

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BASAMAKLI DOLUSAVAKLAR ÜZERİNDE OLUŞAN
AKIMLARININ SAYISAL ANALİZİ**

Ö. Faruk DURSUN

Tez Yöneticisi:
Yrd. Doç. Dr. Mualla ÖZTÜRK

DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ELAZIĞ, 2009

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BASAMAKLI DOLUSAVAKLAR ÜZERİNDE OLUŞAN
AKIMLARININ SAYISAL ANALİZİ**

Ö. Faruk DURSUN

Doktora Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu tez, .././2009 tarihinde, aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği ile başarılı olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mualla ÖZTÜRK

Üye : Doç. Dr. M. Emin EMİROĞLU

Üye : Doç. Dr. İhsan DAĞTEKİN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Nihat KAYA

Üye : Doç. Dr. Mehmet ARDIÇLIOĞLU

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../.....tarih vesayılı kararıyla onaylanmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu tezi hazırlarken, kıymetli bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen Danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Mualla ÖZTÜRK'e ve bölümümüz Öğretim Üyesi Doç. Dr. M. Emin EMİROĞLU'na, bilgilerinden istifade ettiğim Dr. M. Cihan AYDIN'a (Bitlis Eren Üniversitesi), Dr. Asım BALBAY'a (Gazi Endüstri Meslek Lisesi) ve manevi destekleriyle beni yalnız bırakmayan aileme teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇİNDEKİLER.....	I
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	III
TABLOLAR LİSTESİ.....	VI
EKLER LİSTESİ.....	VII
SİMGELER LİSTESİ.....	VIII
KISALTMALAR.....	X
ÖZET.....	XI
ABSTRACT.....	XII
1. GİRİŞ.....	1
2. BASAMAKLI DOLUSAVAKLAR.....	4
2.1 Basamaklı Dolusavakların Tarihçesi.....	4
2.2. Akım Rejimleri.....	6
2.2.1 Nap Akım Rejimi.....	7
2.2.1.1 Nap Şeklinin Hesaplamaları.....	7
2.2.1.2 Hidrolik Sıçramalı Nap Akımın Hidrolik Karakteristikleri.....	11
2.2.1.3 Hidrolik Sıçramasız Nap Akımının Hidrolik Karakteristikleri.....	13
2.2.1.4 Nap Akım Rejimindeki Şütlerin Tasarımı.....	15
2.2.2 Geçiş Akım Rejimi.....	15
2.2.2.1 Boylamsal Akım Örneği Ve Akım Kuruluş Bölgesi.....	16
2.2.2.2 Geçiş Akımı İçin Kararsızlıklar.....	17
2.2.3 Sıçramalı Akım Hidroliği.....	17
2.2.3.1 Temel Akım Örnekleri.....	18
2.2.3.2 Kret Tasarımı Ve Jet Akımın Yoldan Sapması.....	18
2.2.3.3 Akım Rejiminin Gelişmesi Ve Hava Girişinin Başlaması.....	19
2.2.4 Nap, Geçiş Ve Sıçramalı Akım Arasında Enerji Sönümlemenin Karşılaştırılması.....	23
2.3 Basamaklı Dolusavakların Tasarımı.....	23
2.3.1 Akım Derinliği.....	23
2.3.2 Sürtünme Faktörü.....	24
2.3.2.1 Temel Denklem.....	24
2.3.2.2 Şekil Düzeltme Faktörü.....	24
2.3.2.3 Yan Cidar Düzeltme Metodu.....	25
2.3.2.4 Enerji Sönümleme Hesabı.....	25
2.3.2.5 Dolusavak Genişliğinin Seçimi.....	26
2.3.2.6 Basamaklı Dolusavakların Tercih Edilmesinin Kriteri.....	26

2.3.2.7 Hava Katılımı.....	26
3. SAYISAL YÖNTEMLER.....	28
3.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) Yazılımları.....	28
3.1.1 Fluent Programı.....	28
3.1.2. Gambit Programı.....	32
3.2.2. Viskoz Modeli.....	33
3.2.3. Süreklilik Ve Momentum Denklemleri.....	33
3.4. Fluent ‘te Çok Fazlı Akım Problemlerinin Modellenmesi (Multiphase Flows).....	34
3.4.1. Dağınık Faz Modeli (Dispersed Phase Model-DPM).....	34
3.4.2. Akışkan Hacmi (Volume of Fluid-VOF) Modeli.....	35
3.4.2.1. Hacim Oranı	37
3.4.3. Cebirsel Kayma Karışım Modeli (Algebraic Slip Mixture Model-ASMM).....	37
3.5 Sayısal Çözümü Yapılacak Modeller.....	39
4. BASAMAKLI DOLUSAVAKLARIN SAYISAL ANALİZİ VE TARTIŞMA.....	40
4.1 Eşiksiz Basamaklı Dolusavakların Sayısal Analizi.....	40
4.1.2 Basamaklı Dolusavakların Hidrolik Karakteristikleriyle İlgili Literatürdeki Eşitlikler.....	47
4.1.3 Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması.....	51
4.2 Eşikli Basamaklı Dolusavakların Sayısal Analizi.....	55
4.2.1 Şüt Açısı 50° Olan Dolusavak İçin Oluşturulan Sayısal Modeller.....	64
4.2.2 Şüt Açısı 40° Olan Dolusavak İçin Oluşturulan Sayısal Modeller.....	71
4.2.3 Şüt Açısı 30° Olan Dolusavak İçin Oluşturulan Sayısal Modeller.....	76
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	81
5.1 Sonuçlar.....	81
5.2 Öneriler.....	83
KAYNAKLAR.....	84
ÖZGEÇMİŞ.....	88
EKLER.....	89

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil No	Sayfa
Şekil 2.1 Tam gelişmiş hidrolik sıçramalı nap akımına ait şematik gösterim.....	7
Şekil 2.2 Kısmen gelişmiş hidrolik sıçramalı nap akımına ait şematik gösterim.....	8
Şekil 2.3 Hidrolik sıçramasız nap akımına ait şematik gösterim.....	8
Şekil 2.4 Geçiş akım rejimindeki tedrici değişken akım bölgesinde oluşan hava-su karışımı akımı (yatay şüt).....	16
Şekil 2.5 Geçiş akım rejimindeki tedrici değişken akım bölgesinde oluşan hava-su karışımı akımı (dik şüt).....	16
Şekil 2.6 Bir basamak üzerinde meydana gelen kavitasyon çevrintili sıçramalı akım rejimi	17
Şekil 2.7 Jet sapmasının başlaması.....	19
Şekil 3.1 Çözüm algoritması.....	31
Şekil 3.2 Serbest yüzeyli akım modeli.....	35
Şekil 3.3 Kavitasyon modeli.....	38
Şekil 4.1 $\alpha = 30^\circ$ için deney modelinin geometrisi.....	41
Şekil 4.2 $\alpha = 51,3^\circ$ için deney modelinin geometrisi.....	42
Şekil 4.3 $\alpha = 60^\circ$ için deney modelinin geometrisi.....	42
Şekil 4.4 Simülasyonu yapılmış olan deney düzeneğinin sonlu eleman ağı ($\alpha = 30^\circ$).....	43
Şekil 4.5 $\alpha = 51,3^\circ$ olan modele ait sonlu eleman ağı.....	44
Şekil 4.6 $\alpha = 60^\circ$ boşaltım kanalı taban açılı olan modele ait sonlu eleman ağı.....	46
Şekil 4.7 $\alpha = 30^\circ$ açılı modelin sayısal analiz sonucu elde edilen iki fazlı akım görüntüsü ve enerji ölçüm noktaları.....	49
Şekil 4.8 $\alpha = 51,3^\circ$ açılı modelin sayısal analiz sonucu elde edilen iki fazlı akım görüntüsü ve enerji ölçüm noktaları.....	46
Şekil 4.9 $\alpha = 60^\circ$ açılı modelin sayısal analiz sonucu elde edilen iki fazlı akım görüntüsü ve enerji ölçüm noktaları.....	47
Şekil 4.10 Nap, geçiş ve sıçramalı akım koşulları için sınır değerler.....	48
Şekil 4.11 Nap akımdan Sıçramalı akıma geçiş ile ilgili olarak verilmiş olan deneysel, ampirik ve teorik denklemler.....	49
Şekil 4.12 Rölatif sönümlenemeyen enerji oranları ile rölatif dolusavak yüksekliğinin ilişkisi.....	49
Şekil 4.13 $\alpha = 30^\circ$ açılı boşaltım kanalı için enerji sönümlenme oranları.....	52
Şekil 4.14 $\alpha = 51,3^\circ$ açılı boşaltım kanalı için enerji sönümlenme oranları.....	53

Şekil 4.15 $\alpha=60^\circ$ açılı boşaltım kanalı için enerji sönümlenme oranları.....	54
Şekil 4.16 Sayısal analizlerde kullanılan eşik tipleri ve boyutları.....	56
Şekil 4.17 $Z=1$ 'de farklı şüt açıları için enerji sönümlenme oranları.....	57
Şekil 4.18 $Z=2$ 'de farklı şüt açıları için enerji sönümlenme oranları.....	58
Şekil 4.19 $Z=3$ 'te farklı şüt açıları için enerji sönümlenme oranları.....	58
Şekil 4.20 $Z=4$ 'te farklı şüt açıları için enerji sönümlenme oranları.....	59
Şekil 4.21 $Z=1$ 'de birim debilere göre enerji sönümlenme oranlarındaki değişim.....	60
Şekil 4.22 $Z=2$ 'de birim debilere göre enerji sönümlenme oranlarındaki değişim.....	60
Şekil 4.23 $Z=3$ 'te birim debilere göre enerji sönümlenme oranlarındaki değişim.....	61
Şekil 4.24 $Z=4$ 'te birim debilere göre enerji sönümlenme oranlarındaki değişim.....	61
Şekil 4.25 $Z=1$ 'de Froude sayılarına göre enerji sönümlenme oranlarının değişimi.....	62
Şekil 4.26 $Z=2$ 'de Froude sayılarına göre enerji sönümlenme oranlarının değişimi.....	62
Şekil 4.27 $Z=3$ 'te Froude sayılarına göre enerji sönümlenme oranlarının değişimi.....	63
Şekil 4.28 $Z=4$ 'te Froude sayılarına göre enerji sönümlenme oranlarının değişimi.....	63
Şekil 4.29 50° şüt açılı dolusavak modelinin geometrisi.....	64
Şekil 4.30 50° şüt açılı dolusavak modeline ait sonlu eleman ağı yapısı.....	64
Şekil 4.31 50° taban açılı modelin sayısal analiz sonucu elde edilen iki fazlı akım görüntüsü ve enerji ölçüm noktaları.....	65
Şekil 4.32 50° taban açılı modelin sayısal analiz sonucu elde edilen hız vektörleri.....	65
Şekil 4.33 50° taban açılı modelin sayısal analiz sonucu elde edilen hız vektörleri ve büyüklükleri (m/s).....	66
Şekil 4.34 50° şüt açılı model için Cheng ve diğ. [51] tarafından verilen ve mevcut çalışmayla çizilen eş basınç eğrileri.....	67
Şekil 4.35 $\alpha=50^\circ$ ve $Z=1$ için farklı basamak tiplerinde enerji sönümlenme oranları.....	68
Şekil 4.36 $\alpha=50^\circ$ ve $Z=2$ için farklı basamak tiplerinde enerji sönümlenme oranları.....	69
Şekil 4.37 $\alpha=50^\circ$ ve $Z=3$ için farklı basamak tiplerinde enerji sönümlenme oranları.....	69
Şekil 4.38 $\alpha=50^\circ$ ve $Z=4$ için farklı basamak tiplerinde enerji sönümlenme oranları.....	70
Şekil 4.39 $\alpha=50^\circ$ şüt açılı modelde, farklı Z değerleri için en yüksek enerji sönümlenme oranları.....	71
Şekil 4.40 40° şüt açılı dolusavak modelinin geometrisi.....	71
Şekil 4.41 40° şüt açılı dolusavak modelinin sonlu eleman ağı yapısı ve iki fazlı akım görüntüsü.....	72
Şekil 4.42 $\alpha=40^\circ$ ve $Z=1$ için farklı basamak tiplerinde enerji sönümlenme oranları.....	73
Şekil 4.43 $\alpha=40^\circ$ ve $Z=2$ için farklı basamak tiplerinde enerji sönümlenme oranları.....	73
Şekil 4.44 $\alpha=40^\circ$ ve $Z=3$ için farklı basamak tiplerinde enerji sönümlenme oranları.....	74

Şekil 4.45 $\alpha=40^\circ$ ve $Z=4$ için farklı basamak tiplerinde enerji sönümlenme oranları.....	74
Şekil 4.46 $\alpha=40^\circ$ şüt açılı modelde, farklı Z değerleri için en yüksek enerji sönümleme oranları.....	75
Şekil 4.47 30° şüt açılı dolusavak modelinin geometrisi.....	76
Şekil 4.48 30° şüt açılı dolusavak modelinin sonlu eleman ağı yapısı ve iki fazlı akım görüntüsü.....	76
Şekil 4.49 $\alpha=30^\circ$ ve $Z=1$ için farklı basamak tiplerinde enerji sönümlenme oranları.....	77
Şekil 4.50 $\alpha=30^\circ$ ve $Z=2$ için farklı basamak tiplerinde enerji sönümlenme oranları.....	78
Şekil 4.51 $\alpha=30^\circ$ ve $Z=3$ için farklı basamak tiplerinde enerji sönümlenme oranları.....	78
Şekil 4.52 $\alpha=30^\circ$ ve $Z=4$ için farklı basamak tiplerinde enerji sönümlenme oranları.....	79
Şekil 4.53 $\alpha=30^\circ$ şüt açılı modelde, farklı Z değerleri için en yüksek enerji sönümleme oranları.....	80

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo No	Sayfa
Tablo 4.1 Basamaklı dolusavak şüt açılarına göre basamak boyutları.....	43
Tablo 4.2 $\alpha=30$ açılı boşaltım kanalı için enerji sönümlenme oranları.....	53
Tablo 4.3 $\alpha=51.3^\circ$ açılı boşaltım kanalı için enerji sönümlenme oranları.....	54
Tablo 4.4 $\alpha=60$ açılı boşaltım kanalı için enerji sönümlenme oranları.....	55

EKLER LİSTESİ

EK 1 : Yapılan Sayısal Analizlerden Elde Edilen Sonuçlar (Tablo 1 – Tablo 32)

SİMGELER LİSTESİ

d_b	: Basamak Kenarındaki Akım Derinliği (m)
d_c	: Kritik Derinlik (m)
d_i	: Nap Kalınlığı (m)
d_p	: Mansap Havuzu Yüksekliği (m)
$d_{w,u}$	: Kritik Derinlik (m) (İki fazlı akımda)
$d_{90,u}$	: Duvar Yüksekliği (m)
D_H	: Hidrolik Yarıçap (m)
$D_{h,w}$	: Hidrolik Çap (m)
$D_{d,eff}$	: Etkili Hidrolik Çap
E	: Dolusavak Kretindeki Enerji
E_t	: Dolusavak Topuğundaki Enerji
f	: Darcy Sürtünme Faktörü
F^*	: Pürüzlülük Yüksekliği (m)
F_j	: Ek Terim
Fr	: Froude Sayısı
Fr_b	: Düşü Kenarının Menbasındaki Froude Sayısı
f_s	: Duvar Sürtünme Faktörü
f_w	: Darcy-Weisbach Sürtünme Faktörü
g	: Yer Çekim İvmesi (m/s^2)
h	: Basamak Yüksekliği (m)
$h_{w,u}$	: Üniform Akım Derinliği
H_d	: Baraj Yüksekliği (m)
H_{max}	: Toplam Enerji
H_{res}	: Biriken Enerji
H_0	: Şüt Kreti Üzerindeki Rezervuar Serbest-Su Yüzeyi Yüksekliği (m)
I	: Naptaki Dalga Uzunluğu Katsayısı
k	: Türbülans Kinetik Enerjisi (m^2/s^2)
k_s	: Pürüzlülük Yüksekliği
$K/D_{h,w}$	: Rölatif Pürüzlülük
l	: Basamak Genişliği (m)
L_d	: Düşü Uzunluğu (m)
L_r	: Hidrolik Sıçrama Uzunluğu (m)
L_i	: Havalanmayan Bölge Uzunluğu (m)
n	: Manning Pürüzlülük Katsayısı
p	: Basınç (pascal)
P_1, P_2	: Ara Yüzeyin Her İki Tarafında Kalan Akışkanlardaki Basınçlar
R	: Hidrolik Yarıçap
R_1, R_2	: Yüzey Eğriliği Yarıçapları (m)
$R_{h,w}$	: Hidrolik Yarıçap (m) (İki fazlı akımda)
s	: Dolusavak Mansap Yüzünün Eğimi ($s=\sin\alpha$)
S_f	: Sürtünme Kuvveti
S_{ϵ_k}	: Kaynak Terimi
t	: Zaman (s)
u_i	: Hız Vektörü
U_w	: Akım Hızı (m/s)
V_b	: Basamak Kenarındaki Akım Hızı (m/s)
V_i	: Düşen Napın Mansap Havuzu ile Kesiştiği Yerdeki akım Hızı (m/s)

$V_{\max}$	: İdeal Sıvı Hızı (m/s)
V_{90}	: Y_{90} 'daki Karakteristik Hız (m/s)
w	: Şekil Düzeltme Faktörü
y	: Hayali Çizgiye Olan Normal Mesafe (m)
Y_{90}	: Karakteristik Hava-Su Karışımının Derinliğinin %90'ı (m)
Y_{98}	: Karakteristik Hava-Su Karışımının Derinliğinin %98'i (m)
Z	: Dolusavak Kretinden Topuğa Olan Düşey Mesafe (m)
α	: Kanal Eğimi
δ_{BL}	: Sınır Tabakası Kalınlığı (m)
ΔH	: Sönümlenen Enerji
$\Delta H/H_{\max}$	: Enerji Sönümlenme Oranı
$\emptyset$	: Kinetik Enerji Düzeltme Faktörü
Q_w	: Suyun Debisi (m ³ /s)
ε	: Türbülans Yayılım Oranı (m ² /s ³)
ν	: Suyun kinematik viskozitesi, (m ² /s)
σ_s	: Yüzey Gerilmesi
ε_2	: İkincil Fazın Hacim Oranı
$\hat{n}$	: Yüzeye Normal Birim Vektör
$\hat{n}_\omega$	: Katı Cidara Normal Vektör
$\hat{t}_\omega$	: Teğetsel Birim Vektör
θ_ω	: Katı Cidarla Yüzey Teğeti Arasındaki İkincil Faz İçinde Ölçülen Temas Açısı
∇	: Gradyent ve Diverjans Operatörü
μ	: Akışkanın Viskozitesi (Ns/m ²)
ρ_m	: Karışımın Yoğunluğu (kg/m ³)
u_m	: Karışımın Ortalama Hızı (m/s)
u_{DK}	: Sürüklenme Hızları (m/s)
α_k	: k Akışkanının Hacim Oranı
μ_m	: Karışımın Viskozitesi (Ns/m ²)
μ_k	: k Akışkanının Viskozitesi (Ns/m ²)
ρ_w	: Suyun Yoğunluğu (kg/m ³)
q_w	: Birim Su Debisi (m ² /s veya m ³ /s/m)
q_{hava}	: Birim Hava Debisi (m ³ /s/m)
τ_o	: Ortalama Sınır Kesme Şiddeti
x_i	: Yön Vektörü
ε_k	: k'inci Fazın Hacim Oranı
θ	: Düşümlü Napın Yatayla Yaptığı Açısı
κ	: Von Karman Sabiti

KISALTMALAR LİSTESİ

ASMM	: Cebirsel Karışım Kayma Modeli (Algebraic Slip Mixture Model)
BEOWULF	: Birden Fazla Bilgisayarın Paralel Çalıştırıldığı Sistemler
CFD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics)
CSF	: Sürekli Yüzey Kuvveti (Continuum Surface Force)
DPM	: Dağılmış Faz Modeli (Dipersed Phase Model)
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
NA1	: 1. Tip Nap Akımı (Nap Flow 1)
NA2	: 2. Tip Nap Akımı (Nap Flow 2)
NA3	: 3. Tip Nap Akımı (Nap Flow 3)
RCC	: Silindirle Sıkıştırılmış Beton (Roller Compacted Concrete)
SE	: Sonlu Elemanlar
SK1	: 1. Tip Sıçramalı Akım (Skimming Flow 1)
SK2	: 2. Tip Sıçramalı Akım (Skimming Flow 2)
SK3	: 3. Tip Sıçramalı Akım (Skimming Flow 3)
SSB	: Silindirle Sıkıştırılmış Beton
TRA	: Geçiş Akımı (Transition Flow)
USBR	: Amerika Birleşik Devletleri Arazi Islah Bürosu (United States Buro of Reclamation)
VOF	: Akışkan Hacmi (Volume of Fluid)

ÖZET

Doktora Tezi

BASAMAKLI DOLUSAVAKLAR ÜZERİNDE OLUŞAN AKIMLARININ SAYISAL ANALİZİ

Ö. Faruk DURSUN

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

2009, Sayfa: 104

Basamaklı dolusavaklar, akımın enerjisini büyük oranda sönmölemek ve enerji kırıcı havuzun boyutlarını küçölmöktedir. Silindirle sıkıştırma beton barajların yaygın olarak kullanılmasıyla basamaklı dolusavaklara olan ilgi oldukça artmıştır. Bu tip dolusavaklarla, klasik dolusavaklara göre %70-80 oranlarında daha fazla enerji sönmölenmesi mümkün olmaktadır.

Son zamanlarda hesaplamalı yöntemlerdeki gelişmelerle birlikte, ileri sayısal modellerin kullanımı da yaygınlaşmıştır. Basamaklı dolusavaklar konusunda çok sayıda deneysel, az sayıda da sayısal çalışma mevcuttur. Ancak eşikli basamaklı dolusavaklar ile ilgili olarak daha önce yapılmış sayısal bir çalışma mevcut değildir.

Bu çalışmada, hem eşikli hem de eşiksiz basamaklı dolusavakların enerji sönmöleme oranları belirlenmiştir. Eşiksiz basamaklı dolusavaklar için, farklı şüt açıları ve h/l oranları kullanılarak sayısal analizler yapılmıştır. Eşikli basamaklı dolusavaklar için ise, farklı şüt açıları, h/l oranları ve eşik tipleri kullanılarak sayısal analizler yapılmıştır. Sayısal yöntem olarak, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) metodu kullanılmıştır. Analizler, Fluent 6.2 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar mevcut deneysel çalışmalar ve literatürde verilen eşitlikler ile de karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır.

Sayısal analiz sonuçlarının, deneysel çalışmalarla elde edilen sonuçlara yakın değerler olduğu belirlenmiştir. Böylece kullanılan sayısal yöntemin güvenilir olduğu sonucuna varılmıştır. 30° şüt açılı model için yapılan sayısal analizlerde dördüncü tip eşğin, 50° şüt açılı model için yapılan sayısal analizlerde ise, eşiksiz basamaklı tipin enerji sönmölenme oranlarının daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Basamaklı dolusavak, Enerji sönmöleme, Eşik, HAD, Sayısal analiz.

ABSTRACT

PhD Thesis

NUMERICAL ANALYSIS OF FLOW OVER STEPPED SPILLWAYS

Ö. Faruk DURSUN

Firat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

2009, Page: 104

Stepped spillways dissipate highly energy of the flow and decrease the sizes of stilling basin. Popularity of stepped spillways increase widely with using the roller compacted concrete dams. These type spillways have energy dissipation capacity %70-80 ratio more than classical spillways.

In the recent times computational methods were developed and thus using of advanced numerical models became widespread. Studies related to stepped spillways exist in the literature. But, studies about the numerical analysis of the stepped spillways are less. Moreover, the stepped spillways with end sill don't exist in the literature.

In this study, energy dissipation ratio of both stepped spillways with end sill and stepped spillways without end sill were examined. For stepped spillways, numerical analyses were made for different slope angles and ratios of h/l . For stepped spillways with end sill, numerical analyses were conducted for different slope angles, different ratios of h/l and different types of sill. Computational Fluid Dynamics (CFD) was used as a method of numerical study. Analyses were made using of the Fluent 6.2 software. Results obtained from numerical analyses were compared those of with equation in the literature and the results were interpreted.

It is concluded that, results of numerical analyses are very close to experiment results. It is demonstrated that, numerical analysis results of the stepped spillways are reliable. At the slope angle with 30° , Type 4 has the most energy dissipation ratio. In addition to this, at the slope angle with 50° , the stepped spillway without end sill has the most energy dissipation ratio.

Keywords: Stepped spillway, Energy dissipation, Sill, CFD, Numerical analysis.

1. GİRİŞ

Basamaklı dolusavaklar tarihi yapılarda farklı amaçlarla ve yöntemlerle kullanılmışlardır. Dünyanın en eski basamaklı dolusavağı Yunanistan'daki Akarnania basamaklı dolusavağı olup, M.Ö. 1300'de inşa edilmiştir [1].

Barajların dolusavaklarından bırakılan akımların sahip oldukları potansiyel enerjilerinin, basamak ucunda oluşturacağı kinetik enerjinin sönmülmesi amacıyla genellikle enerji kırıcı havuz veya sıçratma eşiği kullanılmaktadır. Ancak enerji kırmak amacıyla inşa edilen büyük düşüm yatağı boyutları nedeniyle maliyet artmaktadır [2]. Ayrıca dolusavak üzerinde kavitasyon meydana gelmemesi için de ilave maliyetler gerekmektedir. Bu gibi sorunların çözülmesi amacıyla özellikle son yıllarda yeni inşa metotlarının da geliştirilmesiyle basamaklı dolusavaklar yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır [3].

Bazı durumlarda sağ ve sol sahilde dolusavak yerleştirmek için uygun yer olmayabilir. Bu durumda dolusavağı gövde üzerine yerleştirmek en uygun çözüm olmaktadır. Bu tür baraj yerlerinde basamaklı dolusavak kullanmak çok avantajlı olmaktadır.

Basamaklı dolusavaklar, inşasının kolaylığı, kavitasyon risk potansiyelini azaltması, şüt boyunca önemli miktarda enerji sönmülmesi ve barajın mansap topuğundaki enerji kırıcı havuzun boyutlarını küçültmesi gibi avantajlara sahiptir [4]. Bu tip dolusavaklar genellikle büyük taşkın debisine sahip olmayan barajlarda, özellikle silindirle sıkıştırılmış beton barajlarda kullanılmaktadır. Silindirle sıkıştırılmış beton barajlar (SSB), düşük çimento ve su muhtevası ile inşa edilirler. Kamyonlarla şantiye sahasına taşınan beton, greyder veya dozerler yardımıyla serilir ve silindirlerle de sıkıştırılır. Gövde yükseldikçe barajın platform genişliği azaltılması esnasında basamaklar oluşturulması oldukça kolaydır. Silindirle sıkıştırılmış olan her bir beton katmanı, beton daha taze iken projesine uygun boyutlarda kesilmek suretiyle basamaklar oluşturulmaktadır. SSB barajlar, üzerlerine basamaklı dolusavak oturtulabilmesi için uygun yapılardır. SSB barajların maliyet, inşa kolaylığı ve süresi yönüyle sahip olduğu avantaja bir de basamaklı dolusavakların getirdiği avantajlar eklenince bu tür yapıların popülaritesi artmıştır. Ülkemizde inşası devam eden Çine ve Cindere Barajları, basamaklı dolusavağı olan Silindirle Sıkıştırılmış Barajların ilk örnekleridir.

