tarafından önerilmemektedir (Chanson, 1996).



Şekil 1.5. Geçiş akımı rejimi (Tuna, 2011)

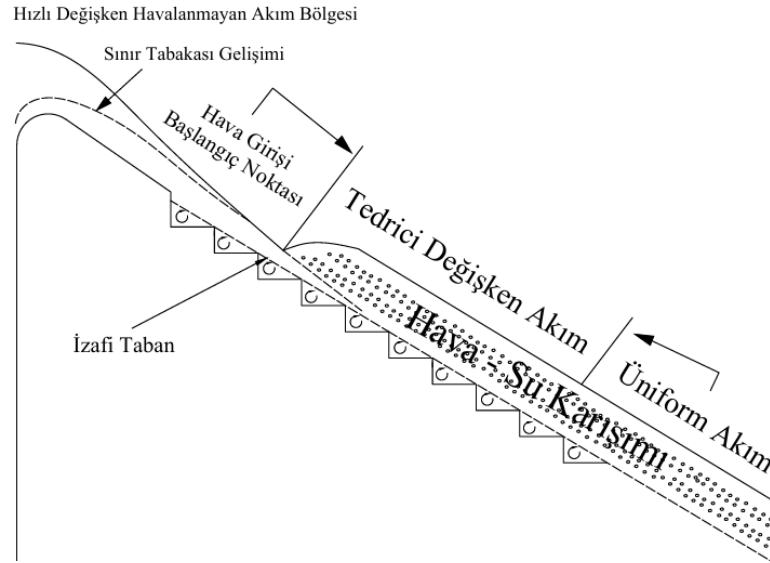
1.1.3. Sıçramalı Akım Rejimi

Yüksek debilerde ve yüksek açılı şut kanallarında akımın basamaklar üzerinde sıçrayarak aktığı akım rejimine sıçramalı akım rejimi denir (Şekil 1.6). Bu rejimde, akım basamak uçlarından sıçrayarak geçerken izafi bir taban meydana gelir. Oluşan bu izafi taban, basamaklar üzerinde oluşan çevrıntiler aracılığıyla akım enerjisinin büyük bir kısmının sönmülmesini sağlar (Tuna, 2011; Bombar, 2004).



Şekil 1.6. Şıçramalı akım rejimi (Tuna, 2011)

Şıçramalı akım rejimine sahip bir basamaklı dolusavakta, ilk basamaklarda akımın serbest yüzeyi düzgündür ve bu bölgede hava girişi gözlemlenmez. Bu bölge, havalanmayan akım bölgesi olarak isimlendirilir ve berrak su görünümü ile ayırt edilir. Ancak bu bölge boyunca türbülanslı sınır tabakasının gelişimi gözlemlenir. Türbülanslı sınır tabakasının dış kenarı serbest yüzeye ulaştığında, türbülans nedeniyle serbest yüzeyde hava girişi meydana gelir. Bu olayın gerçekleştiği nokta başlangıç noktası olarak bilinir. Başlangıç noktasının ötesinde, hava-su karışımını içeren akım tedricen değişen bir akım bölgesi oluşturur; ilerleyen kısımlarda ise akım üniform hale gelir ve bu bölge üniform akım bölgesi olarak tanımlanır (Şekil 1.7) (Murillo, 2006).



Şekil 1.7. Sıçramalı akım rejiminde akım bölgeler (Emiroğlu, 2014)

Basamaklı dolusavaklarda akım rejimlerinin belirlenmesine yönelik yapılan araştırmalar sonucunda, Chanson (2001), nap akım rejimi ile geçiş akım rejimi arasındaki sınırı (nap akım rejiminin üst sınırını) Eşitlik (1.1) ile tanımlamıştır. Aynı çalışmasında, geçiş akım rejimi ile sıçramalı akım rejimi arasındaki sınırı (sıçramalı akım rejiminin alt sınırını) ise Eşitlik (1.2) ile belirtmiştir. Boes ve Hager (2003) ise geçiş akım rejimi ile sıçramalı akım rejimi arasındaki sınırı (sıçramalı akım rejiminin alt sınırını) Eşitlik (1.3) ile ifade etmişlerdir.

$$\frac{y_c}{h} = 0,89 - 0,4 \left(\frac{h}{l} \right) \quad \text{Nap akımı - Geçiş akımı} \quad (1.1)$$

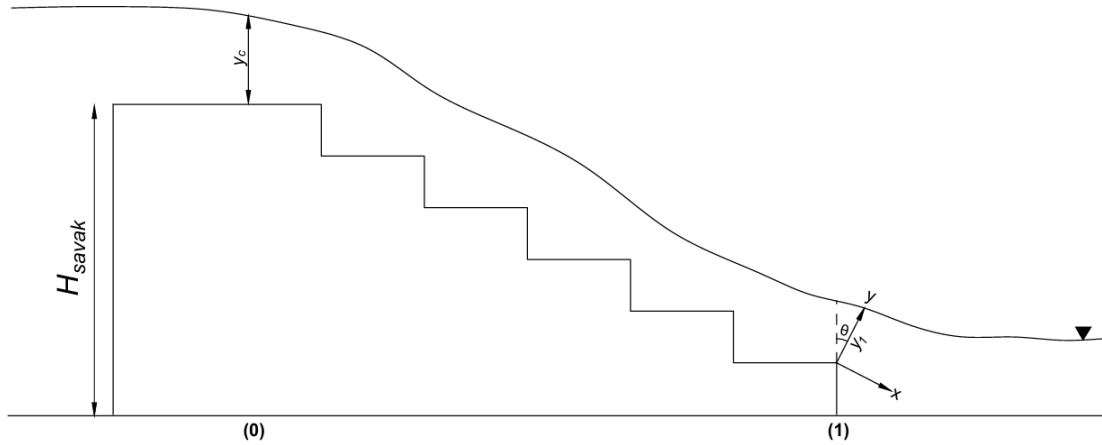
$$\frac{y_c}{h} = 1,2 - 0,325 \left(\frac{h}{l} \right) \quad \text{Geçiş akımı - Sıçramalı akım} \quad (1.2)$$

$$\frac{y_c}{h} = 0,91 - 0,14 \tan(\theta) \quad \text{Nap akımı - Geçiş akımı} \quad (1.3)$$

Bu eşitliklerde, h = basamak yüksekliği (m), l = basamak genişliği (m), y_c = kritik akım derinliği (m) ve θ = şut açısı olarak tanımlanmıştır. Bu eşitliklerden açıkça görüldüğü üzere, basamaklı dolusavaklardaki akım rejiminin türü, basamakların geometrik özelliklerine, debiye ve kanal açısına bağlıdır (Ma vd., 2021).

1.2. Basamaklı Dolusavaklarda Enerji Sönümleme

Enerji sönümleme oranı basamaklı dolusavaklarda memba (E_0) ve mansaptaki enerji (E_1) değerlerini arasındaki ilişki ile hesaplanabilir (Şekil 1.8).



Şekil 1.8. Basamaklı dolusavak boykesiti (Felder vd., 2012)

Membadaki enerji (E_0), Eşitlik (1.4) ile bulunabilir.

$$E_0 = H_{savak} + y_c + \frac{v_c^2}{2g} \quad (1.4)$$

Dikdörtgen kanallar için kritik akım derinliği Eşitlik (1.5)'teki gibidir.

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad \text{ve} \quad q = \frac{Q}{B} \quad (1.5)$$

E_0 'daki hız değeri Eşitlik 1.6'daki şekilde yazılabilir.

$$\frac{v_c^2}{2g} = \frac{Q^2}{2g \cdot A^2} = \frac{q^2 B^2}{2g y_c^2 B^2} = \frac{q^2}{2g y_c^2} \quad (1.6)$$

Eşitlik (1.5)'teki q^2 , Eşitlik (1.6)'da yerine yazılırsa E_0 'daki hız değişkeni aşağıdaki şekilde elde edilebilir.

$$\frac{V_c^2}{2g} = \frac{q^2}{2gy_c^2} = \frac{qy_c^3}{2gy_c^2} = \frac{y_c}{2} \quad (1.7)$$

Son olarak membadaki enerji (E_0) Eşitlik (1.8)'deki gibi ifade edilebilir.

$$E_0 = H_{savak} + y_c + \frac{V_c^2}{2g} = H_{savak} + 1.5y_c \quad (1.8)$$

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.

Son basamak ucundaki enerji (E_1), Felder vd. (2012)'nin ortaya koyduğu metoda göre hesaplanmıştır (Eşitlik 1.9). Bu metotta, akım derinliği ölçülürken kanal açısı dikkate alınmıştır.

$$E_1 = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} + h \quad (1.9)$$

Burada; V_1 , mansaptaki ortalama hızını (m/s), y_1 , son basamaktaki akım derinliğini (m) ve h ise basamak yüksekliğini (m) ifade etmektedir.

Memba ile mansap arasındaki enerji farkı (E_L) Eşitlik (1.10)'da gösterildiği gibi hesaplanabilir.

$$E_L = E_0 - E_1 \quad (1.10)$$

Enerji sönümleme oranı ise Eşitlik (1.11) ile hesaplanabilir.

$$\text{Enerji sönümleme oranı} = \frac{E_L}{E_0} \quad (1.11)$$

Dolusavaklarda enerji sönümlemenin değerlendirilmesinde genellikle boyutsuz parametreler kullanılır. Kritik su derinliğinin basamak yüksekliğine oranı (y_c/h) ve son

basamak ucundaki artık enerjinin kritik derinliğe oranı (E_1/γ_c) gibi parametreler, akım rejimi ve enerji sönümleme performansının belirlenmesinde temel göstergelerdir (Chanson, 1996; Ma vd., 2021). Bu oranlar, basamaklı dolusavaklarda akış karakteristiğini ve enerji kayıplarını boyutsuz olarak ifade ederek farklı sistemler arasında karşılaştırma yapılmasını sağlar. Ayrıca, Froude sayısı akımın dinamik özelliklerini yansıtmakta ve enerji sönümleme analizlerinde yaygın şekilde kullanılmaktadır (Tabari vd., 2016). Basamak geometrisi ile ilgili boyutsuz parametreler, özellikle basamak genişliği ile yüksekliği oranı (B/h) ve basamak sayısı, enerji sönümlemenin etkinliğini etkileyen önemli faktörlerdir (Jabbar, 2018). Bu parametreler sayesinde, dolusavaklarda enerji sönümleme performansı hem deneysel hem de sayısal çalışmalarla tutarlı şekilde değerlendirilebilmektedir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Basamaklı dolusavaklarda enerjinin çoğunluğu, dolusavak boşaltım kanalında bulunan basamaklar tarafından sönümlenmektedir (Boes vd., 2000). Basamaklı dolusavaklarda enerji sönümleme etkisi üzerine son yıllarda birçok araştırmacı basamaklar üzerinde farklı basamak sayıları ve geometrileri ile birlikte farklı şut açıları kullanarak sayısal ve deneysel çalışmalar ortaya koymuşlardır. Çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

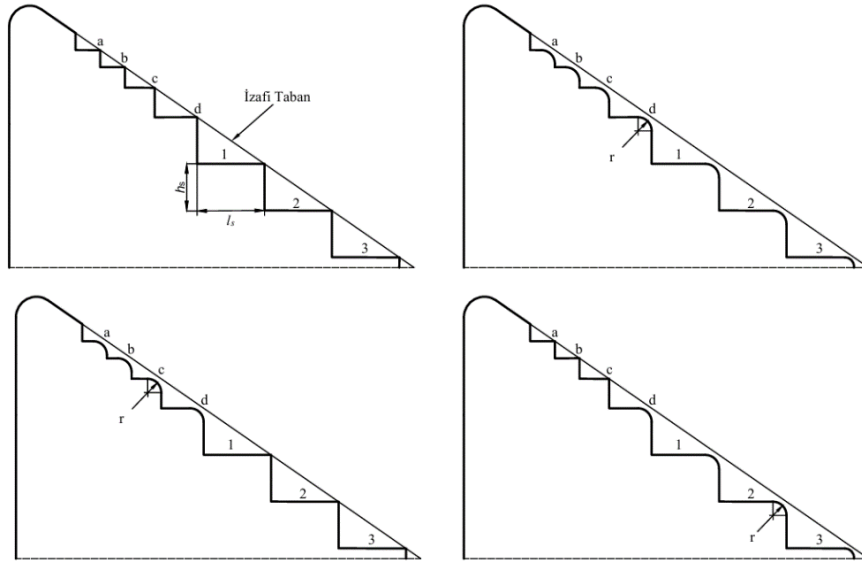
Rice ve Kadavy (1996), Salado Creek Barajı'nın basamaklı dolusavağının hidrolik davranışlarını incelemek amacıyla, Froude benzeşimi ilkesine dayalı olarak 1:20 ölçekli bir fiziksel model oluşturmuşlardır. Bu model, prototipin 1/20 ölçeğinde küçültülmüş bir versiyonudur. Modelin yüksekliği 85,35 cm olup, eğimi 21,8° olarak tasarlanmıştır. Modelde toplam 27 basamak bulunmaktadır. Bu ölçeklendirme, Froude benzeşimi prensiplerine uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar, düşüm havuzu sonuna eşik eklenen modellerin eşiksiz modellere göre akımda daha az çalkantı oluşturduğunu, bundan dolayı düşüm havuzu sonuna eşik eklemenin dolusavak güvenliği bakımından önem teşkil ettiğini ve eklenecek eşğin dolusavak topuğundan itibaren 12,19 m ileride olması gerektiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca enerji sönümleme bakımından basamaklı dolusavakların klasik dolusavaklara oranla 2-3 kat daha fazla enerji sönümleyebildiğini ve basamaklı dolusavak kullanımının klasik dolusavaklara göre düşüm havuzu boyutlarını %30 civarında azalttığını ortaya koymuşlardır.

Peyras vd. (1992), basamaklı dolusavakların akım karakteristiklerini kutu gabyonlar kullanarak ele almışlardır. Doğru inşa metotları kullanıldığında kutu gabyonlardan oluşturulmuş basamaklı dolusavakların, 3 m³/m.s'ye kadar olan akımlarda hasar almadan çalışabileceğini ve klasik dolusavaklara göre %10-30 arasında daha fazla akımın enerjisini sönümlediğini ve dolayısıyla bunun da enerji kırıcı yapıların maliyetini %5-10'lara kadar azaltacağını söylemişlerdir.

Tabbara vd. (2005), farklı basamak modellerini kullanarak basamaklı dolusavaklardaki akımı HAD yöntemi ile sayısal olarak incelemişlerdir. Özellikle, enerji sönümleme oranları

ve basınç dağılımları gibi kritik parametrelerdeki sapmaların %5'in altında olduğu rapor edilmiştir. Bu bulgular, $k-\epsilon$ türbülans modelinin basamaklı dolusavaklardaki akım davranışlarını doğru bir şekilde tahmin edebildiğini göstermektedir. Bu çalışma, HAD yöntemlerinin basamaklı dolusavak tasarımında güvenilir bir araç olarak kullanılabileceğini ve mühendislik uygulamalarında deneysel çalışmalara tamamlayıcı bir yaklaşım sunduğunu ortaya koymaktadır.

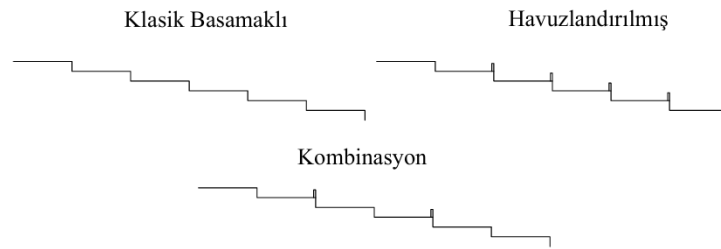
Zare ve Doering (2012), klasik basamaklı dolusavaklar ile farklı konfigürasyonlar oluşturarak tasarladıkları uçları yuvarlatılmış basamaklı dolusavakları; enerji sönümleme, havalandırma başlanma yeri, yan duvar yüksekliği ve ana akım özelliklerine göre kıyaslamışlardır (Şekil 2.1). Yapılan bu deneyler sonucunda basamak uçlarının yuvarlatılmasının klasik basamağa nazaran %3 civarında daha fazla enerji sönümleyebildiğini ve ihtiyaç duyulan yan duvar yüksekliğinin %20 oranında azaldığını ortaya koymuşlardır. Ayrıca, sadece giriş kısmındaki birkaç basamağın yuvarlatılmasının enerji sönümleme üzerinde anlamlı bir artış sağlamadığı, dolayısıyla bu tür kısmi uygulamaların tasarım açısından yeterli olmadığını vurgulamışlardır.



Şekil 2.1. Zare ve Doering (2012) çalışmalarında kullandıkları modeller

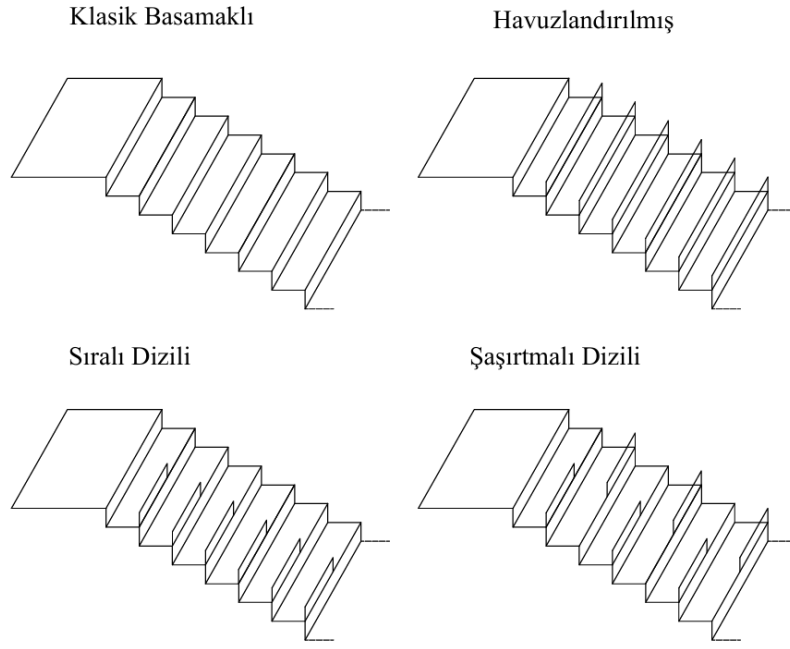
Felder vd. (2012), klasik basamaklı dolusavak modeliyle birlikte üç farklı model daha kullanarak bu modellerin havalandırma oranlarını ve enerji sönümleme performanslarını

ele almışlardır (Şekil 2.2). Araştırmacılar, deneylerden elde ettikleri bulgulara göre, yaptıkları incelemede havuzlandırılmış basamaklı dolusavak modellerinin enerji sönümleme oranının klasik basamaklı dolusavaklara göre daha düşük olduğunu ve yapılan tasarımların havalandırma açısından herhangi bir avantaj sağlamadığını ifade etmişlerdir. Ayrıca araştırmacılar, sıralı ve şaşırtmalı kombine modellerde kanalın enkesiti boyunca akımda büyük farklılıklar olduğunu ifade etmişlerdir.



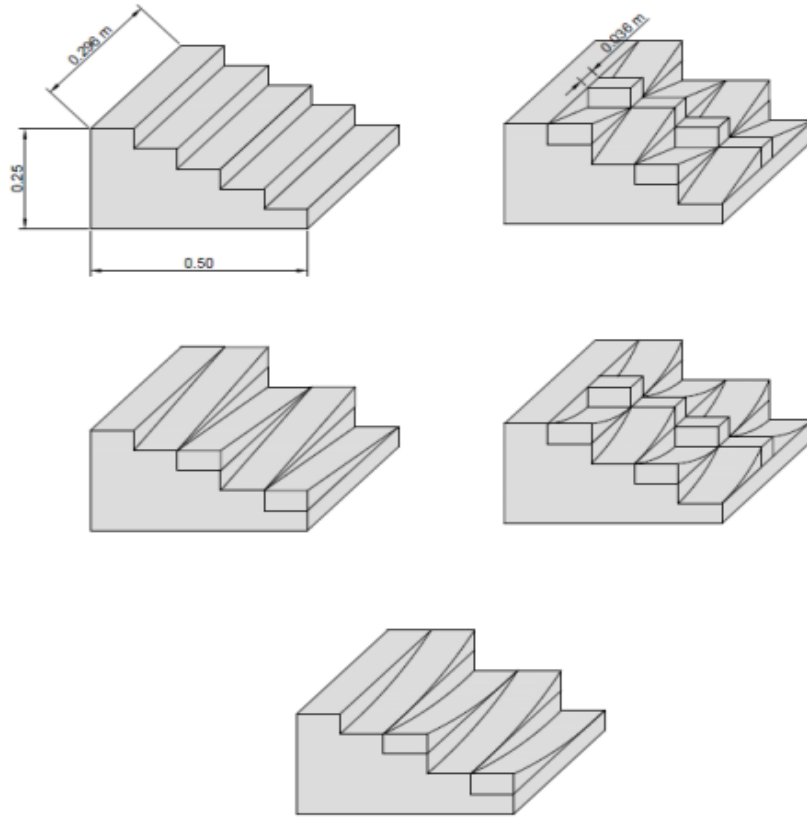
Şekil 2.2. Felder vd. (2012) çalışmalarında kullandıkları modeller

Felder vd. (2012), klasik basamaklı dolusavak modeline ek olarak 3 farklı modeli daha (Şekil 2.3) kullanarak, bu modellerin havalandırma oranlarını ve enerji sönümleme performanslarını analiz etmişlerdir. Araştırmacılar, deneyleri kanal genişliği 0,52 m, basamak genişliği 0,20 m, basamak yüksekliği 0,10 m olan $26,6^\circ$ açılı bir kanalda, 0,02 ile 0,155 m³/s arası debilerle gerçekleştirmişlerdir. Basamakların uçlarına havuz oluşturmak amacıyla yerleştirilen eşiklerin yüksekliği 0,031 m ve genişliği 0,015 m'dir. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre araştırmacılar, havuzlu basamaklı dolusavak modellerinin enerji sönümleme oranının klasik modellere göre daha düşük olduğunu ve tasarımların havalandırma açısından bir üstünlük sunmadığını ifade etmişlerdir. Ayrıca, sıralı ve şaşırtmalı kombine modellerde kanalın enkesiti boyunca akımda önemli farklılıklar gözlemlendiğini belirtmişlerdir.