Basamaklı dolusavaklarda Essery ve Horner [5] tarafından yapılan çalışmalar sonucunda nap akımı olarak adlandırılan akım tipinin meydana geldiği belirlenmiştir. Wilhems ve Gulliver [6], düşülerde yapmış oldukları deneysel çalışmalarda oksijen ve nitrojen gibi atmosferik gazların basamaklar vasıtasıyla transferinin meydana geldiğinin gözlemlemişlerdir. Peyras [7] yapmış olduğu çalışmalarla, basamaklı dolusavakların klasik dolusavaklara göre %10-30 arasında akımın enerjisini daha fazla sönmlediğini ve bunun da enerji kırıcı yapının maliyetini %5-10 civarında azaltacağını ifade etmiştir. Boes [8] tarafından 1999 yılında yapılan

deneysel çalışmalarda, yüksek şüt açılarında basamaklı dolusavakların klasik dolusavaklara göre çok daha fazla akımın havalanmasını sağladığı ifade edilmiştir. Boes [9] tarafından 2000 yılında yapılan deneysel çalışmalarda ise büyük basamakların küçük basamaklara göre daha fazla enerji sönümlene kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir. Stephenson [10] yaptığı çalışmalarda, basamaklı dolusavağın en son basamağını genişleterek enerji sönümlenme oranının arttığını belirlemiştir. Bu durumun ise, enerji kırıcı yapının boyutlarını küçülttüğünü ve maliyeti azalttığını ifade etmiştir. Frizell [11], klasik ve basamaklı dolusavakları karşılaştırmıştır. Basamaklı dolusavakların enerji kırıcı havuz uzunluğunu %21 oranında azalttığını ifade etmiştir. Chanson [12] yaptığı deneysel çalışmalarda büyük debi miktarlarında sıçramalı akım olarak adlandırılan bir akım türünün meydana geldiğini tespit etmiştir. Chamani ve Rajaratnam [13] tam gelişmiş sıçramalı akıma sahip deney modelleri oluşturarak deneysel çalışmalar yapmışlar ve akımın enerjisinin %48–63 arasında değişen oranlarda sönümlendiğini belirlemişlerdir. Boes ve Hager [14], basamaklı dolusavaklarda oluşan nap ve sıçramalı akımı incelemişler sıçramalı akım halinde enerji sönümlenme oranlarının daha fazla olduğu sonucuna varmışlardır. Baylar ve diğ. [15,16,17,18] basamaklı kanalların oksijen transfer verimini araştırmışlardır. Basamaklı dolusavakların ve kaskatların oksijen kazanımı açısından çok etkili olduğunun vurgulamışlardır. Boes ve Hager [19], basamaklı dolusavakların tasarım kriterlerini belirlemek amacıyla deneysel çalışmalar yapmışlar ve bazı karakteristik özelliklerin belirlenmesine yardımcı olması için eşitlikler sunmuşlardır. Ohtsu ve diğ. [20] tarafından sıçramalı akım karakteristiklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan deneysel çalışmalarda, 19° şüt açılı modelde en yüksek enerji sönümlenme oranlarına ulaşıldığı ifade edilmiştir. Kaş [21] tarafından yapılan yüksek lisans tezinde, farklı şüt eğimli basamaklı dolusavak modelleri için deneysel çalışmalar yapılmış ve bu modellere ait enerji sönümlenme oranları ile mansap havuzunda meydana gelen hidrolik sıçrama boyutları ölçülmüştür. Basamaklı dolusavaklar ile mansap havuzunda meydana gelen hidrolik sıçrama boylarının %15-50 oranında azaltılabileceği belirtilmiştir.

Yukarıda da ifade edildiği gibi basamaklı dolusavakların hidroliği ve tasarımı ile ilgili özellikle deneysel çalışmalar olmak üzere literatürde birçok çalışma mevcuttur. Basamaklı dolusavakların sayısal yöntemlerle analizi üzerine çok çalışma mevcut değildir. Bu çalışmada hem eşiksiz hem de eşikli, basamaklı dolusavakların hidrolik karakteristiklerini sayısal yöntemlerle analiz etmek amaçlanmıştır. Bu bağlamda 30°, 51.3° ve 60° taban açlarına ve 0.577, 1.250 ve 1.732 h/l oranlarına sahip eşiksiz basamaklı dolusavak modelleri seçilmiş ve detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Aynı şekilde 30°, 40° ve 50° taban açlarına ve 0.577, 0.839 ve 1.192 h/l oranlarına sahip altı farklı tip eşikli basamaklı dolusavaklar için de sayısal analizler yapılmıştır.

Bu sayısal analizler yapılırken Fluent yazılımı kullanılmıştır. Ayrıca, sayısal çözümleri test etmek amacıyla literatürde mevcut deney sonuçları ile de karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu çalışma ile; yaygın olarak kullanılan basamaklı dolusavakların özellikle enerji sönümleme oranları, farklı şüt açısı ve h/l oranı, eşikli ve eşiksiz tipler için incelenmiştir.

2. BASAMAKLI DOLUSAVAKLAR

Basamaklı dolusavaklar, silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) barajların inşa tekniklerinin gelişmesiyle son otuz yıldır popülaritesini yeniden kazanmıştır. Bir basamaklı şüt, SSB ağırlık barajların mansap yüzünde ekonomik ve pratik olarak inşa edilebilir. Diğer yaygın bir uygulama ise, acil durumlarda baraj kretinin üzerinden taşkın debisini güvenle geçirmek amacıyla basamağın, dolgu barajın mansap yüzüne yapılmasıdır. Basamaklı dolusavak, kretten başlayıp topuğa kadar inen bir basamak dizisi olup, bir barajın standart taşma bölgesidir. Geçiş basamakları olarak da isimlendirilen daha küçük basamaklar ise, su jetinin sapma riskini yok etmek için kret civarına yapılırlar. Geçiş basamakları teğet noktasının altında düzenli bir basamak yüksekliği olacak şekilde projelendirilir.

Basamaklı dolusavakların bazı avantajları; inşasının kolaylığı, kavitasyon risk potansiyelini azaltması ve şüt boyunca önemli miktarda enerji sönmemesi nedeniyle barajın mansap topuğundaki enerji kırıcı havuzun boyutlarını küçültmesi şeklinde sıralanabilir.

Basamaklı dolusavak üzerindeki akımın yapısı doğada çok karmaşıktır. Bunlar üzerindeki akım rejimleri; nap akımı ve sıçramalı akımdır. Nap akımında ise her bir basamakta nap oluşur ve akım nehir rejimindedir. Sıçramalı akımda ise basamaklar tamamen batmıştır ve nap oluşmaz, dolayısıyla akım sel rejimindedir. Bir başka ifadeyle; verilen bir basamaklı dolusavak geometrisi için akım modeli, düşük akım oranında nap akımı, ara debiler için geçiş akımı ve büyük akım oranında ise sıçramalı akım olmaktadır [22].

2.1 Basamaklı Dolusavakların Tarihçesi

Dünyanın en eski basamaklı dolusavağının Yunanistan'daki Akarnania basamaklı dolusavağı olduğu tahmin edilmektedir. M.Ö. 1300'de inşa edilmiştir. Savak toprak dolgudur, 25 m'lik uzun kretiyle 10,5 m yüksekliğindedir [1].

Diğer eski basamaklı dolusavaklar; Irak'taki Khosr Nehri barajları (ya da Ajilah Barajı) dır. Barajlar Aşiran Krallığı Sennacherib civarında M.Ö. 694'te inşa edilmişlerdir. Her iki baraj da mansap yüzü basamaklı ve nehri kretleri üzerinden uzaklaştırmayı amaçlayan özelliktedir.

Etkileyici bir yapı da Kasserine Barajı'dır. Üstten aşmalı dolusavak 150 m uzunluğundaki kretin üzerine yapılmıştır. Roma İmparatorluğu'nun yıkılmasının ardından, Müslüman inşaat mühendisleri Nabateans, Romans ve Sabaens'ten deneyim kazanmışlardır. Irak'ta (Adheim gibi), İran'da (Khajou gibi), Suudi Arabistan'da (Darwaish gibi) ve İspanya'da (Mestella Savağı gibi) basamaklı dolusavaklı barajlar inşa edilmiştir.

İspanyalı mühendisler, Roma İmparatorluğu zamanında ve daha sonra Müslüman mühendislerce yapılmış olan yapıları kullanmaya devam etmişlerdir. Aynı zamanda yeni

savaklar ve basamaklı dolusavağa sahip barajlar inşa etmişlerdir. Almansa Barajı, Alicante Barajı, Barrarueco de Abajo Barajı gibi, 1400 ve 1850 yılları arasında inşa ettikleri barajlar İspanyol mühendislerin dünya standartlarının üzerindeki ustalıklarının eserleridir.

Bu barajlara ek olarak bazı eski ahşap ve ızgaralı bentten, üstten aşmalı tiplerde de basamaklı dolusavaklar kullanılmıştır. 1800–1920 periyodu boyunca ahşap barajlar Amerika’da, Avustralya ve Yeni Zelanda’da çok sık kullanılmıştır. Ahşap barajların çoğu 3 ile 10 m arasındadır, fakat daha büyük olanları ise 30 m yüksekliğe kadar başarıyla inşa edilmişlerdir.

Teknolojideki gelişmeler; çok yüksek barajların, daha büyük hacimli rezervuarların ve yağmursuyu ve sulama kanallarının inşasında artışlara neden olmuştur. Bu durum yeni tasarımların geliştirilmesini ve yeni inşa tekniklerini de beraberinde getirmiştir. Geçmişte olduğu gibi günümüzde de şütler ve dolusavaklar, kendi yapılarına ve çevrelerine zarar vermeden, hidrolik yapı üzerinden (baraj, kanal vb.) büyük su kütlelerini emniyetli bir şekilde mansaba akıtmak için basamaklar kullanarak tasarlanmaktadır.

Dolusavaktan akan taşkın suyu açık kanal akımı veya serbest düşmeli jet gibi akar ve baraj mansap topuğuna, çevresine ve böylece barajın kendisine zarar verir. Bunu önlemek için akımın kinetik enerjisinin büyük kısmının sönmülmesi gereklidir. Enerji sönmeme; yüksek hıza sahip su jetini sıçratma eşiğinden akıtmak, su yastığı gibi davranan mansap dalma havuzuna çarptırmak, akım enerjisinin büyük kısmını sönmek için yapılan hidrolik sıçramanın olduğu yerde dolusavak mansabına enerji kırıcı havuz yapmak (USBR Tip I, II, III ve IV tasarımı) ya da enerji sönmülmesine yardımcı olması amacıyla dolusavak üzerine basamak inşa etmek gibi metotlarından biri ile yapılmaktadır. İlk iki metotta enerji sönmeme, sırası ile mansap ucunda, dalma havuzunda ve enerji kırıcı havuzda gerçekleşir. Basamaklı dolusavakta ise, basamaklar şüt boyunca olduğundan enerji sönmeme de şüt boyunca gerçekleşir ve mansap ucundaki enerji sönmeyicilerin boyutları küçülmektedir. Pürüzlü ya da basamaklı taban üzerinden akan su yüksek türbülanslıdır ve böylece enerjisinin büyük kısmı sönmülür.

Basamaklı kanallar debi kapasitesini arttırmak için de tercih edilmektedir. Kuzeydoğu Avustralya’da, basamaklı derivasyon kanalları inşa edilmiştir. Yapay basamaklı kaskatlar ve düşü yapıları, nehir ve akım boyunca suyun çözünmüş oksijen içeriğini arttırmaktadır. Kontrol barajları, akarsu yataklarının yüksek eğimli kısımlarının eğimini azaltmak, enerji sönmülmesini sağlamak ve yıkıntı akımının başlamasını önlemek gibi amaçlarıyla ve kaskatlar ($h=0.5$ m den 5 m ye kadar) tercih edilmektedir.

2.2. Akım Rejimleri

Basamaklı şüt, tersine çevrildiğinde düşü serisi olan bir açık kanal şeklindedir. Verilen bir geometri için, akım modeli düşük akım oranında nap akımı, ara debiler için geçiş akımı ve büyük akım oranlarında ise sıçramalı akım meydana gelmektedir.

Düşük akımda (nap akım rejimi vb.), toplam düşü daha küçük serbest düşülere bölünebilir. Su, bir basamaktan diğerine akım serisi halinde ilerler. Her basamaktaki akım alt basamağa düşen jet gibi çarpar, bazen hidrolik sıçramayı takip eder. Enerji sönümlenmesi, havada jetin dağılması ile jetin basamağa etkisiyle ve basamakta tamamen veya kısmi hidrolik sıçrama oluşmasıyla meydana gelir. Küçük barajlar üzerinde, düşük oranda bir enerji sönümlenmesi gerçekleşir [23,7,24]. Nap akımında basamak yüksekliğinin büyük olması gerekir. Bu durum pratik olmamakla beraber düşük akım oranları veya düz basamaklı kanallar için uygulanabilir.

Verilen bir basamak geometrisi için akım oranındaki artışla, nap akımı ve sıçramalı akım arasında bir ara akım modeli yani geçiş akımı meydana gelmektedir. Geçiş akımı, su sirkülasyonu yapan bir havuza (bazen küçük bir hava boşluğuna) püskürtme ile ve durgunluk noktasının mansabındaki suyun yolunu değiştirmesi ile tanımlanmaktadır. Geçiş akım modeli, her bir basamakta ve bir basamaktan bir sonrakine akım özelliklerinin boylamsal değişimini göstermektedir. Bu akım çok düzensizdir ve sıçramalı akımı temsil etmez. Sıçramalı akım rejiminde, su basamak yüzünden aşağıya doğru uygun akım şeklinde basamaklardan sıçrayarak akar. Basamakların dış kenarları, akımın geçtiği yerde bir hayali çizgi oluşturur. Menba ucunda, akım düzenlidir ve hava girişi olmaz. Birkaç basamaktan sonra akım güçlü bir hava girişi ve basamak ucundaki çevrintiler ile kaplanır. Akımın enerjisinin sönümlenmesi, akışkanın çevrintisine momentum transferini arttırmak yoluyla yapılır [25]. Büyük barajlarda sıçramalı akım, nap akımına göre daha fazla akım geçirmektedir.

Basamaklı akım rejiminin tipi, debiye ve basamak geometrisine bağlıdır.

Chanson [4] tarafından verilen sonuçlar, nap akımının üst limitinin;

$$\frac{d_c}{h} = 0.89 - 0.4 \frac{h}{l} \text{ Nap akımı- Geçiş akımı} \quad (2.1)$$

ile yaklaşık olarak bulunabileceğini göstermiştir. Burada, d_c kritik derinlik, h ise basamak yüksekliğidir. Sıçramalı akımın alt limiti ise;

$$\frac{d_c}{h} = 1.2 - 0.325 \frac{h}{l} \text{ Geçiş akımı- Sıçramalı akım} \quad (2.2)$$

şeklindedir. Chanson [22] aşağıda verilen iki konuya da dikkat edilmesi gerektiğini vurgulamıştır:

1. (2.1) ve (2.2) nolu denklemler h/l oranının 0.05 ile 1.7 ($3.4 < \alpha < 60^\circ$) aralığındaki düz yatay basamaklar için çıkarılmıştır. Bu aralık dışındaki doğruluğu hakkında herhangi bir bilgi yoktur ve hassaslık $\pm \% 10$ civarındadır.
2. (2.1) ve (2.2) nolu denklemleri sadece üniform veya hemen hemen üniform olan akımların akım rejimindeki değişimi tanımlarlar. Çabuk değişen akımlar için, sonuçlar güvenilir değildir.

2.2.1 Nap Akım Rejimi

Verilen düz bir basamağın geometrisine göre, düşük akımlar mansap basamakları üzerindeki nap etkisi ile serbest düşmeli jetler gibi davranırlar. Her bir basamağın menba ucunda ise akım, serbest düşmeli nap, hava boşluğu ve akışkan çevrinti bölgesi ile karakterize edilebilir. Dik şütlerin sıçramalı akımı üzerine bir çok araştırma yürütülmekle beraber, nap akım hidroliğine daha az ilgi çekilmiştir.

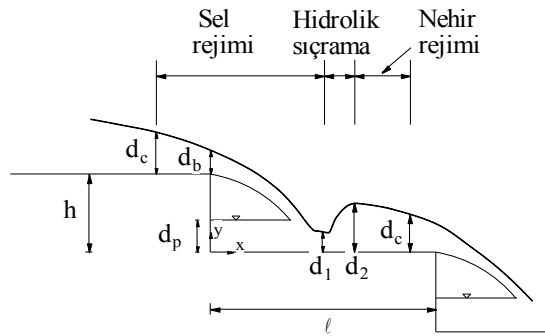
2.2.1.1 Nap Şeklinin Hesaplamaları

Yatay bir basamak için, nap şeklinin basit bir ifadesi hareket denkleminde çıkarılır. Havalandırılmış bir nap göz önüne alınırsa, basamağın kenarındaki akım yönü yaklaşık olarak yataydır ve napın merkezindeki şekil denklemleri;

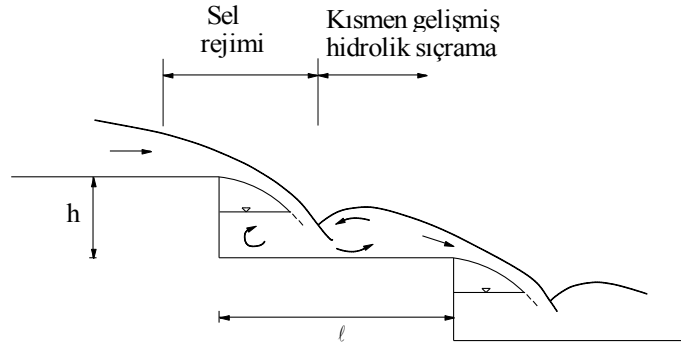
$$x = V_b \cdot t \quad (2.3)$$

$$y = h + \frac{d_b}{2} - \frac{1}{2} g t^2 \quad (2.4)$$

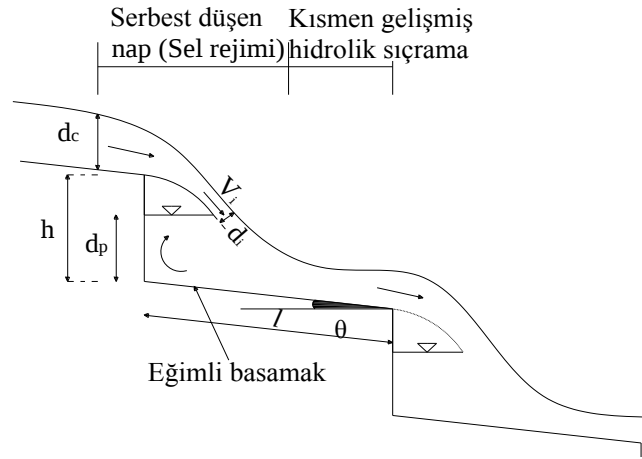
elde edilir. Burada; V_b basamak kenarındaki akım hızı, t zaman, h basamak yüksekliği ve d_b basamak kenarındaki akım derinliğidir (Şekil 2.1, 2.2 ve 2.3).



Şekil 2.1 Tam gelişmiş hidrolik sıçramalı nap akımına ait şematik gösterim.



Şekil 2.2 Kısmen gelişmiş hidrolik sıçramalı nap akımına ait şematik gösterim.



Şekil 2.3 Hidrolik sıçramasız nap akımına ait şematik gösterim.

Şekil 2.1, 2.2 ve 2.3'te sırasıyla; tam gelişmiş hidrolik sıçramalı, kısmen gelişmiş hidrolik sıçramalı ve hidrolik sıçramasız nap akımlara ait şematik gösterimler verilmiştir.

Düşü uzunluğu L_d ve nap etkisi koşulları şekil denklemlerinden çıkarılır:

$$\frac{L_d}{h} = \left(\frac{d_c}{h} \right)^{3/2} \sqrt{\frac{h}{d_b}} \sqrt{1 + 2 \frac{h}{d_b}} \quad (2.5)$$

$$\frac{d_i}{d_c} = \left(\left(\frac{d_c}{d_b} \right)^2 + 2 \frac{h + \frac{d_b}{2} - d_p}{d_c} \right)^{-1/2} \quad (2.6)$$

$$\frac{V_i}{V_c} = \sqrt{\left(\frac{d_c}{d_b} \right)^2 + 2 \frac{h + \frac{d_b}{2} - d_p}{d_c}} \quad (2.7)$$

$$\tan \theta = \sqrt{2} \sqrt{\frac{d_b}{d_c}} \sqrt{\frac{h + \frac{d_b}{2} - d_p}{d_c}} \quad (2.8)$$

Burada, d_i ve V_i nap kalınlığı ve düşen napın mansap havuzu ile kesiştiği yerdeki akım hızı, d_p havuz yüksekliği ve düşümlü napın yatayla yaptığı açıdır (Şekil 2.3). Basamak yüzeyi boyunca Momentum Denklemi;

$$\frac{1}{2} \rho_w \cdot g \cdot d_p^2 - \frac{1}{2} \rho_w \cdot g \cdot d_i^2 = \rho_w \cdot q_w \cdot (V_i - V_i \cdot \cos \theta) \quad (2.9)$$

bulunur. Jet akışkanının kenarlarının püskürtülmüş kısımlara parçalanmadığı ve yüzeydeki kesme kuvvetlerinin ihmal edildiği farz edilmektedir. Kontrol hacmine giriş hızının çıkış hızıyla aynı olduğu farz edilirse;

$$\frac{d_p}{d_i} = \sqrt{1 + 2 \frac{V_i^2}{g \cdot d_i} (1 - \cos \theta)} \quad (2.10)$$

elde edilir. Düşü tabanındaki enerji kaybı için uyguladığı metot kullanılarak, düşü temelindeki momentum denkleminin uygulaması:

$$\frac{d_1}{d_c} = \frac{2 \cdot Fr_b^{-2/3}}{1 + \frac{2}{Fr_b^2} + \sqrt{1 + \frac{2}{Fr_b^2} \left(1 + \frac{h}{d_c} Fr_b^{2/3} \right)}} \quad (2.11)$$

olarak bulunur. Burada Fr_b hemen düşü kenarının menbasındaki Froude sayısıdır. 3'ten 11'e denklemlerin hepsi nap akımının her çeşidi için geçerlidir ki bu nehir ve sel rejimi için akım durumlarıdır.

Nap akımı üç tip olarak ayırt edilebilir. Bunlar: düşük akım oranlarında gelişen hidrolik sıçramalı nap akımı (nehir rejimi NA1), kısmi gelişen hidrolik sıçramalı nap akımı (nehir rejimi NA2), ve hidrolik sıçramasız nap akımı (nehir rejimi NA3) dır (Şekil 2.1, 2.2, 2.3).

Üst basamakların eğimli kısımları üzerinde ve yatay basamaklar üzerindeki nap akımı hidrolik sıçramanın varlığı ile karakterize edilir (nehir rejimi NA1 ve NA2). Nehir rejimi NA1'de meydana gelen akım tipleri; her bir basamakta serbest düşmeli naptan hidrolik sıçrama meydana gelen kısma kadar sel rejimi, sıçramanın mansabında nehir rejimi ve basamak kenarında kritik akım şeklindedir (Şekil 2.1). Hidrolik sıçramasız bir nap akımı (nehir rejimi NA3) geçiş akımının oluşumundan önce ve daha büyük debilerde meydana gelir. Nehir rejimi NA3 düz yatay basamaklar üzerinde ve daha çok mansaba doğru eğimli basamaklı kanallar üzerinde gözlenmiştir (Şekil 2.2, 2.3). Bu akım tipinde hidrolik kontrol meydana gelmez (kritik akım vb.) ve akım herhangi bir pozisyonda sel rejimindedir. Ayrıca şok dalgaları, yan cidar dalgaları gibi üç boyutlu akım modelleri gözlenebilir [26,27].

Nap akımının hidrolik analizi, hidrolik sıçramanın oluşup, oluşmamasına göre farklılık gösterir. Önceki durumda, her bir basamak kenarında kritik akım ortaya çıkar ve akım, bir düşü serisi gibi analiz edilir. Hidrolik sıçramasız nap akımı için, sel rejimi analizi daha karmaşıktır.

Nap akım ile nehir rejimi arasında geçiş

Chanson, düz yatay basamaklarda hidrolik sıçramalı nap akım rejimi (nehir rejimi NA1) için bir şart geliştirmiştir [28]. Bu şart düşü uzunluğu ve hidrolik sıçrama uzunluğu üzerine temellendirilmiştir:

$$\left(\frac{d_c}{h}\right) < 0.0916 \left(\frac{h}{l}\right)^{-1.276} \quad \text{Nap akımı nehir rejimi (NA1)} \quad (2.12)$$

Burada h ve ℓ sırasıyla basamak yüksekliği ve uzunluğudur. Bu eşitlik $0.2 \leq \frac{h}{\ell} \leq 6$ aralığı için elde edilmiştir. Sonuçlar NA1 nehir rejiminin yalnızca dik eğimler üzerindeki çok düşük debilerde meydana geldiğine işaret etmektedir $\left(\frac{h}{l} > 0.5\right)$.

Napın havalandırılması ve salınımı

Düşen nap, suyun alındığı havuzla kesiştiğinde, jetin alt kenarı ve havuzun kesiştiği yerde hava girişi olur. Katılan hava napın altına hava boşluğundan sürüklenir. Nap ile düşey basamak arasındaki boşluk havalandırılmazsa basınç düşer ve nap salınımları oluşmasıyla boşluktaki basınç atmosferik basıncın altına düşer.

Nap salınımları

Serbest akımlı dolusavaklar üzerindeki çok düşük debi değerlerinde meydana gelen akım olayı nap salınımı olarak adlandırılabilir. Bu titreşim kararsızlığına Kelvin-Helmholtz kararsızlığı da denir. Bu kararsızlık halinde meydana gelen titreşim frekansı yapının doğal frekansına yakın olmadığı sürece yapının stabilitesi açısından tehlike azdır. Aksi durumda meydana gelen titreşimler yapının zarar görmesine neden olabilir.

Nap salınımları napın altındaki boşlukta hava hareketi engellenerek kontrol edilir. Hava-su sisteminin doğal frekansı su kütlesine ve engellenen havanın hacmine bağlıdır. İlk yaklaşım olarak, yatay bir basamaktan ayrılan napın F salınımlarının mümkün olan frekansı;

$$\frac{F}{\sqrt{\frac{g}{d_c}}} = 0.715 \frac{I + \frac{1}{4}}{-i + \sqrt{1 + 0.022 \frac{h}{d_c}}} \quad (2.13)$$

ile tahmin edilebilir. Burada h basamak yüksekliği ve I bir tamsayıdır: $I=1,2,3,4,5$ veya daha büyük salınımlı nap için, naptaki dalga uzunluğu sayısı I tamsayısı ile ifade edilir.

Nap yarıcılarını nap salınımlarını kontrol etmek için kullanılabilir [29, 30, 31]. Nap yarıcılar düzenli aralıklarla krete yerleştirilebilir. Her bir yarıcı napta hava geçişini sağlamak amacıyla bir geçit oluşturmaktadır. Nap yarıcılarının 0.2 ile 0.75 m yüksekliğinde olması gerekir. Basamaklı savak, sıçramalı akımı idare etmek için dizayn edilmiş olup bu durum baraj kreti boyunca (0.6 m yüksekliğinde) yarıcılarının tertibatı ile düzeltilmiştir. Diğer metotlar kret pürüzlülüğünü ya da kret profilinin modifikasyonlarını içeren nap stabilitesizliğini önlemek içindir.