Şekil 2.3. Felder vd. (2012) çalışmalarında kullandıkları modeller

Mero ve Mitchell (2017), basamak geometrileri farklı olan 5 modeli (Şekil 2.4) kullanarak enerji sönümleme oranlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Deneyler, 0,296 m genişliğinde, 4 m uzunluğunda ve 0,32 m derinliğinde bir kanalda, 0,25 m yüksekliğinde ve 0,50 m uzunluğunda 5 basamaklı bir dolusavak üzerinde gerçekleştirilmiştir. Debi değerlerinin 0,00213-0,0121 m³/s aralığında olduğu çalışmada, reflektör kullanılan basamaklı modellerin klasik modellere göre daha fazla enerji sönümlendiği ve debi arttıkça enerji sönümleme oranının azaldığı gözlemlenmiştir. Araştırmacılar, reflektör kullanımının hava akışını artırarak enerji dağıtımını iyileştirdiğini ortaya koymuşlardır.



Şekil 2.4. Mero ve Mitchell (2017) çalışmalarında kullandıkları modeller

Attarian vd. (2014), farklı basamak yüksekliklerinde (3,8 cm ve 7,6 cm) enerji sönümlemeyi, havalanma başlangıç noktasını ve dolusavak boyunca hız profilini sayısal olarak incelemişlerdir. Gerçek akım türbülanslı olduğundan, türbülans modellemesinde $k-\epsilon$ türbülans modelini kullanmışlardır. Elde ettikleri sayısal sonuçları literatürden alınan deneysel sonuçlarla (Hunt ve Kadavy, 2009) karşılaştırdıklarında, hız değerlerinde %3,20 ve enerji sönümleme oranlarında %5'lik bir hata olduğunu ve yüksek basamak yüksekliğinde daha fazla enerji sönümlendiği sonucuna varmışlardır.

Felder ve Chanson (2014a), basamak uçlarına ekledikleri çeşitli boşluk oranlarında eşikler kullanarak havuzlandırılmış basamaklı dolusavakların enerji sönümleme oranlarını klasik basamaklı dolusavaklarla karşılaştırmışlardır. Araştırmacılar, boşluk oranı %20 olan eşiklerle donatılmış havuzlandırılmış modellerin, klasik basamaklı dolusavaklara kıyasla enerji sönümleme oranlarının %5 ila %10 daha düşük olduğunu belirlemişlerdir. Bu durum,

boşluklu eşiklerin akımın enerji sönümleme kapasitesini sınırladığını ve tasarımda dikkatli bir şekilde değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Tabari ve Tavakoli (2016), basamaklı dolusavaklarda enerji sönümleme oranını etkileyen basamak sayısı, basamak yüksekliği ve akış debisi gibi faktörleri sayısal yöntemlerle incelemişlerdir. Çalışmada Flow-3D yazılımı kullanılmış ve türbülans modeli olarak k- ϵ modeli tercih edilmiştir. Üç farklı basamak sayısına sahip model (10, 15 ve 20 basamak) oluşturulmuş olup, basamak yükseklikleri sırasıyla 0,10 m, 0,067 m ve 0,05 m olarak belirlenmiştir. Bu modeller üzerinde, 0,01236 m³/s, 0,01952 m³/s ve 0,0282 m³/s olmak üzere üç farklı debi için toplam dokuz analiz gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, debinin artmasıyla enerji sönümleme oranının düştüğünü; basamak sayısının artması ve buna bağlı olarak basamak yüksekliğinin azalmasının da enerji sönümleme oranını azalttığını göstermiştir.

Hamedi vd. (2016), eğimli basamaklı dolusavakların uçlarına eşik ekleyerek enerji sönümleme performansını incelemek için deneysel ve iki boyutlu sayısal çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar, toplam 12 adet deney yaparak deneysel ve sayısal çalışmaların sonucunda enerji sönümleme oranlarını karşılaştırmışlar ve ortalama %5,55 civarında bir fark tespit etmişlerdir. Sadece 4 basamağa farklı derecelerde eğimler verilerek (39°-42° arası) ve bu basamakların uçlarına farklı boyutlarda eşikler eklenerek yapılan kıyaslamada ise, enerji sönümleme için ortalama %14,52 civarında bir artış olduğunu gözlemlemişlerdir.

Jabbar (2018), farklı basamak sayılarına ve boyutlarına sahip modellerde farklı debi değerleri kullanarak klasik basamaklı dolusavakların su yüzü profilini ve enerji sönümleme oranlarını sayısal olarak incelemiştir. Çalışmada, elde ettiği sayısal sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırmış ve su yüzü profilinde ortalama %3,50, enerji sönümleme oranında ise ortalama %2,75'lik bir hata olduğunu gözlemlenmiştir. Ayrıca, basamaklı dolusavaklarda enerji sönümleme oranının basamak sayısı ile doğru ve akım debisi ile ters orantılı olduğunu vurgulamıştır.

Reeve vd. (2019), farklı gabyon geometrilerine sahip basamaklı dolusavakların hidrolik performansını sayısal olarak Flow-3D yazılımı ile incelemiştir. Klasik, bindirmeli, eğimli

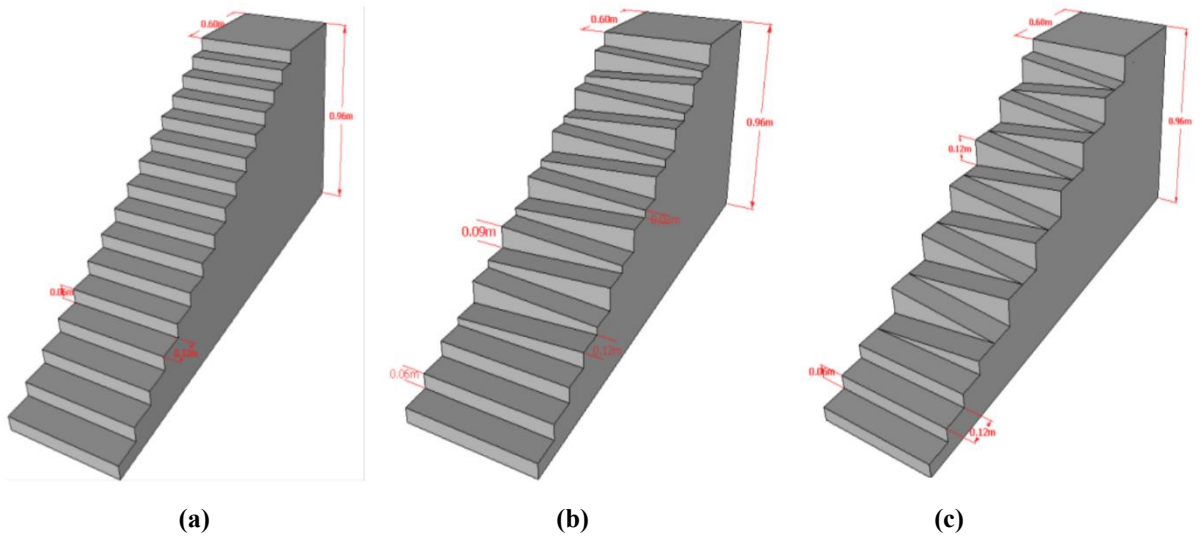
ve havuzlandırılmış gabyon modelleri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, klasik gabyon geometrisinin enerji sönümleme oranında en yüksek performansı gösterdiğini ortaya koymuş; havalanma başlangıç noktası da klasik modelde daha erken gerçekleşmiştir. Ayrıca, basamak yüksekliği ve dolusavak eğiminin azalması havalanmayan akım bölgesinin uzunluğunu artırırken, gabyon porozitesi ve çakıl tane boyutunun bu noktaya etkisinin minimal olduğu belirlenmiştir. Bu bulgularla, gabyon malzemeden yapılmış basamaklı dolusavaklarda klasik geometrinin enerji sönümleme ve havalanma açısından daha avantajlı olduğunu göstermişlerdir.

Zhang ve Chanson (2018), basamaklı dolusavaklarda basamaklara yapılan pahların akımdaki hava miktarına ve enerji sönümleme oranlarına etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, farklı pah açılarının akışkanın hava-su karışım oranı ve enerji kaybı üzerindeki etkileri, laboratuvar ölçekli fiziksel modeller kullanılarak ölçülmüştür. Bulgular, pah yapılan basamakların enerji sönümleme oranlarının %5–10 oranında azaldığını ve havalanma başlangıcının mansaba doğru yaklaşık 1–2 basamak ötelenerek gerçekleştiğini göstermiştir.

Ashoor ve Riazi (2019), 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, basamak uzunluğunun artmasıyla birlikte akıma dahil olan hava miktarının arttığı, basamak geometrisi 1D:2,2Y oranında tasarlanan modelin enerji sönümleme açısından en iyi 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 (2019), enine farklı eğimlere sahip basamaklı dolusavak modelleri ile klasik basamaklı modellerin enerji sönümleme performanslarını karşılaştırmışlardır. Çalışmalarında, 0,03-0,005 m³/s arasında değişen debi değerleri kullanılarak 3 farklı model (Şekil 2.5) test etmişlerdir. Modellerin her biri 0,90 m yükseklik, 0,60 m genişlik, 1,92 m uzunluk ve 26,6° eğime sahiptir. İlk model (M1) 16 adet, 0,06 m yatay ve 0,12 m düşey boyutlu basamaklardan oluşmaktadır. İkinci ve üçüncü modellerde ise ilk ve son üç basamak düz, geri kalan 12 basamak ise enine eğimli yapıdadır. İkinci modelde eğim 2,84°,

üçüncü modelde ise $5,66^\circ$ 'dir. Araştırmalar sonucunda, enine eğim arttıkça enerji sönümlenme oranının da arttığı, en büyük enerji sönümlenmenin $5,66^\circ$ eğimli modellerde görüldüğü ve tüm modellerde debi arttıkça enerji sönümlenme oranının azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 2.5. Farklı basamak konfigürasyonlarının Ali ve Yousif (2019) tarafından deneysel incelenmesi: a) M1 Konfigürasyonu; b) M2 Konfigürasyonu; c) M3 Konfigürasyonu

Güler ve İmamoğlu (2020), Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yönteminin mühendislik alanındaki önemini ve uygulama avantajlarını ele aldıkları çalışmalarında, bu yöntemin özellikle deneysel yollarla elde edilmesi güç olan akışkan davranışlarının sayısal olarak modellenmesinde etkili olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmada, HAD'nin ısı transferi, basınç kaybı, hız dağılımı gibi parametrelerin analizinde sağladığı katkılar vurgulanmakta; bu yöntemle mühendislik tasarımlarının hem ekonomik hem de zamansal açıdan daha verimli hale geldiği ifade edilmektedir. Yazarlar, HAD'nin mühendislik problemlerinin çözümünde deneysel yöntemlere alternatif oluşturduğunu ve tasarım süreçlerini daha etkin kıldığını ortaya koymuşlardır.

Korkmaz ve Kaçar (2021), Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) simülasyonlarında ağ (mesh) kalitesinin önemini ve optimum ağ yapısının belirlenmesini ele aldıkları çalışmalarında, döner tamburlu kurutucu örneği üzerinden ağ kalitesinin değerlendirilmesini ve en uygun parametrelerin seçimini açıklamışlardır. Çalışmada, HAD simülasyonlarında ağ kalitesinin, analiz sonuçlarının doğruluğu ve hesaplama maliyetleri

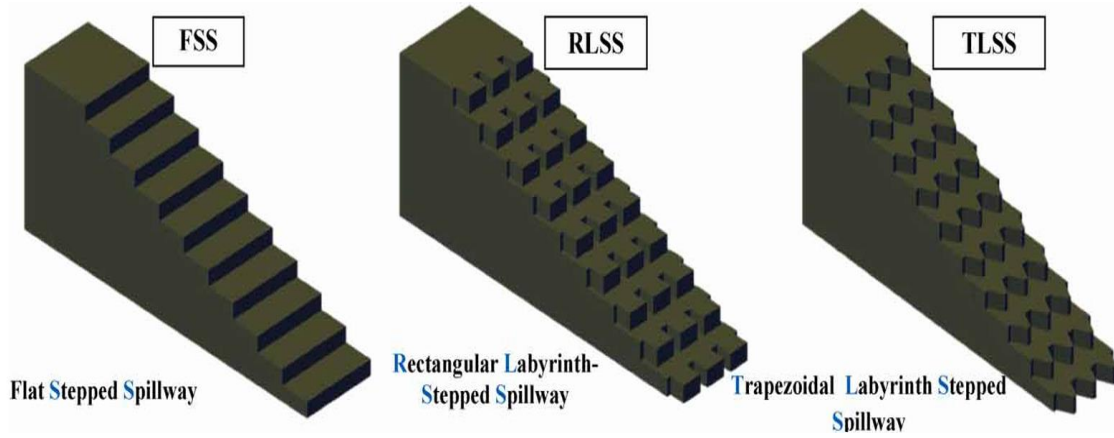
üzerinde doğrudan etkili olduğu vurgulanmıştır. Özellikle, Polymesh (çok yüzlü ağ) elemanlarının kullanımıyla, kompleks geometrilere sahip sistemlerde daha verimli ve doğru sonuçlar elde edilebileceği belirtilmiştir. Ayrıca, optimum ağ yapısının oluşturulmasının, yüksek partikül sayılarına sahip analizlerde ve montaj yapılarına sahip sistemlerde, analiz süresini ve bilgisayar kaynaklarına olan bağımlılığı azaltarak, daha ekonomik ve hızlı çözümler sunabileceği ifade edilmiştir. Bu bağlamda, çalışma, HAD simülasyonlarında ağ yapısının optimizasyonunun, mühendislik uygulamalarında önemli bir adım olduğunu ortaya koymuştur.

İkinciogulları (2021), basamak uçlarına eklediği ters basamaklı eşiklerin, akımın enerjisini sönümleme oranına etkisini $k-\varepsilon$ türbülans modeli ile sayısal olarak incelemiştir. Araştırmacı, çalışmalarında üç farklı model ve altı farklı debi kullanarak toplam 18 adet sayısal analiz gerçekleştirmiştir. Elde ettiği sonuçlara göre, her bir basamağın ucuna eklenen ters basamak geometrili eşiklerin, sıçramalı akım koşullarında, klasik basamaklı savaklara göre %18'e kadar daha fazla enerji sönümleyebildiğini ve bu değer in nap akım rejimine geçildikçe azaldığını gözlemlemiştir.

Ma vd. (2022), aralıklı havuzlandırılmış basamaklı dolusavakların enerji sönümleme performansını sayısal olarak incelemişlerdir. Bu çalışmada, akım serbest yüzey takibi için VOF (Volume of Fluid) yöntemi ve türbülans modellemesi için RNG (Re-Normalization Group) türbülans modeli kullanılmıştır. Üç farklı dolusavak tipi -aralıklı havuzlandırılmış, normal havuzlandırılmış ve klasik basamaklı dolusavak- üzerinde gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda, aralıklı havuzlandırılmış dolusavakların enerji sönümleme oranının diğer iki modele kıyasla %5 ila %10 arasında daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç, aralıklı havuzların akımın enerji dağılımını daha etkin şekilde artırdığını göstermektedir.

Roushangar vd. (2022), üçgen prizmatik elemanların (TPE) basamaklı dolusavaklardaki hidrolik performans etkileri, dokuz farklı model üzerinde deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Sayısal analizlerde RNG ve standart $k-\varepsilon$ türbülans modelleri kullanılmıştır. Araştırmacılar, basamaklar üzerine yerleştirilen üçgen prizmatik blokların kullanımının kavitasyon etkilerini azaltmada etkili olabileceğini ve klasik basamaklı dolusavaklara göre enerji sönümleme oranının %54 civarında daha fazla olduğunu gözlemlemiştir.

Ghaderi vd. (2023), çalışmalarında basamaklı dolusavakların çeşitli labirent konfigürasyonları kullanmışlardır (Şekil 2.6). Sayısal modelin doğrulanması, önceki fiziksel modellerin sonuçları kullanılarak yapılmıştır. Bundan sonra, düz basamaklı dolusavak, trapez-labirent ve dikdörtgen-labirent dahil olmak üzere üç konfigürasyonu sıçramalı akım rejimi için OpenFOAM modeli kullanılarak InterFOAM çözücüsü ile modellemişlerdir. Sonuçlar, $d_c/h = 1,45$ için (d_c aralığı 8 ila 14,5 cm arasındadır) trapez ve dikdörtgen basamaklı-labirent dolusavaklarda enerji dağılımında %34,7 ve %21,1'lik bir artış göstermiştir. Trapez ve dikdörtgen-labirent konfigürasyonunun son basamağındaki akış hızı sırasıyla %50,5 ve %31,1 oranında azaltılmıştır. Ayrıca, trapez konfigürasyonunda, dikdörtgen basamaklı-labirent konfigürasyonuna kıyasla akış hızında %14,7'lik bir azalma elde edilmiştir. Sonuçlar, dikey yüzler üzerindeki minimum basıncın basamakların üst yarısında meydana geldiğini ve dikdörtgen konfigürasyonun en yüksek miktarda negatif basınçla sonuçlandığını göstermiştir. Türbülans kinetik enerjisi, özellikle trapez konfigürasyonunda, mansaba doğru artmıştır.



Şekil 2.6. Ghaderi vd. (2023) çalışmalarında kullandıkları modeller

İkinciogulları (2023a), trapez basamaklı dolusavakların enerji sönmleme performanslarını $k-\omega$ SST türbülans modelini kullanarak sayısal açıdan incelemiştir. Araştırmacı, yapmış olduğu analizler sonucunda, debi değerlerinin artışıyla birlikte enerji sönmleme oranının azaldığını, trapez derinliği ve trapezin alt taban uzunluğunun artışının enerji sönmleme oranını artırdığını ve trapez basamaklı dolusavakların klasik basamaklı dolusavaklara oranla %30'a kadar daha fazla enerji sönmleyebildiğini gözlemlemiştir.

İkincioğulları (2023b), düz basamaklı dolusavaklarda alternatif bir tasarım önererek enerji sönümlemeyi arttırmayı amaçlamıştır. Bu nedenle dairesel basamaklı dolusavak (Circular stepped spillway-CSS) modeli geliştirmiş ve sayısal olarak incelemiştir. CSS'nin ve düz basamaklı dolusavağın enerji sönümleme oranı, üç farklı model ve debi kullanılarak karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlara göre basamak adımlarındaki yarıçap küçüldükçe CSS daha iyi performans göstermiştir. 0,50, 1,50 ve 2,50 cm basamak derinliğine sahip CSS modelleri, düz basamaklı dolusavağa kıyasla, sırasıyla %21,4, %38 ve %50,7'ye kadar daha fazla enerji tüketmiştir.

Alashan vd. (2023); iklim değişikliğinin artırdığı taşkın riski nedeniyle dolusavaklarda enerji sönümlemenin önem kazandığını belirtmiştir ve çalışmalarında, basamaklı dolusavaklardaki enerji sönümleme oranları, Python programlama diliyle geliştirilen bulanık mantık sistemi kullanılarak hesaplanmıştır. Modelde 2 yeni parametre (yaklaşım kanalı oranı ve basamak üstü geometrik oran) tanımlanmış ve farklı araştırmacılara ait deneysel verilerle test edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda ortalama yüzde hata 1,69 ve ortalama mutlak hata 2,00 olarak bulunmuş, modelin farklı akış koşullarında güvenilir şekilde uygulanabileceği gösterilmiştir.

Abdulrahman vd. (2023), farklı basamak yüksekliklerine sahip basamaklı dolusavakların akış karakteristikleri ve enerji dağılım oranlarını incelemek amacıyla laboratuvar deneyleri gerçekleştirmiştir. Çalışmada elde edilen bulgular, bu yapıların tasarım ve inşasında önemli bilgiler sunmaktadır. Modeller, 0,14 ila 3,50 boyutsal olmayan deşarj (y_c/h) aralığı ile 0,3 m genişliğinde yatay bir kanal içinde çeşitli akış hızlarına tabi tutulmuştur. Bunun sonucunda, daha büyük bir basamak yüksekliğine sahip modelin, daha küçük bir basamak yüksekliğine sahip modele kıyasla yaklaşık %28'e kadar daha fazla enerji sönümlendiği gösterilmiştir.

Jahad vd. (2024), çalışmalarında mansap açısı $\theta = 26,6^\circ$ olan altı basamaklı dolusavak modeli üzerinde bir kanalda laboratuvar deneyleri yapmışlardır. Kullanılan fiziksel modeller 10:1 ölçeğinde olup 0,055 m³/s'ye kadar deşarj testleri yapılmıştır. Akış davranışını ve genel enerji dağılımını incelemek için geleneksel basamaklı, eşikli ve kavisli geometrililer dahil olmak üzere çeşitli basamak geometrileri kullanmışlardır. Araştırmacılar analizler sonucunda, enerji dağılımının kavisli basamaklı için yaklaşık

%10,5 oranıyla en yüksek olduğunu göstermişlerdir ve burada sıçramalı akım rejiminin daha yüksek bir deşarj aralığına kaydırıldığını gözlemlemişlerdir. Sayısal modelleme sonuçları, deneysel sonuçlarla iyi bir uyum göstermiştir.

Yalçın vd. (2024) tarafından yapılan bir çalışmada, üçgen kesitli basamaklara sahip dolusavakların enerji sönümleme performansları Flow-3D yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Çalışmada, 26,6 derece eğime sahip 3 farklı model ve 3 farklı debi değeri kullanılarak toplamda 9 adet sayısal analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, üçgen basamaklı dolusavaklarda basamak derinliğinin artmasıyla birlikte enerji sönümleme oranının arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, üçgen basamaklı dolusavakların klasik dikdörtgen basamaklı dolusavaklara kıyasla yaklaşık %78'e kadar daha yüksek enerji sönümleme oranına sahip olduğu ve bu oranın geçiş akım rejimine yönelmesiyle azaldığı belirlenmiştir.

İkincioğulları (2024), basamaklı dolusavaklar üzerinde labirent ve harmonik basamak tiplerinin enerji sönümleme etkisini OpenFOAM yazılımı ile incelemiştir. 11 farklı geometri, 6 farklı debi ile $k-\omega$ SST türbülans modeli ve InterFoam çözücüsü kullanılarak analiz edilmiştir. Sonuçlar, çevrim sayısı ve efektif kret uzunluğunun enerji sönümlemeyi artırdığını, labirent ve harmonik modellerin düz modele göre yaklaşık %20 daha fazla enerji sönümlediğini göstermiştir.

Literatürdeki birçok çalışmada, araştırmacılar farklı basamak geometrilerinin enerji sönümleme performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada ise açık kaynak kodlu bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımı olan OpenFOAM kullanılarak planda zigzag geometriye sahip basamak tasarımlarının ve farklı kanal açılarının enerji sönümleme performansına etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Bu çalışmanın özgünlüğü; hem farklı göz açıklığına sahip zigzag labirent basamakların hem de farklı kanal açılarının enerji sönümleme performansı üzerine etkisinin incelenmiş olmasıdır. Böylece, çalışma kapsamında üç farklı açı (8,9°, 14,6°, 26,6°), beş farklı basamak modeli ve altı farklı debi olmak üzere toplamda 90 adet analiz yürütülmüştür.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

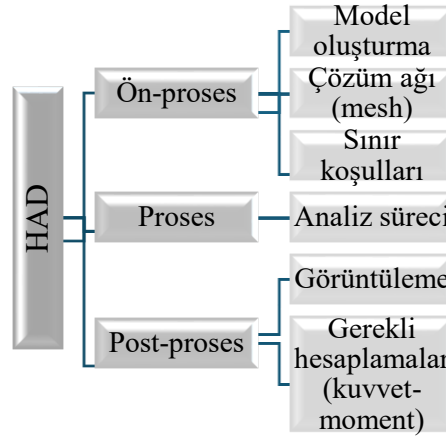
3.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD)

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), Navier-Stokes ve Süreklilik denklemleri gibi temel denklemler aracılığıyla akışkanlar mekaniği problemlerini analiz eden bir bilim dalıdır. Son yıllarda bilgisayar teknolojilerindeki hızlı ilerlemelerle birlikte birçok HAD yazılımı geliştirilmiş ve bu yazılımlar, hidrolik mühendisliği dahil olmak üzere çeşitli bilim dallarında yaygın bir şekilde kullanılmıştır (İkinciöğulları, 2019).

Günümüzde HAD yöntemiyle geliştirilen birçok yazılım bulunmaktadır. Bu yazılımlar, akım alanını ve sınır koşullarını kolayca tanımlamaya olanak sağlayan gelişmiş kullanıcı arayüzlerine sahiptir. HAD yazılımları, bir problemi çözerken üç temel süreci takip etmektedir. Bunlar; ön hazırlık süreci (pre-processing), analiz süreci (processing) ve çıktıların alındığı son süreç (post-processing) şeklindedir (Şekil 3.1).

HAD yazılımlarında, ilk olarak analizde kullanılacak akışkanın hidrolik parametreleri programa tanıtılır, ardından hidrolik model ve çözüm ağı oluşturulur. Çözüm ağının boyutu sonuçların doğruluğunu etkiler; daha küçük ağlar daha hassas sonuçlar verir ancak analiz süresini uzatır. Bu nedenle, optimum çözüm ağı boyutunun belirlenmesi çözüm maliyetleri açısından önemlidir. Daha sonra akım bölgesinin sınır şartları ve türbülans modeli gibi parametreler belirlenir. Analiz aşamasında, akışkan akımını yöneten denklemler aracılığıyla akım parametreleri hesaplanır ve son olarak simülasyonun analiz sonuçları alınır ve görselleştirilir (İkinciöğulları, 2019; Usta, 2014).

HAD yöntemi ile yapılan sayısal modellemeler, fiziksel modellere kıyasla hem zaman hem de maliyet açısından tasarruf sağlar. Ayrıca, fiziksel olarak inşa edilmesi zor veya imkânsız modeller, sayısal yöntemlerle kolayca oluşturulabilir. Ancak, HAD yazılımlarında sayısal model, ele alınan problem için uygun bir şekilde oluşturulmazsa sonuçlar yanıltıcı olabilir. Bu yüzden, sayısal sonuçların deneysel verilerle doğrulanması büyük önem taşır (İkinciöğulları, 2019; Usta, 2014).



Şekil 3.1. HAD yöntemi için simülasyon aşamaları (Uzol, 2021)

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 ortalamalı hızları, u' , v' , w' ise türbülans çalkantı hızlarını ifade etmektedir. Buradan zaman ortalamalı süreklilik denklemi;

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

3.2.2. Navier Stokes Denklemi

Navier-Stokes denklemleri, sıkıştırılamaz akışkan akımının hareketini tanımlamak için kullanılan akışkanlar mekaniğinin temel bünye denklemleridir ve bu denklemler Eşitlik (3.4)'te vektörel formda gösterilmiştir.

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \text{grad } \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \text{grad } p + \vec{F} + \nu \nabla^2 \vec{V} \quad (3.4)$$

Burada ρ , akışkanın özgül kütlesi, p , basınç ve ν , kinematik viskozitedir.

3.3. Kullanılan HAD Yazılımı (OpenFOAM)

OpenFOAM; C++ diline sahip, Linux tabanlı, kullanımı ücretsiz ve açık kaynak kodlu olan bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımıdır. OpenFOAM, bünyesindeki çeşitli çözücüler sayesinde birçok mühendislik problemine uygulanabilmektedir. Özellikle açık kanal akımları için su ve havanın birlikte hesaplandığı çözücülerin kullanılması gereklidir. Bu tez çalışmasında, basamaklı dolusavak üzerindeki akım incelendiğinden sonlu hacimler yöntemine (Volume of Fluid-VOF) göre su ve hava akışını çözebilen *incompressibleVoF* çözücüsü kullanılmıştır. Sonuçların alınması ve görselleştirilmesinde ise OpenFOAM ile entegre çalışan ParaView uygulaması kullanılmıştır.

3.3.1. VOF (*Volume of Fluid*) Yöntemi

Hirt ve Nichols (1981), serbest yüzeylerin takibi için Kesirli Akışkan Hacmi (VOF) yöntemini geliştirerek, bu tekniğin karmaşık sınır geometrilerini hassas ve verimli bir şekilde modelleyebildiğini ortaya koymuştur. VOF yöntemi, bir hücredeki akışkan hacim kesrini kullanarak serbest yüzeyleri tanımlar ve daha kararlı ve doğru sonuçlar sunar.

OpenFOAM yazılımında, su-hava arakesitine sahip serbest yüzeylerin tanımlanmasında Akışkan Hacmi (VOF) yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemle, çözüm hücrelerinin tamamen boş, tamamen dolu ya da kısmen akışkanla dolu olup olmadığı belirlenir. Örneğin, hücre tamamen akışkanla doluyorsa 1, tamamen boşsa 0 ve kısmen doluyorsa

akışkanın hücrede kapladığı hacme göre 0 ile 1 arasında bir değer alır. VOF yöntemiyle serbest yüzey üç aşamada incelenir: önce yüzeyin yeri tespit edilir, ardından su ve hava arasında keskin bir arayüz tanımlanır ve son olarak bu arayüze sınır koşulları uygulanır. Ara yüzeyde sıfır kayma gerilmesi ve sabit basınç sınır şartları uygulanır (Kocaman, 2007).

3.3.2. OpenFOAM’da Bulunan Türbülans Yöntemleri

Türbülans, akışkanların düzensiz ve kararsız hareketlerini tanımlar ve viskoz kuvvetlerin yetersiz kaldığı durumlarda, özellikle yüksek Reynolds sayılarında, ortaya çıkar. Bu tür durumlarda, akımda sönümlenemeyen doğal kararsızlıklar nedeniyle çeşitli boyutlarda girdaplar oluşur. Doğal akışların çoğu türbülanslı olduğundan, türbülansın sayısal modellemede göz ardı edilmesi mümkün değildir. Kütle ve momentum korunum denklemleri kullanılarak türbülansın tüm dalgalanmalarının simülasyonu mümkün olsa da bu, ağ çözünürlüğünün yeterli olduğu durumlarda sağlanabilir. Ancak, yüksek çözünürlükte modelleme, genellikle bilgisayar bellek ve işlem süresi kısıtlamaları nedeniyle mümkün olamamaktadır. Bu yüzden, türbülansın ortalama akım üzerindeki etkilerini ifade eden daha basit modellemeler tercih edilir. OpenFOAM yazılımında genel hatlarıyla 3 farklı türbülans yöntemi bulunmaktadır. Bunlar: RAS (Reynolds Averaged Simulation), DES (Detached Eddy Simulation) ve LES (Large Eddy Simulation)’tir (*OpenFOAM Foundation, 2023*).

Reynolds-Ortalama Navier-Stokes (RANS veya RAS) denklemlerini çözmeye yönelik birçok türbülans modeli geliştirilmiştir. En yaygın modeller arasında Spalart-Allmaras, $k-\epsilon$ (k-epsilon), $k-\omega$ (k-omega) ve $k-\omega SST$ (Shear Stress Transport) bulunur. RAS modelleri, düşük hesaplama maliyetleri ve makul doğrulukları nedeniyle endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Large Eddy Simulation (LES) yöntemi ise tüm türbülans ölçeklerini modellemek yerine, büyük çevrintilerin ayrıntılı hesaplamasına odaklanan bir yaklaşımdır. LES’de, büyük girdaplar doğrudan sayısal yöntemlerle hesaplanırken, küçük ölçekli girdaplar basitleştirilmiş modellerle temsil edilir. Bu yöntem, türbülanslı akış alanlarını RAS modellerine kıyasla daha yüksek doğrulukta hesaplar. Son olarak Detached Eddy Simulation (DES) ise hibrit bir yöntem olup, duvara yakın bölgeleri RAS yaklaşımıyla, toplu akışı ise LES yaklaşımıyla ele alır (Wolf Dynamics, 2021).

Yalçın vd. (2023), DSİ TAKK (Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol) Dairesi Başkanlığı tarafından 1/40 ölçekte modellenen Antalya Gökçeler Barajı basamaklı dolusavağının deşarj suyu seviyesi, basınç, enerji sönümleme oranı ve hız profili için dört farklı türbülans modeli ($k-\varepsilon$, $k-\omega$, LES, RNG) kullanarak sayısal olarak incelemişlerdir. Araştırmacıların elde ettikleri sonuçlara göre; debi seviye eğrilerinde %2,76 bağıl hata ile en uyumlu türbülans modelinin $k-\omega$; dolusavak basınç ölçümleri (%13,36 bağıl hata), sönümlenen enerji oranları (%0,13) ve yaklaşım kanalı hızlarında (%7,80 bağıl hata) en uyumlu türbülans modelinin $k-\varepsilon$; dolusavak su yüzü profillerinde %0,15 bağıl hata ile ise en uyumlu türbülans modelinin LES (Large Eddy Simulation) olduğu ortaya konulmuştur. Yalçın vd. (2023) tarafından sunulan bu veriler doğrultusunda bu tez için OpenFOAM'da $k-\varepsilon$ çözücüsü seçilmiştir. k türbülanslı kinetik enerji ve ε enerji sönümleme oranı için iki taşıma denklemleri bir model olmakla birlikte duvar fonksiyonlarıyla oldukça sağlamdır ve modelin bilinen sınırlamalarına rağmen yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Wolf Dynamics, 2021; *OpenFOAM Foundation*, 2023).

3.4. Geometrik Modeller

Bu tez çalışmasında, basamaklı dolusavaklarda farklı tip basamak tasarımlarının enerji sönümleme performansına etkisini incelemek maksadıyla 5 farklı basamak planına sahip modeller tasarlanmıştır. Tasarlanan bu 5 modelde farklı göz sayılarında eşkenar üçgenler kullanılarak zigzag labirent modeller oluşturulmuştur. Kanal genişliği sırasıyla 4, 5, 6, 7 ve 8'e bölünmüş ve efektif kret uzunluğu bütün modellerde sabit tutulmuştur. Oluşturulan zigzag labirent basamaklı dolusavakların basamak planı Tablo 3.1'de sunulmuştur.

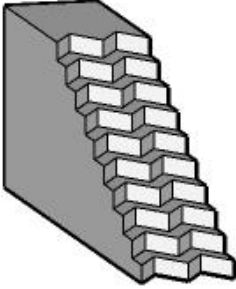
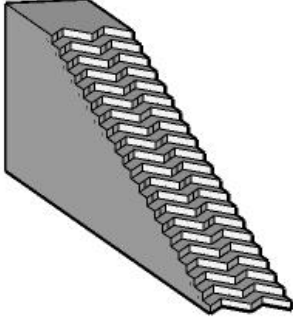
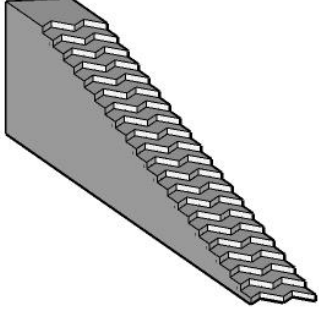
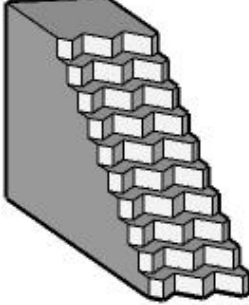
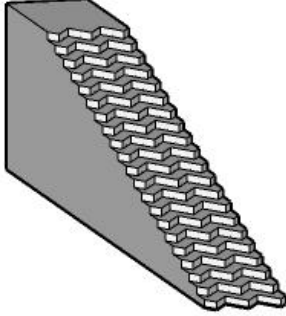
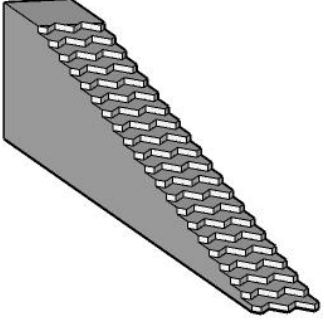
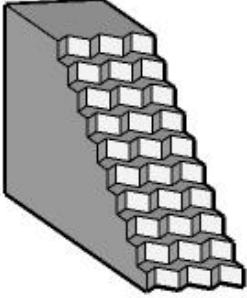
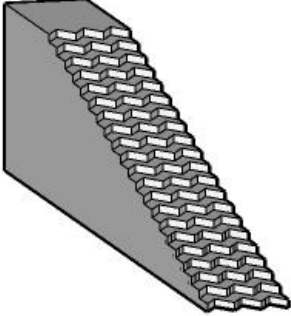
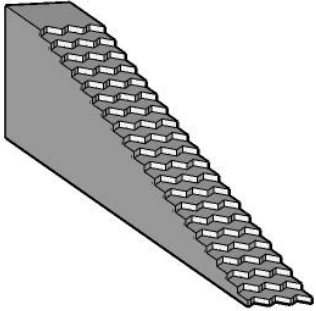
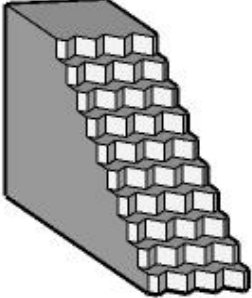
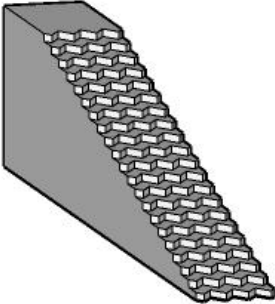
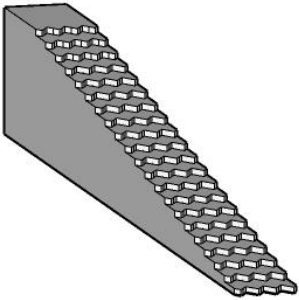
Tablo 3.1. Sayısal modellerde basamak planları ($a=13$ cm, $b=10,4$ cm, $c=8,66$ cm, $d=7,42$ cm, $e=6,5$ cm)

Model Adı	Basamak Planı
Model 1-6-11	
Model 2-7-12	
Model 3-8-13	
Model 4-9-14	
Model 5-10-15	

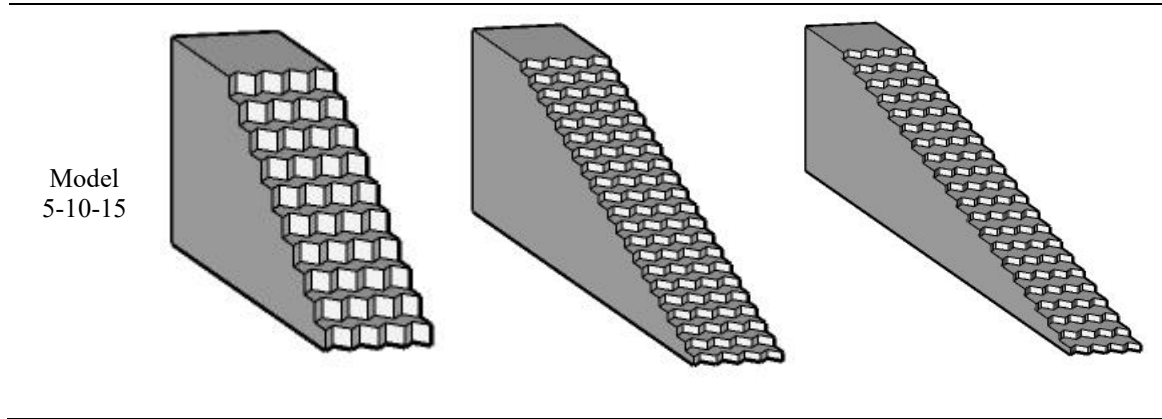
Çalışma kapsamında oluşturulan basamaklı dolusavak modellerinde $26,6^\circ$ kanal açısına sahip modeller için 10 cm basamak yüksekliği ve 20 cm basamak uzunluğu; $14,6^\circ$ kanal açısına sahip modeller için 5 cm basamak yüksekliği ve 19,2 cm basamak uzunluğu ve son olarak $8,9^\circ$ kanal açısına sahip modeller için ise 5 cm basamak yüksekliği ve 31,8 cm

basamak uzunluğu kullanılmıştır (Tablo 3.2). Tasarlanan modeller için dolusavak uzunlukları sırasıyla 2,80 m, 4,84 m ve 7,36 m'dir.

Tablo 3.2. Tasarlanan zigzag labirent basamaklı dolusavak modelleri

Model / Açı	26,6°	14,6°	8,9°
Model 1-6-11			
Model 2-7-12			
Model 3-8-13			
Model 4-9-14			

Tablo 3.2. (Devam): Tasarlanan zigzag basamaklı dolusavak modelleri

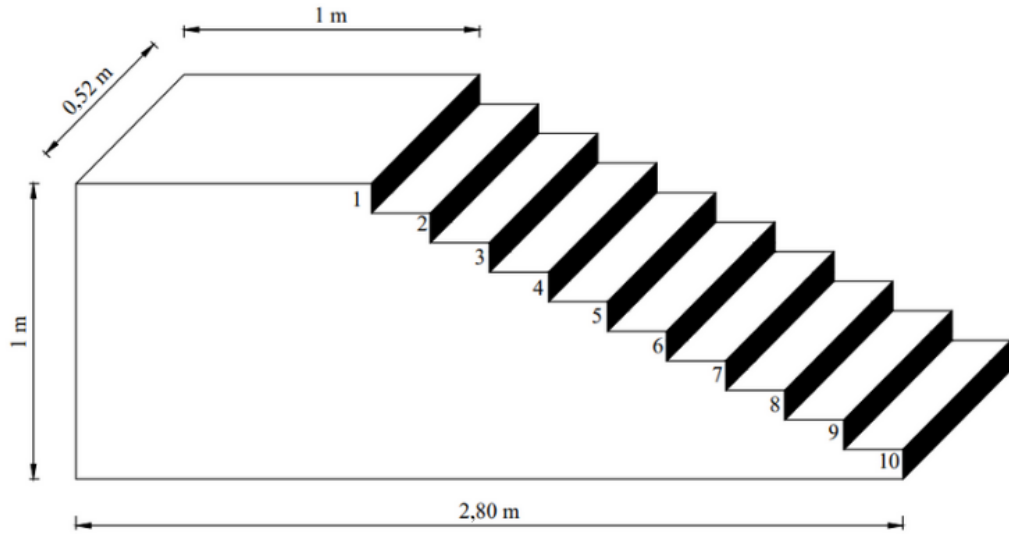


3.5. ARF Hesaplama Kümesi

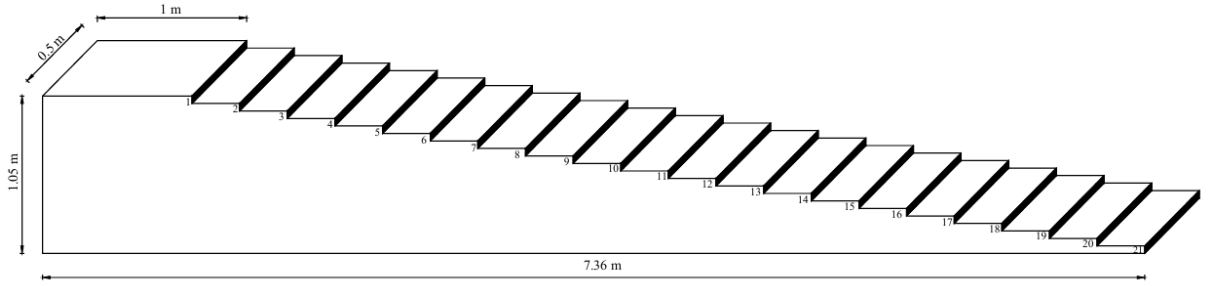
TÜBİTAK tarafından 2023 yılı sonunda MODSİMMER Veri Merkezi'nde kurulumu gerçekleştirilip ARF ismi verilerek kullanıma açılan bir hesaplama kümesidir. ARF ismiyle kullanıma açılan bu hesaplama kümesi, toplam 504 adet orfoz [1-504] isimli sunucudan oluşmaktadır. Her sunucuda 2 adet Intel(R) Xeon(R) Platinum 8480+ işlemci bulunmakta olup toplam 112 çekirdek işlem gücü ve 256 GB bellek kapasitesi sunulmaktadır (TRUBA, 2023). Yazılım uygulamaları, derleyiciler ve kütüphaneler /arf/sw/ altında organize edilmiştir. Kümenin işletim sistemi olarak Rocky Linux 9.2 tercih edilmiştir ve uygulamaların, analizlerin yürütülmesi için sisteme eklenen dosyalar ile birlikte gerekli kodların bulunduğu bir iş dosyasına ihtiyaç duymaktadır. ARF, içerisinde bulunan hazır modüller veya kullanıcının kendi dizinine yüklediği uygulamalar aracılığıyla bilimsel çalışmaların yürütülmesine olanak sağlamaktadır. Bu tezdeki sayısal modellerin analizleri ARF hesaplama kümesi ile yapılmıştır.