Pratik olarak basamaklı dolusavaklardaki birçok nap akımı durumları kısa düşülü naplarla karakterize edilir. Nap havalandırması yetersiz ise, küçük yan duvar çıkıntılarıyla akım havalandırılabilir. Böylece, kavitasyon riski azaltılmış ve daha fazla enerji sönümlenmiş olur.

Nap havalandırılması

Yapay havalandırma gerekli olduğunda, hava akımı oranı;

$$\frac{q_{hava}}{q_w} = 0.19 \left(\frac{h - d_p}{d_b} \right)^{0.95} \quad (2.14)$$

ile tahmin edilebilir. Burada q_{hava} nap havalandırılmasıdır. Bu eşitlik Levin'in tabandaki havalandırma deliği ve nap havalandırılması çalışmasından çıkarılmıştır. Havalandırma sistemi, maksimum debiden daha küçük akım oranları için tasarlanmıştır.

2.2.1.2 Hidrolik Sıçramalı Nap Akımın Hidrolik Karakteristikleri

Temel akım özellikleri

Hidrolik sıçramalı nap akımı, her bir basamak kenarında kritik akım durumları oluşması ile karakterize edilir. Yatay basamaklardaki akım özellikleri, bir düşü dizisi olarak analiz edilebilir. Yatay bir basamak göz önüne alındığında basamağın ucu civarındaki akımın basamağın kenarında nehir rejiminden kritik akıma geçtiği görülecektir. Kenardaki basınç dağılımı, sıvı ivmesi ve akım derinliği d_b ' den dolayı, hidrostatik basınç dağılımından ayrılır.

$$d_b = 0.715 \cdot d_c \quad (2.15)$$

Burada d_c kritik akım derinliğidir [32]. Mansaptaki nap etkisinin veya nap çarpmasının akım özellikleri momentum kabulünden çıkarılabilir. Pratikte aşağıdaki bağıntılar tavsiye edilir:

$$\frac{d_1}{h} = 0.54 \left(\frac{d_c}{h} \right)^{1.275} \quad (2.16)$$

$$\frac{d_2}{h} = 1.66 \left(\frac{d_c}{h} \right)^{0.81} \quad (2.17)$$

$$\frac{d_p}{h} = \left(\frac{d_c}{h} \right)^{0.66} \quad (2.18)$$

$$\frac{L_d}{h} = 4.30 \left(\frac{d_c}{h} \right)^{0.81} \quad (2.19)$$

$$\frac{d_i}{h} = 0.687 \left(\frac{d_c}{h} \right)^{1.487} \quad (2.20)$$

$$\tan \theta = 0.838 \left(\frac{d_c}{h} \right)^{-0.586} \quad (2.21)$$

Burada d_p ; düşü jetinin arkasındaki havuzdaki suyun yüksekliği, d_1 ; mansaptaki nap etkisinin sel rejimindeki akım derinliği, d_2 ; mansaptaki hidrolik sıçramanın nehir rejimi derinliği, L_d ; düşü duvarından d_1 derinliğinin konumuna olan mesafe, d_i ; çarpmadaki nap kalınlığı, θ ; yatayla napın yaptığı açıdır.

Mansaptaki nap etkisi, tamamen-geliştirilmiş hidrolik sıçramanın uzunluğu;

$$\frac{L_r}{d_1} = 8 \left[\left(\frac{d_c}{d_1} \right)^{3/2} - 1.5 \right] \quad (2.22)$$

ile tahmin edilebilir. Burada L_r ; hidrolik sıçramanın uzunluğudur [33].

Yukarıdaki hesaplamalar (denklem (2.15) ten (2.22) eşitliğine kadar) havalandırılmış naplar ve düz yatay basamaklar için geliştirilmiştir. Bunlar eğik yüzeyli basamaklar ve havuz basamakları için geçerli değildir.

Enerji sönümlemesi

Hidrolik sıçramalı nap akımında, aradaki herhangi bir basamaktaki enerji kaybı basamak yüksekliğine eşittir. Şüt boyunca toplam enerji kaybı ΔH maksimum enerji değeri $H_{\max}$ ile kanalın ucunda mansapta biriken enerji arasındaki farktır. Sel rejimi akımında biriken enerji;

$$\frac{H_{res}}{d_c} = \frac{H_1}{d_c} = \frac{d_1}{d_c} + \frac{1}{2} \left(\frac{d_c}{d_1} \right)^2 \quad (2.23)$$

eşittir. Burada H_{res} kalan enerjidir. Kanalın ucunda mansaba doğru hidrostatik basınç varmış gibi düşünülür, ancak bu varsayım tam manasıyla doğru değildir. Boyutsuz formda, enerji sönümlenme oranını Chanson [4];

$$\frac{\Delta H}{H_{\max}} = 1 - \left(\frac{\frac{d_1}{d_c} + \frac{1}{2} \left(\frac{d_c}{d_1} \right)^2}{\frac{3}{2} + \frac{H_d}{d_c}} \right) \text{ Kapaksız şüt} \quad (2.24)$$

$$\frac{\Delta H}{H_{\max}} = 1 - \left(\frac{\frac{d_1}{d_c} + \frac{1}{2} \left(\frac{d_c}{d_1} \right)^2}{\frac{H_d + H_0}{d_c}} \right) \text{ Kapaklı şüt} \quad (2.25)$$

eşitlikleri ile verilmiştir. Burada H_d ; mansap topuğu üzerinden kret yüksekliği ve H_0 ; şüt kreti üzerinden rezervuarın serbest-yüzey yükseltisidir. Biriken enerji $H_{\text{res}} = H_{\max} - \Delta H$ mansap sönümleme yapısında şütün topuğunda sönümlenir.

(2.16) ve (2.22) eşitlikleri birleştirilerek, toplam enerji kaybı,

$$\frac{\Delta H}{H_{\max}} = 1 - \left(\frac{0.54 \left(\frac{d_c}{h} \right)^{0.275} + \frac{3.43}{2} \left(\frac{d_c}{h} \right)^{-0.55}}{\frac{3}{2} + \frac{H_d}{d_c}} \right) \text{ (kapaksız şüt için)} \quad (2.26)$$

$$\frac{\Delta H}{H_{\max}} = 1 - \left(\frac{0.54 \left(\frac{d_c}{h} \right)^{0.275} + \frac{3.43}{2} \left(\frac{d_c}{h} \right)^{-0.55}}{\frac{H_d + H_0}{d_c}} \right) \text{ (kapaklı şüt için)} \quad (2.27)$$

haline gelir. (2.26) ve (2.27) nolu eşitlikler, hidrolik sıçramasız nap akım rejimi içindir (NA3).

Akımın enerjisinin çoğu, büyük barajlarda, basamaklı şütler üzerinde sönümlenmektedir. Verilen bir baraj yüksekliği ve basamak geometrisi için, debinin yükselmesiyle birlikte enerji sönümlenme oranı düşmektedir.

2.2.1.3 Hidrolik Sıçramasız Nap Akımının Hidrolik Karakteristikleri

Hidrolik sıçramasız nap akımında, herhangi bir noktada akım aslında sel rejimindedir. Hidrolik sıçramasız nap akım özellikleri analitik hesaplamalarla tahmin edilmesi zordur. En iyi bilgi kaynağı deneysel araştırmalardan elde edilir [34]. Bu kapsamda, Queensland Üniversitesinde, Horner tarafından 1969 yılında [34], Chanson ve Toombes tarafından ise 1997 [26] ve 2001 [2] yıllarında bazı deneyler yapılmıştır.

Boylamsal serbest yüzey profilleri

Hidrolik sıçramasız nap akımı için yapılan bütün araştırmalarda gelen akımın ilk düşüye ve küçük bir havalandırmaya ulaşınca kadar iki boyutlu olduğu gözlenmiştir. İlk düşüde, yoldan sapan nap serbest düşmeli bir jet şeklindedir. Mansap akımı ise yüksek türbülanslıdır. İlk birkaç basamak üzerindeki akım çabucak değişir ve bu bölge akım kuruluş bölgesi olarak adlandırılır. Bu ise üç-boyutlu akım örnekleriyle karakterize edilir: Örneğin; şok dalgaları ve yan cidardaki sürekli dalgalar gibi. Akım kuruluş bölgesinin mansabında, akım tedrici-değişken hale gelir. Basamaktan basamağa akım özelliklerinin değişimi devam eder. Horner [34] bu bölgeyi “üniform bölge” olarak tanımlar. Akım tedrici-değişken akım bölgesindeki herhangi bir noktada sel rejimindedir.

Enerji sönümlenmesi

Birçok araştırmacı enerji sönümlenme oranını $\Delta H/H_{\max}$ ile ifade etse de, uygulamalı mühendislikte mansabın enerji kırıcı yapısı için tayin edilmesi gereken birikmiş enerjiye ihtiyaç vardır. Chanson [4] tarafından yapılan çalışmalarla, hidrolik sıçramasız nap akımı için deneysel sonuçlardan aşağıdaki denklemler bulunmuştur:

$$\frac{H_{res}}{d_c} = 6.0 \left(\frac{H_d}{d_c} \right)^{-0.30} \quad 2 < \frac{H_d}{d_c} < 20 \quad (2.28)$$

$$\frac{H_{res}}{d_c} = 3.34 \left(\frac{H_d}{d_c} \right)^{-0.027} \quad 30 < \frac{H_d}{d_c} < 75 \quad (2.29)$$

Enerji sönümlenme oranı sürtünme açısı ile de açıklanabilir, $S_f = -\partial H / \partial s$ bağıntısı ile bu oran ifade edilebilir. Sürtünme açısı aslında toplam enerji doğrusunun eğimidir. Sürtünme açısının uyarlanmış biçimi;

$$\frac{S_f}{\frac{1}{8} Fr^2} \quad (2.30)$$

dir. Burada, Fr yerel Froude sayısıdır. Geniş bir kanal için, enerji denklemi,

$$\frac{S_f}{\frac{1}{8} Fr^2} = \frac{\tau_0}{1/8 \cdot e_w \cdot U_w^2} \quad (2.31)$$

şeklinde elde edilir. Burada, τ_0 ; ortalama sınır kesme şiddeti ve U_w ; akım hızıdır. $\Delta H/H_{\max}$ enerji sönümlenme oranı, akım kuruluş bölgesi ve tedrici-değişken akımdaki bütün enerji kaybını karakterize eder. Uyarlanmış sürtünme açısı, tedrici-değişken akım bölgesinde her birim

uzunluk için enerji sönümlenme oranını yansıtmaktadır. Deneysel sonuçlar, nap akımlı basamaklı kaskatlar üzerinde düz şüt akımlarından daha yüksek sönümlenme oranına sahip olduğunu göstermektedir.

2.2.1.4 Nap Akım Rejimindeki Şütlerin Tasarımı

Birçok araştırmacı nap akım ile çalışan basamaklı kaskatlar için tasarım kriteri önermiştir. 20. yüzyılın başlarında, Schoklitsch;

$$\frac{h}{l} = \left(3 + 4.3 \left(\frac{d_c}{h} \right)^{0.81} \right)^{-1} \quad (2.32)$$

şeklinde bir bağıntı tavsiye etmiştir. Son zamanlarda, Güney Afrika’da inşa edilen barajların çoğu, basamaklı dolusavağa sahiptir. Bu tecrübe ile Stephenson [10] nap akım için en uygun durumların tam gelişmiş hidrolik sıçramalı nap akım rejimi (nehir-rejimi NA1) olduğunu ileri sürmüştür. Bu öneriler daha çok geniş basamaklar ve düz eğimleri belirtmektedir. Bu durum pek pratik değildir; fakat nispeten düz dolusavaklara, doğal akımlara, derelere, nehir tırmanışına ve taşkın kanallarına uygulanabilir. Sarp kanallar veya küçük basamak yükseklikleri için, sıçramalı akım rejimi daha caziptir ve daha büyük enerji sönümleme başarılabilir.

Yan cidar yüksekliği

Tasarım mühendisleri, yan cidar yüksekliğini akımın dışa taşmasını engelleyecek şekilde boyutlandırmalıdır. Pratikte, karakteristik hava-su derinliği Y_{90} tasarım parametresi olarak kullanılabilir. Akım kuruluş bölgesinde daha yüksek yan cidar gerektiğine dikkat edilmelidir.

Dolgu yapısının üzerindeki bir basamaklı kanalda, üstten aşmalı olmayan bölgenin erozyon riski hesaba katılmalıdır. Bu durumda tırmanma duvarı yüksekliği Y_{98} karakteristik derinliği ile tahmin edilebilir.

2.2.2 Geçiş Akım Rejimi

Verilen bir basamaklı şüt geometrisi için, akım oranları düşük debilerdeki nap akımı ile büyük akım oranlarındaki sıçramalı akım arasında bir ara akım rejimi vermektedir. Bu ise geçiş akım rejimi olarak bilinmektedir. Nap ve sıçramalı akım arasındaki geçişin güçlü düzensiz hidrodinamik değişim ile karakterize edildiği ileri sürülmüştür. Bu akım durumlarından

akımı ne de sıçramalı akım gibi değildir. Sıçramalı akımda, akım homojen gibi görünmez ve her bir basamak üzerinde, akım özelliklerinde önemli boylamsal değişimler gözlenir.

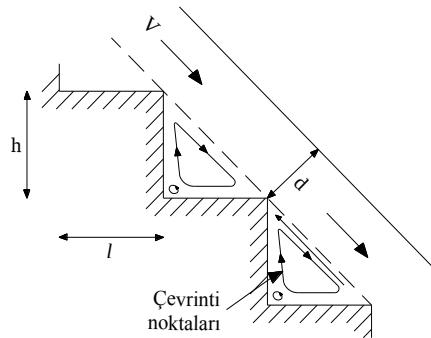
Dik eğimler üzerinde ($\alpha=22^\circ$), menba akımı düz ve şeffaftır. Basamak köşelerindeki bazı havalandırmalar hava girişinin başlangıç noktasının menba kısmında gözlenir. Başlangıç noktasının mansabında önemli sıçramalar meydana gelir. Daha düşük akım oranlarında (örneğin, $d_c/h=0.65$), hava boşlukları napın altında bulunur.

2.2.2.2 Geçiş Akımı İçin Kararsızlıklar

Yapılan deney sonuçlarında her bir basamakta akım özelliklerinin çabuk değişmesinden dolayı geçiş akımının düzensiz bir akım olarak karakterize edildiği ispatlanmıştır. Bu düzensiz değişimlerin basamak yüzlerinde düzensiz basınç değişimleri sonucu olduğu düşünülmektedir. Küçük eğimlerde ($\alpha=22^\circ$), akım durumlarının aralığı ile jet akımlarının yoldan saptırılması arasında ilişki kurulmaktadır. Pratik olarak, basamaklı bir dolusavak geçiş akımı rejiminden kaçınmak için tasarlanmalıdır. Eğer dolusavak dizayn debisinde işletilen sıçramalı akım rejimi gibi dizayn edilirse, kontrolsüz kretteki geçiş akım rejimi kaçınılmaz olacaktır. Geçiş akım rejimi küçük debilerde ortaya çıkmakta ve geçiş akımı (TRA) ile karakterize edilen akım oranları aralığında fiziksel modelleştirmenin yürütülmesi tavsiye edilmektedir [22].

2.2.3 Sıçramalı Akım Hidroliği

Büyük debilerde su, basamaklardan uygun akımla sıçrayarak basamaklı kanaldan aşağı akar. Basamakların dış kenarları akımın sıçradığı yerin üzerinde hayali bir çizgi oluşturur. Hayali çizginin altında dolaşım çevrintileri gelişir (Şekil 2.6). Akım enerjisinin büyük çoğunluğu, çevrintinin dolaşımını korumak için sönmülenir.



Şekil 2.6 Bir basamak üzerinde meydana gelen kavitasyon çevrintili sıçramalı akım rejimi

Menba ucunda, serbest yüzey pürüzsüz ve donuktur. Sınır yakınında türbülans meydana gelir ve bir sınır tabakası gelişir. Sınır tabakasının dış kenarı serbest yüzeye ulaştığında, türbülans nedeniyle doğal serbest yüzey havalandırması başlar. Hava girişinin başladığı konuma

başlangıç noktası denir. Mansapta, akım tamamen gelişmiştir ve hızlı bir serbest yüzey havalandırılması gözlenir. Mansabın uzağında akım üniform dengeye ulaşır ve verilen bir debi için akım derinliği, hava konsantrasyonu ve hız dağılımında şüt boyunca değişiklik olmaz. Bu bölge üniform denge akım bölgesi olarak tanımlanır.

2.2.3.1 Temel Akım Örnekleri

Deneysel gözlemler, ters eğime dayanan sıçramalı akıntının altında birbirinden farklı birçok çevrıntili akım örneği önermişlerdir. Temel akım parametreleri iki komşu basamak arasındaki mesafe ve akım derinliğinden meydana gelmektedir.

Çok küçük eğimlerde ($\alpha < 12^\circ$ ile 15°) akım, bir sonraki basamak üzerindeki karışımın etkisiyle karakterize edilir. Bu akım örneğinde dalga-basamak ara yüzü nehir rejimi olarak adlandırılır (SK1). Daha büyük eğimlerde (12° ile $15^\circ < \alpha < 15^\circ$ ile 25°), dalga bir sonraki karışım tabakasına karışır ve burada küçük sürtünme sürüklenmesi bileşimi oluşur. Bu örnekte ise dalga-dalga ara yüzü nehir rejimi olarak adlandırılır (SK2).

Dik eğimlerde ($\alpha > 25^\circ$ ile 30°), komşu basamakların kenarları arasındaki boşluklarda stabil devir gözlenir. Bu durumda akım örneği, devreden boşluk akımı nehir-rejimi (SK3) olarak adlandırılır.

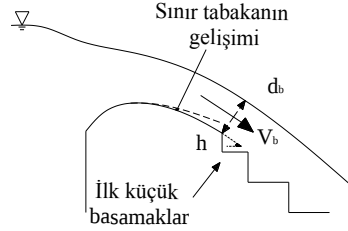
2.2.3.2 Kret Tasarımı ve Jet Akımın Yoldan Sapması

Kret profilinin şekli menba basamakları üzerindeki uygun akım davranışının başarılması için önemlidir. Model ve prototip gözlemleri, menba basamaklarının çok yüksek olması halinde jetin yoldan sapmasının mümkün olduğunu göstermektedir. Jetin saptırılması için analitik konum ise;

$$\frac{d_c}{h} < \frac{Fr_b^{2/3} \sqrt{1 + \frac{1}{Fr_b^2}}}{\sqrt{1 + 2Fr_b^2 \left(1 + \frac{1}{Fr_b^2}\right)^{3/2} \left(1 - \frac{\cos \alpha_b}{\sqrt{1 + \frac{1}{Fr_b^2}}}\right)}} \quad (2.33)$$

ile bulunur. Burada $Fr_b = \frac{V_b}{\sqrt{g \cdot d_b}}$, d_b ; akım derinliği, V_b ; hız ve α_b ; ise düşey ile yatay arasındaki açıdır. Bu eşitlik büyük boyutlu modeller için geçerlidir.

Şekil 2.7, Froude sayısı ve jet açısının bir fonksiyonu olarak jetlerin yoldan saptırılmasının başlangıç durumunu özetlemektedir. Verilen bir debi için, ilk basamak yüksekliği h küçültülerek suyun yoldan sapma riski azaltılabilir. İlk basamak olabildiğince menbaya yakın yerleştirilmeli ve ilk basamak civarındaki profil eğriliği mümkünse değiştirilmelidir.



Şekil 2.7 Jet sapmasının başlaması.

Pratikte, prototipler için farklı dolusavak kret şekilleri kullanılmaktadır: örneğin, geniş-kret (Gold Creek, Aus.), dairesel kret (Le Pont, Fra), ogee kreti (Trigomil, Mex.) gibi. Beton barajlarda, ogee kreti yaygındır. Örnek olarak; Monksville Barajındaki WES profili, M'Bali Barajındaki Creager profili verilebilir. RCC barajlarda beton sağlamak için traktör trafiğine ve silindire sıkıştırılmaya müsaade etmesi amacıyla geniş kret tercih edilir.

2.2.3.3 Akım Rejiminin Gelişmesi ve Hava Girişinin Başlaması

Akım özelliklerinin geliştirilmesi

Akım, dolusavak şütünde yer çekimi kuvveti bileşeni ile akım yönünde ivmelenir. İdeal sıvı akımı için, serbest akım hızı Bernoulli eşitliğinden çıkarılabilir:

$$V_{\max} = \sqrt{2g(H_{\max} - d \cos \alpha)} \quad \text{ideal sıvı akımı} \quad (2.34)$$

Burada, $H_{\max}$; menba toplam enerjisi, α ; kanal eğimi ve d ; akım derinliğidir. Pratikte, sürtünme kaybı oluşur. Menba ucunda, taban sürtünmesi tarafından türbülanslı sınır tabakası oluşturulur ve akım yönünde gelişir. Sınır tabakasının dış kenarının serbest yüzeye ulaştığı yere hava girişinin başlangıç noktası denir. Mansapta, serbest yüzey bitişiğindeki türbülans, doğal yüzey havalanmasını başlatacak büyüklüğe gelir. Başlangıç noktasının karakteristikleri olan L_1 ; sınır tabakasının büyümesinin başladığı yere olan mesafe ve d_1 ; başlangıç noktasındaki derinliktir.

Gelişen akım bölgesinde akım, türbülanslı sınır tabakası ve yukarıda ideal sıvı akım bölgesi içermektedir. Sınır tabakasında, hız dağılımı bir güç kuralını takip eder:

$$\frac{V}{V_{\max}} = \left(\frac{y}{\delta_{BL}} \right)^{1/N} \quad 0 < y/\delta < 1 \quad (2.35)$$

Burada δ_{BL} ; sınır tabakası kalınlığı, y ; hayali çizgiye olan normal mesafe ve $V_{\max}$; ideal sıvı hızıdır.

Su derinliği ile sınır tabakası kalınlığı ve serbest akım hızı arasındaki ilişki, süreklilik denkleminde çıkarılır:

$$q_w = V_{\max} \left(d - \frac{\delta_{BL}}{N+1} \right) \quad (2.36)$$

Burada d ; hayali akım çizgisinden ölçülen akım derinliğidir.

Başlangıç noktası

Başlangıç noktasının yeri debi ve basamak yüksekliğinin bir fonksiyonudur:

$$\frac{L_1}{h \cos \alpha} = f_1(F_*, \alpha) \quad (2.37)$$

$$\frac{d_1}{h \cos \alpha} = f_2(F_*, \alpha) \quad (2.38)$$

Burada F_* ; pürüzlülük yüksekliği terimleriyle ifade edilen Froude sayısıdır.

$$F_* = q_w / \sqrt{g \sin \alpha (h \cos \alpha)^3} \quad (2.39)$$

Burada; $h \cos \alpha$; basamak pürüzlülük yüksekliği ve α ; kanal eğimidir [24]. İstatistiksel verilerin analizi akım özelliklerini en iyi şekilde doğruladığını belirtmektedir:

$$\frac{L_1}{h \cos \alpha} = 9.719 (\sin \alpha)^{0.0796} (F^*)^{0.713} \quad (2.40)$$

$$\frac{d_1}{h \cos \alpha} = \frac{0.4034}{(\sin \alpha)^{0.04}} (F^*)^{0.592} \quad (2.41)$$

Buradan;

$$\frac{d_1}{L_1} = 0.06106 (\sin \alpha)^{0.133} \left(\frac{L_1}{h \cos \alpha} \right)^{-0.17} \quad (2.42)$$

elde edilir. Burada $k_s = h \cos \alpha$ dır. Basamaklı şüt üzerindeki sınır tabakasının büyüme oranının düz kanallar üzerindeki yaklaşıktan yaklaşık 2.8 kat daha büyük olduğuna işaret edilmektedir.

Çok küçük debilerde başlangıç noktası kanalın zirvesi civarında oluşur. Büyük debilerde ise, su kanal boyunca berraktır, serbest yüzey havalandırmasının olmamasının bir işareti; türbülanslı sınır tabakasının dış kenarı kanalın mansap ucundan önce serbest yüzeye ulaşamamasıdır.

Hız dağılımı

Tam gelişmiş hava-su akımında, hız dağılımı bir güç kuralı ile yaklaşık olarak bulunabilir:

$$\frac{V}{V_{90}} = \left(\frac{y}{Y_{90}} \right)^{1/N} \quad (2.43)$$

Burada V_{90} $y=Y_{90}$ 'daki karakteristik hızdır. Düz bir şüt üzerindeki üniform havalandırılmamış akımda Chen hız dağılımının N eksponent ile Darcy Sürtünme Faktörü f arasında teorik bir ilişki çıkarmıştır [35].

$$N = \chi \sqrt{\frac{8}{f}} \quad (2.44)$$

Burada χ ; von Karman Sabitidir ($\chi=0.4$).

Enerji sökülme

Sıçramalı akımda şütün mansap ucunda biriken enerji;

$$H_{res} = d \cos \alpha + \frac{q_w^2}{2gd^2} \quad (2.45)$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada d ; temiz su derinliğidir.

Akımın mansap ucunda üniform dengeye ulaştığı çok uzun şütlerde, toplam enerji kaybı :

$$\frac{\Delta H}{H_{max}} = 1 - \frac{\left(\frac{f}{8 \sin \alpha} \right)^{1/3} \cos \alpha + \frac{1}{2} \left(\frac{f}{8 \sin \alpha} \right)^{-2/3}}{\frac{3}{2} + \frac{H_d}{d_c}} \quad \text{kapaksız şüt} \quad (2.46)$$

$$\frac{\Delta H}{H_{max}} = 1 - \frac{\left(\frac{f}{8 \sin \alpha} \right)^{1/3} \cos \alpha + \frac{1}{2} \left(\frac{f}{8 \sin \alpha} \right)^{-2/3}}{\frac{H_d + H_o}{d_c}} \quad \text{kapaklı şüt} \quad (2.47)$$

ile hesaplanır. Burada, H_{max} ; maksimum enerji, f ; hava-su akımının sürtünme faktörü, H_d ; mansap topuğu üzerindeki baraj kreti enerjisi, H_o ; şüt kreti üzerinde rezervuarın serbest yüzey yükseltisidir. Kapaksız kanalda, maksimum enerji değeri ve savak yüksekliği: $H_{max}=H_d+1.5d_c$ dir. Kapaklı şütte ise bu ilişki: $H_{max}=H_d+H_o$ dır. (2.46) ve (2.47) eşitlikleri çok yüksek barajlarda:

$$\frac{\Delta H}{H_{max}} = 1 - \left(\left(\frac{f}{8 \sin \alpha} \right)^{1/3} \cos \alpha + \frac{1}{2} \left(\frac{f}{8 \sin \alpha} \right)^{-2/3} \right) \frac{d_c}{H_d} \quad (2.48)$$

şekline dönüştürülebilir. (2.46) ve (2.47) nolu denklemler baraj yüksekliği ile enerji sönümlenme oranının artışı göstermektedir. Pratikte, boyutsuz birikmiş enerjiyi göz önüne almak daha uygundur:

$$\frac{H_{res}}{d_c} = \left(\frac{f}{8 \sin \alpha} \right)^{1/3} \cos \alpha + \frac{1}{2} \left(\frac{f}{8 \sin \alpha} \right)^{-2/3} \quad (2.49)$$

(2.48) eşitliği verilen eğim ve sürtünme faktörü için, $q_w^{2/3}$ biriken enerjinin artmasını ifade etmektedir. Pratikte boyutsuz birikmiş enerjiyi göz önüne almak daha uygundur.

Boes ve Hager [19] tarafından ise, basamaklı dolu savaklardaki enerji sönümleme oranları ile ilgili olarak aşağıdaki eşitlikler önerilmiştir.