4. SAYISAL MODEL

Çalışma kapsamında, doğrulama için iki farklı sayısal model kullanılmıştır. İlk aşamada, Felder vd. (2012) tarafından yürütülen deneysel çalışmadaki $26,6^\circ$ açığa sahip klasik basamaklı dolusavak modeli doğrulanmıştır (Şekil 4.1). Bu model toplam 10 basamaktan oluşmakta ve her bir basamağın uzunluğu 20 cm ve yüksekliği 10 cm'dir. İkinci aşamada, basamaklı dolusavaklarda kanal açısının enerji sönümleme performansına etkisini görebilmek için, Felder ve Chanson (2014b) tarafından yürütülen $8,9^\circ$ açılı klasik basamaklı dolusavak modeli doğrulanmıştır. Bu modelde ise basamak yüksekliği 5 cm, uzunluğu 31,8 cm'dir (Felder ve Chanson, 2013) ve 21 basamaktan oluşmaktadır (Şekil 4.2).

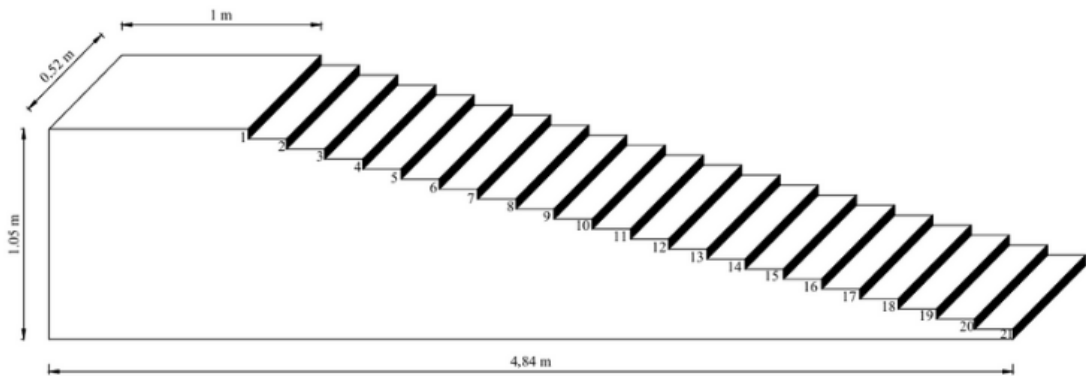


Şekil 4.1. Felder vd. (2012)'in deneysel çalışmalarında kullanmış oldukları $26,6^\circ$ açığa sahip klasik basamaklı dolusavak modeli



Şekil 4.2. Felder ve Chanson (2014b)'nın deneysel çalışmalarında kullanmış oldukları 8,9° açısıya sahip klasik basamaklı dolusavak modeli

Son aşamada ise yukarıda özellikleri verilen iki farklı kanal açısına ek olarak literatürde mevcut olan Thorwarth (2009)'ın 14,6° açısıya sahip klasik basamaklı dolusavak modeli ilham alınarak Şekil 4.3'teki model tasarlanmıştır. Bu modelde ise 5 cm yüksekliğe ve 19,2 cm uzunluğa sahip basamaklar kullanılmıştır. Bu çalışmaya ait deneysel sonuçlara ulaşamadığından yukarıdaki iki farklı model için elde edilen doğrulanmış çözüm ağı kullanılarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Bahse konu modellerin çözüm ağını oluşturmak için “*snappyHexMesh*” yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemle 3D modeller yazılım tarafından okunarak kolay bir şekilde oluşturulmaktadır. Her bir model oluşturulurken aynı parametrik özellikler kullanılmıştır. Böylece elde edilen sonuçların karşılaştırılmasında daha güvenilir sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçların doğruluğu ilerleyen bölümlerde daha detaylı olarak incelenmiştir.

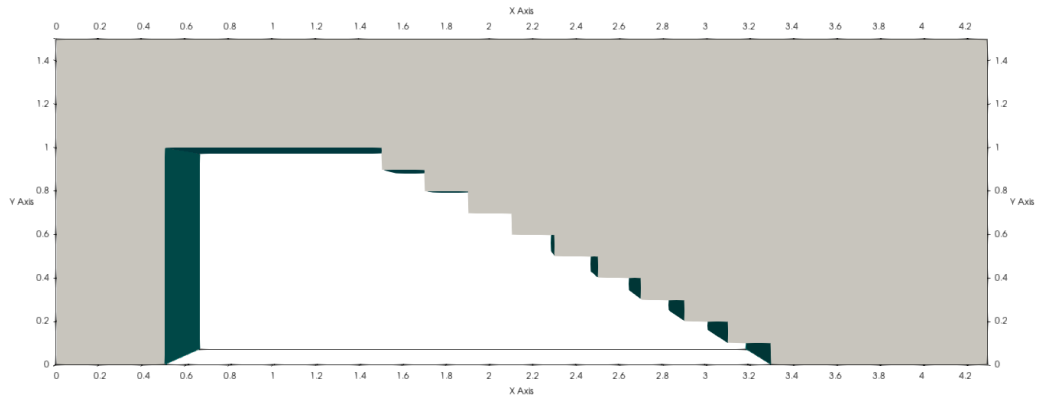


Şekil 4.3. Thorwarth (2009)'ın deneysel çalışmasında kullanmış olduğu 14,6° açısıya sahip klasik basamaklı dolusavak modeli

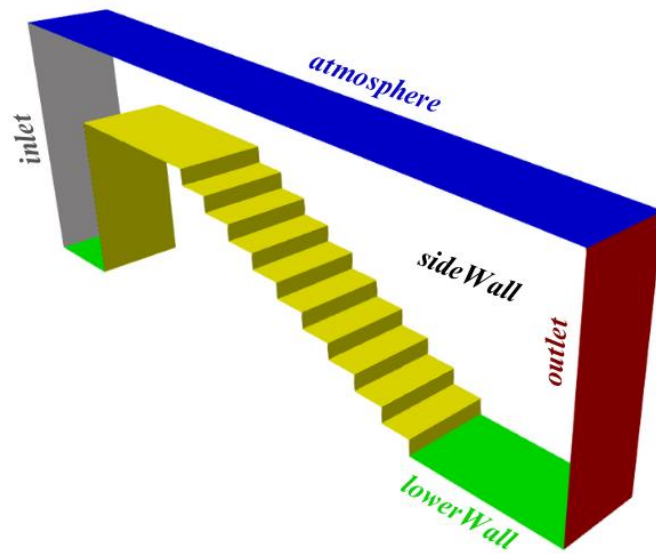
4.1. Çözüm Ağı ve Sınır Şartları

4.1.1. 26,6°'lik Kanal İçin Doğrulama Sonuçları

Sayısal modelde kanal 4,3 m uzunluğunda, 1,5 m yüksekliğinde ve 0,52 m genişliğinde olup dolusavak, koordinat sistemine göre kanalın 0,50 m ilerisine yerleştirilmiştir (Şekil 4.4). Model sınır koşulları için giriş, *inlet*; çıkış, *outlet*; kanal tavanı, *atmosphere*; kanal tabanı, *lowerWall* ve kanal yan duvarları, *sideWall* olarak adlandırılmıştır (Şekil 4.5).

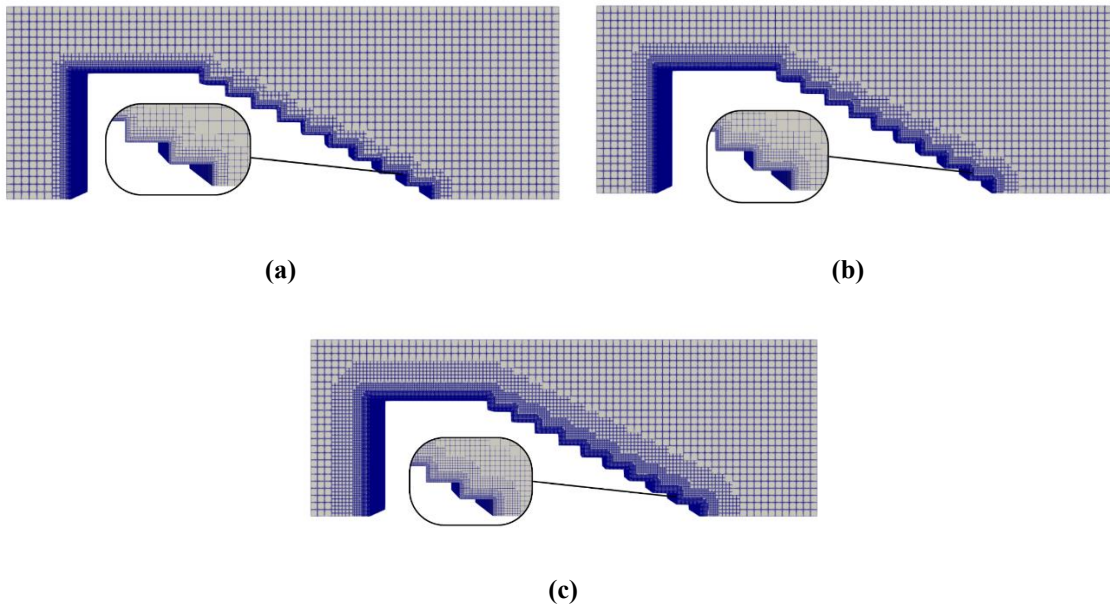


Şekil 4.4. Kanal geometrisi



Şekil 4.5. Sınır koşulları

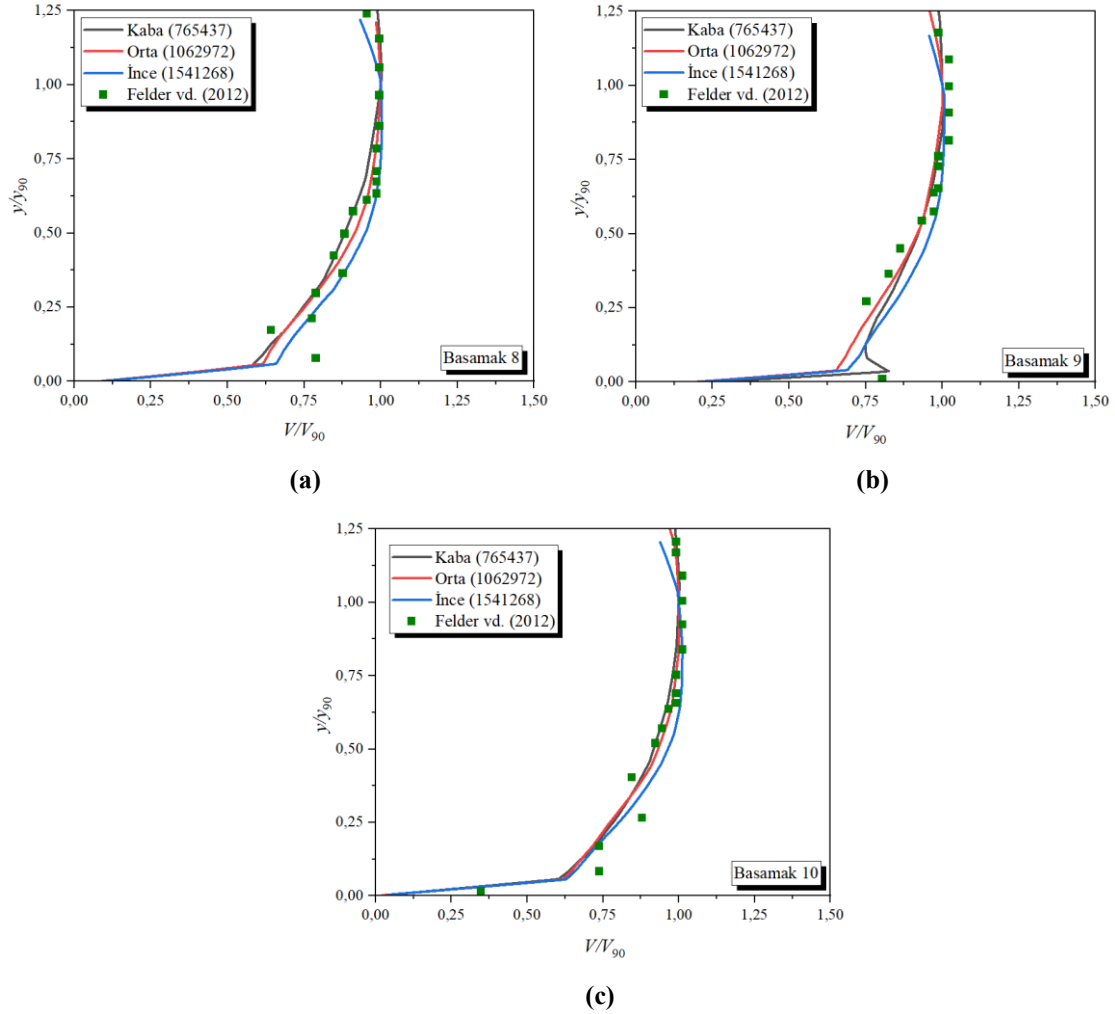
Sayısal doğrulama için kaba, orta ve ince olmak üzere üç farklı bir çözüm ağı oluşturulmuştur. Doğrulamanın ilk aşamasında 6 cm'lik boyuta sahip hücreler kullanılmıştır. Çözüm ağı sisteminde “.stl” uzantılı geometrinin OpenFOAM yazılımına aktarılabilirdiği “*snappyHexMesh*” yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde kaba gridlerle oluşturulan bir arka plan çözüm ağının içerisine gerektiği kadar sıkılaştırmalar yapılarak “.stl” uzantılı geometriler eklenebilmektedir. “*snappyHexMesh*”, “*blockMesh*” dosyasında oluşturulan çözüm ağı boyutlarını kendi içerisindeki 3D modelleri yakalama parametreleri ile birlikte “.stl” dosyaları üzerinde inceltme, detaylandırma, sıkılaştırma yapabilmektedir. Öncelikle “*blockMesh*” komutu ile arka plan çözüm ağı oluşturulduktan sonra Felder vd. (2012) çalışmasında kullanılan klasik basamaklı dolusavak modelinin “.stl” uzantılı dosyası OpenFOAM yazılımına eklenmiştir. Bu modelin hücre sayıları kaba mesh sistemi için 765437, orta mesh sistemi için 1062972 ve ince mesh sistemi için ise 1541268'dir (Şekil 4.6). Hücre sayılarının artış oranı belirlenirken Çelik vd. (2008) tarafından önerilen minimum 1,30'luk artış oranı dikkate alınmıştır.



Şekil 4.6. Çözüm ağları ve basamak detayları: a) kaba; b) orta; c) ince

Doğrulamada $0,113 \text{ m}^3/\text{s}$ ' lik debi için 8, 9 ve 10. basamaklardaki boyutsuz hız (V/V_{90}) ve boyutsuz su yüksekliği (y/y_{90}) parametreleri kullanılmıştır. Burada, y , basamak üzerindeki ölçüm yüksekliği; y_{90} , %90 hava konsantrasyonuna sahip hücrenin yüksekliği; V , akım hızı ve V_{90} ise %90 hava konsantrasyonuna sahip hücrenin karakteristik akım hızıdır (Şekil 4.7).

Elde edilen grafikler incelendiğinde, her bir basamak için elde edilen hız grafiklerinin her üç çözüm ağı için de oldukça uyumlu olduğu gözlenmiştir. Bu durum oluşturulan çözüm ağı sisteminin yeterli olduğunu kanıtlamaktadır.



Şekil 4.7. Boyutsuz akım hızının boyutsuz akım derinliğine göre değişimi: a) Basamak 8; b) Basamak 9; c) Basamak 10

Sayısal sonuçların deneysel sonuçlarla karşılaştırılması neticesinde, $y/y_{90} = 0,65$ için V/V_{90} değerinde oluşan hata yüzdeleri Tablo 4.1’de sunulmuştur. Kaba çözüm ağı kullanılarak elde edilen sonuçlarda hata oranı maksimum %4,75 iken orta ve ince boyutlu çözüm ağı sisteminde hata oranları sırasıyla %2,35 ve %0,85 olarak hesaplanmıştır. Sayısal çalışmalarda genellikle %5 hata oranının kabul edilebilir olduğu göz önüne (Eça ve Hoekstra, 2014) alındığında kaba çözüm ağının bile deney sonuçları ile yeterince uyumlu olduğu kanaatine varılmıştır. Ancak güvenli tarafta kalmak açısından orta çözüm ağının kullanılması uygun görülmüştür.

Tablo 4.1. $y/y_0 = 0,65$ için V/V_{90} değerinde oluşan hata yüzdeleri

Basamak No	% Kaba	% Orta	% İnce
8	4,75	2,35	0,24
9	2,33	2,24	0,74
10	3,01	1,39	0,85

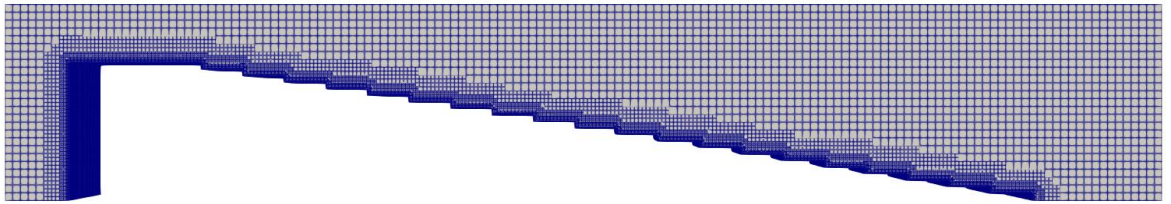
Orta çözüm ağı ile oluşturulan sayısal klasik basamaklı dolusavak modelinin deneysel sonuçlarla (Felder vd., 2012) kıyaslanması neticesinde enerji sönümleme oranlarının maksimum %1,65 bir hata oranı ile uyumlu olduğu ve hata oranlarının oldukça düşük olduğu gözlemlenmiştir (Tablo 4.2).

Tablo 4.2. Felder vd. (2012) $26,6^\circ$ açılı klasik basamaklı dolusavak modelinin sayısal model ile karşılaştırılması sonucu oluşan enerji sönümleme performansı ve hata oranları

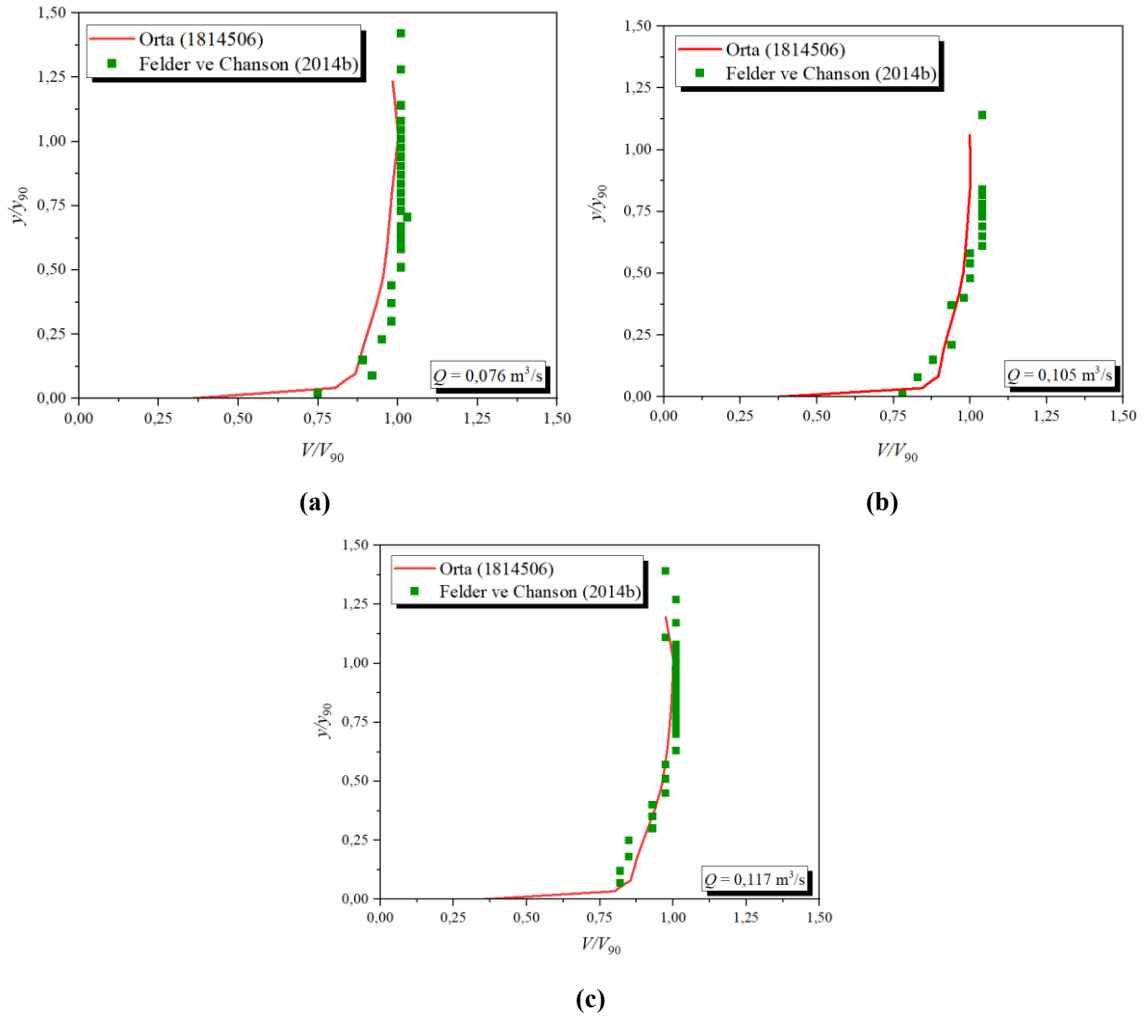
Q (m ³ /s)	q (m ³ /s.m)	y_c (m)	E_0	E_1	$E_L(E_0-E_1)$	E_L/E_0	E_L/E_0 (Felder vd., 2012)	Hata Oranı (%)
0,049	0,094	0,097	1,145	0,307	0,839	0,732	0,733	0,035
0,063	0,121	0,114	1,172	0,351	0,820	0,700	0,695	0,766
0,075	0,144	0,128	1,193	0,391	0,802	0,672	0,671	0,227
0,090	0,173	0,145	1,218	0,437	0,781	0,641	0,635	1,002
0,097	0,187	0,153	1,229	0,458	0,771	0,627	0,617	1,649
0,113	0,217	0,169	1,253	0,516	0,736	0,588	0,586	0,360

4.1.2. $8,9^\circ$ 'lik Kanal İçin Doğrulama Sonuçları

Doğrulamanın ikinci aşamasında ise $26,6^\circ$ kanal için kullanılan orta çözüm ağı boyutlarının, sınır şartlarının ve “*snappyHexMesh*” parametrelerinin doğruluğunu kanıtlamak için yalnızca kanal açısı azaltılmıştır. Felder ve Chanson (2014b) tarafından yürütülen $8,9^\circ$ açılıya sahip klasik basamaklı dolusavak modeli; farklı kanal uzunluğuna, genişliğine ve basamak yapısına sahip olmasına rağmen yukarıda bahsedilen orta çözüm ağı kullanılarak tasarlanmıştır (Şekil 4.8).

Şekil 4.8. $8,9^\circ$ kanal açısına sahip klasik basamaklı dolusavak modeli

Kanal açısının azaltılması ile elde edilen 21 basamaklı model için üç farklı debi ($0,076 \text{ m}^3/\text{s}$, $0,105 \text{ m}^3/\text{s}$ ve $0,117 \text{ m}^3/\text{s}$) kullanılarak son basamak üzerindeki boyutsuz hız (V/V_{90}) ve boyutsuz su yüksekliği (y/y_{90}) parametreleri deneysel sonuçlarla (Felder ve Chanson, 2014b) karşılaştırılmıştır. (Şekil 4.9). Sonuçlar incelendiğinde, oluşturulan sayısal model sonuçlarının deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu gözlenmiştir ve bu tez kapsamında orta çözüm ağı sisteminin farklı dolusavak sistemlerinde sayısal analizlerin yürütülmesi için gerekli yeterliliğe sahip olduğuna kanaat getirilmiştir.



Şekil 4.9. $8,9^\circ$ kanal açısına sahip Felder ve Chanson (2014b)'ın klasik basamaklı dolusavak modelinin 21. basamaktaki doğrulama sonuçları: a) $0,076 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik debi için; b) $0,105 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik debi için c) $0,113 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik debi için

Üç farklı debi için elde edilen enerji sönümle performansları sayısal ve deneysel sonuçlar için Tablo 4.3'te gösterilmiş olup hata oranlarının kabul edilebilir bir değerde olduğu görülmektedir. Tablo 4.3'te düşük debide hata oranının yüksek çıkmasının sebebinin $k-\varepsilon$ gibi klasik türbülans modellerinin, çok fazlı ve serbest yüzeyli karmaşık akışlarda yeterince

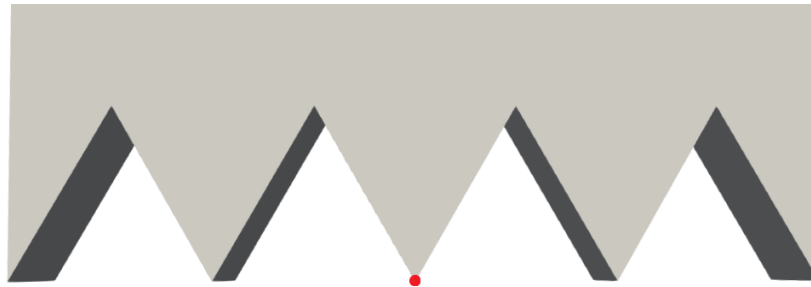
detaylı fiziksel süreçleri yakalamada yetersiz kalabilmesi; özellikle düşük debilerde serbest yüzey hareketleri ve hava girdaplarının model performansını olumsuz etkilemesi olduğu düşünülmektedir (Rodi, 1993). İki farklı kanal açısı üzerinden ortaya konulan sonuçlar, seçilen orta çözüm ağının farklı dolusavak modelleri ve kanal sistemleri için deneysel sonuçlarla uyumlu olduğunu göstermektedir.

Tablo 4.3. Felder ve Chanson (2014b)'nın 8,9° açılı klasik basamaklı dolusavak modelinin sayısal model ile karşılaştırılması sonucu oluşan enerji sönümleme performansı ve hata oranları

Q (m ³ /s)	q (m ³ /s.m)	y_c (m)	E_0	E_1	$E_L(E_0-E_1)$	E_L/E_0	E_L/E_0 (Felder ve Chanson, 2014b)	Hata Oranı (%)
0,076	0,152	0,133	1,250	0,410	0,840	0,672	0,640	5,030
0,105	0,210	0,165	1,298	0,525	0,773	0,595	0,580	2,671
0,117	0,234	0,177	1,316	0,586	0,730	0,555	0,540	2,750

4.2. Mesh Hassasiyeti ve Analiz Süresi

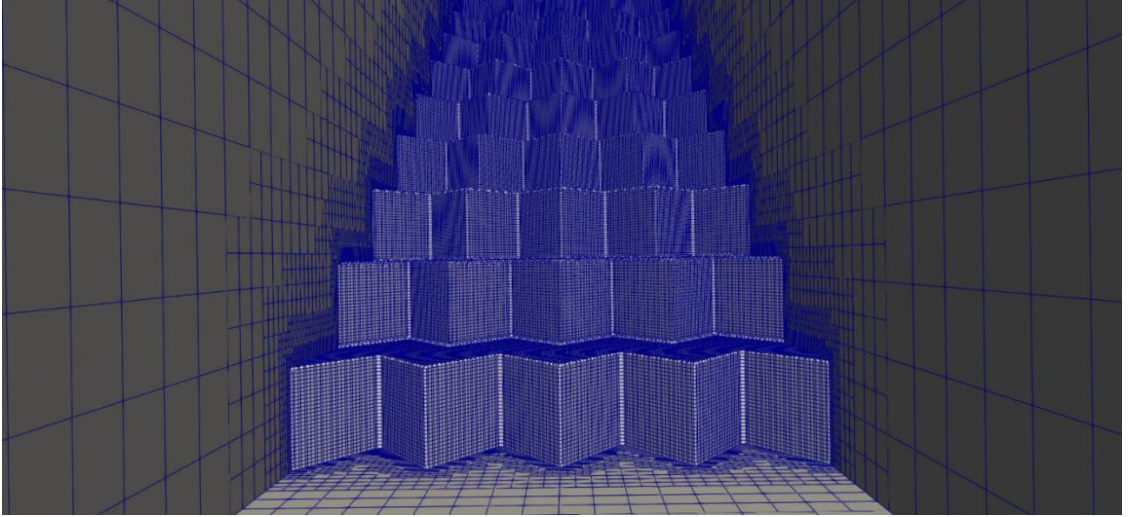
Sayısal çalışmalarda sadece deneysel doğrulama yapmak karmaşık geometriler için doğru sonuçlar verecek anlamına gelmeyebilir. Dolayısı ile oluşturulan çözüm ağının tasarlanan yeni karmaşık modeller üzerinde etkili olup olmadığını görebilmek için hücre sayısı artırılarak sonuçlar üzerindeki değişim incelenmelidir. Bu bölümde ise üç farklı açıda tasarlanan basamak geometrisinde pürüzlülüğü yüksek modellerin son basamaklarının orta noktasındaki hızın derinlikle değişimi dikkate alınmıştır (Şekil 4.10). Mesh hassasiyeti analizleri maksimum debi için dikkate alınmıştır.



Şekil 4.10. Mesh hassasiyetleri için son basamaktaki ölçüm noktası

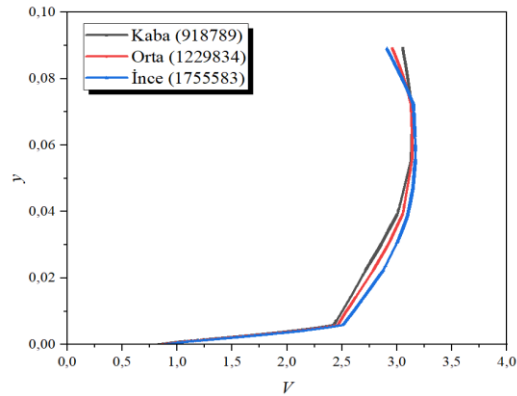
4.2.1. 26,6°'lik Kanal için Mesh Hassasiyeti

26,6° açığa sahip olan modeller arasında mesh hassasiyeti, basamak geometrisi bakımından 8 eşkenar üçgene denk alanıyla pürüzlülüğü en yüksek model olan Model 5 için maksimum debide yürütülmüştür. Oluşturulan bu çözüm ağı Şekil 4.11'deki gibidir.

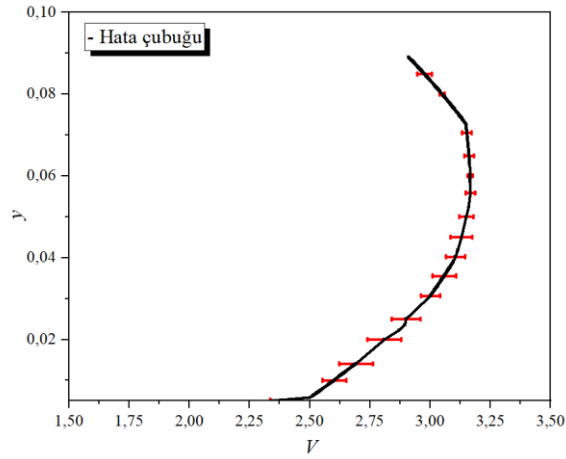


Şekil 4.11. 26,6° kanal açısına sahip Model 5 için orta çözüm ağı

Model 5 için mesh hassasiyetini orta koymak amacıyla oluşturulan $V - y$ grafiği (Şekil 4.12), üç çözüm ağı için de aslında değişimin fazla olmadığını göstermektedir. Orta ve ince çözüm ağları arasındaki hata çubuğu grafiği ise hem zaman hem de maliyet açısından orta çözüm ağının yeterli olduğunu göz önüne sermiştir (Şekil 4.13).



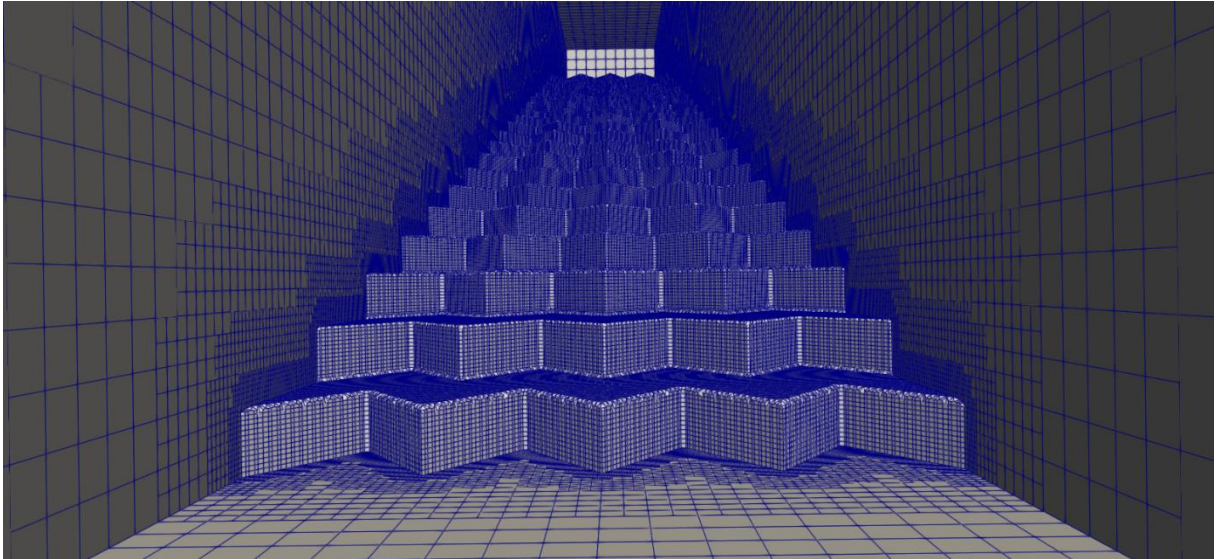
Şekil 4.12. 26,6° kanal açısına sahip Model 5'te mesh hassasiyeti için $V - y$ grafiği



Şekil 4.13. 26,6° kanal açısına sahip Model 5 için orta ve ince mesh sistemleri arasında oluşan hata çubuğu grafiği

4.2.2. 14,6°'lik Kanal için Mesh Hassasiyeti

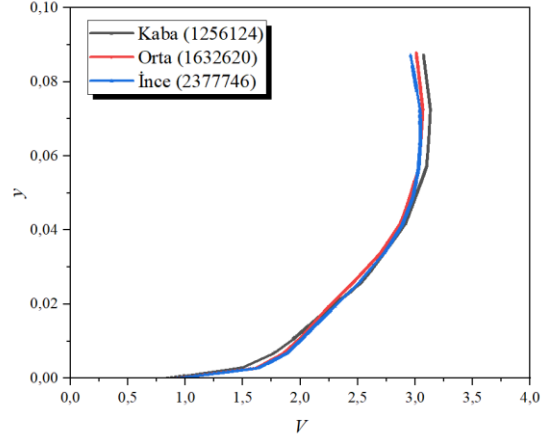
14,6° kanal açısına sahip olan modeller arasında mesh hassasiyeti, yine en yüksek pürüzlülük oranına sahip Model 10 için maksimum debide yürütülmüştür. Oluşturulan bu çözüm ağı Şekil 4.14'teki gibidir.



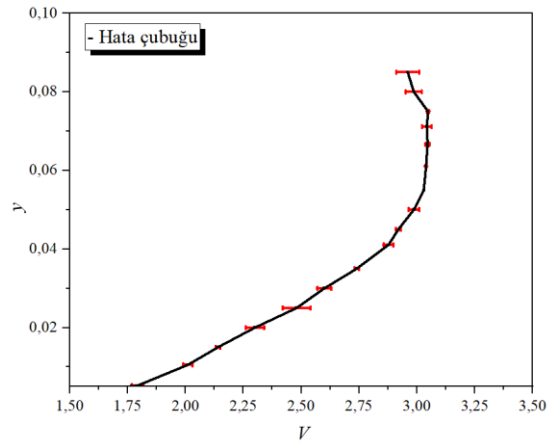
Şekil 4.14. 14,6° kanal açısına sahip Model 10 için orta çözüm ağı

Model 10 için mesh hassasiyetini ortaya koymak amacıyla oluşturulan $V - y$ grafiği (Şekil 4.15), orta ve ince çözüm ağı için değişimin fazla olmadığını göstermektedir. Orta ve ince

çözüm ağları arasındaki hata çubuğu grafiği yine hem zaman hem de maliyet açısından orta çözüm ağının yeterli olduğunu göz önüne sermiştir (Şekil 4.16).



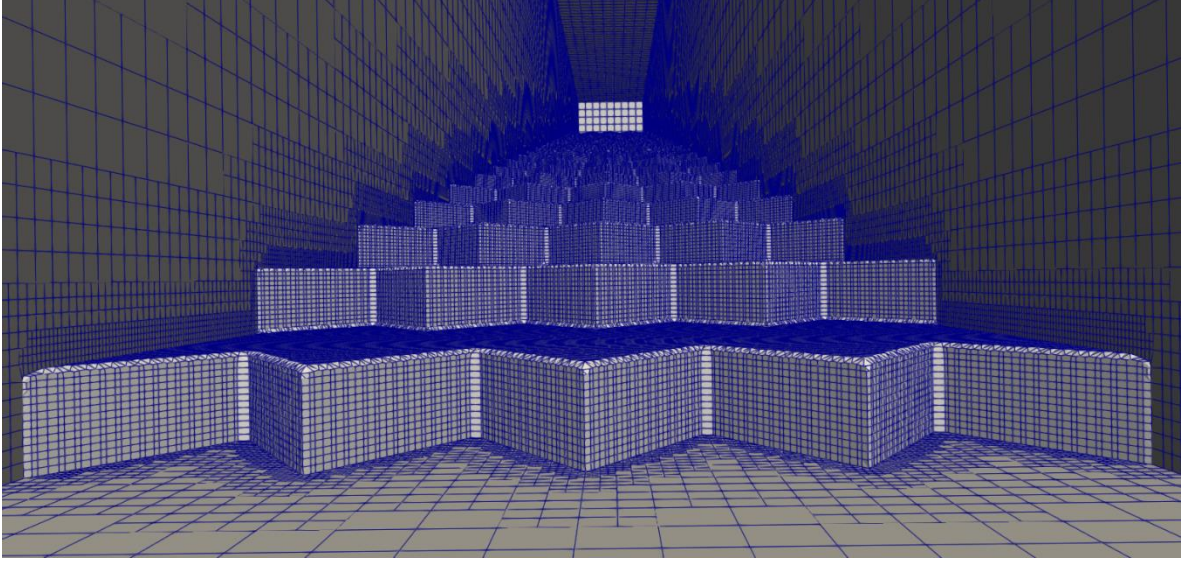
Şekil 4.15. 14,6° kanal açısına sahip Model 10'da mesh hassasiyeti için $V-y$ grafiği



Şekil 4.16. 14,6° kanal açısına sahip Model 10 için orta ve ince mesh sistemleri arasında oluşan hata çubuğu grafiği

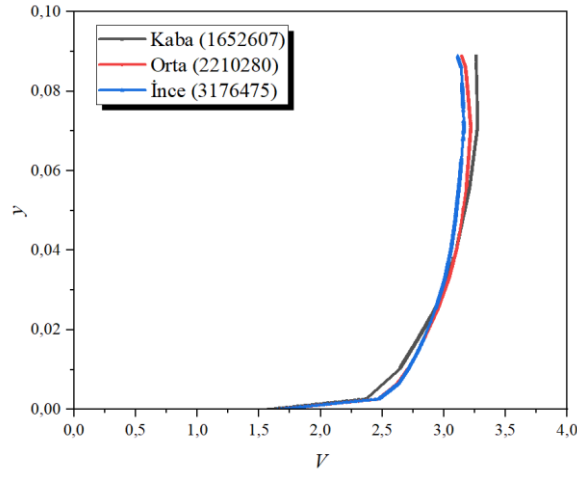
4.2.3. 8,9°'lik Kanal için Mesh Hassasiyeti

Diğer iki mesh hassasiyeti analizlerinde olduğu gibi 8,9° açısına sahip olan modeller arasında mesh hassasiyeti yine en karmaşık basamak geometrisine sahip olan Model 15 için orta çözüm ağı kullanılarak maksimum debide yürütülmüştür. Oluşturulan bu çözüm ağı Şekil 4.17'deki gibidir.

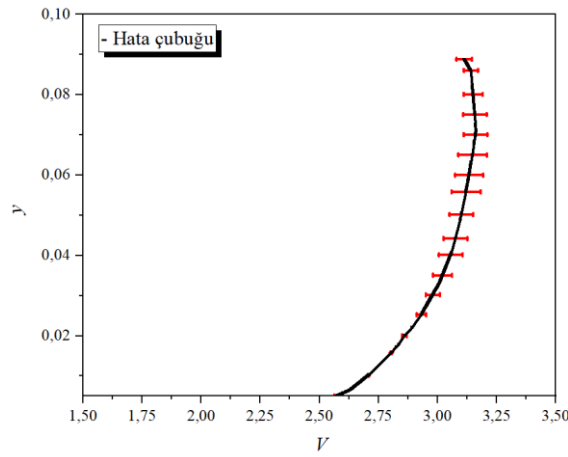


Şekil 4.17. 8,9° kanal açısına sahip Model 15 için orta çözüm ağı

Model 10 için mesh hassasiyetini orta koymak amacıyla oluşturulan $V - y$ grafiği Şekil 3.18’de gösterilmiştir. Grafiğe göre hücre sayısının artması basamaklara yakın bölgede çok etkili olmazken akım yüzeyine yaklaştıkça kaba ve ince çözüm ağı ile elde edilen sonuçlarda fark açılırken ince ve orta çözüm ağı ile elde edilen sonuçların birbirine daha uyumlu olduğu görülmektedir. Orta ve ince çözüm ağları arasındaki hata çubuğu grafiği diğer iki açıya sahip modellerde olduğu gibi Model 15’te de hem zaman hem de maliyet açısından orta çözüm ağının yeterli olduğunu göz önüne sermiştir (Şekil 4.19). Üç kanal açısı için de ortaya konulan hata çubuğu grafiklerinde elde edilen maksimum hata oranı %2,49’dur ve bu hata oranı sayısal analizler için kabul edilebilir düzeydedir (Şekil 4.13, Şekil 4.16, Şekil 4.19).