$H_d/d_c < 15 - 20$ için;

$$\frac{\Delta H}{H_{max}} = \exp \left[\left(-0.045 \left(\frac{K}{D_{h,w}} \right)^{0.1} (\sin \alpha)^{-0.8} \right) \frac{H_d}{d_c} \right] \quad (2.50)$$

$H_d/d_c \geq 15 - 20$ için ise;

$$\frac{\Delta H}{H_{max}} = \frac{F}{\frac{H_d}{d_c} + F} \quad (2.51)$$

(2.50) ve (2.51) Eşitliklerindeki F ve $D_{h,w}$;

$$F = \left(\frac{f_b}{8 \sin \alpha} \right)^{1/3} \cos \alpha + \frac{\phi}{2} \left(\frac{f_b}{8 \sin \alpha} \right)^{-2/3} \quad (2.52)$$

$$\frac{h_{w,u}}{d_c} = 0.215 (\sin \alpha)^{-1/3} \quad (2.53)$$

eşitlikleri ile bulunur. (2.52) Eşitliğindeki f_b ; ise;

$$f_b = [0.50 - 0.42 \sin(2\alpha)] \left(\frac{K}{D_{h,w}} \right)^{0.2} \quad (2.54)$$

eşitliği ile elde edilir. $D_{h,w} = 4 \cdot R_{h,w}$ alınabileceği Boes ve Hager [19] tarafından ifade edilir. Burada $K = h \cdot \cos \alpha$ bağıntısıyla belirlenen şüt tabanına dik yöndeki pürüzlülük yüksekliğini, $D_{h,w}$ hidrolik çapı, α şüt açısını, d_c kritik derinliği, ϕ kinetik enerji düzeltme faktörünü (yaklaşık 1.1 alınabilir), f_b taban pürüzlülüğünün sürtünme faktörünü, $R_{h,w}$ hidrolik yarıçapı, $h_{w,u}$ üniform akım derinliğini ve $K/D_{h,w}$ rölatif pürüzlülüğü ifade etmektedir.

2.2.4 Nap, Geçiş ve Sıçramalı Akımlar Arasında Enerji Sönümleme Oranlarının Karşılaştırılması

Birçok araştırmacı nap akımında sıçramalı akım durumundan daha yüksek enerji sönümleniminin başarıldığını belirtmişlerdir. Hava konsantrasyonu üzerine temellendirilen deneysel veriler ile hesaplar karşılaştırılmıştır. Sonuçlar; en fazla nap akımda, en az sıçramalı akımda enerji sönümlendiğini göstermiştir. Eldeki sonuçların bir kısmı pratik limitler belirleme eğilimindedir: örneğin, nap akımı büyük basamak yükseklikleri ve düz eğimler gerektirirken, sıçramalı akım büyük debi kapasitelerini başarabilir. Sıçramalı akım verilerinin dar bir eğim aralığını kapsadığına dikkat edilmelidir. Kısa kanallarda sıçramalı akım için, büyük akım oranlarında mansap ucunda akım tam gelişemez. Analitik hesaplamalar biriken enerjinin tahmin edilebileceğini ispatlamaktadır. Kısa şütlerde, nap akımı sıçramalı akımdan daha fazla enerji sönümler. Buna göre:

1. Basamaklı dolusavaklarda düz şütlerden daha fazla enerji sönümlenir.
2. Verilen bir hidrolik yapı için ($H_d \approx \text{sabit vb.}$), basamaklı şütte debinin artmasıyla $\Delta H/H_{\max}$ enerji sönümleme oranı düşmektedir. Sonuç hem nap hem sıçramalı akım rejimini içine almaktadır.
3. Sabit debide baraj yüksekliğinin artmasıyla enerji sönümlenme oranı da artar.
4. Basamaklı dolusavaklarda, enerji sönümlenme oranı yerine biriken enerjiyi göz önüne almak daha uygundur.
5. Küçük basamaklı savaklarda akım, sıçramalı akım rejiminde dolusavağın topuğunda tam gelişemez. Nap akım rejimi daha fazla enerji sönümlendiği için tercih edilir.

2.3 Basamaklı Dolusavakların Tasarımı

2.3.1 Akım Derinliği

Üniform eşit su derinlikleri h basamak yüksekliği ile normalleştirilirse ve Froude sayısının bir fonksiyonuna dönüştürülürse $F_* = q_w / (g \cdot \sin \phi \cdot h^3)^{1/2}$, q_w birim genişlikten geçen debi ve g yerçekimi ivmesi olmak üzere;

$$\frac{d_{w,u}}{h} = 0.23 F_*^{0.65} \quad (2.55)$$

elde edilir. Deneyler dahilinde, denklem (2.55) $d_{w,u}/h = 0.215 F_*^{2/3}$ veya

$$\frac{d_{w,u}}{d_c} = 0.215 (\sin \phi)^{-1/3} \quad (2.56)$$

olarak düşünülebilir. Üniorm su derinliği $d_{w,u}$, kritik derinlik d_c ile bağlantılıdır. Böylece şüt açısı ϕ , h ve q_w den bağımsız olarak değiştirilebilir. Üniorm karışım derinliği $d_{90,u}$ duvar yüksekliğinin hesaplanmasında;

$$\frac{d_{90,u}}{h} = 0.50F_*^{(0.1 \tan \phi + 0.5)} \quad (2.57)$$

bağıntısı kullanılabilir [36]. Bundan dolayı şüt açısının artmasıyla $d_{90,u}$ ve $d_{w,u}$ değerı azalır.

2.3.2 Sürtünme Faktörü

2.3.2.1 Temel Denklem

Havalandırılmış akım için, Darcy-Weisbach sürtünme faktörü f_w iki-fazlı üniorm akımda, $d_{w,u}$ üniorm eşit su derinliği ile hesaplanmıştır. $\sin \phi = u^2 / (2g) [f_w / D_{d,w,u}]$ bağıntısı ile üniorm akım için hidrolik çap; $D_{d,w,u} = 4R_{d,w,u} / (b + 2d_{w,u})$, hidrolik yarıçap $R_{h,w,u}$ ve akım hızı $u = q_w / d_w$ süreklilik denkleminde hesaplanır.

$$f_w = \frac{8 \cdot g \cdot b \cdot d_{w,u}^3 \cdot \sin \phi}{q_w^2 (b + 2d_{w,u})} \quad (2.58)$$

2.3.2.2 şekil Düzeltme Faktörü

Prandtl Colebrook denkleminin temelini oluşturan dikdörtgen enkesitli kanallar için hesaplar Marchi tarafından tanıtılan w şekil düzeltme faktörü, Schröder'in açıkladığı etkili hidrolik çapın ($D_{d,eff} = w \cdot D_{d,w}$) bulunması için kullanılır [37,38].

$$w = 0.90 - 0.38 \exp\left(\frac{-5d}{b}\right) \quad d/b \geq 0.4 \text{ için} \quad (2.59)$$

$$w = 0.60 \quad d/b < 0.4 \text{ için} \quad (2.60)$$

eşit su derinliği $d_{w,u}$ denklem (2.53) ve (2.54)'te uygun akım derinliği d olarak düşünülebilir.

Üniorm sıçramalı akım için üst basamakların hayali akım çizgisine dik pürüzlülük yüksekliği $k_s = h \cdot \cos \phi$ Prandtl Colebrook denkleminde;

$$\frac{1}{\sqrt{f_w}} = -2 \log \left[\frac{2.51}{wR\sqrt{f_w}} + \frac{k_s / (w, D_{d,w})}{3.71} \right] \quad (2.61)$$

okunur. Burada, $R = u \cdot D_{d,w} / \nu = 4 \cdot Q_w / [\nu(b + 2dw)]$; Reynolds sayısı, ν ; suyun kinematik viskozitesi ve Q_w ; suyun debisidir.

2.3.2.3 Yan Cidar Düzeltme Metodu

Yan cidarlar hidrolik olarak düz olduğu halde sadece kanal tabanı makro pürüzlü basamaklarla çevrili olduğu için denklem (2.58)'den bulunan sürtünme faktörü bölgesel basamaklı kanalın sürtünmesinin bütünü için değerlendirir. Sadece taban pürüzlülüğünün sürtünme faktörü f_b 'yi hesaplamak için Schröder tarafından bulunan duvar düzeltme metodu uygulanır [38]. Bu metot aşağıdaki yöntemleri içerir:

1. f_w nin değeri denklem (2.58)'den hesaplanır.
2. Hidrolik olarak düz akım için duvar sürtünme faktörü f_s ,

$$\frac{1}{\sqrt{f_s}} = -2 \log \left[\frac{2.51 f_w}{w R \sqrt{f_s^3}} \right] \quad (2.62)$$

bağıntısından hesaplanır. w ; denklem (2.59)'dan ve $R=4Q_w/(v(b+2d_{w,u}))$ formülünden çözülür.

3. Taban sürtünme faktörü f_b daha sonra $f_b = f_w + 2(f_w - f_s)d_{w,u}/b$ den elde edilir.

2.3.2.4 Enerji Sönümleme Hesabı

Tatewar ve Ingle dolusavak topuğunda sıçramalı akım rejimine göre akım derinliğinin hesabı için bir metot önermiştir [39]. Topuk derinliği Manning denklemi kullanılarak hesaplanır:

$$v = (1/n) R^{2/3} \sqrt{s} \quad (2.63)$$

burada $v=q/Y$ akım hızıdır.

$$Y = (qn / \sqrt{s})^{0.6} \quad (2.64)$$

Burada, n ; Manning pürüzlülük katsayısı; R ; hidrolik yarıçap olup, çok geniş dikdörtgen kanallarda y 'ye eşit alınır ve $s=\sin\alpha$; dolusavak mansap yüzünün eğimi denklem (2.63)'de verilen hız değeri ile Knight ve Mc Donold'un pürüzlülüğü fazla elemanların hızı için verdiği denklemler birbirlerine eşitlenerek aşağıdaki denklem elde edilir [40]:

$$z^{0.1}/ng^{1/2} = 0.25 + 19.0 \log(\lambda/b) + 5.75 \log(z^{0.6}/k) \quad (2.65)$$

burada, $z = (qn / \sqrt{s})$; üniform akım hesabı için bölge faktörüdür.

Bilinen bir debi ve dolusavak mansap eğimi için Manning'in n değeri denklem (2.65)'den elde edilir. Bu n değeri ile, topuk derinliği (y) ve topuk hızı (v) denklem (2.64) ve denklem (2.63)'den hesaplanır. Dolusavak yüzeyindeki enerji sönümlemesi; $\Delta E = E - E_t$ şeklinde

verilir. Burada $E=H+1.5d_c$; dolusavak kretindeki enerji, $E_t = d_c + \frac{v^2}{2g}$; dolusavak topuğundaki enerji, H; dolusavak yüksekliği ve d_c ; kritik akım derinliğidir.

2.3.2.5 Dolusavak Genişliğinin Seçimi

Şok dalgalarının oluşacağını gösteren dolusavak tırmanma duvarının birbirine yaklaşmasını önlemek için, akarsu mansap genişliğine eşit bir şüt genişliği seçilir. Örneğin; $b=40$ m için $q_d=Q_d/b=800/40=20$ m³/sn'lik bir birim debi meydana getirir ($Q=800$ m³/sn alındı). Dikdörtgen bir dolusavak en kesiti için kritik yükseklik; $d_c=(q_d^2/g)^{1/3}=(20^2/9.81)^{1/3}=3.44$ m olarak hesaplanabilir.

2.3.2.6 Basamaklı Dolusavakların Tercih Edilmesinin Kriteri

Dolusavak basamaklarının yapılması için gereken ekstra masraflar enerji kırıcı havuzun uzunluğu %20 azaltılarak karşılandığı varsayılırsa, basamaklı dolusavağın tercih edilmesinin kriteri, enerji kırıcı havuzun uzunluğunda %20'den fazla azaltma yapılması gerektiğidir. Burada basamaklı dolusavaklar genellikle d_c/H oranının 0.125'ten küçük olması halinde tercih edilirler.

2.3.2.7 Hava Katılımı

Türbülanslı sınır tabakasının serbest yüzeye ulaştığı nokta, yani türbülans derecesinin su akımına hava girecek kadar büyük olduğu yer, hava katılımının başlangıç noktası olarak adlandırılır. Basamaklı şüt tasarımcılarına göre, dolusavağın havalanmayan bölgesi hakkında fikir edinmek açısından başlangıç noktasının konumunun bilinmesi önemlidir. Çünkü havalanmayan bölge büyük basınçlar yüzünden potansiyel olarak kaviteasyon hasarına eğilimlidir. Boes [9] tarafından havalanmayan bölge uzunluğu ile aşağıdaki denklemler verilmiştir.

$$\frac{z_i}{h} = 4.93Fr_*^{0.84} \quad 26^\circ < \phi < 55^\circ \quad (2.66)$$

Burada $Fr_*=q/(g\sin\phi^3)^{1/2}$ basamaklı dolusavağın; q birim debi, h basamak yüksekliği, ϕ şüt başlangıç açısı ve $g=9.81$ m/s² yerçekimi ivmesi gibi ilgili parametrelerini içeren Froude pürüzlülük sayısıdır. Eğer $z_i \approx L_i \sin\phi$ olursa ve (2.66) nolu eşitlik boyutsuz formda yazılırsa, havalanmayan veya kara bölgenin uzunluğu L_i ;

$$L_i = 4.93 \frac{q^{0.84}}{g^{0.42} (\sin \phi)^{1.42} h^{0.26}} \quad 26^\circ < \phi < 55^\circ \quad (2.67)$$

haline gelir. Birim debi iki katına çıktığı zaman L_i %79 artar ve basamak yüksekliğinin iki katı olması durumunda kara bölgenin uzunluğu sadece %16.5 oranında azalacaktır. Eğimdeki artış 1ℓ:2h'dan 1ℓ:0.8h'a ($\phi=26.6^\circ$ - 51.3°) L_i 'yi %55 azaltacaktır.

Yüksek hızlarda, basamak yüzeyindeki veya basamak köşesindeki hidrodinamik basınç buhar basıncının altına düşebilir. Bunun sonucunda dolusavak betonuna büyük miktarda zarar veren kavitasyon olayı meydana gelir. Hidrodinamik basınç değişimi üzerine yapılan ilave araştırmalar özellikle havalanmamış dolusavak bölgesindeki olmak üzere, basamaklı dolusavaklarda kavitasyon risk potansiyeline daha fazla ışık tutacaktır.

3. SAYISAL YÖNTEMLER

3.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) Yazılımları

Akışkanlarla ilgili problemlerin çözülmesinde gelişen teknolojiyle birlikte yeni ve gelişmiş bilgisayar yazılımları piyasaya çıkarılmıştır. Bu yazılımlardan HAD yazılımları yabancı literatürde “Computational Fluid Dynamics” (CFD) olarak bilinen çok geniş kapsamlı yazılımlardır. Akışkanların hareketini belirlemek için, temel denklemlerden ve deneysel sonuçlardan yola çıkarak geliştirilmiş bazı matematiksel yöntemler vardır. Bu yöntemlerin sayısal çözümlenmesi, karmaşık modeller için ancak bilgisayar desteği ile mümkün olabilmektedir. Sonlu elemanlar gibi sayısal yöntemler kullanılarak geliştirilen matematiksel modeller bilgisayar desteği ile çok hızlı ve etkili bir şekilde çözülebilir. Üç boyutlu modellerde hassas çözüm için sonlu eleman sayısı çok fazla artacağından çözüm zamanı ve zorluğu da çok fazla artmaktadır. Üç boyutlu hassas çözümler, günümüzde kullanılan hızlı ve bellek kapasitesi yüksek bilgisayarlar yardımı ile yeni yeni mümkün olmaktadır. Hatta bazı problemlerin sayısal çözümlemesi için sadece bir bilgisayar yeterli olmayıp, işlemci ve bellek kapasitesi çok yüksek birden fazla bilgisayarın paralel çalıştırıldığı sistemler (Beowulf) gerekebilmektedir. Bu konudaki ihtiyaçları karşılamak için ULAKBİM, 2 X Intel (R) Xeon (TM) 2.80GHz işlemci, 2 GB bellek, 600 GB yerel disk içeren bir sunucu ve Intel (R) PIV 2.66 GHz işlemcili ve 1 GB bellek, 80 GB yerel diskli uç birimlerden oluşan 128 paralel bilgisayarlı Beowulf sistemini kurmuştur [41].

HAD analizleri için genel bir çözüm algoritması hazırlamak oldukça güç ve çok sayıda kişinin çalışmasını gerektirecek bir işlemdir. Literatürdeki sayısal çalışmaların çoğunda her problem için özel bir yöntem önerilir. Her bir problem için uğraştırıcı matematik modeller kurmak yerine bu konuda yılların birikim ve deneyimleri sonucu hazırlanmış Fluent gibi genel amaçlı HAD yazılımlarının kullanılması çok uygun ve doğru olacaktır [42].

3.1.1 Fluent Programı

Fluent sonlu hacimler yöntemini kullanan bir HAD yazılımıdır. 1983’den bu yana dünya çapında bir çok endüstri dalında kullanılan ve günden güne gelişerek tüm dünyadaki HAD piyasasında en çok kullanılan yazılım durumuna gelen Fluent, en ileri teknolojiye sahip ticari HAD yazılımı olarak kullanıcılarının en zor problemlerine kolay ve kısa sürede elde edilen çözümler sunmaktadır. Bu kapsamda yapılan bazı çalışmalar aşağıda anlatılmıştır.

Savage ve Johnson (2001), Ogee dolusavak üzerindeki analizlerle hata oranının çok az olduğunu görmüşlerdir. Yüksek, orta ve düşük akım koşullarında basınç değerlerini

karşılaştırmışlardır. Fiziksel modellerle sayısal modeller arasında çok fazla bir farkın olmadığını tespit etmişlerdir [43].

Behr (2001), yaptığı çalışma ile CFD yazılımlarının çalışma prensibinin sonlu elemanlar yöntemi olduğunu açıklamıştır ve bu gibi yazılımlarda Navier-Stokes denklemlerinin sonlu elemanlar yöntemiyle kullanıldığını belirtmiştir [44].

Ho ve diğ. (2003), çalışmalarında dolusavak modellerini ilk olarak iki boyutlu daha sonra da üç boyutlu olarak modelleyip incelemişlerdir. New South Wales'daki Hume Barajı dolusavağı ve Victoria'daki Buffalo Barajı dolusavağını CFD analizi ile çözmüşler ve sonuçları hidrolik model sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır [45].

Tabbara ve diğ. (2005), 2004 yılında yaptıkları ogee profilili dolusavak üzerindeki çalışmalarını, ADINA yazılımını kullanarak basamaklı dolusavaklar üzerinde yapmışlardır. Farklı basamak modellerini sunarak basamaklı dolusavak üzerinde akımın karakteristik özelliklerini incelemişlerdir [46].

Nguyen ve Nestmann (2004), k- ϵ modeli ve VOF metodunu kullanarak Avrupa'nın önemli akarsularından olan ve 1320 km uzunluğundaki Rhine akarsuyunu modelleyerek akarsuyun farklı mesafelerinde su derinliklere göre hızını ve türbülans durumunu incelemiştir [47].

Aydın ve diğ. (2005), Kars Barajı yandan alıslı dolusavak teknesinde üç boyutlu analiz uygulaması ile Fluent yazılımında modellerini oluşturmuş ve elde ettikleri verilerle, hidrolik modelle elde edilen verileri karşılaştırmışlardır. Yapılan çalışmada sonuçların birbirine yakın değerlerde olduğunu görmüşler ve su yüzeyinde görülen türbülans yoğunluğu dağılımı ve kanal tabanındaki basınç dağılımının rahatlıkla görüldüğünü tespit etmişlerdir [48].

Chatila ve diğ. (2004), çalışmalarında k- ϵ modelini kullanarak Ogee profilili dolusavağı üç boyutlu olarak modelleyip, savaklar üzerinde farklı su yüklerinde yüzeydeki su profillerinin x ve y koordinatlarını bulup hidrolik modelle elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır. Bu çalışma ile serbest yüzeyli akımların karakteristik özelliklerini kolayca belirlemişlerdir [49].

Çelik ve Güner (2005), nozullu pervaneler için modellerini Gambit programında hazırlamış ve Fluent programını kullanarak çözüme ulaşmışlardır. Bu çalışmalarında hareketli meshleme'yi (sonlu eleman ağı oluşturmak) kullanmışlardır [50].

Cheng ve diğ. (2006) tarafından basamaklı dolusavaklar ile ilgili olarak sayısal analizler yapılmıştır. Bu çalışmayla; dolusavak şütünün farklı yerlerindeki basamaklar üzerinde oluşan akım koşulları belirlenmeye çalışılmış, enerji sönümlene oranları ve basamaklar üzerinde oluşan eş basınç eğrileri belirlenmiştir[51].

Aydın (2005) tarafından yapılan doktora tezinde; alttan alıslı dolusavak havalandırıcıları ile ilgili olarak Fluent yazılımı kullanılarak sayısal analizler yapılmıştır [41]

Balbay (2008) tarafından yapılan doktora tezinde; termal kaynaklı ısı pompaları kullanılarak kar ve buzun eritilmesi amacıyla Fluent yazılımı yardımıyla sayısal çözümler yapılmıştır [52].

Yukarıda anlatılan çalışmalardan anlaşılacağı üzere, CFD yazılımları sadece İnşaat Mühendisliği çalışmalarında değil, Makine Mühendisliğindeki birçok çalışmada da kullanılmaktadır.

Yapılan bu çalışmalar, kolaylık ve avantaj sağlaması nedeniyle CFD yazılımlarının kullanılmasının yaygınlaşmasında bir etken olmaktadır.

Fluent programı, çözüm bölgesini bir dizi kontrol hacmine (mesh'e) veya hücreye bölerek (sayısal ağ oluşturulması) kütle, momentum, enerji vs. için genel korunum denklemleri kullanır.

Fluent, genel amaçlı bir HAD yazılımı olarak, otomotiv endüstrisi, havacılık endüstrisi, beyaz eşya endüstrisi, turbomakine (fanlar, kompresörler, pompalar, türbinler v.b.) endüstrisi, kimya endüstrisi, yiyecek endüstrisi gibi birbirinden farklı bir çok endüstriye ait akışkanlar mekaniği ve ısı transferi problemlerinin çözümünde kullanılabilir. Bu özelliği sayesinde kullanıcıya birbirinden farklı bir çok probleme aynı arayüzü kullanarak çözüm alma olanağı sağlar. Kolay kullanımı ile Fluent, ürün performansını ürün henüz tasarım aşamasındayken ölçme, performansı düşüren etkenleri detaylı bir şekilde tespit ederek yine bilgisayar ortamında giderme ve piyasaya iyileştirme işlemleri tamamlanmış son ürünün verilmesini sağlar [53].

Fluent, sahip olduğu ileri çözücü teknolojisi ve bünyesinde barındırdığı değişik fiziksel modeller sayesinde laminar ve türbülanslı akışlara, iletim, taşınım ve ısı iletim ile ısı geçişini içeren problemlere, kimyasal tepkimeleri içeren problemlere, çok fazlı akışları içeren problemlere hızlı ve güvenilir çözümler üretir.

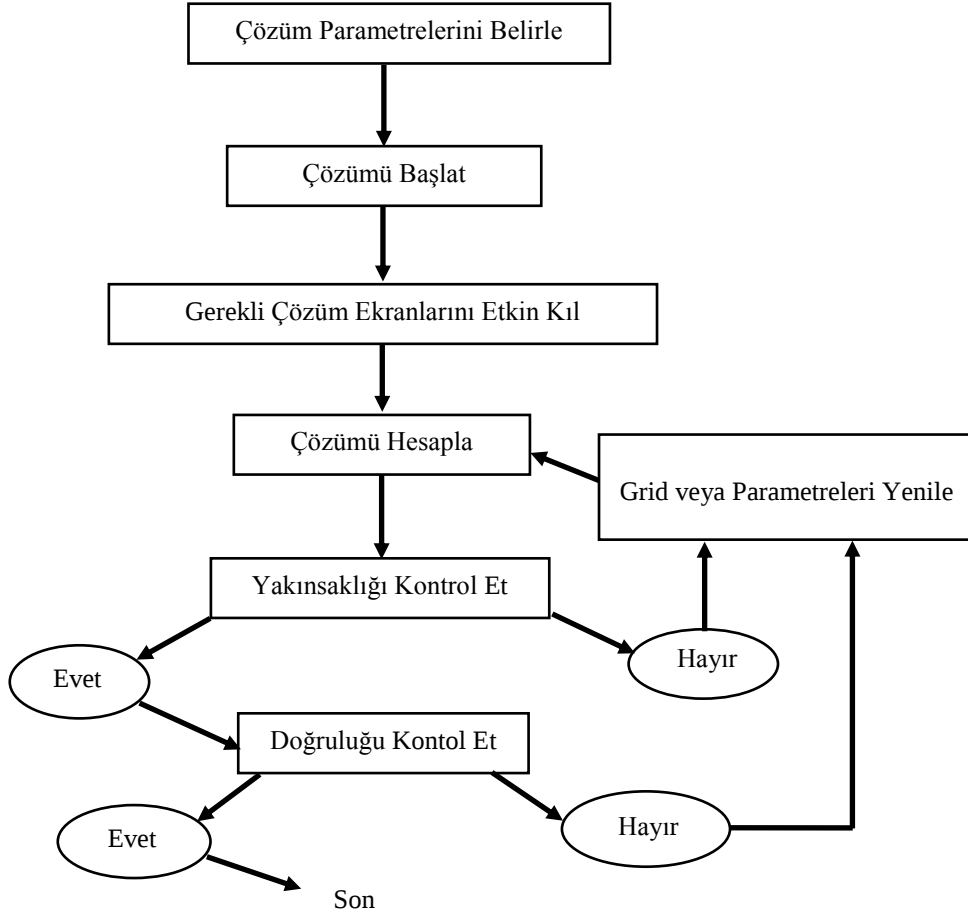
Fluent 6.2'deki fiziksel modellerin zenginliği, laminar, geçiş ve türbülanslı akışların, ısı transferinin, kimyasal tepkimelerin, çok fazlı akışların ve diğer olguların sayısal ağ esnekliği ve çözüm tabanlı ağ uyarlaması ile hassas çözülmesine olanak sağlar.

Fluent programı ile bir problemi çözmek için aşağıdaki temel basamaklar takip edilir [54].

- A. Problem tanımlama ve ön işlem;
 1. İlgili modelin amaçlarını belirlemek,
 2. Modellenecek alanı belirlemek,
 3. Tasarlayıp gridi oluşturmak,
- B. Çözüm aşaması;
 4. Sayısal modeli kur,
 5. Hesapla ve çözümü görüntüle,
- C. Son işlem;
 6. Sonuçları yorumla,

7. Değişiklikleri modele ekle.

Fluent 6.2'nin seri ve paralel sürümleri en yaygın UNIX, Windows/NT ve Linux üzerinde çalışmaktadır. Fluent programı ile çözüm yapılırken bir çözüm algoritmasına göre işlemler devam eder. Mevcut çözüm algoritması aşağıda Şekil 3.1'de verilmiştir [55].



Şekil 3.1 Çözüm algoritması [54]

Bu çalışmada, özellikle hava-su karışımı gibi çok fazlı, serbest yüzeyli ve türbülanslı akımların çözümünde, gün geçtikçe kullanımı yaygınlaşan ve bir CFD yazılımı olan Fluent programı kullanılmıştır. Fluent sonlu hacimler yöntemini kullanan bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımıdır. Bu program ile akım alanı oluşturulup akımın gerçeğe yakın özellikleri incelenebilir. Programla akışkanın hareketini incelemek mümkündür. Akımın özelliğini belirleyen hız değişimi, kesme kuvveti ve suyun hareketinden kaynaklanan çalkantıların miktarı tespit edilebilir. Böylece, akımın nasıl davranacağı anlaşılmış olur. Analitik olarak türbülanslı akımın hareketini incelemek zordur, fakat Fluent programının denklemleri sistematik olarak çözüme açısından kolaylık sağlaması bu durumu ortadan kaldırmaktadır. Türbülanslı akımın özellikleri için, Reynolds-Ortalama Navier Stokes denklemlerini kullanılır

[41]. Modelleri Fluent'te hazır hale getirmek için Gambit ve TGrid gibi üç boyutlu çizim programları kullanılmaktadır. Bu programlarla modelin üç boyutlu geometrisi oluşturulur ve bu modeller sonlu elemanlar ağına bölünür. Gambit, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ve Sonlu Elemanlar (SE) analizlerinde kullanılabilen genel amaçlı bir ön işlemcidir.

3.1.2. Gambit Programı

Gambit, HAD yazılımları ve Sonlu Elemanlar (SE) analizlerinde kullanılabilen genel amaçlı bir ön işlemcidir. Gambit, HAD ve SE analizlerinin üzerinde en fazla vakit harcanan kısmı olan model hazırlama ve sayısal ağ oluşturma işlemlerini, bünyesinde barındırdığı araçların da yardımıyla, kolaylaştırma ve hızlandırmayı amaçlayan bir yazılımdır. Gambit, sunduğu araçlarla, kullanıcıya kaliteli bir çözüm için gerekli ilk şart olan kaliteli sayısal ağa sahip olma imkanı tanır.

Gambit, sahip olduğu katı modelleme araçları sayesinde hem orta derecede karmaşık geometrilerin oluşturulmasına hem de gelişmiş geometri alım kapasitesi sayesinde UNIGRAPHICS, I-DEAS, Pro/ENGINEER, CATIA, SOLIDWORKS gibi profesyonel katı modelleme programlarından model alımına olanak tanıyarak kullanıcıya büyük bir esneklik sağlar. Ayrıca kendisine ait “sanal geometri” kavramıyla dışarıdan alınmış modellerdeki en büyük sorun olan geometri temizleme işlemini kolaylaştırarak sayısal ağ oluşumuna uygun modellerin elde edilmesine olanak sağlar.

Gambit, iki boyutta dörtgen ve üçgen elemanların, üç boyutta ise altı yüzlü, dört yüzlü ve geçiş elemanları olarak kama tipi ve piramit tipi elemanların kullanımına izin vererek istenilen tipteki sayısal ağın basit ve hızlı bir şekilde oluşturulmasına imkan verir. Bununla beraber, “boyut fonksiyonu” ve “sınır tabaka aracı” gibi araçları yardımıyla model içinde ve kritik noktalarda eleman yoğunluğunun ve kalitesinin kontrol altında tutulmasına olanak sağlar [53]. Fluent gibi HAD yazılımlarının en büyük dezavantajı çözüm zamanı ve yüksek bellek gereksinimidir. Özellikle üç boyutlu modellerden hassas sonuçlar alabilmek için modeli daha küçük dolayısı ile daha fazla sonlu eleman ağına bölmek gerekmekte ve bu durumda da daha fazla işlemci gücü ve bellek kapasitesine gereksinim duyulmaktadır. Ancak günümüzdeki yüksek hızlı işlemci (Core 2 Duo) ve yüksek bellekli en az 512 RAM bilgisayarlarla bile yeterli sayıda sonlu eleman hücrelerine sahip üç boyutlu modeller çözülebilmektedir. Fluent ile sayısal çözümlerde, her 100.000 üç boyutlu eleman için yaklaşık 100 MB RAM'a ihtiyaç duyulur. Çok daha fazla elemanlı model çözümü için veya çözüm zamanını daha azaltmak için paralel işlemci teknolojilerinden (Beowulf) yararlanılabilir[41].

3.2.2. Viskoz Modeli

Laminer ve türbülanslı akımların Fluent programı ile modellenmesi mümkündür. Türbülanslı modelleme için k-ε model seçeneğinde standart, RNG ve Realizable k-ε model seçenekleri vardır. Standart k-ε model, kinetik enerji (k) ve bunun yayılımı (ε) için taşınım denklemleri üzerine kurulu yarı deneysel bir modeldir. Fluent programı girilen değerlere bağımlı olarak çözümü yapmaktadır. Girilen değerler türbülanslı akış için gerekli giriş değerleri değil ise fluent programı türbülanslı akış için gerekli parametreleri yok kabul eder ve çözümü tamamlar. Laminer akış için türbülanslı modelin seçilmesi; programcının türbülans parametrelerinin düzenlenmesinde zaman kaybetmesine, bilgisayarın ise çözüm için ek işlemler yapmasına neden olur. Çözümlerin doğruluğunu etkilemez.

3.2.3. Süreklilik ve Momentum Denklemleri

Fluent kütle ve momentum için korunum denklemlerini çözmektedir. Süreklilik denkleminin genel denklemi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [54].

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

Eylemsiz bir yapıda momentumun korunum denklemi aşağıda ifade edildiği gibidir.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\bar{\tau}}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3.2)$$

Bu denklemde P statik basıncı, $\bar{\bar{\tau}}$ gerilme tensörünü (aşağıda ifade edilmektedir), $\rho \vec{g}$ ve $\vec{F}$ yerçekimi kuvvetini ve dış kuvvetleri ifade etmektedir. $\vec{F}$, poroz ortam gibi tanımlı başka modele bağlı ifadeleri de içermektedir. Gerilme tensörü aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir.

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu \left[\left(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} \vec{I} \right) \right] \quad (3.3)$$

μ moleküler akışkan viskozitesini, I birim tensörü ve sağ taraftaki 2. terim hacmin genişleme etkisini ifade etmektedir.

3.4. Fluent’te Çok Fazlı Akım Problemlerinin Modellenmesi (Multiphase Flows)

Fluent, aşağıda sıralanan çok fazlı akım problemlerinin modellenmesine olanak sağlar.

- Kabarcık Akımı (Bubble Flow): Sürekli sıvı faz içindeki gaz veya hava kabarcıklarının modellenmesi (Havalandırıcılar gibi).
- Damlacık Akımı (Droplet Flow): Sürekli gaz fazı ortamındaki sıvı zerrelere veya damlacıklarının modellenmesi
- Sediment Akımı (Particle-Laden Flow): Sürekli akışkan ortamındaki katı parçacık hareketi (sediment gibi).
- Büyük Kabarcık Akımı (Slug Flow): Sürekli sıvı ortamındaki büyük kabarcıkların modellenmesi.
- Halkasal Akış (Annular Flow): Cidarlar boyunca sürekli akışkan modellenmesi.
- Serbest Yüzeyli Akım (Free Surface Flow): Net bir şekilde belirlenmiş ara yüzeyle birbirine karışmayan akışkanların modellenmesi.

Fluent’te çok fazlı akımlar genelde, birincil faz sürekli ortam akışkanı, diğeri ise bu akışkan içine dağılmış olan ikincil faz olarak tanımlanır. Atmosfere açık serbest yüzeyli akımlar için, sürekli ortam akışkanı hava, ikincil faz ise su olarak alınır. Fluent 5’te çok fazlı akışkan için 4 farklı model önerilmiştir:

- Dağınık Faz Modeli (Dispersed Phase Model-DPM)
- Akışkan Hacmi Modeli (Volume of Fluid Model- VOF)
- Cebirsel Kayma Karışım Modeli (Algebraic Slip Mixture Model-ASMM)
- Kavitasyon Modeli (Cavitation Model) [54].

3.4.1. Dağınık Faz Modeli (Dispersed Phase Model-DPM)

Sürekli ortam akışkanlarından katı parçacıkları, sıvı damlaları veya gaz kabarcıklarının ayrılması gerekiyorsa bu model kullanılabilir.

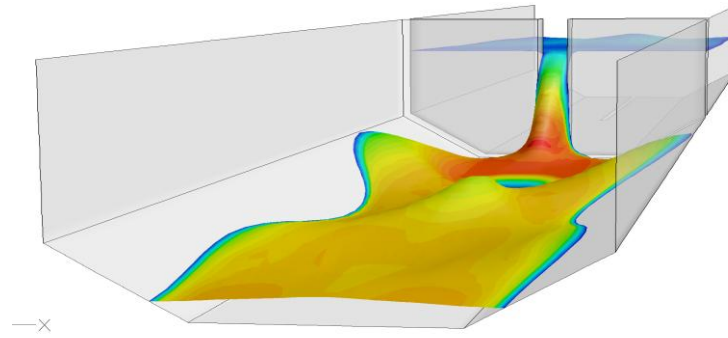
Hücrelerin %10’undan daha küçük hacim oranlarının belirlenmesi için uygundur. DPM, çözüm yaparken aşağıdaki hesapları gerçekleştirir:

- Sürekli akışkan içerisindeki ikincil faz akışkan parçacıklarının yörüngesi hesaplanır (kabarcıkların yörüngesi gibi).
- Sürekli ve ayrılmış akışkan fazları arasında ısı, kütle ve moment transferi hesaplarını gerçekleştirir.

- Parçacık-parçacık etkileşimini ihmal eder.
- Zamanla değişen veya değişmeyen akımların parçacık izlerini hesaplar [54].

3.4.2. Akışkan Hacmi (Volume of Fluid-VOF) Modeli

Karışmayan akışkanların net bir ara yüzey ile ayrılması bekleniyorsa bu modelin kullanılması doğru olur. Özellikle serbest yüzeyin şeklinin önemli olduğu problemlerde kullanılmaktadır. Genellikle, bir sıvı içerisindeki büyük kabarcıkların hareketinde, bir engelden sonraki sıvının hareketi gibi ara yüzeyleri net olan birçok modellemede kullanılabilir.



Şekil 3.2. Serbest yüzeyli akım modeli

Şekil 3.2’de Fluent yazılımında VOF modeline örnek olarak verilen bir akım modeli görülmektedir. VOF modelde sıvı ve gaz fazı arasındaki ara yüzeyin belirlenmesi her k fazı için bir hacim oranı süreklilik denkleminin çözümü ile gerçekleşir.

$$\frac{\partial \varepsilon_k}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon_k}{\partial x_j} = S_{\varepsilon_k} \quad (3.4)$$

Denklemin sağ tarafındaki kaynak terimi VOF model için sıfıra eşittir. Bu terim, kavitasyon model için sıfırdan farklıdır. Hacim oranı denklemi birincil faz için çözülmeyecektir. Birincil fazın oranı (4.2)’deki sınırlamaya dayalı olarak hesaplanır.

$$\sum_{k=1}^n \varepsilon_k = 1 \quad (3.5)$$

Denklem (3.4) ve (3.5)’deki; ε_k : k fazının hacim oranı, u_j : Hız vektörleri, x_j : Yön vektörleri, S_{ε_k} : Kaynak terimi, n: Akışkan sayısını ifade etmektedir. Seçilen sonlu elemanın boyutundan daha küçük hassaslıkta ara yüzey belirlemek mümkün değildir. Dolayısıyla daha net bir ara yüzey için daha hassas bir sonlu eleman ağı gerekmektedir. VOF modelin çözüm özellikleri şunlardır:

- Her akışkan için momentum denkleminin bir seti çözülür.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \rho g_j + F_j \quad (3.6)$$

- Momentum denklemine eklenen bir terimle yüzey gerilimleri ve cidar adezyonu modellenebilir.
- Türbülanslı akımlar için transfer denklemlerinin tekil seti çözülür.
- Birincil fazın korunum denklemleri çözülür.

Fluent'teki yüzey gerilim kuvvetleri sürekli yüzey kuvvet (Continuouom Surface Force-CSF) yöntemiyle modellenir. Buna göre, ara yüzeyin her iki tarafında kalan akışkanların basınç farkı yüzey gerilim katsayısına bağlıdır. Yüzey eğriliği iki yarıçaplı (R_1 ve R_2) olarak tanımlanırsa, bu basınç farkı aşağıdaki (3.7) denklemiyle ifade edilir:

$$P_1 - P_2 = \sigma_s \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (3.7)$$

Burada; P_1 ve P_2 : Ara yüzeyin her iki tarafında kalan akışkanlardaki basınçlar, σ_s : Yüzey gerilmesidir. CSF modeline göre VOF hesaplarında momentum denklemine eklenen ek terim, yüzeydeki kuvvetin bir hacim kuvveti olarak aşağıdaki denklemle ifade edilir:

$$F_{vol}(x) = 2\sigma_s K(x) \varepsilon_2 \nabla \varepsilon_2 \quad (3.8)$$

Bu ek terim ara yüzeyin yalnızca bir tarafına eklenir. Fluent, VOF modelde bu ikincil fazdır. Burada; ε_2 : İkincil fazın hacim oranı ve K: Yüzey eğriliğidir. Yüzey eğriliği, $\hat{n}$ vektörün diverjansı bakımından aşağıdaki denklemle ifade edilir:

$$K = \nabla \cdot \hat{n} = \frac{1}{|n_s|} \left[\left(\frac{n_s}{|n_s|} \cdot \nabla \right) |n_s| - (\nabla \cdot n_s) \right] \quad (3.9)$$

Burada, n_s : İkincil fazın hacim oranı gradyentiyle tanımlanan yüzey normalidir ($n_s = \nabla \varepsilon_2$). $\hat{n} = n_s / |n_s|$ olarak ifade edilir. Yine Brackbill ve diğ. [55] tarafından önerilen yöntemden alınarak VOF modelde kullanılan cidar adezyon kuvvet açısı ile alakalı ifade aşağıdaki gibidir:

$$\hat{n} = \hat{n}_\omega \cos \theta_\omega + \hat{t}_\omega \sin \theta_\omega \quad (3.10)$$

Burada; $\hat{n}$: Yüzeye normal birim vektör $\hat{n}_\omega$ ve $\hat{t}_\omega$: Sırasıyla, katı cidara normal ve teğetsel birim vektörler, θ_ω : Katı cidarla yüzey teğeti arasındaki ikincil faz içinde ölçülen temas açısıdır. ∇ operatörü aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \text{ ve } \text{div}(n) = \nabla \cdot n \quad (3.11)$$

3.4.2.1. Hacim Oranı

Çok fazlı akımlarda sonlu elemanlar ağlarıyla bölünmüş her bir hücre iki akışkanın belirli hacim oranlarıyla işgal edilir. ‘k’ akışkanın hacim oranı için üç durum söz konusudur.

- $\varepsilon_k = 0$ ise k akışkanın hücresi boş,
- $\varepsilon_k = 1$ ise akışkanı hücreyi tamamen doldurmuş,
- $0 < \varepsilon_k < 1$ ise hücre iki akışkanın ara yüzeyini içerir [54].

3.4.3. Cebirsel Kayma Karışım Modeli (Algebraic Slip Mixture Model-ASMM)

VOF modelden farklı olarak ASMM model, akışkan fazlarının birbirine karışmasına izin verir. Sıvı içindeki çok daha küçük gaz kabarcıklarının modellenmesine olanak sağlar. Kontrol hacimlerinde 0~1 arasında hacim oranları elde edilir. Bu nedenle akıma hava karışımının etkisinin önemli olduğu problemlerde akım modellemesinin ASMM ile yapılması daha uygun olacaktır. Akışkan fazları arasında VOF model gibi net bir ara yüzey elde edilmez. Çözüm özellikleri şunlardır:

- Karışım, süreklilik ve momentum denklemlerini çözer.
- İkincil fazın hacim oranının taşınımını çözer.
- Fazlar arasındaki kayma hızını hesaplamak için cebirsel bir bağıntı kullanılır. Böylece iki faz akışkanın farklı hızlarda hareket etmesine olanak tanır.
- Zamanla değişen veya değişmeyen akımlar içinde uygundur.
- Yalnız iki fazlı akımlar modellenebilir.
- Akım sıkıştırılmaz olmalıdır.
- Tüm kontrol hacimleri tek bir akışkan fazıyla veya iki fazın birleşmesiyle doldurulmalı boş hacim bırakılmamalıdır [54].

Karışımın süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_m u_{m,i}) = 0 \quad (3.12)$$

Karışımın momentum denklemi iki ayrı faz için momentum denkleminin toplamıyla elde edilir.

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho u_{mj} + \frac{\partial}{\partial x_i} \rho_m u_{m,i} u_{m,j} = \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \mu_m \left(\frac{\partial u_{m,i}}{\partial x_j} + \frac{\partial u_{m,j}}{\partial x_i} \right) + \rho_m g_j + F_j + \frac{\partial}{\partial x_i} \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k u_{Dk,i} u_{Dk,j} \quad (3.13)$$

Burada; n: Faz sayısı, g: Yerçekimi ivmesi, ρ_m : Karışımın yoğunluğu, u_m : Karışımın ortalama hızı, u_{Dk} : Sürüklenme hızları, α_k : k akışkanının hacim oranını, μ_m : Karışımın viskozitesi, μ_k : k akışkanının viskozitesi, p: Basınç ve F_j : Ek terimidir. Karışımın yoğunluğu:

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (3.14)$$

Karışımın viskozitesi:

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k \quad (3.15)$$

Karışımın ortalama hızı:

$$\vec{u}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{u}_k}{\rho_m} \quad (3.16)$$

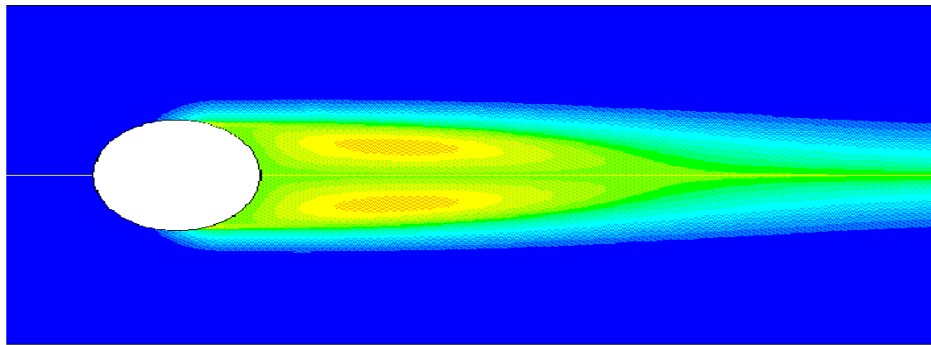
Sürüklenme hızı:

$$\vec{u}_{Dk} = \vec{u}_k - \vec{u}_m \quad (3.17)$$

denklemleriyle hesaplanır [54].

Akımın enerji kırıcı bloklara çarpıp sıçraması göz önünde bulundurularak, akışkan fazlarının birbirine karışması söz konusu olduğundan, akıma karışan havayı da modelleyebilmesine olanak sağlayan ASMM modelin bu çalışmada kullanılması uygun görülmüştür.

Kavitasyon Model (Cavitation Model)



Şekil 3.3. Kavitasyon modeli

VOF modelden iki yönüyle ayrılır. Birincisi, iki akışkan arasında ara yüzey olması gerekmez, akışkanların birbirine karışması sağlanır. İkincisi, fazlar arasında dönüşüm mümkündür. Kavitasyon modelde ise yalnızca iki faz modellenenabilir. Kavitasyon modelin çözüm özellikleri şunlardır:

- Kavitasyonun başlangıcını ve kabarcıklarının yaklaşık boyutunu tahmin eder.
- Karışımın momentum denklemini hesaplar.
- Karışımın süreklilik denklemini hesaplar.
- Fazlar arasında kayma (slip) hızının olmadığı varsayılır.
- Buhar fazının hacim oranı taşınımı için çözüm yapar.
- Akım sıkıştırılmaz olmalıdır.
- Yalnızca iki faz modellenenebilir [54].

3.5 Sayısal Çözümü Yapılacak Modeller

Modellerin hazırlanmasında ve çözümünde, dünyada geniş bir kullanıma sahip Fluent HAD yazılımı kullanılmıştır. Üç boyutlu model geometrilerini hazırlamak ve bu modelleri sonlu ağlarına bölmek için de Gambit programı kullanılmıştır.

Model için çözüm yönteminin belirlenmesi için Fluent programında "Segregated" ve "Coupled" olarak bilinen iki farklı yöntem ile çözüm yapılabilmektedir. Segregated yönteminde, iterasyonun her bir adımında elde edilen her bir değerin süreklilik, enerjinin korunumu ve türbülans açısından uygun olup olmadığı kontrol edilir ve bir sonraki adım buna göre belirlenir. "Segregated" yöntemi, "Coupled" yöntemine göre bilgisayar hafızasını daha az kullandığından daha hızlı çözüm yaptığı için tercih edilmiştir.

Bu sayısal HAD analizlerinde, üç boyutlu (3D), Segregated, zamana bağlı akım (Unsteady) ve zamandan bağımsız (Steady State) modelleri seçilmiştir.

4. BASAMAKLI DOLUSAVAKLARIN SAYISAL ANALİZİ VE TARTIŞMA

Basamaklı dolusavakların sayısal analizleri kapsamında iki ayrı çalışma yapılmıştır. İlk çalışmada eşiksiz basamaklı dolusavaklarla ilgili sayısal analizler yapılmış ve elde edilen sonuçlar, önceden yapılmış olan bazı deneysel çalışmalarla ve literatürde verilen eşitliklerle karşılaştırılmıştır. Böylece bu konuda sayısal yöntemlerin güvenilirliği test edilmiştir. İkinci çalışmada ise; klasik (basamaksız), basamaklı ve altı ayrı tipte eşikli basamaklı dolusavaklar için sayısal analizler yapılmıştır.

4.1 Eşiksiz Basamaklı Dolusavakların Sayısal Analizi

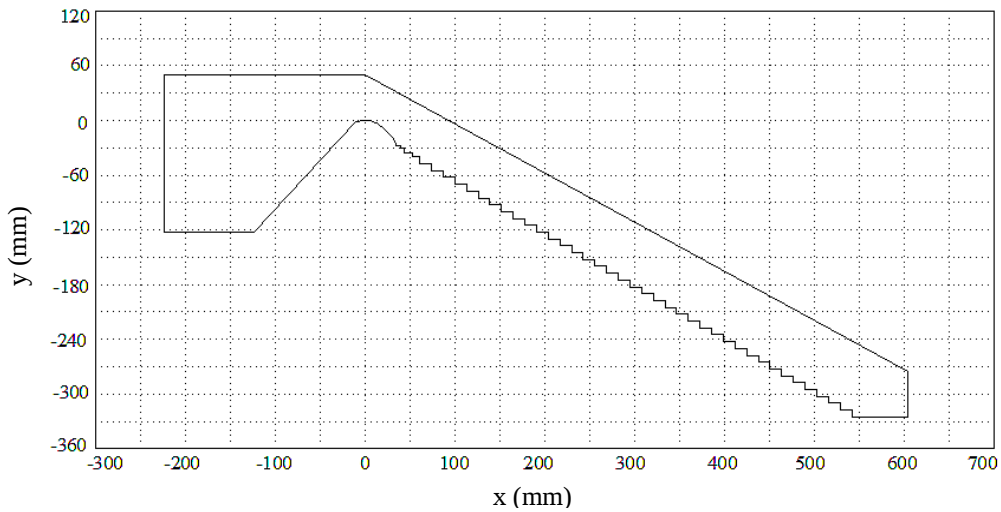
Eşiksiz basamaklı dolusavaklar ile ilgili olarak yapılan sayısal çalışmaların sonucunda elde edilen çözümlerin deneysel çalışmalara ait çözümlerle karşılaştırılması yapılmış ve sayısal çalışmaların güvenilirliği konusu tartışılmıştır. Ayrıca bazı araştırmacılar tarafından verilen eşitlikler de sayısal ve deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Deneysel metotlar, bilimsel çalışmalarda en çok kullanılan araştırma yöntemi olması yönüyle günümüzde popülaritesini halen korumaktadır. Basamaklı dolusavaklar gibi hidrolik yapılarda, meydana gelen akım koşulları oldukça karmaşıktır. Literatürde ortaya koyulan sonuçların ve verilen eşitliklerin neredeyse tamamı deneysel çalışmalar neticesinde elde edilmiştir. Deneysel çalışmalardan ancak uygun deney gereçleri ve hassas ölçüm aletleri kullanıldığında sağlıklı sonuçlar elde edilebilmektedir. Bu durum beraberinde yüksek maddi kaynakların da gerekliliğini ortaya koymaktadır. Deney düzeneklerinin kurulması aşamasında zaman kaybı yaşanması ve her bir deney düzeneğinin sınırlı sayıda deneysel çalışmada kullanılabilmesi hususları ise, deneysel çalışmaların diğer olumsuz yönleridir.

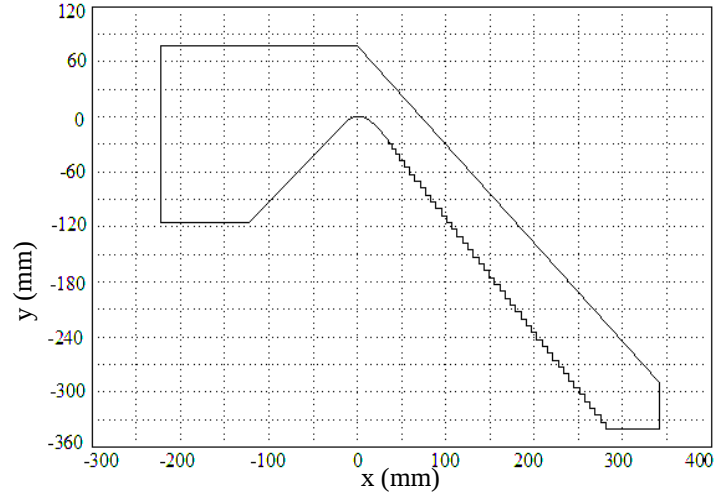
Sayısal çalışmalar; günümüzde özellikle paket yazılımların sayısının artması ve bu yazılımların güvenli sonuçlar vermesi, yüksek maddi kaynaklar gerektirmemesi, deney düzeneği kurulması için fazladan zaman harcanmaması, insan ve araç-gereç faktörü nedeniyle meydana gelen ölçüm hatalarının yaşanmaması gibi birçok sebepten dolayı sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak sayısal yöntemlerin de deneysel yöntemlere göre dezavantajlı olduğu yönleri vardır. Sayısal analizlerin hassasiyeti çözüm yapılan bilgisayarların gelişmiş olması ile doğru orantılıdır. Gelişmiş bilgisayarlarda çözüm süresi de kısalmaktadır. Paket yazılımlarla yapılan

analizlerde kullanıcının tecrübesi ön plana çıkmaktadır. Bu durum ise özellikle tecrübesiz araştırmacıları olumsuz yönde etkilemektedir.