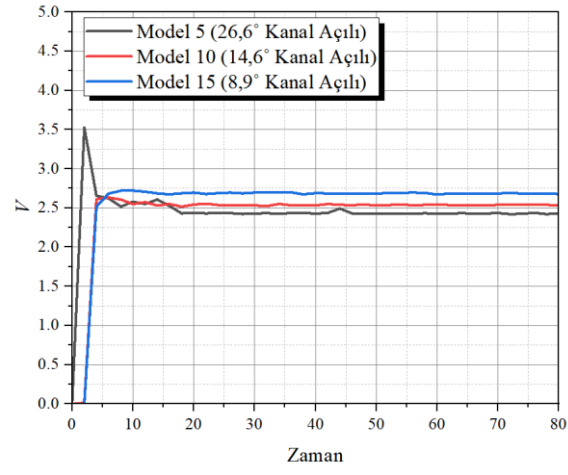
Şekil 4.18. 8,9° kanal açısına sahip Model 15'te mesh hassasiyeti için $V-y$ grafiği



Şekil 4.19. 8,9° kanal açısına sahip Model 15 için orta ve ince mesh sistemleri arasında oluşan hata çubuğu grafiği

4.2.4. Analiz Süresi

Analiz süresinin belirlenmesi için farklı kanal açısına sahip üç farklı modelin (Model 5, Model 10 ve Model 15) son basamak ucundaki akım hızının zamana göre değişimi dikkate alınmıştır (Şekil 4.20). 80 saniye boyunca sürdürülen analizlerde, hızın zamana bağlı değişimi incelendiğinde bütün modeller için 40 saniyelik analiz süresinin yeterli olduğu kanaatine varılmıştır çünkü zamana bağlı hız değişiminde seçilen zaman adımı ile son zaman adımı arasında, türbülanslı akımdan kaynaklı dalgalanmalar olmasına rağmen değişim oldukça azdır, %1'den az bir fark vardır.



Şekil 4.20. Analiz süresinin belirlenmesinde dikkate alınan hızın zamana bağlı değişimi

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Basamaklı Dolusavaklarda Farklı Tip Basamak Tasarımlarının Enerji Sönümlleme Oranlarına Etkisi

Çalışmada kullanılan üç farklı açığa ve beş farklı basamak tipine sahip modellerin akım rejimleri ve parametreleri Tablo 5.1’de verilmiştir. Tabloda h = basamak yüksekliği, l = basamak uzunluğu, ve θ kanal açısını göstermektedir. Basamaklı dolusavaklarda enerji sönümlleme performanslarının kıyaslanmasında y_c/h değeri önem arz etmektedir. Literatürdeki çalışmalara bakıldığında araştırmacılar bu boyutsuz parametre üzerinden değerlendirmelerde bulunmuşlardır (Felder vd., 2012; Felder ve Chanson, 2014b; Ghaderi vd., 2020; İkinciogulları, 2024). Tablo 5.1 de verilen akım rejimleri, Boes ve Hager (2003)’in tarafından sunulan eşitlik (1.3) ile belirlenmiştir.

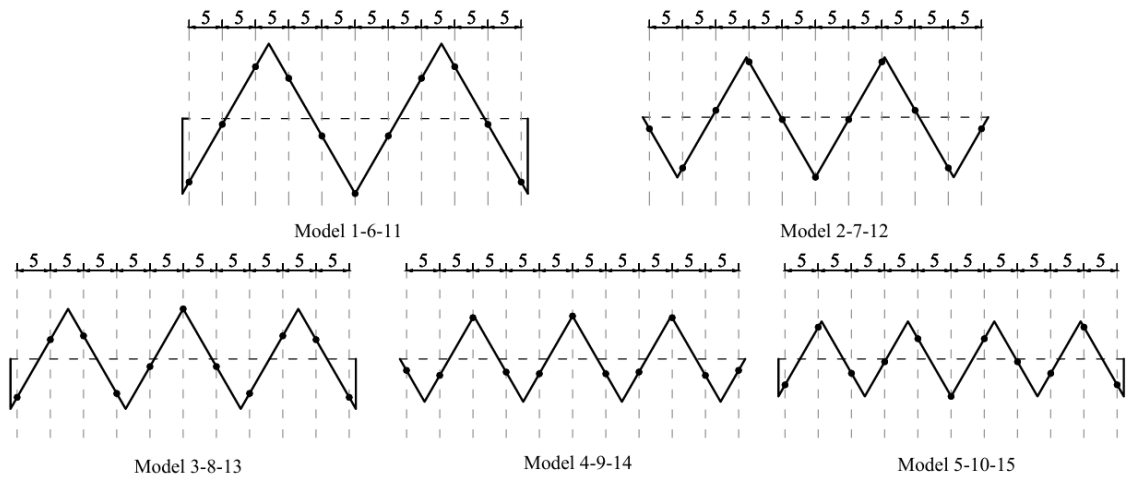
Tablo 5.1 Akım rejimi parametreleri

Q (m ³ /s)	q (m ³ /s.m)	y_c (m)	h (m)	l (m)	h/l (-)	θ (-)	y_c/h (-)	Akım Rejimi
0,049	0,094	0,097	0,10	0,200	0,50	26,6°	0,967	Siçramalı
0,049	0,094	0,097	0,05	0,192	0,26	14,6°	1,934	Siçramalı
0,049	0,094	0,097	0,05	0,318	0,15	8,9°	1,934	Siçramalı
0,063	0,121	0,114	0,10	0,200	0,50	26,6°	1,144	Siçramalı
0,063	0,121	0,114	0,05	0,192	0,26	14,6°	2,287	Siçramalı
0,063	0,121	0,114	0,05	0,318	0,15	8,9°	2,287	Siçramalı
0,075	0,144	0,128	0,10	0,200	0,50	26,6°	1,285	Siçramalı
0,075	0,144	0,128	0,05	0,192	0,26	14,6°	2,567	Siçramalı
0,075	0,144	0,128	0,05	0,318	0,15	8,9°	2,567	Siçramalı
0,090	0,173	0,145	0,10	0,200	0,50	26,6°	1,451	Siçramalı
0,090	0,173	0,145	0,05	0,192	0,26	14,6°	2,902	Siçramalı
0,090	0,173	0,145	0,05	0,318	0,15	8,9°	2,902	Siçramalı
0,097	0,187	0,153	0,10	0,200	0,50	26,6°	1,525	Siçramalı
0,097	0,187	0,153	0,05	0,192	0,26	14,6°	3,050	Siçramalı
0,097	0,187	0,153	0,05	0,318	0,15	8,9°	3,050	Siçramalı
0,113	0,217	0,169	0,10	0,200	0,50	26,6°	1,689	Siçramalı
0,113	0,217	0,169	0,05	0,192	0,26	14,6°	3,377	Siçramalı
0,113	0,217	0,169	0,05	0,318	0,15	8,9°	3,377	Siçramalı

Enerji sönümle performansları karşılaştırırken iki farklı grafik dikkate alınmıştır. Bunlardan ilki boyutsuz enerji sönümleme oranı (E_L/E_0) ile $\Delta z/y_c$ (Δz : Kret yüksekliği ile son basamak yüksekliği arasındaki fark, y_c : kritik akım derinliği) arasındaki değişimi gösteren grafiklerdir. Bu grafiklerde, $\Delta z/y_c$, kret yüksekliği ile son basamak yüksekliği

arasındaki düşey farkın kritik akım derinliğine oranını ifade etmektedir. İkincisi ise enerji sönümleme yüzdesinin y_c/h değeri ile değişimini gösteren grafiklerdir.

Basamak üzerindeki akım derinliği, Felder vd. (2012)'nin sunduğu yöntemle ölçülmüştür (Şekil 1.8) ve E_1 bu yöntemle hesaplanmıştır ancak önerilen basamaklı dolusavak modellerinde en kesit boyunca sabit bir geometri olmadığından enerji sönümleme performansı hesabında İkinciogulları (2024) tarafından sunulan yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemde enerji sönümleme oranları, duvar yaklaşma bölgelerinde 1'er cm ve ara bölümde 5'er cm olmak üzere toplam 11 noktadan ölçülmüştür (Şekil 5.1). İkinciogulları (2024), 5 cm'den küçük aralıkları da denemiş olmasına rağmen sonuca çok fazla etki etmediğini, ölçüm noktalarının ortalamasının kullanılmasının sonuç güvenilirliğini artırdığını ortaya koymuştur.

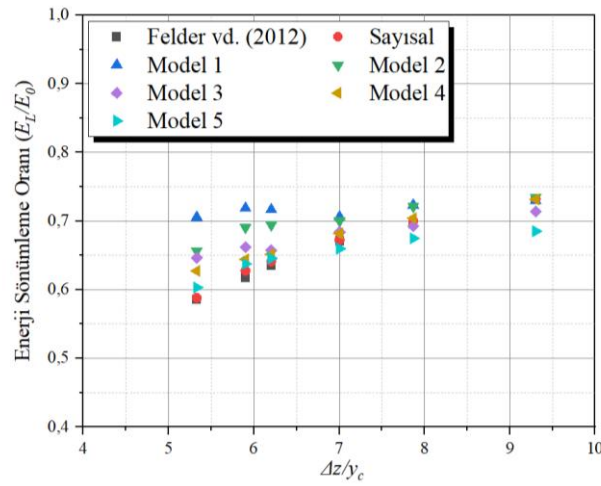


Şekil 5.1. İkinciogulları (2024)'nın yöntemine göre tasarlanan modellerdeki ölçüm noktaları

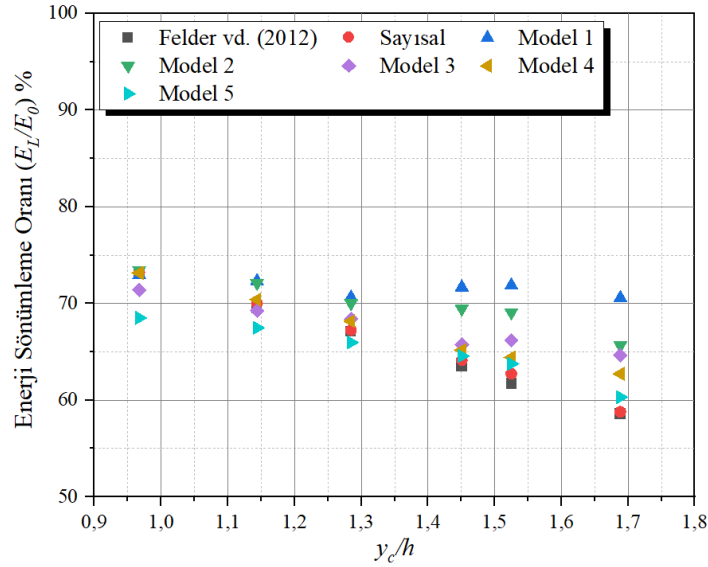
5.1.1. Kanal Açısı 26,6° Olan Basamaklı Dolusavaklarda Sayısal Modellerin Enerji Sönümleme Performansları

Kanal açısı 26,6° olan modellerin enerji sönümleme performansları Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'te ortaya konulmuştur. Çizilen bu grafiklerde klasik basamaklı dolusavaklarda HAD yöntemiyle yapılan sayısal analizin ve deneysel sonuçların uyumu gözükmemektedir. Tasarlanan modeller genel olarak Felder vd. (2012) klasik basamaklı dolusavak modeline göre enerji sönümleme oranı bakımından daha iyi bir performans sergilemiştir. Özellikle yüksek debilerde (0,090 m³/s, 0,097 m³/s, 0,113 m³/s) tüm modeller klasik basamaklı

dolusavağa göre daha iyi bir enerji sönümleme performansı göstermiştir. Düşük debilerde göz sayısının artmasının enerji sönümleme performansını düşürdüğü görülmektedir. Bu grafiklerde Model 1, %72'yi aşan enerji sönümleme oranı ile en iyi performansı göstermiş olup debi arttıkça da bu performansını korumuştur. Maksimum debide sayısal modellerde en düşük enerji sönümleme yüzdesi %60,3 ile Model 5'e aittir. Bu grafikler üzerinden zigzag labirent basamak tiplerinde göz sayısının artmasının enerji sönümleme oranını düşürdüğü kanaatine varılmıştır. Çünkü göz sayısı arttıkça labirentlerin basamak ekseninden olan uzunluğu azalmaktadır. Böylece akım çizgileri de klasik basamaklı dolusavağa benzemektedir. Debi azaldıkça ve göz sayısı arttıkça enerji sönümleme performansının klasik basamaklı dolusavaktan daha düşük seviyelere gerilediği görülmektedir.

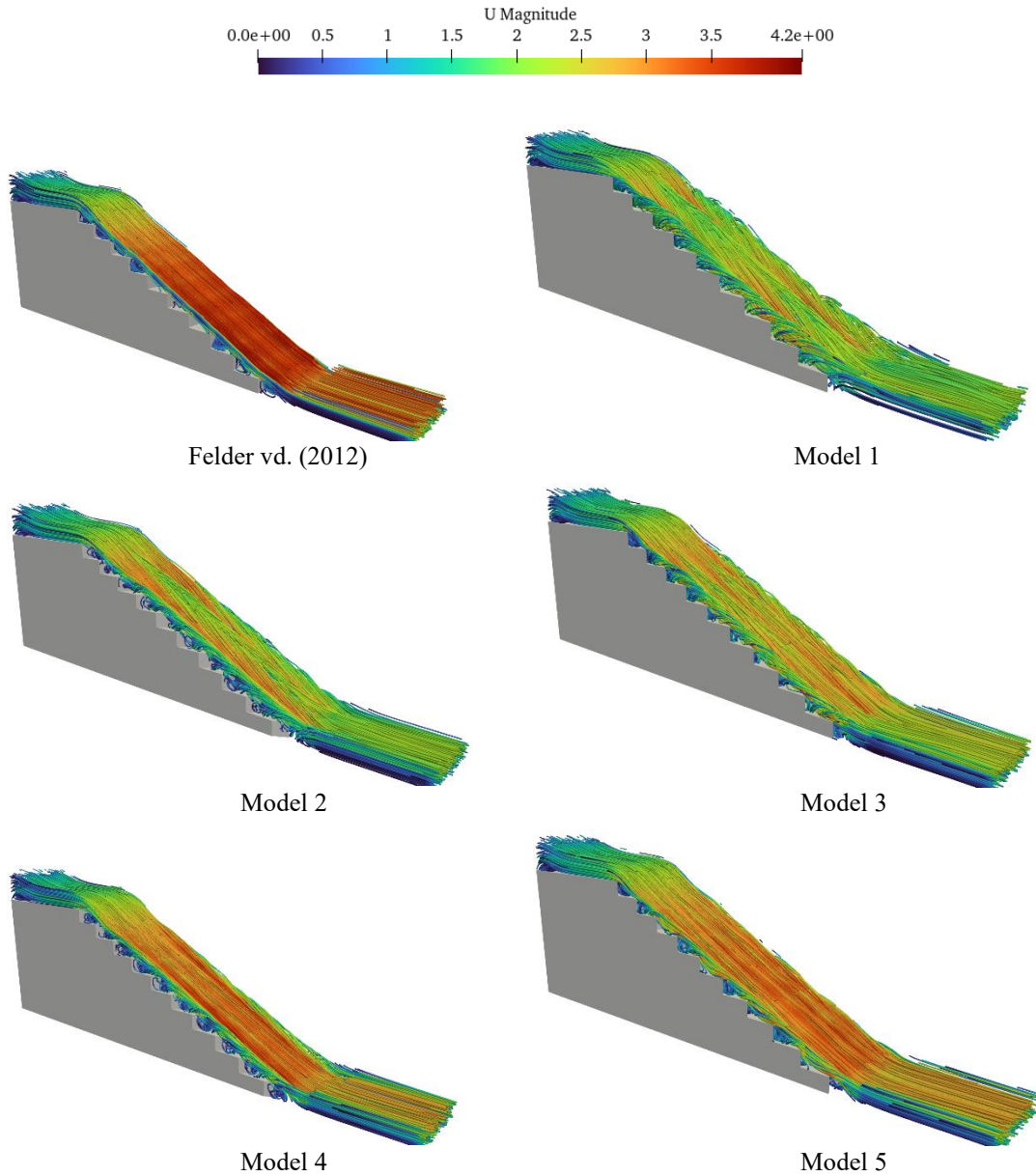


Şekil 5.2. 26,6° açığa sahip sayısal modellerde enerji sönümleme oranının kıyaslanması



Şekil 5.3. 26,6° açığa sahip sayısal modellerde enerji sönmüleme yüzdesinin kıyaslanması

Akım çizgileri incelendiğinde tasarlanan yeni modellerin akım hızını azaltmada etkili bir performans sergilediği görülmektedir (Şekil 5.4). Bu tez kapsamındaki tüm akım çizgisi şekilleri maksimum debi için ($0,113 \text{ m}^3/\text{s}$) sunulmuştur. Akım hızı duvar yaklaşma bölgelerinde 0'a yakın iken suyun akışa geçmesiyle kademeli olarak artmaktadır. Zigzag labirent modellerde göz sayısı az olan Model 1'in akım çizgileri incelendiğinde basamaklar üzerinde yüksek çalkantıların olduğu görülmektedir. (Şekil 5.4). Labirent göz sayıları arttıkça basamakların eksenden olan mesafesi azaldığı için akım çizgileri de git gide klasik basamaklı modelin akım çizgilerine benzemektedir. Böylece göz sayısı en yüksek olan Model 5'in akım çizgileri incelendiğinde göz sayısı az olan Model 1'e göre dolusavak mansabında akım hızında da artış olduğu gözlenmiştir. Göz sayısının artmasıyla akım çizgilerinin klasik basamaklı dolusavaklar gibi daha düz bir hal aldığı ve bununla birlikte akım hızında da artış meydana geldiği gözlemlenmektedir.

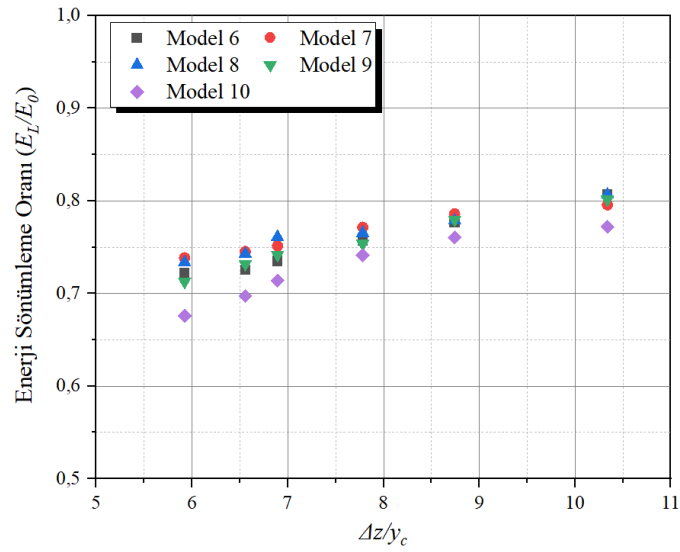


Şekil 5.4. Kanal açısı 26,6° olan basamaklı modellerin akım çizgileriyle birlikte hız dağılımları

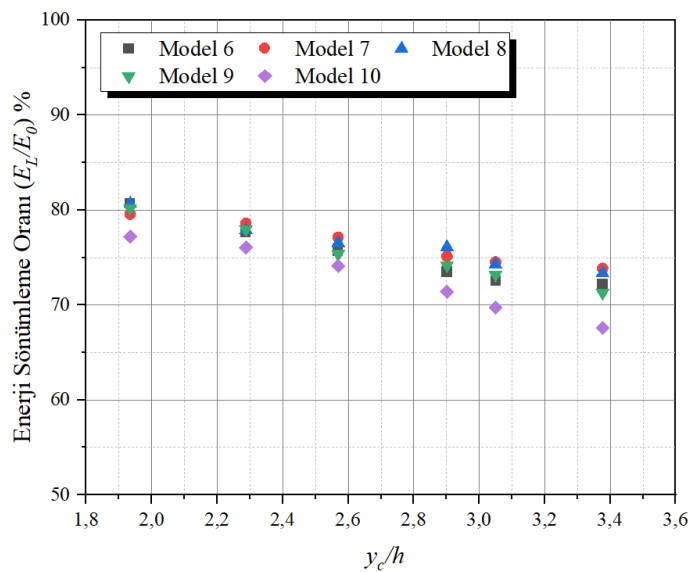
5.1.2. Kanal Açısı 14,6° Olan Basamaklı Dolusavaklarda Sayısal Modellerin Enerji Sönümleme Performansları

Kanal açısı 14,6° olan modellerin enerji sönümleme performansları Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da ortaya konulmuştur. Burada literatürde 14,6° açıya sahip deneysel sonuçlar olmadığından modeller kendi arasında kıyaslanmıştır. İlerleyen bölümlerde boyutsuz grafikler yardımıyla bütün açılara sahip modeller kıyaslanacaktır. Bu açı değeri için de debi arttıkça enerji sönümleme performansının azaldığı gözlemlenmiştir. Yüksek debilerde

Model 7 ve Model 8 daha iyi performans sergilemiştir. Maksimum debide Model 7 en iyi performansı sergilemiş olup enerji sönümleme yüzdesi %73,85'tir. Model 6, en düşük debide en iyi performansı sergilemiştir. Bu modeller arasında en düşük enerji sönümleme performansını hem maksimum hem de minimum debilerde Model 10 sergilemiştir. Yine eşkenar üçgenlerle oluşturulan zigzag labirent basamaklı modellerin basamaklarındaki göz sayısı arttıkça enerji sönümleme performanslarında düşüş yaşandığı gözlemlenmiştir.

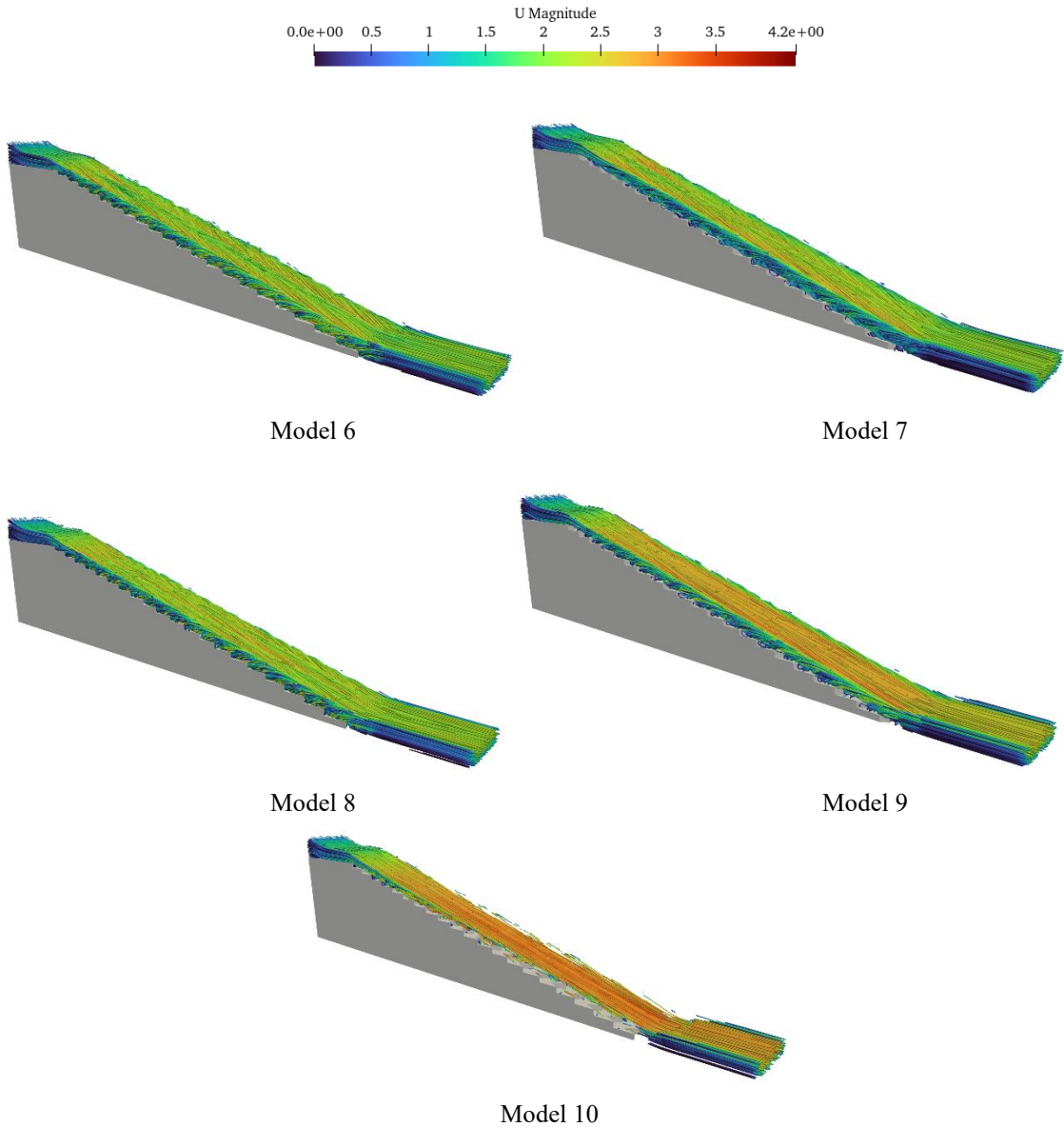


Şekil 5.5. 14,6° açılıya sahip sayısal modellerde enerji sönümleme oranının kıyaslanması



Şekil 5.6. 14,6° açılıya sahip sayısal modellerde enerji sönümleme yüzdesinin kıyaslanması

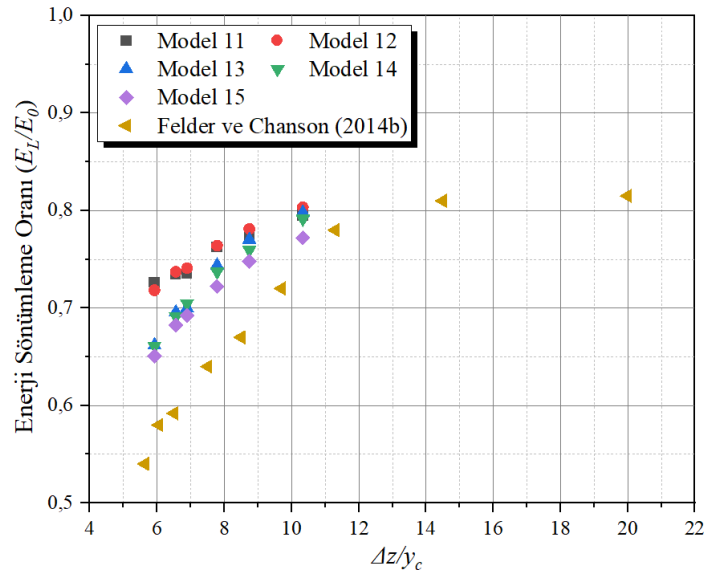
Kanal açısı $14,6^\circ$ olan modellerin akım çizgileri incelendiğinde, kanal açısı $26,6^\circ$ olan modeller gibi zigzag labirent sayısı az modeller için akım çizgilerinin çakışmasının ve göz sayısının az olmasının akım hızını azaltmada etkili olduğu düşünülmektedir (Şekil 5.7). Akım hızı duvar yaklaşma bölgelerinde 0'a yakın iken, suyun akışa geçmesiyle kademeli olarak artmaktadır. Göz sayısının artmasıyla akım çizgilerinin klasik basamaklı dolusavaklar gibi daha düz bir hal aldığı ve bununla birlikte akım hızında da artış meydana geldiği gözlemlenmektedir. Bazı şekillerde akım çizgilerinin çizilmesinde, basamaklara yakın bölümlerde, boşluklar göze çarpmaktadır. Bunun sebebi işlem yapılan bilgisayarın görüntü almadaki yetersizliğidir.



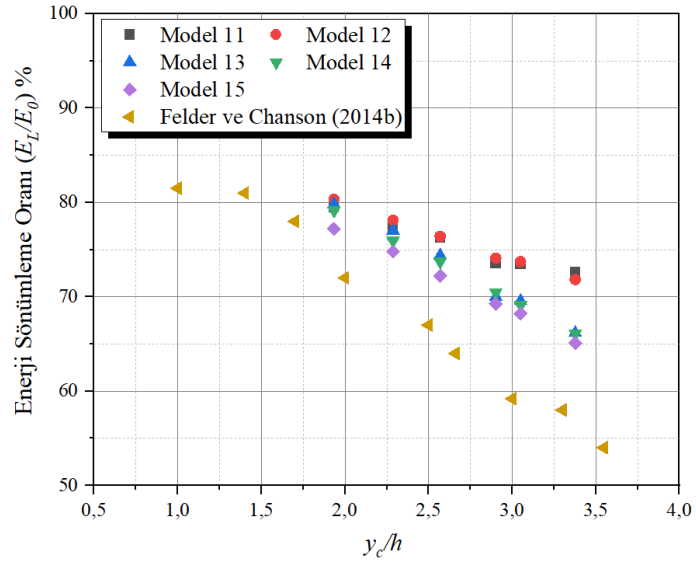
Şekil 5.7. Kanal açısı $14,6^\circ$ olan basamaklı modellerin akım çizgileriyle birlikte hız dağılımları

5.1.3. Kanal Açısı 8,9° Olan Basamaklı Dolusavaklarda Sayısal Modellerin Enerji Sönümleme Performansları

Kanal açısı 8,9° olan modellerin enerji sönümleme performansları Şekil 5.8 ve Şekil 5.9’da ortaya konulmuştur. Tasarlanan modeller Felder ve Chanson (2014b)’ın 8,9° kanal açısına sahip klasik basamak dolusavak modeline göre daha iyi bir performans sergilemiştir. En yüksek enerji sönümleme performansı yine göz sayısının az olduğu Model 11 ve Model 12’de gözlemlenmiştir. Maksimum debide en yüksek enerji sönümleme yüzdesi %72,62 ile Model 11’e aittir. Model 12 düşük debide %80,3 ile en iyi enerji sönümleme performansını göstermiştir. Aynı şekilde en düşük enerji sönümleme performansı ise basamak planında en yüksek göz sayısına sahip olan Model 15’e aittir ve yine eşkenar üçgenlerle oluşturulan modellerin basamaklarındaki zigzagların göz sayısı arttıkça enerji sönümleme performanslarında düşüş yaşandığı gözlemlenmiştir.

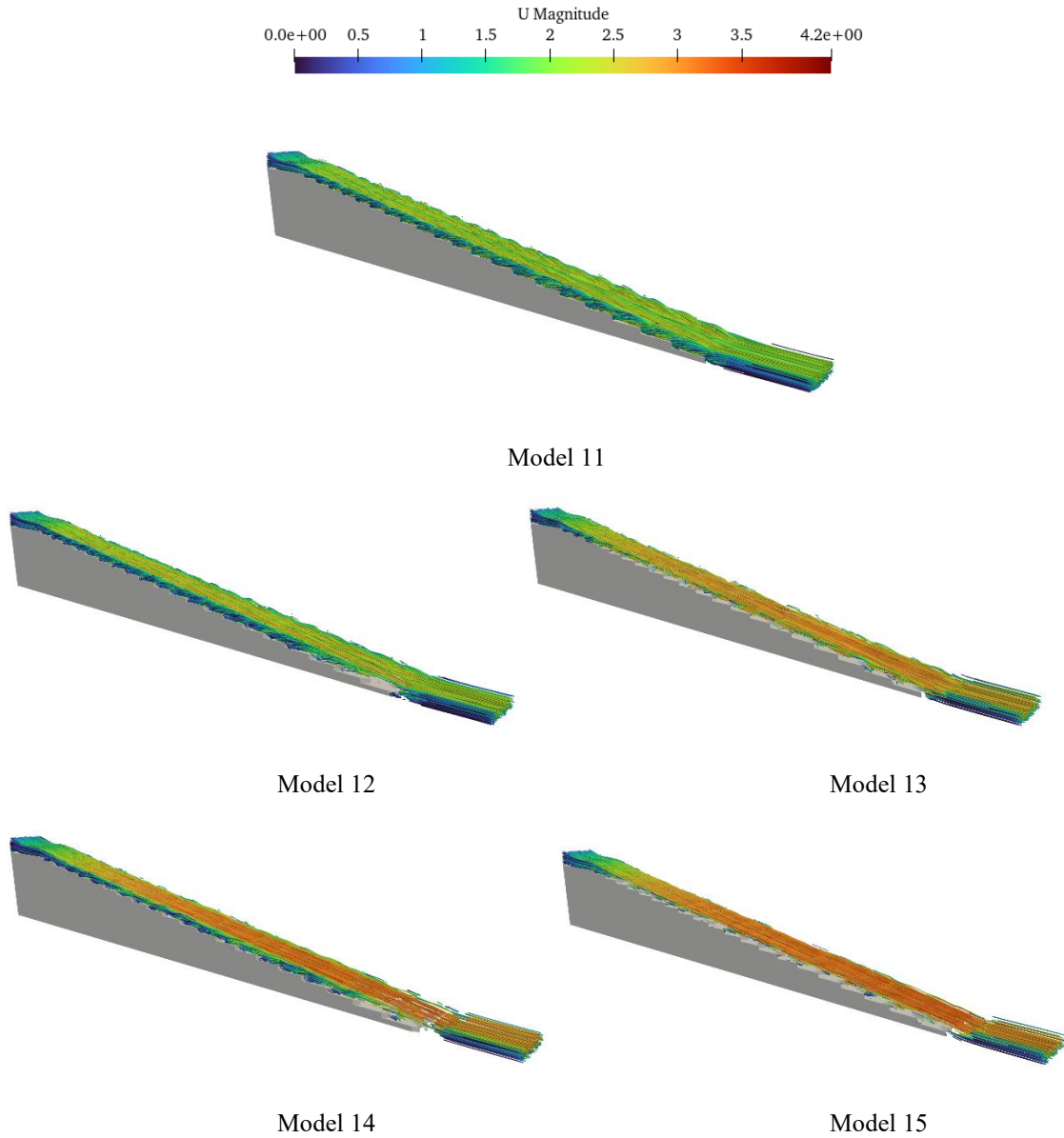


Şekil 5.8. 8,9° açılıya sahip sayısal modellerde enerji sönümleme oranının kıyaslanması



Şekil 5.9. 8,9° açılıya sahip sayısal modellerde enerji sönümlene yüzdesinin kıyaslanması

Kanal açısı 8,9° olan modellerin akım çizgileri incelendiğinde, kanal açısı 26,6° ve 14,6° olan modellerdeki gibi, göz sayısı az modeller için akım çizgilerinin çakışmasının akım hızını azaltmada etkili olduğu düşünülmektedir (Şekil 5.10). Akım hızı duvar yaklaşma bölgelerinde 0'a yakın iken, suyun akışa geçmesiyle kademeli olarak artmaktadır. Göz sayısının artmasıyla akım çizgilerinin klasik basamaklı dolusavaklar gibi daha düz bir hal aldığı ve bununla birlikte akım hızında da artış meydana geldiği gözlemlenmektedir. 14,6° açılı modellerde olduğu gibi yine bazı şekillerde akım çizgilerinin çizilmesinde, basamaklara yakın bölümlerde, boşluklar göze çarpmaktadır. Bunun sebebi işlem yapılan bilgisayarın görüntü almadaki yetersizliğidir.



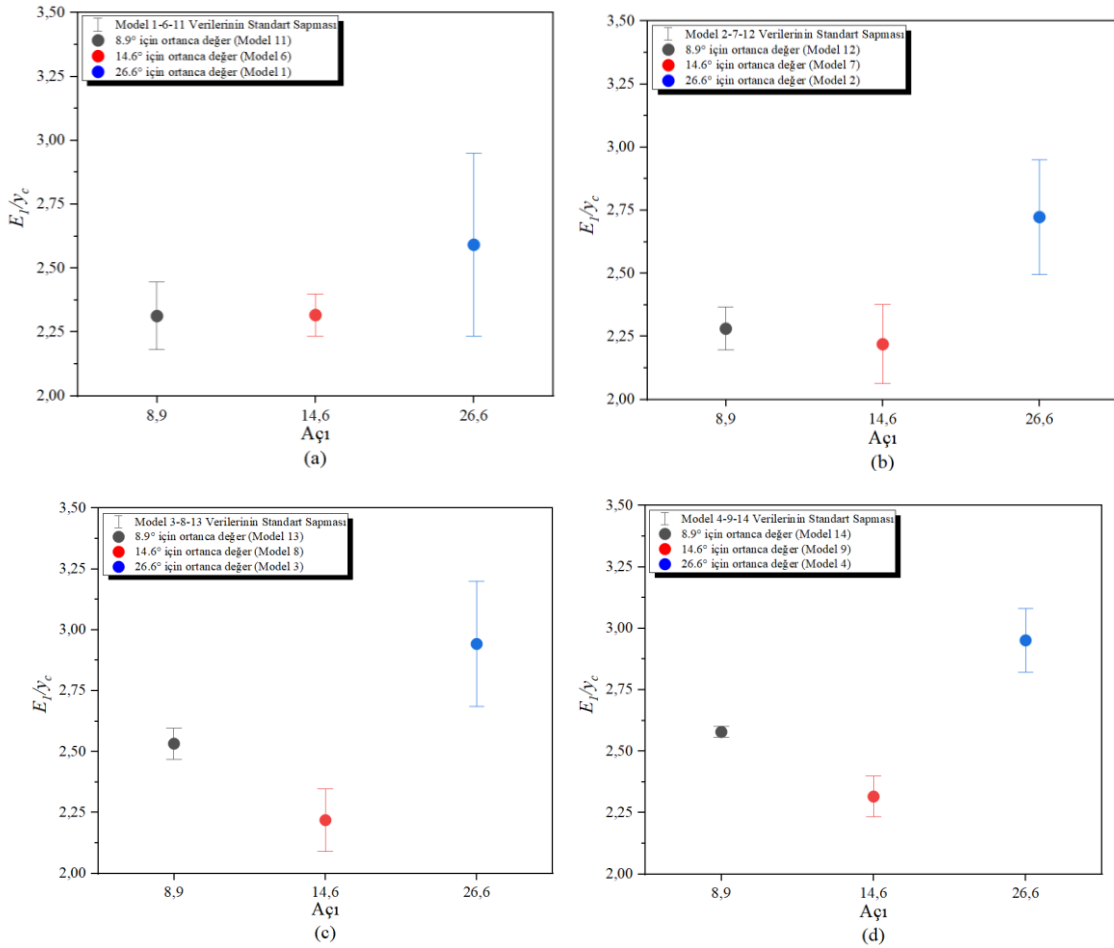
Şekil 5.10. Kanal açısı 8,9° olan basamaklı modellerin akım çizgileriyle birlikte hız dağılımları

5.2. Sayısal Modellerde Basamak Tiplerinin ve Dolusavak Açısının Enerji Sönümleme Performansına Etkisi

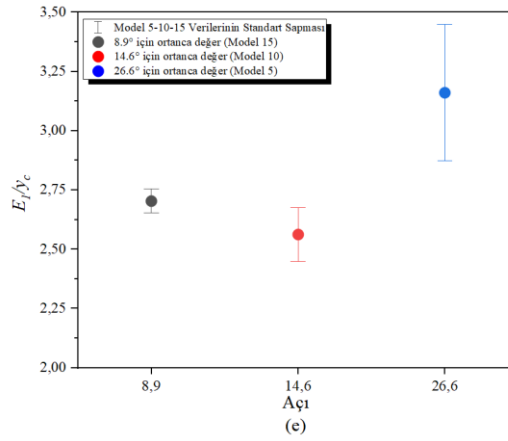
Tez çalışmasının bu bölümünde farklı açılarının ve göz sayısının enerji sönümleme performansı üzerine etkisi incelenmiştir. Chanson ve Gonzalez (2006) ve Ohtsu vd. (2004) çalışmalarında; farklı açılara sahip basamaklı dolusavaklar için düşük eğimlerin, enerji seviyesini azaltabileceğini ancak tasarımın uzun ve ekonomik olmayan bir yapıya dönüşmesine neden olabileceğini ve ek olarak açı arttıkça artık enerji değerinde (E_1) hafif bir artış olduğunu belirtmişlerdir. Felder ve Chanson (2014b) farklı açılara sahip basamaklı

dolusavaklarda enerji sönümlenme performansı için E_l/y_c parametresi üzerinden veri setlerinin standart sapma aralığı ve medyan değeri ile kıyaslama yoluna gitmiştir. Bu tez kapsamında da aynı yol izlenmiştir.

Şekil 5.11'deki grafiklerde basamak tiplerinin farklı kanal açılarında enerji sönümlenme performansı kıyaslanmıştır. Ortanca değer ve E_l/y_c verilerinin standart sapması üzerinden yapılan bu kıyaslamalarda göz sayısının az olduğu Model 1-6 ve 11 için dolusavak açısının etkisi daha az olmuştur. Zigzaglardaki göz sayısı arttıkça düşük açılarda enerji sönümlenme oranlarının farkı da artmıştır. Göz sayısının açıyla ilişkisi incelendiğinde en az değişim $14,6^\circ$ modeller için, en fazla değişim ise $26,6^\circ$ kanal açısına sahip modellerde olmuştur.

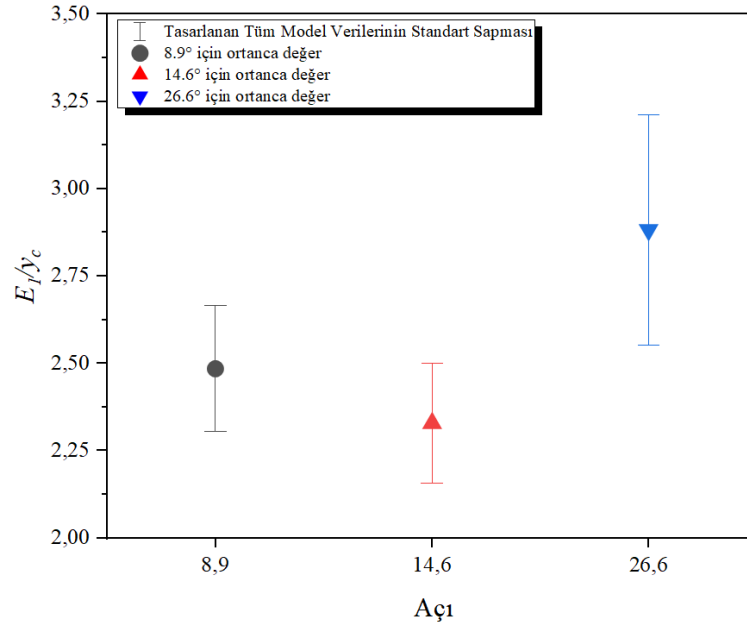


Şekil 5.11. Aynı basamak tipine sahip sayısal modellerin farklı dolusavak açılarında ortanca artık enerji değerleri ve veri setlerinin standart sapması: a) Model 1-6-11, b) Model 2-7-12, c) Model 3-8-13, d) Model 4-9-14, e) Model 5-10-15



Şekil 5.11. (Devam): Aynı basamak tipine sahip sayısal modellerin farklı dolusavak açılarında ortalama artık enerji değerleri ve veri setlerinin standart sapması: a) Model 1-6-11, b) Model 2-7-12, c) Model 3-8-13, d) Model 4-9-14, e) Model 5-10-15

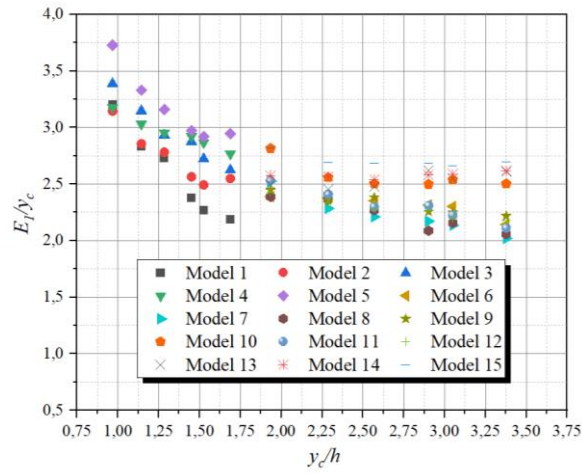
Tasarlanan tüm sayısal modellerin üç farklı kanal açısı için kıyaslaması da Şekil 5.12'deki gibidir. Elde edilen sonuçlara göre, 26,6° kanal açısı için E_1/y_c değeri daha yüksek olduğundan enerji sönümleme performansının daha düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca, düşük açılı dolusavaklardan elde edilen düşük standart sapma değerleri, enerji sönümleme performansının daha tutarlı ve öngörülebilir olduğunu göstermektedir. Yüksek açıda ise veri dağılımı daha geniş olup sistemin kararlılığının daha düşük olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, kanal açısı azaldıkça enerji sönümleme performansında bir değere kadar artış gözlemlenmiştir. Bu durum literatürle uyumludur (Chanson ve Gonzalez, 2006; Ohtsu vd., 2004; Felder ve Chanson, 2014b). Tasarlanan modellerde enerji sönümleme açısından optimum performansı 14,6° açıya sahip dolusavak modellerinin gösterdiği görülmüştür.