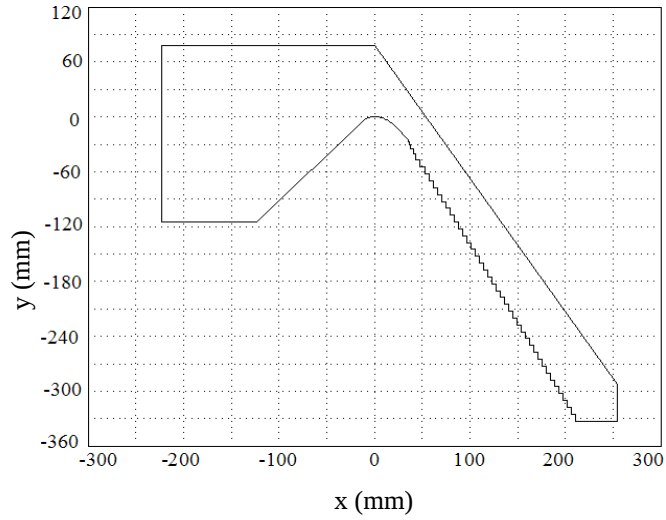
Bu bölümde üç farklı boşaltım kanalı taban eğimi ve dokuz farklı debi değeri için sayısal analizler yapılmıştır. Çalışmalarda “Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD)” metoduna göre analiz yapma imkanı veren Fluent isimli bir yazılım kullanılmıştır. HAD yazılımları yabancı literatürde “Computational Fluid Dynamics (CFD)” olarak bilinen çok geniş kapsamlı yazılımlardır. Akışkanların hareketini belirlemek için, temel denklemlerden ve deneysel sonuçlardan yola çıkarak geliştirilmiş bazı matematiksel yöntemler vardır. Bu yöntemlerin sayısal çözülmesi, karmaşık modeller için ancak bilgisayar desteği ile mümkün olabilmektedir. Sonlu elemanlar gibi sayısal yöntemler kullanılarak geliştirilen matematiksel modeller bilgisayar desteği ile çok hızlı ve etkili bir şekilde çözülebilir. Üç boyutlu modellerde hassas çözüm için sonlu eleman sayısı çok fazla artacağından çözüm zamanı ve zorluğu da çok fazla artmaktadır. Üç boyutlu hassas çözümler, günümüzde kullanılan hızlı ve bellek kapasitesi yüksek bilgisayarlar yardımı ile mümkün olmaktadır. Fluent sonlu hacimler yöntemini kullanan bir HAD yazılımıdır. 1983’ten bu yana dünya çapında birçok endüstri dalında kullanılan ve günden güne gelişerek tüm dünyadaki HAD piyasasında en çok kullanılan yazılım durumuna gelen Fluent, en ileri teknolojiye sahip ticari HAD yazılımı olarak kullanıcılarının en zor problemlerine kolay ve kısa sürede elde edilen çözümler sunmaktadır. Fluent, sahip olduğu ileri çözücü teknolojisi ve bünyesinde barındırdığı değişik fiziksel modeller sayesinde laminar ve türbülanslı akışlara, iletim, taşınım ve ışıınım ile ısı geçişini içeren problemlere, kimyasal tepkimeleri içeren problemlere, çok fazlı akışları içeren problemlere hızlı ve güvenilir çözümler üretir.



Şekil 4.1 $\alpha= 30^\circ$ için deney modelinin geometrisi.



Şekil 4.2 $\alpha=51.3^\circ$ için deney modelinin geometrisi.



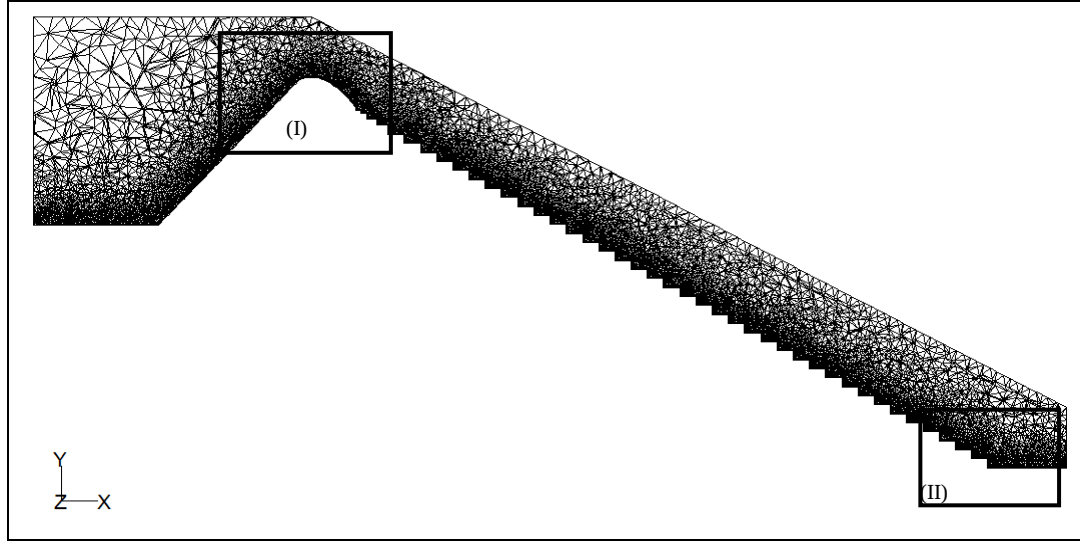
Şekil 4.3 $\alpha=60^\circ$ için deney modelinin geometrisi.

Şekil 4.1'de boşaltım kanalı taban açısı 30° olan deney modelinin, Şekil 4.2'de boşaltım kanalı taban açısı 51.3° olan deney modelinin ve Şekil 4.3'te ise boşaltım kanalı taban açısı 60° olan deney modellerinin geometrileri verilmiştir. Boşaltım kanalı, genişliği 0.5 m olacak şekilde boyutlandırılmıştır. Dolusavak kreti, mansap havuzu tabanından 3.23 m yüksektedir. Boşaltım kanalı menbasında hazne oluşturulmuş ve suyun haznedan boşaltım kanalına geçiş kısmında Ogee kreti oluşturulmuştur. Ogee kretinden sonra boşaltım kanalı başlangıcına, önce küçük boyutlardaki basamaklar (2 adet 2.5 cm yüksekliğinde ve 2 adet 5 cm yüksekliğinde) yerleştirilmiştir. Tam boyutlu basamaklar küçük basamaklardan sonra oluşturulmuştur. Bu durum, suyun enerjisinin ilk basamaklarda da kırılması amacıyla uygulanmıştır. 30° , 51.3° ve 60° taban açılı şütlere ait tam boyutlu basamakların boyutları Tablo 4.1'de verilmiştir.

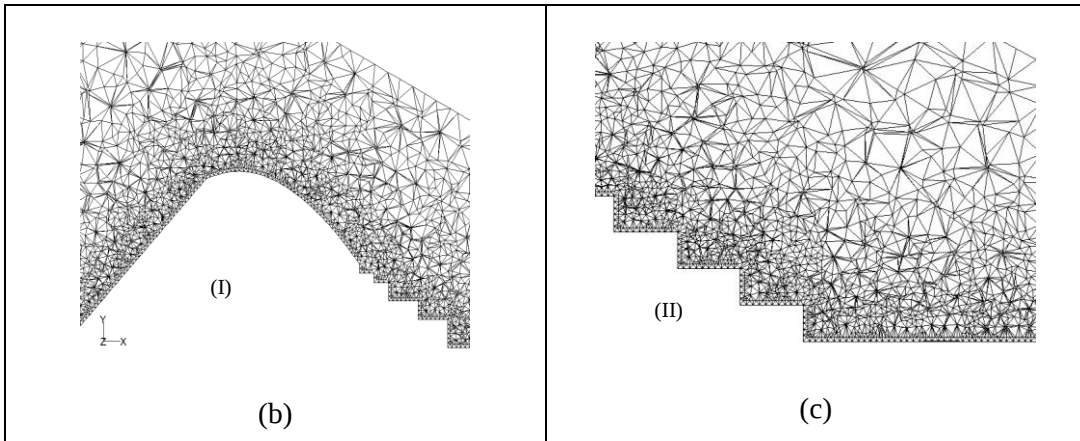
Tablo 4.1 Basamaklı dolusavak şüt açılara göre basamak boyutları

Şüt Açısı (°)	Basamak Yüksekliği (cm)	Basamak Genişliği (cm)
30	7.5	12.99
51.3	7.5	6.00
60	7.5	4.33

Sayısal analizler için, ilk önce modeli hazırlanacak olan deney düzeneklerinin simülasyonu bilgisayar ortamında oluşturulmuştur. Bu işlem için Fluent yazılımının alt programı olan Gambit isimli yazılım kullanılmıştır. Bu yazılımda; simülasyonu yapılacak olan düzeneğin geometrisi, başlangıç ve sınır koşulları ile çözümün hassas olmasına etki edecek olan sonlu eleman ağı modeli tanımlanmıştır. Çözümler için oluşturulan her bir sonlu eleman ağında, ortalama 850 000 adet sonlu eleman bulunmaktadır. Bu boyutta sonlu eleman sayısına sahip olan bir çözüm modeli için yaklaşık olarak 1 GB RAM bellek kapasiteli bilgisayarlara ihtiyaç duyulmaktadır.



(a)

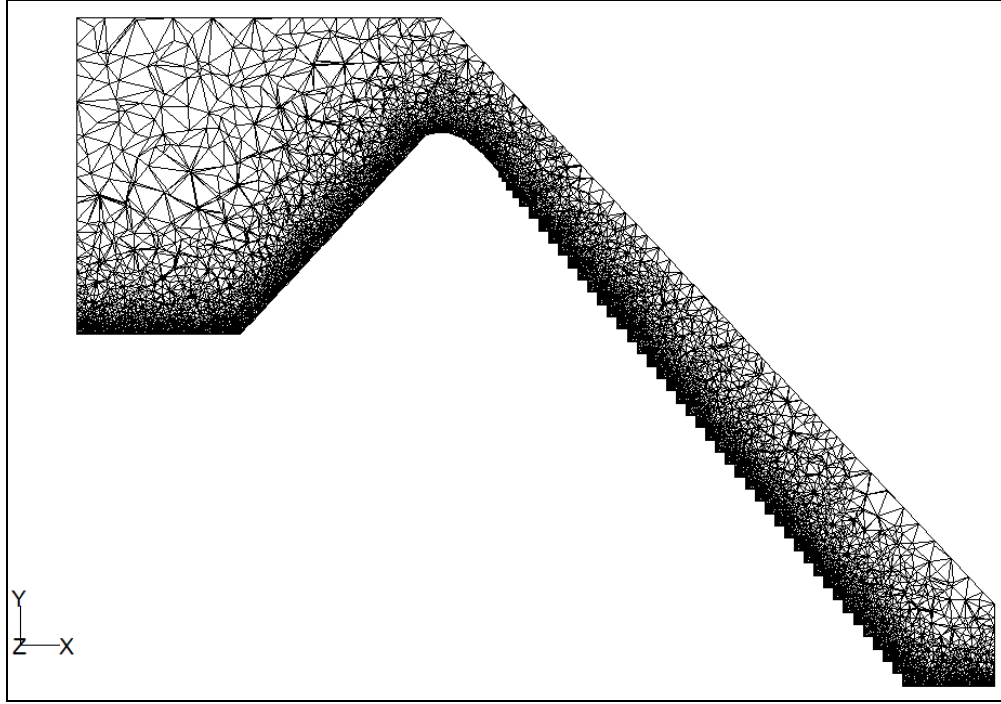


(b)

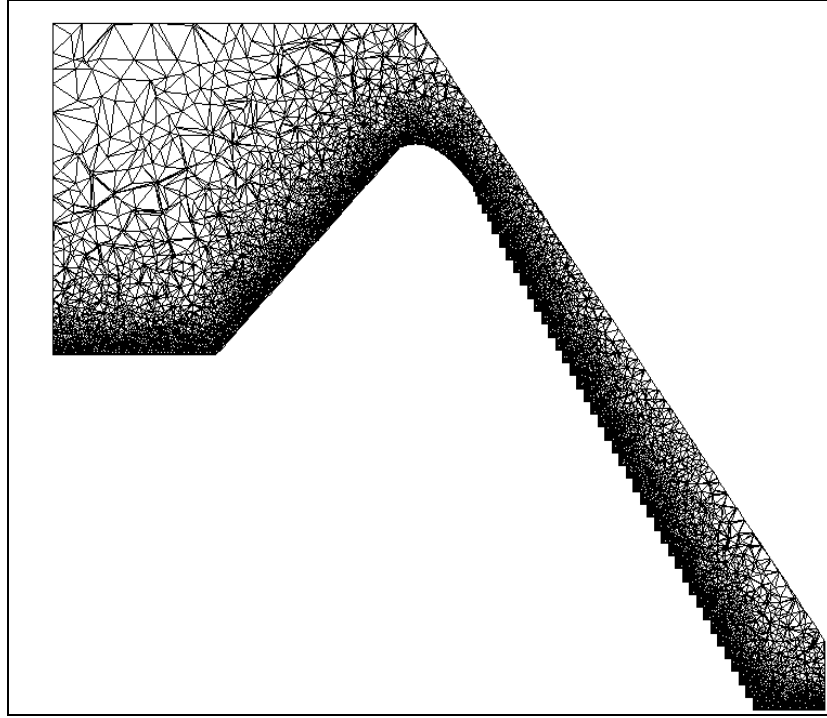
(c)

Şekil 4.4 Simülasyonu yapılmış olan deney düzeneğinin sonlu eleman ağı ($\alpha=30^\circ$)

Şekil 4.4'te $\alpha=30^\circ$ boşaltım kanalı açısına sahip olan deney düzeneği simülasyonu ve sonlu eleman ağı yapısı görülmektedir. Sayısal çalışmalar için model oluşturulurken sonlu eleman sayısı yeterli sayıda olmadığı veya ağ yapısı oluşturulan modele uygun olmadığı durumlarda yazılımdan sonuç alınamamış veya sonuçlar hatalı olmuştur. Bu durum dikkate alınmış ve her bir sayısal çalışma için birkaç kez model oluşturulmuş ve sonuçta en uygun olan sayısal model kullanılmıştır.



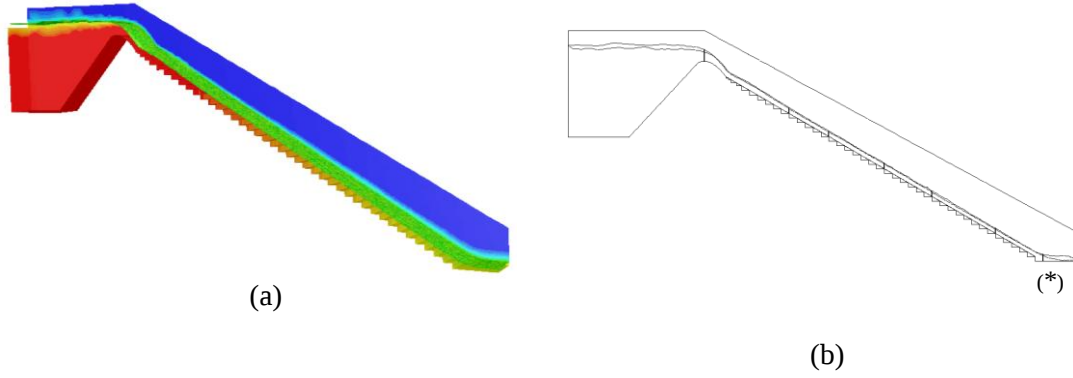
Şekil 4.5 $\alpha=51.3^\circ$ olan modele ait sonlu eleman ağı



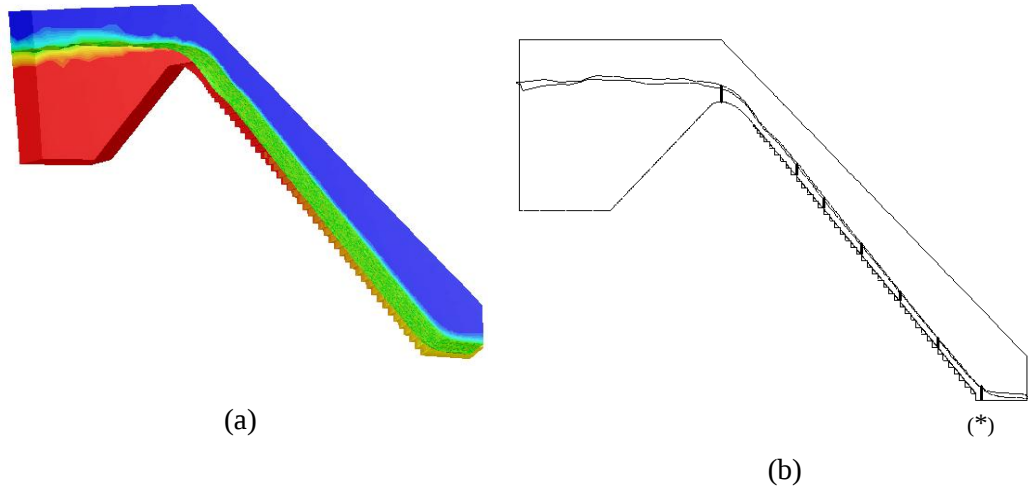
Şekil 4.6 $\alpha=60^\circ$ boşaltım kanalı taban açılı olan modele ait sonlu eleman ağı

Şekil 4.5'te ve Şekil 4.6'da 51.3° ve 60° şüt açılı modeller ve bu modellere ait sonlu eleman ağları görülmektedir. Tüm çalışmalarda hazırlanmış olan her bir deney modeli, Fluent yazılımına aktarılmış ve modele ait başlangıç şartları, sınır şartları, malzeme özellikleri, türbülans ve viskozite gibi özellikleri tanımlanmıştır. Bu çalışmada iki fazlı akım koşulları ve k- ϵ türbülans modeli baz alınarak, yazılımın Akışkan Hacmi Modeli (Volume of Fluid (VOF)) ile sayısal analizler yaptırılmıştır. Serbest yüzeyli akımlarda yazılımın VOF modeli daha uygun sonuçlar verdiği için çalışmalar bu modelle yapılmıştır. Çözüm yöntemi olarak da üç boyutlu ayrılmış (3D segregated) ve zamana bağlı olarak değişen (unsteady solver) akım modeli kullanılmıştır.

Üç farklı boşaltım kanalı taban açısı ve dokuz farklı debi değeri dikkate alınarak basamaklı ve basamaksız olmak üzere toplam 54 adet çözüm yapılmıştır. Her bir çözüm için, bilgisayarın yaklaşık olarak 30–48 saat arasında değişen sürelerde işlem yapması gerekmiştir. Kararlı akım koşulları elde edildikten sonra yazılımdan elde edilen sonuçlar alınmıştır.

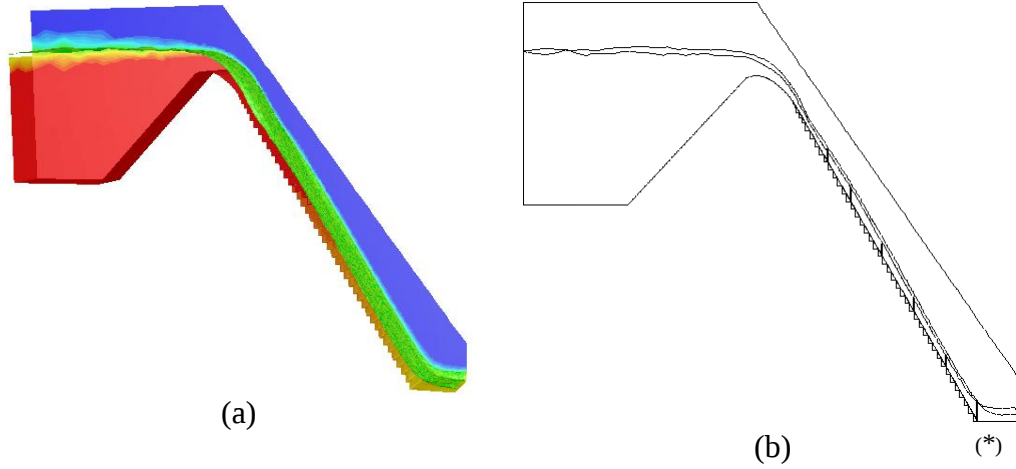


Şekil 4.7 $\alpha=30^\circ$ açılı modelin sayısal analiz sonucu elde edilen iki fazlı akım görüntüsü ve enerji ölçüm noktaları. (*) ölçüm alınan noktayı göstermektedir.



Şekil 4.8 $\alpha=51.3^\circ$ açılı modelin sayısal analiz sonucu elde edilen iki fazlı akım görüntüsü ve enerji ölçüm noktaları. (*) ölçüm alınan noktayı göstermektedir.

Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da sırasıyla 30° , 51.3° ve 60° şüt açılı basamaklı dolusavak modellerinin, Fluent yazılımıyla yapılan sayısal analiz sonucunda elde edilen iki fazlı akım görüntüleri ve basamaklar üzerlerinde enerji miktarlarının ölçüldüğü noktada tanımlanmış olan çizgiler görülmektedir. Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de yeşil renkli yüzey su-hava ara yüzeyini, kırmızı renkli kısım su ile dolu olan kısmı ve mavi renkli kısım ise hava ile temas eden kısmı göstermektedir.



Şekil 4.9 $\alpha=60^\circ$ açılı modelin sayısal analiz sonucu elde edilen iki fazlı akım görüntüsü ve enerji ölçüm noktaları. (*) ölçüm alınan noktayı göstermektedir.

Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da yeşil renkle gösterilen yüzeyler, hava-su ara yüzeylerini göstermektedir. Şekiller üzerinde ayrıca kritik akım derinliğinin, basamak üzerlerinde oluşan akım derinliklerinin ve hızların ölçüldüğü noktalar da gösterilmektedir. Ölçüm yapılan noktalarda boşaltım kanalının ekseninde, y doğrultusunda tanımlanan çizgiler yardımıyla derinlik ölçümleri yapılmıştır. Aynı çizgiler ölçüm yapılan noktalarda akımın hızının belirlenmesinde de kullanılmıştır.

4.1.2 Basamaklı Dolusavakların Hidrolik Karakteristikleriyle İlgili Literatürdeki Eşitlikler

Basamaklı dolusavaklarda enerji sönümlenmesi; birim debi, kritik akım derinliği, baraj yüksekliği, boşaltım kanalı eğimi, basamak geometrisi gibi parametrelerle doğrudan ilişkilidir. Chanson [4], sıçramalı ve nap akımı halleri için aşağıdaki enerji sönümlenme bağıntılarını vermiştir.

Chanson [4] tarafından verilen sonuçlar, nap akımının üst limitinin;

$$\frac{d_c}{h} = 0.89 - 0.4 \frac{h}{l} \quad \text{Nap akımı- geçiş akımı için} \quad (2.1)$$

ile yaklaşık olarak bulunabileceğini göstermiştir. Burada, d_c kritik derinlik, h ise basamak yüksekliğidir. Sıçramalı akımın alt limiti ise;

$$\frac{d_c}{h} = 1.2 - 0.325 \frac{h}{l} \quad \text{Geçiş akımı-sıçramalı akım için} \quad (2.2)$$

şeklinde. Baylar ve diğ.[56] tarafından ise aşağıdaki bağıntılar verilmiştir.

Nap akımı için;

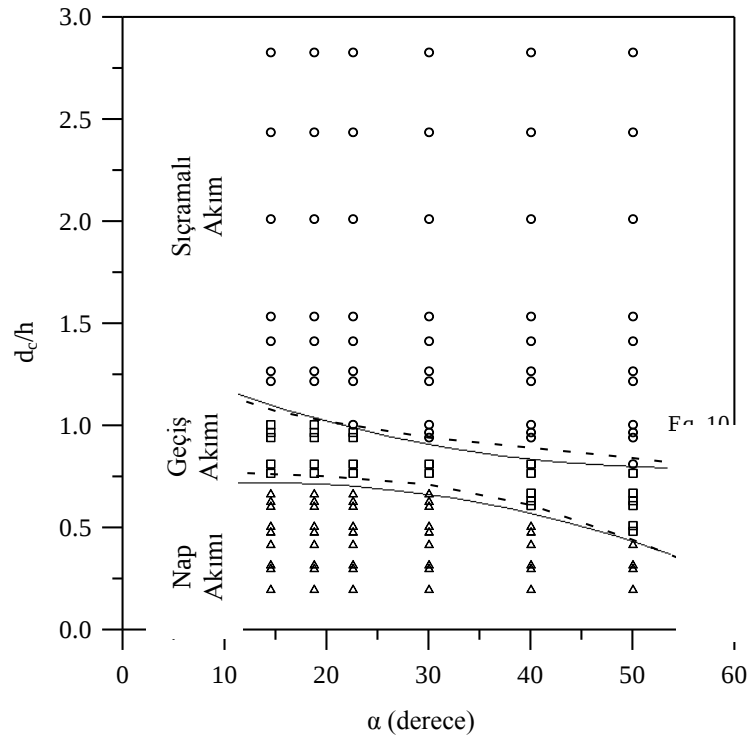
$$\left(\frac{h}{d_c}\right)_N = 0.57(\tan \alpha)^3 + 1.30 \quad 5.7^\circ \leq \alpha \leq 55^\circ \text{ için} \quad (4.1)$$

Sıçramalı akım için;

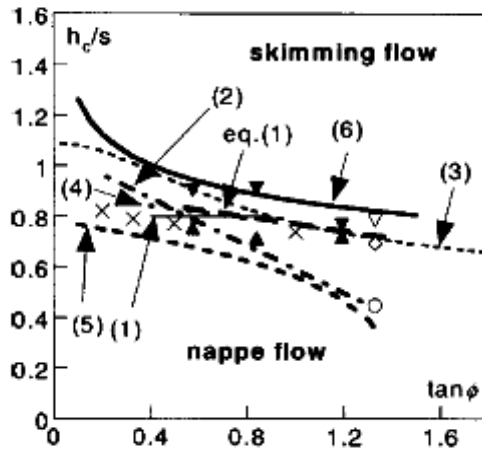
$$\left(\frac{h}{d_c}\right)_S = 1.16(\tan \alpha)^{0.165} \quad 5.7^\circ \leq \alpha \leq 55^\circ \text{ için} \quad (4.2)$$

şeklindedir.

Şekil 4.10'da nap, geçiş ve sıçramalı akım koşulları için sınır değerler verilmiştir.

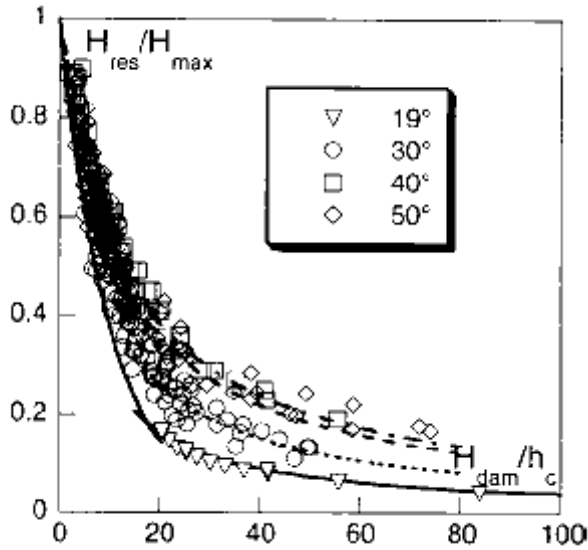


Şekil 4.10 Nap, geçiş ve sıçramalı akım koşulları için sınır değerler.(Kesikli çizgiler Ohtsu ve diğ. tarafından [56], düz çizgiler ise Baylar ve diğ. tarafından [17] verilmiştir)



Şekil 4.11 Nap akımdan Sıçramalı akıma geçiş ile ilgili olarak verilmiş olan deneysel, ampirik ve teorik denklemler. ((1) Rajaratnam (1990), (x) Stephenson (1991), (2) Chanson (1994), (3) Chanson (1996), (4) Tatewar ve Ingle (1999), (5) Yasuda ve Ohtsu (1999), (6) Matos (2001)).

Boes ve Hager [19] basamaklı dolusavaklarda enerji sönümlenme ile ilgili olarak yaptıkları çalışmalarında, deneysel olarak elde ettikleri sonuçlarını diğer çalışmalar ile karşılaştırmışlardır. Bu karşılaştırma Şekil 4.11’de görülmektedir.



Şekil 4.12 Rölatif sönümlenemeyen enerji oranları ile rölatif dolusavak yüksekliğinin ilişkisi ($\theta=19^\circ$ Yasuda ve Ohtsu 1999 [56], $\theta=30^\circ$, 40° ve 50° Boes ve Hager [19] (Bu şekilde yazar d_c yerine h_c simgesini kullanmıştır))

Şekil 4.12’de görüldüğü gibi H_d/d_c oranının artması ile $H_r/H_{\max}$ değerleri azalmıştır.

Sıçramalı akım durumunda enerji sönümlenme oranları Chanson [4] tarafından,

$$\frac{\Delta H}{H_{\max}} = 1 - \frac{\left(\frac{f}{8 \sin \alpha}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \cos \alpha + \frac{1}{2} \left(\frac{f}{8 \sin \alpha}\right)^{\frac{2}{3}}}{\frac{H_d}{d_c} + \frac{2}{3}} \quad \text{kapaksız dolusavaklar için} \quad (2.46)$$

$$\frac{\Delta H}{H_{\max}} = 1 - \frac{\left(\frac{f}{8 \sin \alpha}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \cos \alpha + \frac{1}{2} \left(\frac{f}{8 \sin \alpha}\right)^{\frac{2}{3}}}{\frac{H_d + H_p}{d_c}} \quad \text{kapaklı dolusavaklar için} \quad (2.47)$$

$$\text{Sürtünme faktörü için ise, } f = \frac{8 \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot d_0^2}{q_w^2} \cdot \frac{D_H}{4} \quad (4.3)$$

olarak verilmiştir. Burada, D_H hidrolik yarıçap (m); H_d baraj yüksekliği (m); H_0 toplam enerji yüksekliği (m); ΔH toplam enerji kaybı (m); H_p kret üzerindeki su yükü (m); d_c kritik akım derinliği (m); f sürtünme katsayısı; d_0 üniform akım derinliği (m); q_w dikdörtgen kesitli kanalın birim genişliğinden geçen debi ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$); α boşaltım kanalı taban açısı (derece)'dir.

Nap akımı halinde enerji sönümlenme oranlarına ait bağıntılar ise yine aynı araştırmacı tarafından,

$$\frac{\Delta H}{H_{\max}} = 1 - \left(\frac{0.54 \left(\frac{d_c}{h}\right)^{0.275} + \frac{3.43}{2} \left(\frac{d_c}{h}\right)^{-0.55}}{\frac{3}{2} + \frac{H_d}{d_c}} \right) \quad \text{kapaksız dolusavaklar için} \quad (2.26)$$

$$\frac{\Delta H}{H_{\max}} = 1 - \left(\frac{0.54 \left(\frac{d_c}{h}\right)^{0.275} + \frac{3.43}{2} \left(\frac{d_c}{h}\right)^{-0.55}}{\frac{H_d + H_0}{d_c}} \right) \quad \text{kapaklı dolusavaklar için} \quad (2.27)$$

şeklinde verilmiştir. Burada d_c (m) kritik akım derinliğini ve h (m) basamak yüksekliğini ifade etmektedir.

Ayrıca, kapaksız dolusavaklar için; $H_0 = H_d + 1.5 d_c$ ve kapaklı dolusavaklar için de, $H_{\max} = H_d + H_0$ eşitlikleri verilmiştir [4].

Bu çalışmada kapaksız dolusavak modeli oluşturulmuştur. Yapılan sayısal analizlerin kıyaslanması amacıyla teorik enerji sönümlenme oranları da Chanson [4] tarafından verilmiş olan Eşitlik (2.46) ve (2.26) yardımıyla hesaplanmıştır. Tablo 4.2, Tablo 4.3 ve Tablo 4.4'te

sırasıyla 30°, 51.3° ve 60° boşaltım kanalı taban eğimleri için, hesaplanmış olan teorik enerji sönümlenme oranları verilmiştir.

Boes ve Hager [19] tarafından ise, basamaklı dolu savaklardaki enerji sönümleme oranları ile ilgili olarak;

$H_d/d_c < 15 - 20$ için;

$$\frac{\Delta H}{H_{\max}} = \exp \left[\left(-0.045 \left(\frac{K}{D_{h,w}} \right)^{0.1} (\sin \alpha)^{-0.8} \right) \frac{H_d}{d_c} \right] \quad (2.50)$$

$H_d/d_c \geq 15 - 20$ için ise;

$$\frac{\Delta H}{H_{\max}} = \frac{F}{\frac{H_d}{d_c} + F} \quad (2.51)$$

(2.50) ve (2.51) Eşitliklerindeki F ve $D_{h,w}$;

$$F = \left(\frac{f_b}{8 \sin \alpha} \right)^{1/3} \cos \alpha + \frac{\phi}{2} \left(\frac{f_b}{8 \sin \alpha} \right)^{-2/3} \quad (2.52)$$

$$\frac{h_{w,u}}{d_c} = 0.215 (\sin \alpha)^{-1/3} \quad (2.53)$$

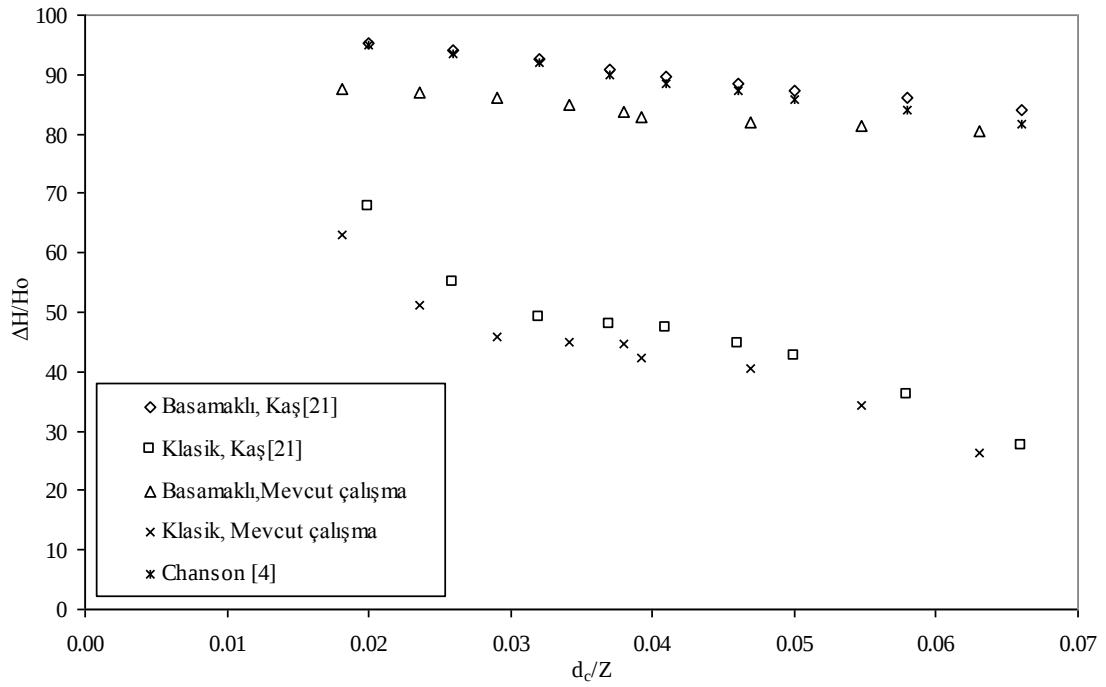
eşitlikleri ile bulunur. (2.53) Eşitliğindeki f_b ; ise;

$$f_b = [0.50 - 0.42 \sin(2\alpha)] \left(\frac{K}{D_{h,w}} \right)^{0.2} \quad (2.54)$$

eşitliği ile elde edilir. $D_{h,w} = 4 R_{h,w}$ alınabileceği Boes ve Hager [19] tarafından ifade edilir. Burada $K = h \cos \alpha$ bağıntısıyla belirlenen şüt tabanına dik yöndeki pürüzlülük yüksekliğini, $D_{h,w}$ hidrolik çapı, α şüt açısını, d_c kritik derinliği, ϕ kinetik enerji düzeltme faktörünü (yaklaşık 1.1 alınabilir), f_b taban pürüzlülüğünün sürtünme faktörünü, $R_{h,w}$ hidrolik yarıçapı, $h_{w,u}$ üniform akım derinliğini ve $K/D_{h,w}$ rölaf pürüzlülüğü ifade etmektedir.

4.1.3 Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması

Üç farklı boşaltım kanalı taban açısı için yapılan sayısal çalışmalar ile elde edilen sonuçlar, daha önceden Kaş [21] tarafından yapılmış olan deneysel çalışmaların ve literatürde verilen eşitlikler yardımıyla yapılan hesaplamaların sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Aşağıda verilmiş olan Şekil 4.11, Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Tablo 4.2, Tablo 4.3, Tablo 4.4 ile her çalışma için elde edilmiş olan enerji sönümlenme oranları verilmiştir.



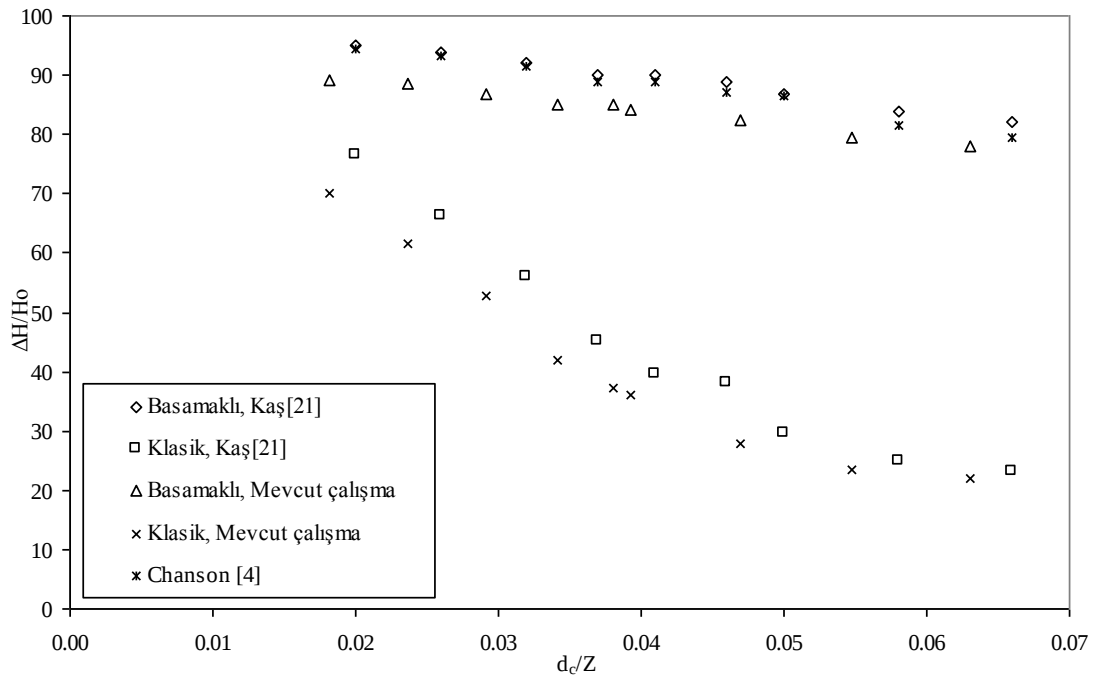
Şekil 4.13 $\alpha=30$ açılı boşaltım kanalı için enerji sönümlenme oranları

Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'te; d_c kritik akım derinliğini, Z ise enerji sönümlenme oranının hesaplandığı noktanın dolusavak kretine olan düşey mesafesini ifade etmektedir. Böylece d_c/Z oranı x eksenini boyutsuz yapmaktadır. $\Delta H/H_0$ oranı sönümlenen enerji miktarının toplam enerji miktarına oranıdır. Bu şekillerde, yapılmış olan deneyle [21] bulunmuş olan sonuçlar, Fluent yazılımı ile yapılan sayısal analizler ile elde edilen sonuçlar ve Chanson tarafından verilen Eşitlik (2.46 ve 2.26) yardımıyla hesaplanmış olan değerler grafik olarak verilmiştir. Deneysel ve sayısal çalışmalar için basamaklı ve basamaksız (düz) boşaltım kanalları durumları için de grafikler çizilmiştir. Şekil 4.13'ten görüleceği üzere basamaksız (düz) dolusavakta enerji sönümlenme oranı oldukça düşüktür. x eksenini oluşturan d_c/Z oranı arttıkça (debi değeri büyüdükçe) enerji sönümlenme oranları azalmaktadır. Bu azalma miktarları, basamaksız dolusavakta basamaklı dolusavağa göre daha fazladır.

Tablo 4.2 $\alpha=30$ açılı boşaltım kanalı için enerji sönümlenme oranları

Debi	d_c	d_c/Z	d_c	d_c/Z	Basamaklı	Düz	$\Delta H/H_0$
------	-------	---------	-------	---------	-----------	-----	----------------

(L/s)					$\Delta H/H_0$ (%)	$\Delta H/H_0$ (%)	$\Delta H/H_0$ (%)	$\Delta H/H_0$ (%)	(%)
	Kaş [21]		Mevcut Çalışma		Kaş [21]	Mevcut Çalışma	Kaş [21]	Mevcut Çalışma	Chanson [4]
20	0.05	0.02	0.05	0.02	95.22	87.60	67.78	63.01	94.97
30	0.07	0.03	0.07	0.02	93.95	86.90	55.00	51.15	93.54
40	0.09	0.03	0.08	0.03	92.57	86.09	49.11	45.80	91.96
50	0.10	0.04	0.09	0.03	90.91	84.82	47.95	45.01	90.08
60	0.11	0.04	0.11	0.04	89.59	83.86	47.21	44.67	88.53
70	0.13	0.05	0.11	0.04	88.45	82.97	44.63	42.41	87.14
80	0.14	0.05	0.13	0.05	87.28	82.04	42.59	40.51	85.72
100	0.16	0.06	0.15	0.05	86.04	81.31	36.03	34.35	84.04
120	0.18	0.07	0.17	0.06	84.13	80.35	27.38	26.25	81.60



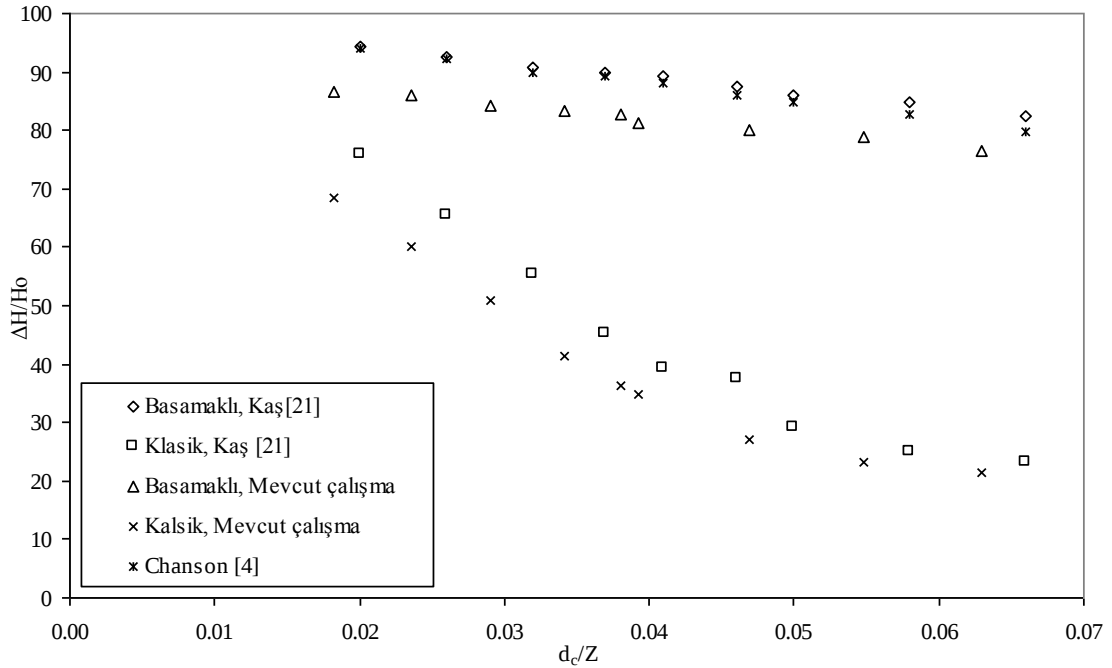
Şekil 4.14 $\alpha=51.3^\circ$ açılı boşaltım kanalı için enerji sönümlenme oranları

Şekil 4.14’de ve Tablo 4.3’te boşaltım kanalı taban eğiminin 51.3 derece olduğu durum için enerji sönümlenme oranları verilmiştir. Bu şekilde de basamaksız dolusavaktaki enerji sönümlenme oranlarının oldukça düşük olduğu görülmektedir.

Tablo 4.3 $\alpha=51.3^\circ$ açılı boşaltım kanalı için enerji sönümlenme oranları

Debi	d_c	d_c/Z	d_c	d_c/Z	Basamaklı		Düz		$\Delta H/H_0$ (%)
					$\Delta H/H_0$	$\Delta H/H_0$	$\Delta H/H_0$	$\Delta H/H_0$	

(L/s)	Kaş [21]		Mevcut Çalışma		(%) Kaş [21]	(%) Mevcut Çalışma	(%) Kaş [21]	(%) Mevcut Çalışma	Chanson [4]
20	0.05	0.02	0.05	0.02	94.90	89.12	76.49	70.15	94.56
30	0.07	0.03	0.07	0.02	93.90	88.65	66.28	61.56	93.39
40	0.09	0.03	0.08	0.03	92.00	86.95	56.11	52.68	91.36
50	0.10	0.04	0.09	0.03	89.99	85.11	45.11	42.08	88.78
60	0.11	0.04	0.11	0.04	89.89	85.02	39.68	37.11	88.77
70	0.13	0.05	0.11	0.04	88.90	84.14	38.14	35.95	87.24
80	0.14	0.05	0.13	0.05	86.90	82.35	29.57	27.88	86.54
100	0.16	0.06	0.15	0.05	83.92	79.56	24.83	23.44	81.60
120	0.18	0.07	0.17	0.06	82.11	77.88	23.11	21.88	79.38



Şekil 4.15 $\alpha=60^\circ$ açılı boşaltım kanalı için enerji sönümlenme oranları

Şekil 4.15'te ve Tablo 4.4'te boşaltım kanalı taban eğimi 60 derece için yapılan çalışmalar sonucu elde edilen enerji sönümlenme oranları verilmiştir.

Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'te sayısal analiz sonucu elde edilen verilerin deney sonucu elde edilmiş olan verilere yakın değerler olduğu görülmektedir. Aynı şekillerde d_c/Z oranının düşük olduğu kısımlarda sayısal çalışma ile elde edilen sonuçların deneysel sonuçlardan biraz daha uzak değerler olduğu görülmektedir. Bu durum, d_c/Z değerinin yani debi değerlerinin düşük olduğu durumlarda, modele su girişindeki hız değerlerinin düşük olması dolayısıyla çözüm hassasiyetinin azalması ile ilişkilidir.

Tablo 4.4 $\alpha=60^\circ$ açılı boşaltım kanalı için enerji sönümlenme oranları

Debi	d_c	d_c/Z	d_c	d_c/Z	Basamaklı		Düz		$\Delta H/H_0$
					$\Delta H/H_0$	$\Delta H/H_0$	$\Delta H/H_0$	$\Delta H/H_0$	(%)

(L/s)	Kaş [21]		Mevcut Çalışma		(%) Kaş [21]	(%) Mevcut Çalışma	(%) Kaş [21]	(%) Mevcut Çalışma	Chanson [4]
20	0.05	0.02	0.05	0.02	94.26	86.61	75.97	68.54	94.06
30	0.07	0.03	0.07	0.02	92.70	86.02	65.43	60.05	92.25
40	0.09	0.03	0.08	0.03	90.64	84.15	55.28	50.89	89.85
50	0.10	0.04	0.09	0.03	89.98	83.46	45.10	41.23	89.17
60	0.11	0.04	0.11	0.04	89.14	82.78	39.35	36.25	88.05
70	0.13	0.05	0.11	0.04	87.37	81.18	37.48	34.68	86.08
80	0.14	0.05	0.13	0.05	86.13	80.05	29.31	27.04	84.91
100	0.16	0.06	0.15	0.05	84.80	78.82	25.09	23.28	82.72
120	0.18	0.07	0.17	0.06	82.42	76.63	23.20	21.57	79.68

Bu bölümde; basamaklı dolusavakların akımın enerjisini sönümleme özelliğinin araştırıldığı sayısal ve deneysel çalışmalardan elde edilen veriler karşılaştırılmış ve basamaklı dolusavakların enerji sönümleme oranlarının, klasik dolusavaklara göre oldukça fazla olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca sayısal ve deneysel çalışmaların tamamında sıçramalı akım koşulları meydana geldiği ve debi değerleri ile d_c/Z oranlarının artması durumlarında enerji sönümleme oranların azaldığı belirlenmiştir.

Boşaltım kanalı taban açısı 30° olan modelde enerji sönümleme oranları 20–120 L/s arasındaki debi değerleri için %84–94 aralığında olduğu ve bu enerji sönümleme oranlarının 51.3° ve 60° taban açılı modellerin enerji sönümleme oranlarından daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Taban açıları 51.3° ve 60° olan boşaltım kanalı modellerine ait enerji sönümleme oranları ise birbirlerine yakın değerlerdedir. Tüm çalışmalardan elde edilen sonuçların literatürde verilmiş olan eşitlikler ile de uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır.

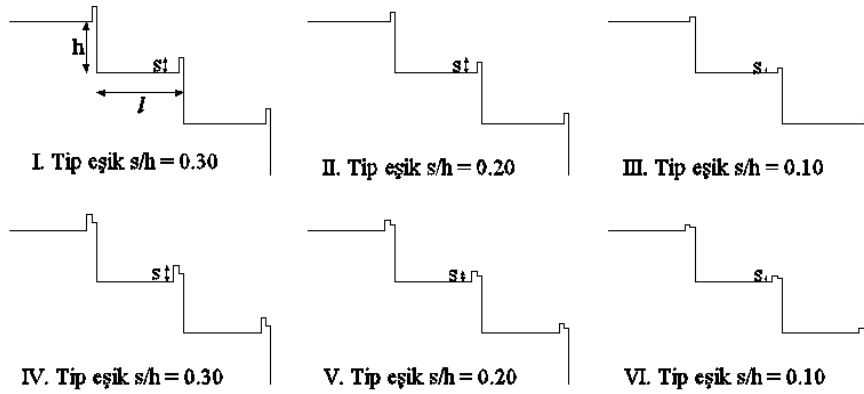
Sayısal yöntemle elde edilen sonuçlar, deneysel çalışmayla elde edilmiş olan sonuçlara göre yaklaşık olarak %5~9 civarında farklılık göstermiştir. Bu durum sayısal yöntemlerin güvenilirliğini desteklemektedir. Bu bölümde yapılan çalışma neticesinde Fluent yazılımı yardımıyla yapılan sayısal analizlerin güvenilirliği ortaya koyulmuş ve bu doktora tezi için sayısal yöntem olarak Fluent yazılımından yararlanılmasının uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

4.2 Eşikli Basamaklı Dolusavakların Sayısal Analizi

Basamaklı dolusavakların enerji sönümleme oranlarını belirlemek amacıyla bazı sayısal analizler yapılmıştır. Sayısal analizler yapılırken Fluent isimli yazılımdan faydalanılmıştır. Bölüm 4.1’de, Fluent yazılımı yardımıyla basamaklı dolusavakların enerji sönümleme oranlarını belirlemek amacıyla analizler yapılmış ve bulunan sonuçlar deneysel ve literatürdeki eşitliklerle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma neticesinde; Fluent yazılımının, basamaklı dolusavakların

enerji sönümleme oranlarını belirlemek amacıyla yapılan sayısal çalışmalarda kullanılmasının uygun ve güvenilir bir metot olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu bölümde ise; üç farklı boşaltım kanalı taban açısı (30° , 40° ve 50°) ve altı farklı debi değeri için sayısal analizler yapılmıştır. Basamaksız, basamaklı ve altı farklı tipte eşikli basamaklı olmak üzere toplam sekiz farklı dolusavak modeli için toplam 144 adet sayısal analiz yapılmıştır. Eşiksiz basamaklı dolusavakların sayısal analizleri, karşılaştırma amacıyla yapılmıştır. Ayrıca düz (klasik) dolusavaklar için de sayısal analizler yapılmıştır.



Şekil 4.16 Sayısal analizlerde kullanılan eşik tipleri ve boyutları

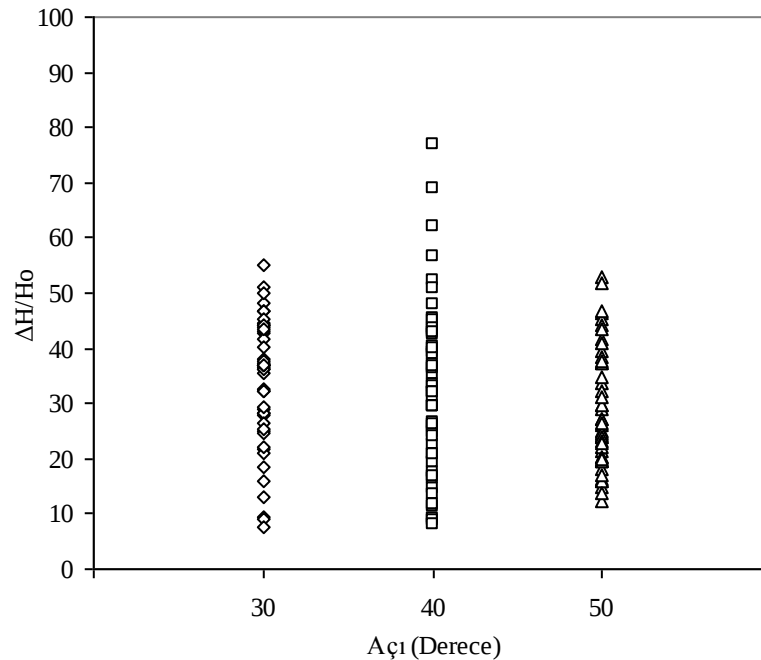
Şekil 4.16’da sayısal analizlerde kullanılmış olan eşik tipleri görülmektedir. I, II ve III’üncü tip eşikler düz eşiğin yüksekliğinin basamak yüksekliğine üç farklı oranı şeklindedir. IV, V ve VI’ncı tip eşikler ise kademeli tip eşiğin yüksekliğinin basamak yüksekliğine üç farklı oranıdır.

Her bir sayısal analiz için ayrı ayrı sonlu eleman ağları oluşturulmuştur. Oluşturulan sonlu eleman ağlarında, 500 000 ile 1 000 000 arasında değişen miktarlarda sonlu elemanlar bulunmaktadır. Özellikle debi değerlerinin düşük olduğu analizlerde az sonlu elemanlı modellerden sonuç alınamamış, bazen de çözüm tamamlanmış ancak sonuçlar hatalı olmuştur. Bu durumlarda sonlu eleman sayıları artırılarak yeniden çözüm yapılmıştır. Sonlu eleman sayılarının artırılması da bazen doğru sonuçlar elde edilmesi için yeterli olmamıştır. Bu tür durumlarda da ise, sonlu eleman ağı yapısı değiştirilmiştir. Dolayısıyla doğru çözümlerin elde edilebilmesi için yapılan bu işlemler bazen 6–7 kez, tekrarlanmıştır.