Şekil 5.12. Tüm sayısal modellerin farklı dolusavak açılarında ortalama artık enerji değerleri ve veri setlerinin standart sapması

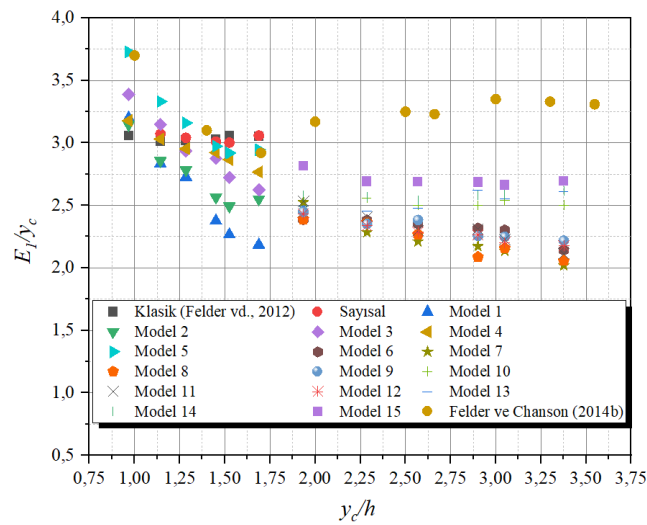
5.3. Sayısal Modellerin Enerji Sönümleme Performanslarının Karşılaştırılması

Sayısal modellerin analizleri sonucunda enerji sönümleme performansları boyutsuz parametreler ile Şekil 5.13'te gösterilmiştir. Bu grafiğe göre, tasarlanan bütün modeller arasında en yüksek enerji sönümleme performansı 14,6° açıya sahip olan Model 7 ile elde edilmiştir. Model 5, sayısal modeller arasında en düşük enerji sönümleme performansına sahiptir. Bu durum, yukarıda da bahsedildiği üzere, kanal açısının artması ve göz sayısının artması neticesinde elde edilmiş olabilir. 8,9° kanal açısına sahip Model 11'de ise enerji sönümleme performansı bakımından en iyi model olan Model 7'ye yakın bir sonuç elde edilmiştir.



Şekil 5.13. Tüm sayısal modellerin enerji sönümleme performansları bakımından birbirleriyle kıyaslanması

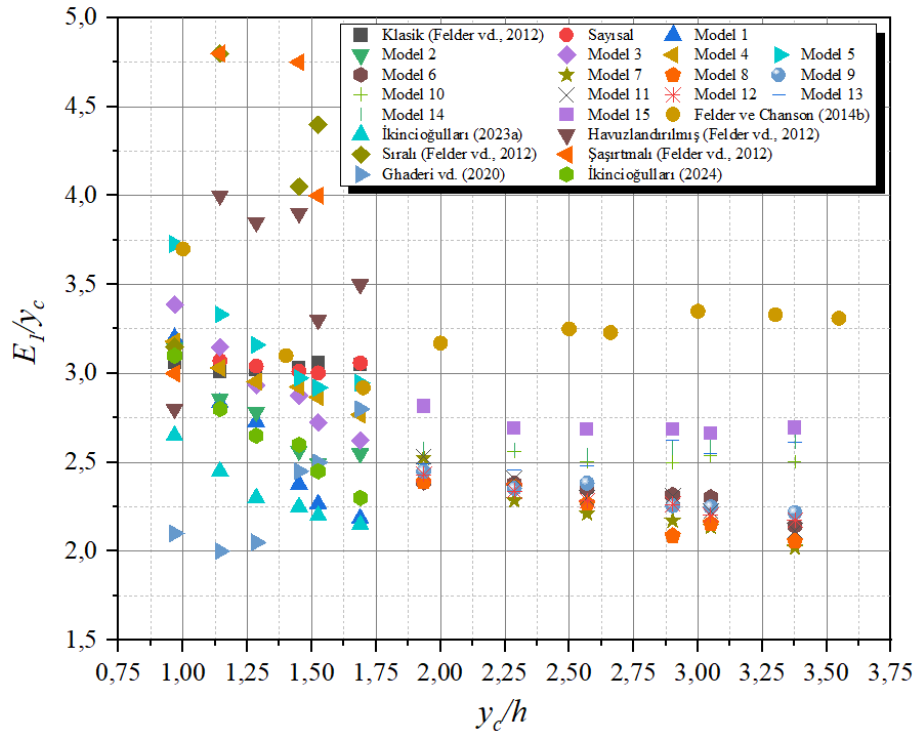
Çalışma kapsamında; tasarlanan modellerle doğrulaması yapılan klasik basamaklı dolusavak modelleri kıyaslandığında, zigzag labirent olarak tasarlanan modellerin enerji sönümleme performansını incelemek için yürütülen toplam 90 analizin yaklaşık %90'ının daha yüksek oranlarda sonuçlar verdiği görülmektedir (Şekil 5.14). Düşük debilerde, genel olarak, klasik basamaklı dolusavaklardan daha düşük performans verenler Model 4 ve Model 5'tir. Bu durum, yukarıda da bahsedildiği üzere, bu modellerin hem yüksek kanal açısına hem de fazla göz sayısına sahip olduğundan kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.14. Çalışma kapsamında tasarlanan modellerin klasik basamaklı dolusavak modelleri ile enerji sönümleme performansları bakımında kıyaslanması

5.4. Sayısal Modellerin Enerji Sönümleme Performanslarının Literatürdeki Bazı Dolusavak Modelleri ile Karşılaştırılması

Tasarlanan sayısal modellerin enerji sönümleme performansları literatürdeki bazı modeller ile kıyaslanmıştır (Şekil 5.15). Kanal açısı $26,6^\circ$ olan Model 1, İkinciogulları (2023a)'nın modeline yüksek debilerde yakın bir performans sergilemiştir. $26,6^\circ$ kanal açısına sahip olan modeller, Felder vd. (2012) klasik, havuzlandırılmış, sıralı ve şaşırtmalı modellerine göre daha yüksek performans sergilemiştir. $8,9^\circ$ kanal açısına sahip sayısal modeller de literatürdeki klasik basamaklı dolusavak modeline göre yüksek bir performans ortaya koyduğu görülmektedir. Tasarlanan modellerin literatürdeki modellerle ilişkisi göz önüne alındığında, enerji sönümleme performansı açısından genellikle daha yüksek performans verdiği gözlenmiştir.



Şekil 5.15. Tasarlanan sayısal modellerin literatürdeki bazı modeller ile kıyaslanması

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, HAD yöntemi ile çalışan hidrolik problemlerin çözülmesinde rol oynayan OpenFOAM yazılımı kullanılarak basamaklı dolusavaklarda farklı tip basamak tasarımlarının enerji sönümleme performansına etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Çalışma, literatürdeki iki farklı açıya sahip klasik basamaklı dolusavakların (Felder vd., 2012; Felder ve Chanson, 2014b) deney sonuçları kullanılarak sayısal model doğrulanmış ve zigzag labirent basamak planına sahip basamaklı dolusavak modellerinin enerji sönümleme performansları üç farklı açı ($26,6^\circ$, $14,6^\circ$ $8,9^\circ$) için $k-\varepsilon$ türbülans modeli ile sayısal olarak incelenmiştir. Yapılan analizler neticesinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Çalışmada kullanılan tüm modellerde debi değeri arttıkça enerji sönümleme oranının azaldığı,
- Çalışmada kullanılan aynı efektif kret uzunluğuna sahip yeni tip zigzag labirent basamaklı dolusavak modellerinde; göz sayısı azaldıkça basamakların kenar uzunluklarının klasik basamaklı dolusavağa oranla daha fazla olmasından dolayı enerji sönümleme performansının arttığı, göz sayısının artmasıyla basamakların klasik basamaklara benzemesinden dolayı enerji sönümleme performansının genel olarak azaldığı,
- Maksimum debide yüksek enerji sönümleme performansının $\%73,85$ ile $14,6^\circ$ kanal açısına sahip olan Model 7’de olduğu,
- $26,6^\circ$ kanal açısına sahip sayısal modeller içerisinde, en yüksek enerji sönümleme performansının Model 1’de olduğu ve klasik basamaklı dolusavak (Felder vd., 2012) modeline göre $\%20$ daha fazla enerji sönümleyebildiği,
- $8,9^\circ$ kanal açısına sahip modeller içerisinde ise Model 11 ve Model 12’nin diğer modellere göre da iyi enerji sönümleme performansı sergilediği,
- Kanal açısı azaldıkça sönümlenen enerji oranının arttığı ancak açının belli bir değerden sonra azalmasıyla enerji sönümleme oranının azalabileceği,
- Düşük kanal açılarında dolusavak sistemlerinin standart sapmasının daha düşük olduğu ve sistemin daha kararlı olduğu,

- Yeni modellerin mansabındaki akım hızının klasik basamaklı dolusavakların mansabındaki akım hızından oldukça düşük olduğu ve yeni önerilen modellerin enerji sönümleme açısından oldukça etkili olduğu gözlemlenmiştir.
- Bu çalışmaya ek olarak, daha fazla kanal açısı kullanılarak kanal açısının enerji sönümleme performansı daha detaylı incelenebilir.
- Basamak tiplerinde farklı efektif kret uzunluğuna sahip modellerin enerji sönümleme performansına etkisi araştırılabilir.
- Kanal pürüzlülüğü arttırılarak farklı kanal açısına sahip modellerin ve pürüzlülüğün enerji sönümleme üzerinde etkisi kıyaslanabilir.
- Basamak tiplerinin akım havalandırma miktarına etkisi araştırılabilir.
- Fiziksel model üzerinde çalışmadaki dolusavak modellerinin deneysel çalışması yapıp alınan sonuçlar, bu tez kapsamında HAD yöntemiyle alınan sonuçlar ile kıyaslanabilir.

KAYNAKLAR

Abdulrahman, K. Z., Ali, A. S., and Qadir, W. (2023). Experimental Investigation of the Influence of Step Height on Energy Dissipation and Flow Characteristics in Stepped Spillways. *Sulaimania Journal for Engineering Sciences*, 10(1).

Alashan, S., İkinciogulları, E., and Yalçın, E. E. (2023). Practical Design of Stepped Spillways using Fuzzy Inference System.

Ali, A. S. and 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

Ashoor, A. and Riazi, A. (2019). Stepped spillways and energy dissipation: A non-uniform step length approach. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(23). doi:10.3390/app9235071

Attarian, A., Hosseini, K., Abdi, H., and Hosseini, M. (2014). The Effect of the Step Height on Energy Dissipation in Stepped Spillways Using Numerical Simulation. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(4), 2587–2594. doi:10.1007/s13369-013-0900-y

Berkün, M. (2007). *Su Yapıları*. Birsen Yayınevi.

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., and Rajaratnam, N. (2000). Characteristics of Skimming Flow over Stepped Spillways, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125, No. November, 860–873.

Boes, R. M. and Hager, W. H. (2003). Hydraulic Design of Stepped Spillways for RCC Dams. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(5), 671–679.

Boes, R. M. (2012). Guidelines on the design and hydraulic characteristics of stepped spillways. In *Proceedings of the 24th ICOLD Congress on Large Dams* (pp. 203–220).

Celik, I. B., Ghia, U., Roache, P. J., Freitas, C. J., Coleman, H., and Raad, P. E. (2008) Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications, *J. Fluids Eng. Trans. ASME*, 130, 0780011–0780014. <https://doi.org/10.1115/1.2960953/444689>

Chanson, H. (1993). Stepped Spillway Flows and Air Entrainment. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 20(3), 422–435. doi:10.1139/193-057

Chanson, H. (1996). Prediction of the transition nappe/skimming flow on a stepped channel. *Journal of Hydraulic Research*, 34, 421–429.

Chanson, H. (1998). Review of Studies on Stepped Channel Flows. *Workshop on Flow Characteristics around Hydraulic Structures and River Environment*, 25.

Chanson, H. (2000). Hydraulics of Stepped Spillways: Current Status. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(9), 636–637. doi:10.1061/(asce)0733-9429(2000)126:9(636)

Chanson, H. (2002). Air–water flow measurements with intrusive phase-detection probes in open channel, skimming flow. *Experiments in Fluids*, 33(5), 801–813.

Chanson, H. (2004). Drag reduction in skimming flow on stepped spillways by aeration. *Journal of Hydraulic Research*, 42(3), 316–322. doi:10.1080/00221686.2004.9728397

Chanson, H., and Gonzalez, C. A. (2006). Physical modelling and scale effects of stepped spillways. *Journal of Hydraulic Research*, 44(1), 89–99. <https://doi.org/10.1080/00221686.2006.9521677>

Chanson, H. (2005). Characteristics of Skimming Flow over Stepped Spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(11), 860–873.

Chow, V. T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill.

Eça, L., and Hoekstra, M. (2014). A procedure for the estimation of the numerical uncertainty of CFD calculations based on grid refinement studies. *Journal of computational physics*, 262, 104–130.

Felder, S., and Chanson, H. (2012). Phase-detection probe measurements in high-velocity free-surface flows including a double-tip resolution enhancement technique. *Flow Measurement and Instrumentation*, 24(1), 19–29.

Felder, S., Guenther, P., and Chanson, H. (2012). Air-Water Flow Properties and Energy Dissipation on Stepped Spillways: A Physical Study of Several Pooled Stepped Configurations. Brisbane.

Felder, S. and Chanson, H. (2013). Aeration, flow instabilities, and residual energy on pooled stepped spillways of embankment dams. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 139(10), 880–887.

Felder, S. and Chanson, H. (2014a). Effects of Step Pool Porosity upon Flow Aeration and Energy Dissipation on Pooled Stepped Spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(4), 04014002. doi:10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000858

Felder, S., and Chanson, H. (2014b, January). Energy dissipation and flow resistance on flat slope stepped spillways. In *ISHS 2014-Hydraulic Structures and Society-Engineering Challenges and Extremes: Proceedings of the 5th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures* (pp. 1-9). The University of Queensland.

Ghaderi, A., Abbasi, S., Abraham, J. and Azamathulla, H. M. (2020) Efficiency of trapezoidal labyrinth shaped stepped spillways, *Flow Meas. Instrum.*, 72, 101711. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2020.101711>

- Ghaderi, D., Ebrahimnezhadian, H., and Mollazadeh, M. (2023). A three-dimensional study of flow characteristics over different forms of stepped-labyrinth spillways in the skimming flow regime. *AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 72(8), 1415-1430.
- Güler, B. A. and İmamoğlu, E. (2020). Bilgisayar Destekli Simülasyon ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, 13(1), 42–52.
- Hamed, A., Hajigholizadeh, M., and 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*, 2(9), 426–437. doi:10.28991/cej-2016-00000047
- Hess, J. L. ve Smith, A. M. O. (1967). Calculation of Potential Flow about Arbitrary Bodies. *Progress in Aerospace Sciences*, 8(C), 1–138. doi:10.1016/0376-0421(67)90003-6
- Hirt, C. W., and Nichols, B. D. (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of computational physics*, 39(1), 201-225.
- Hunt, S. L. and 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.
- İkinciogulları, E. (2019). *Serbest düşümlü savakların mansabında oluşan yerel oyulmanın analizi* (Yayımlanmamış doktora tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- İkinciogulları, E. (2021). Ters Basamaklı Eşikler Kullanılarak Tasarlanan Basamaklı Savakların Enerji Sönümleme Oranlarının Sayısal Olarak İncelenmesi. *European Journal of Science and Technology*, 23, 189–196. doi:10.31590/ejosat.859116
- İkinciogullari, E. (2023a). A novel design for stepped spillway using staggered labyrinth trapezoidal steps. *Flow Measurement and Instrumentation*, 93, 102439.
- İkinciogullari, E. (2023b). Stepped spillway design for energy dissipation. *Water Supply*, 23(2), 749-763.
- İkinciogullari, E. (2024). Energy dissipation performance of labyrinth and harmonic stepped spillways. *Journal of Hydroinformatics*, 26(10), 2668-2682.
- Jabbar, I. N. (2018). Numerical Analysis of Flow over Stepped Spillways. *M.Sc. Thesis, Gaziantep University, Civil Engineering Department*.
- Jahad, U. A., Chabuk, A., Al-Ameri, R., Majdi, H. S., Majdi, A., Al-Ansari, N., and Abed, S. A. (2024). Flow characteristics and energy dissipation over stepped spillway with various step geometries: case study (steps with curve end sill). *Applied Water Science*, 14(3), 60.

- Khatsuria, R. M. (2005). *Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators*. CRC Press.
- Korkmaz, C., ve Kaçar, İ. (2021). Hesaplama akışkanlar dinamiği simülasyonları için optimum eleman ağ yapısının belirlenmesi. *Tarımsal Mekanizasyon ve Enerji Üzerine Güncel Araştırmalar*, 1(8), 109–125.
- Ma, P., Hu, Y., and Liu, H. (2021). Study on energy dissipation characteristics of skimming flow on stepped spillways. *Taiwan Water Conservancy*, 69(2), 89–102. [https://doi.org/10.6937/TWC.202106/PP_69\(2\).0008](https://doi.org/10.6937/TWC.202106/PP_69(2).0008)
- Ma, X., Zhang, J., and Hu, Y. (2022). Analysis of Energy Dissipation of Interval-Pooled Stepped Spillways. *Entropy*, 24(1), 1–13. doi:10.3390/e2401008
- Mero, S. and 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
- Mohammad Rezapour Tabari, M. and Tavakoli, S. (2016). Effects of Stepped Spillway Geometry on Flow Pattern and Energy Dissipation. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41(4), 1215–1224. doi:10.1007/s13369-015-1874-8
- Novak, P., Moffat, A. I. B., Nalluri, C., and Narayanan, R. (2007). *Hydraulic Structures* (4th ed.). Taylor and Francis.
- Ohtsu, I. and Yasuda, Y. (1991). Transition from supercritical to subcritical flow at an abrupt drop. *Journal of Hydraulic Research*, 29(2), 309–328. doi:10.1080/00221689109498436
- Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Takahashi, M. (2004). Flow characteristics of skimming flows in stepped channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(9), 860–869. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2004\)130:9\(860\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:9(860))
- OpenFOAM Foundation. (2023). *User guide (version 11)*. <https://openfoam.org>
- Peyras, L., Royet, P. and Degoutte, G. (1992). Flow and Energy Dissipation over Stepped Gabion Weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(5), 707–717. doi:10.1061/(asce)0733-9429(1992)118:5(707)
- Reeve, D. E., Zuhaira, A. A., and Karunarathna, H. (2019). Computational investigation of hydraulic performance variation with geometry in gabion stepped spillways. *Water Science and Engineering*, 12(1), 62–72. doi:10.1016/j.wse.2019.04.002
- Rice, C. E. and Kadavy, K. C. (1996). Model Study of a Roller Compacted Concrete Stepped Spillway. *Journal of Hydraulic Engineering*, 122(6), 292–297. doi:10.1061/(asce)0733-9429(1996)122:6(292)
- Rodi, W. (1993). *Turbulence models and their application in hydraulics — A state of the art review* (Report No. IAHR Delft). International Association for Hydraulic Research.

Roushangar, K., Akhgar, S., and 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*, 24(2), 243–258. doi:10.2166/hydro.2022.031

Sorensen, R. M. (1985). Stepped Spillway Hydraulic Model Investigation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(12), 1461–1472.

Tabari, M., Ghanbarpour, M., and Fadakar, S. (2016). Numerical investigation of flow over stepped spillways using Flow-3D. *Journal of Hydraulic Research*, 54(4), 400–410.

Tabbara, M., Chatila, J., and Awwad, R. (2005). Computational Simulation of Flow over Stepped Spillways. *Computers and Structures*, 83(27), 2215–2224. doi:10.1016/j.compstruc.2005.04.005

Thorwarth, J. (2009). *Hydraulisches Verhalten von Treppengerinnen Mit Eingetieften Stufen: Selbstinduzierte Abflussinstationaritäten Und Energiedissipation*. Shaker.

TRUBA. (2023). *ARF Kullanıcı El Kitabı*. 28 Nisan 2025 tarihinde <https://docs.truba.gov.tr/TRUBA/kullanici-el-kitabi/arf/index.html> adresinden erişildi.

Tu, J., Yeoh, G. H., and Liu, C. (2018). *Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach*.

ULAKBİM, TÜBİTAK. (2021). Türk Ulusal Bilim E-Altyapısı – TRUBA. 12 Mayıs 2022 tarihinde <https://www.truba.gov.tr/> adresinden erişildi.

United States Army Corps of Engineers (USACE). (1990). *Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators (EM 1110-2-1605)*.

URL-1. (2022). Computational Fluid Dynamics. *Wikipedia*. 12 Mayıs 2022 tarihinde https://en.wikipedia.org/wiki/computational_fluid_dynamics adresinden erişildi.

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.

Uzol, N. S. (2021). *Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği'ne Giriş ve Aerodinamik Simülasyonlar (Ders Notları)*.

Wolf Dynamics. (2021). *Turbulence training*. https://www.wolfdynamics.com/training/turbulence/OF2021/turbulence_2021_OF8.pdf

Yalcin, E. E., İkinciogullari, E., and Kaya, N. (2023). Comparison of turbulence methods for a stepped spillway using computational fluid dynamics. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 47(6), 3895–3911.

Yalçın, E. E., İkincioğulları, E., ve Kaya, N. (2024). Üçgen basamaklı dolusavakların enerji sönmüleme performansının incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(4), 522-529.

Zare, H. K. and Doering, J. C. (2012). Effect of rounding edges of stepped spillways on the flow characteristics. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 39(2), 140–153. doi:10.1139/L11-121

Zhang, G. and Chanson, H. (2018). Effects of Step and Cavity Shapes on Aeration and Energy Dissipation Performances of Stepped Chutes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 144(9), 04018060. doi:10.1061/(asce)hy.1943-7900.0001505