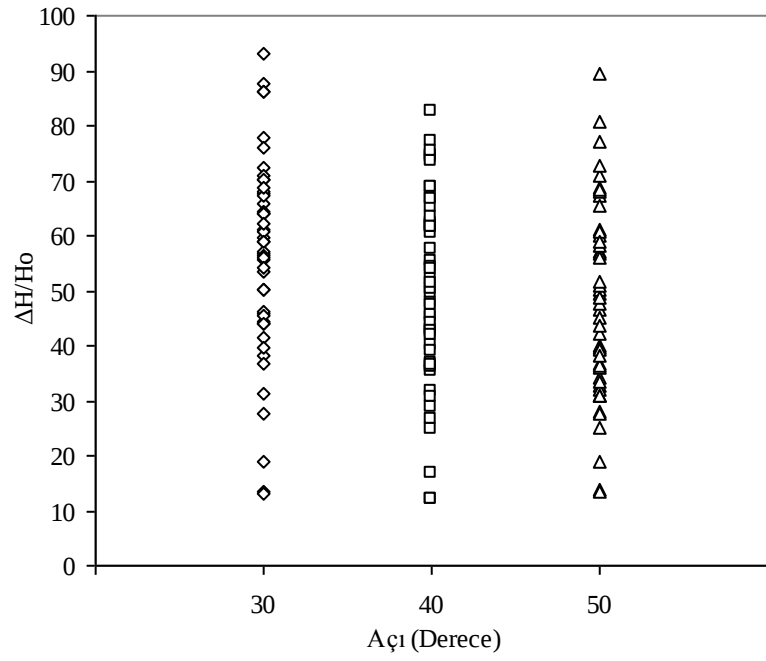
Gambit isimli yazılımda yüzey ve hacimler için kullanılabilecek 8’er adet sonlu eleman ağı yapıları mevcuttur. Bu bölümde yapılan sayısal analizlerde kullanılan sonlu eleman ağları için; genellikle önce yüzeyler için sonlu eleman ağı oluşturulmuş ve daha sonra bu yüzey elemanları baz alınarak bir büyüme fonksiyonu tanımlanmak suretiyle tüm hacme ait sonlu eleman ağı oluşturulmuştur.

Tüm çalışmalarda hazırlanmış olan her bir deney modeli Fluent yazılımına aktarılmış ve modele ait başlangıç şartları, sınır şartları, malzeme özellikleri, türbülans ve viskozite gibi özellikleri tanımlanmıştır. Bu çalışmada iki fazlı akım koşulları ve k-ε türbülans modeli baz alınarak, yazılımın Akışkan Hacmi Modeli (Volume of Fluid (VOF)) ile sayısal analizler yaptırılmıştır. Serbest yüzeyli akımlarda yazılımın VOF modeli daha uygun sonuçlar verdiği için çalışmalar bu modelle yapılmıştır. Çözüm yöntemi olarak ta üç boyutlu ayrılmış (3D segregated) ve zamana bağlı olarak değişen (unsteady solver) akım modeli kullanılmıştır.

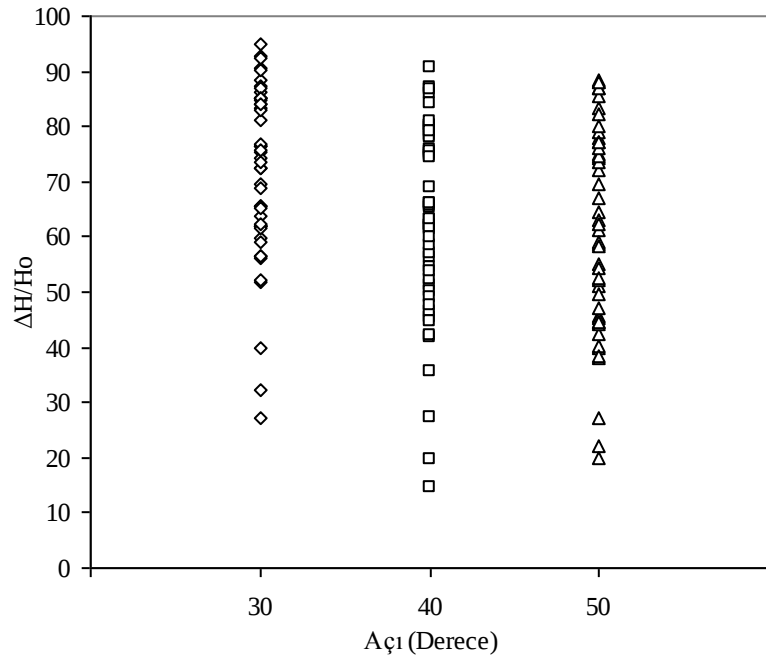
Üç farklı şüt açısı için Fluent yazılımı yardımıyla yapılmış olan sayısal analizlere ait veriler aşağıda verilmiştir. Sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar aşağıda grafikler halinde verilmiştir. Şekil 4.17, 4.18, 4.19 ve 4.20’de, sayısal modellere ait ölçüm noktaları olan sırasıyla; Z=1, Z=2, Z=3 ve Z=4 noktalarındaki enerji sönümlenme oranlarının farklı şüt açıları ile değişimleri görülmektedir. Z değerleri 1’den 4’e doğru gidildikçe farklı şüt açılı modellerin hepsinde enerji sönümlenme oranları artmıştır. Z=1, 2 ve 3 için çizilen grafiklerde, enerji sönümlenme yüzdelerinin ortalamalarına göre büyükten küçüğe doğru sıralaması; 30°, 40° ve 50° şüt açılı modeller şeklinde olmuştur. Z=4’te ise enerji sönümlenme oranlarının ortalamaları birbirine çok yakın değerler olarak gerçekleşmiştir. Enerji sönümlenme oranlarının en yüksek değerleri genellikle; Z=1’de %50-60, Z=2’de %80-90, Z=3, ve 4’te ise %90-100 arasında meydana gelmiştir.



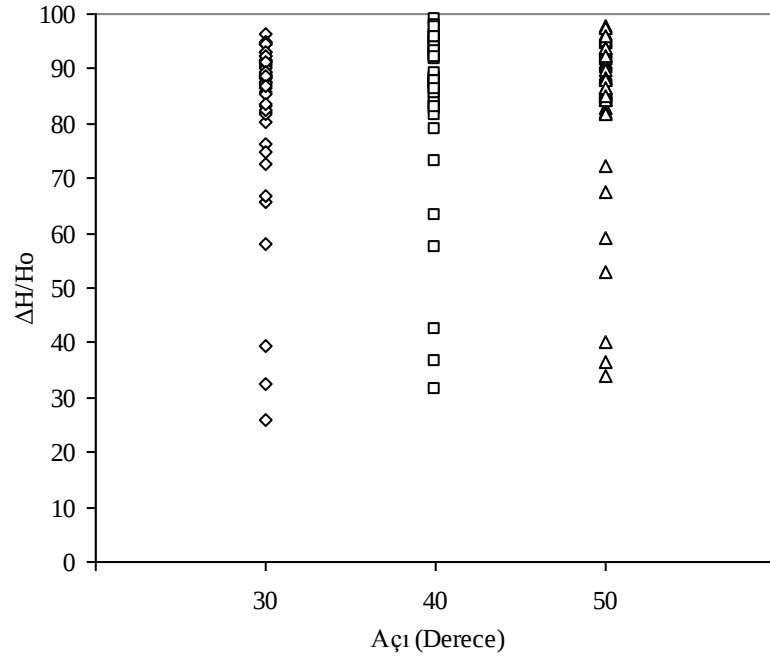
Şekil 4.17 Z=1’de farklı şüt açıları için enerji sönümlenme oranları.



Şekil 4.18 $Z=2$ 'de farklı şüt açıları için enerji sönümlenme oranları.

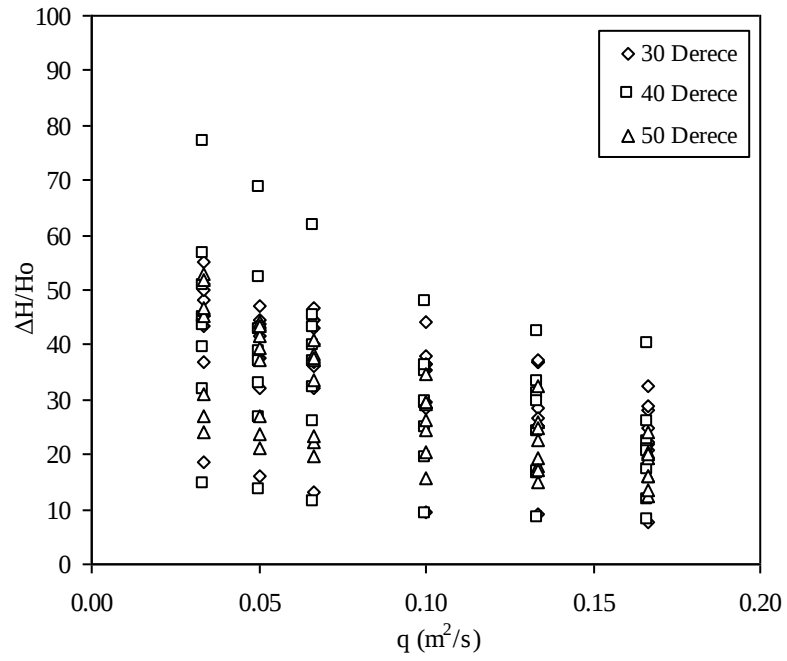


Şekil 4.19 $Z=3$ 'te farklı şüt açıları için enerji sönümlenme oranları.

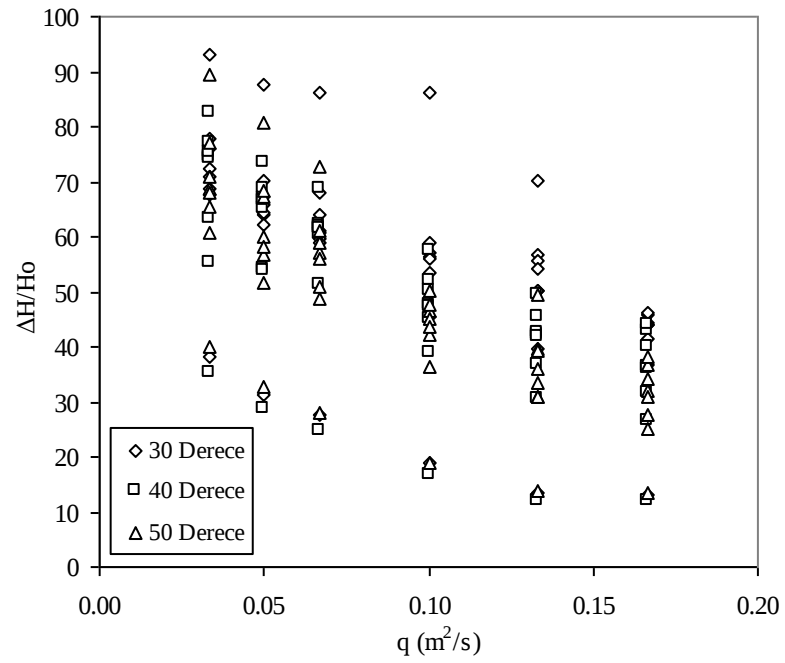


Şekil 4.20 Z=4'te farklı şüt açıları için enerji sönümlenme oranları.

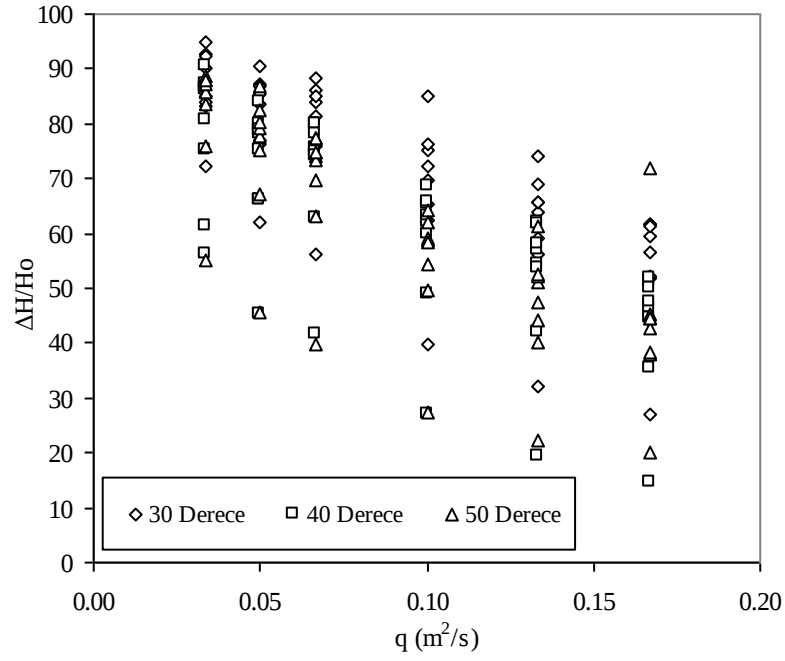
Şekil 4.21, 4.22, 4.23 ve 4.24'te üç farklı şüt açısına sahip olan modellerin Z=1, 2, 3 ve 4 noktalarında birim debi değerleri ile enerji sönümlenme oranlarının değişimi verilmiştir. Tüm Z değerleri için enerji sönümlenme oranları birim debinin artmasıyla azalmıştır. Z değerleri 1'den 4'e doğru gittikçe enerji sönümlenme oranları da artmıştır. Tüm Z değerleri için enerji sönümlenme oranları genelde 30° ve 40° şüt açılı modellerde daha yüksek olmuştur. Aynı şekillerde her birim debinin karşılığında tüm şüt açılı modellere ait düşük enerji sönümlenme oranları görülmektedir. Bu değerler her model için kıyaslama amacıyla sayısal analizi yapılan klasik (basamaksız) dolusavak modeline ait enerji sönümleme oranlarıdır. Z değerleri arttıkça, klasik dolusavak modeli ile basamaklı ve eşikli dolusavak modellerinin enerji sönümleme oranları arasındaki farkın gittikçe arttığı görülmektedir. Z=4 noktasında farklı basamak ve eşik tipine sahip modeller arasındaki farkın azaldığı görülmektedir.



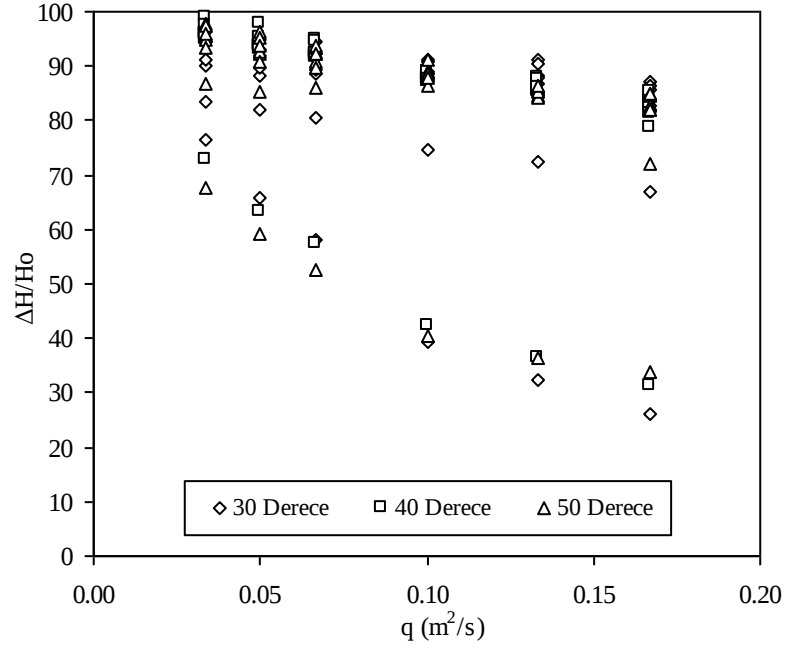
Şekil 4.21 $Z=1$ 'de birim debilere göre enerji sönümlenme oranlarındaki değişim.



Şekil 4.22 $Z=2$ 'de birim debilere göre enerji sönümlenme oranlarındaki değişim.



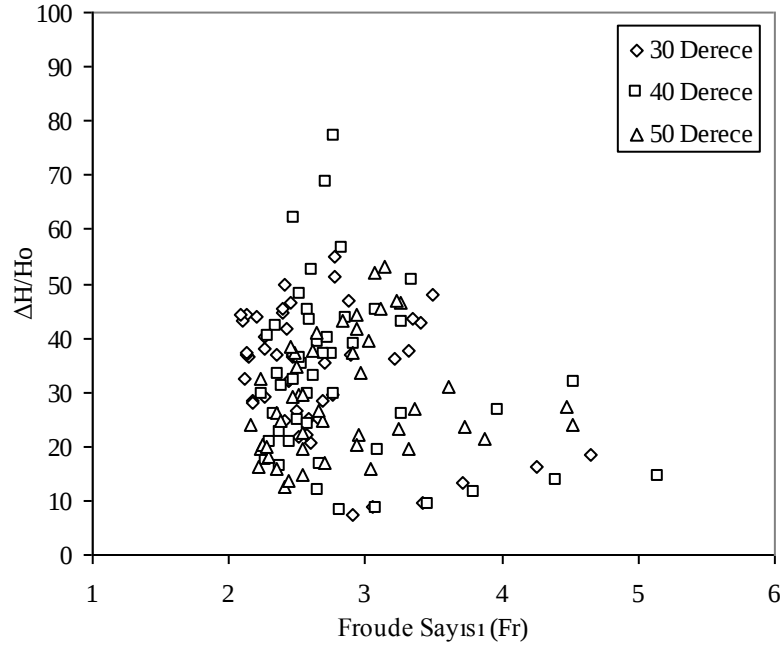
Şekil 4.23 Z=3'te birim debilere göre enerji sönümlenme oranlarındaki değişim.



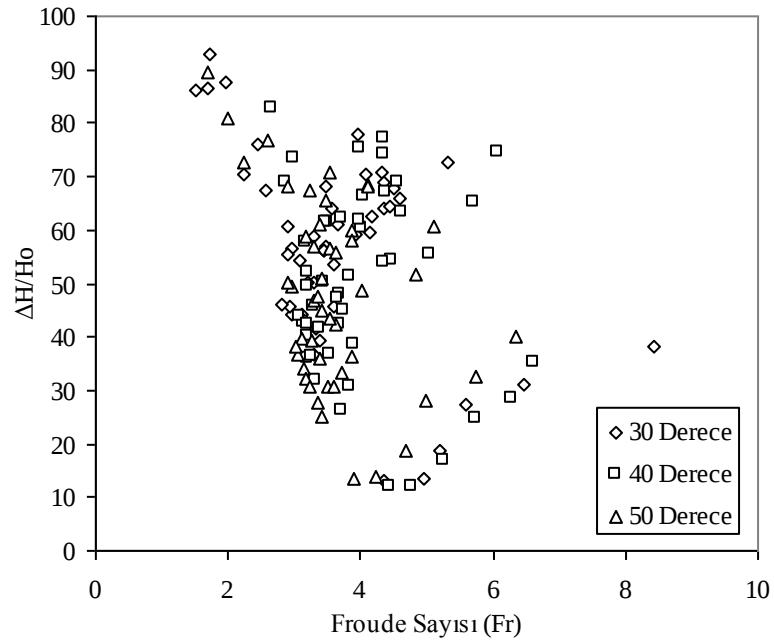
Şekil 4.24 Z=4'te birim debilere göre enerji sönümlenme oranlarındaki değişim.

Şekil 4.25, 4.26, 4.27 ve 4.28'de farklı Z değerlerinde Froude sayıları ile enerji sönümlenme oranlarının ilişkisi görülmektedir. Froude sayıları genellikle; Z=1'de 2-5, Z=2'de 2-7, Z=3'te 2-8 ve Z=4'te 1-10 arasında olmuştur. Z arttıkça enerji sönümlenme oranları da artmıştır. Z=4'te Froude sayıları birbirine daha yakın ve genellikle 2 civarında değerler

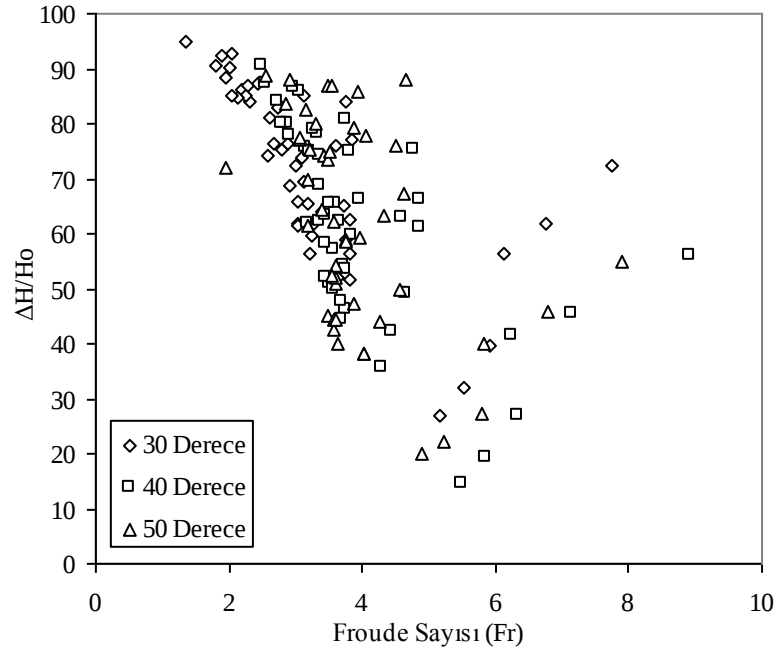
olmuşlardır. $Z=1, 2, 3$ ve 4 için verilen şekillerde yüksek Froude değerleri klasik (basamaksız) dolusavak modeline ait değerlerdir.



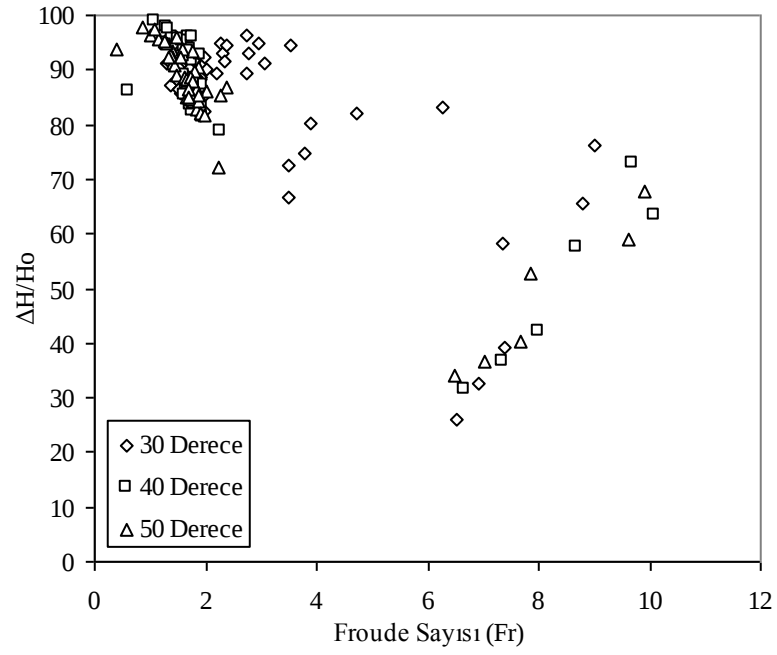
Şekil 4.25 $Z=1$ 'de Froude sayılarına göre enerji sönümlenme oranlarının değişimi.



Şekil 4.26 $Z=2$ 'de Froude sayılarına göre enerji sönümlenme oranlarının değişimi.



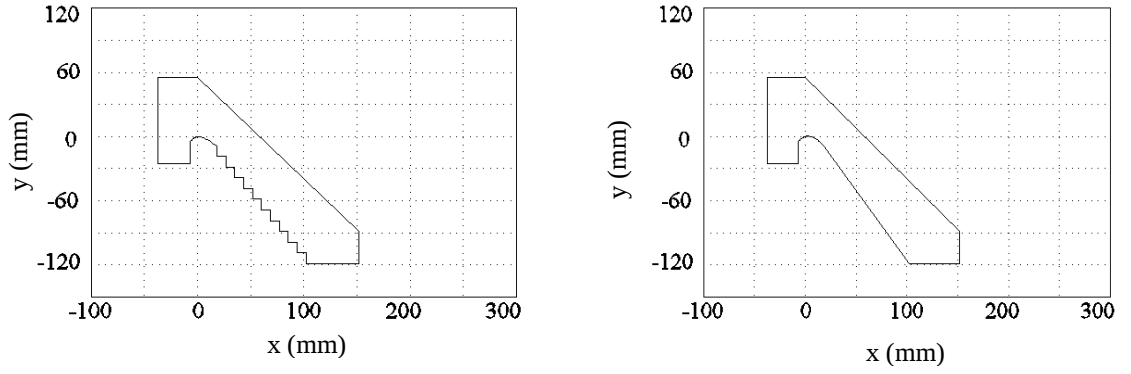
Şekil 4.27 Z=3'te Froude sayılarına göre enerji sönmülenme oranlarının değişimi.



Şekil 4.28 Z=4'te Froude sayılarına göre enerji sönmülenme oranlarının değişimi.

Farklı şüt açılı dolusavaklar için yapılan sayısal modellemeler ve analizlerden elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

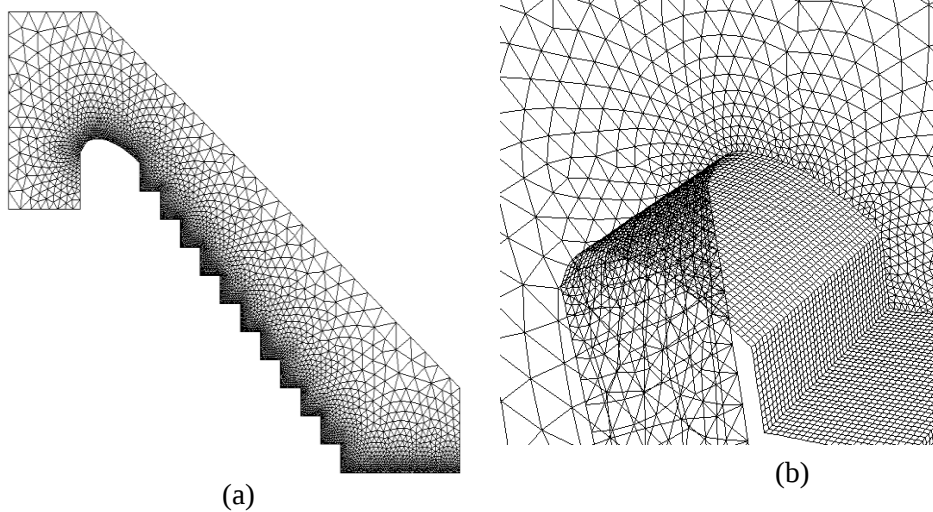
4.2.1 Şüt Açısı 50° Olan Dolusavak İçin Oluşturulan Sayısal Modeller



Şekil 4.29 50° şüt açılı dolusavak modelinin geometrisi

Şekil 4.29’da 50° şüt açılı dolusavak modelinin basamaklı ve basamaksız (klasik) durumlarına ait geometrileri görülmektedir. Sayısal analizler yapılırken bu şekilde verilmiş olan ve Şekil 4.16’da görülen eşik tipleri ile oluşturulmuş olan modeller kullanılmıştır. 50° şüt açılı dolusavak modelinde; basamak yükseklikleri 10 cm, genişlikleri ise 8.39 cm olarak boyutlandırılmıştır. Modelin dolusavak kreti ile mansap havuzu tabanı arasındaki kot farkı ise; 118.7 cm dir.

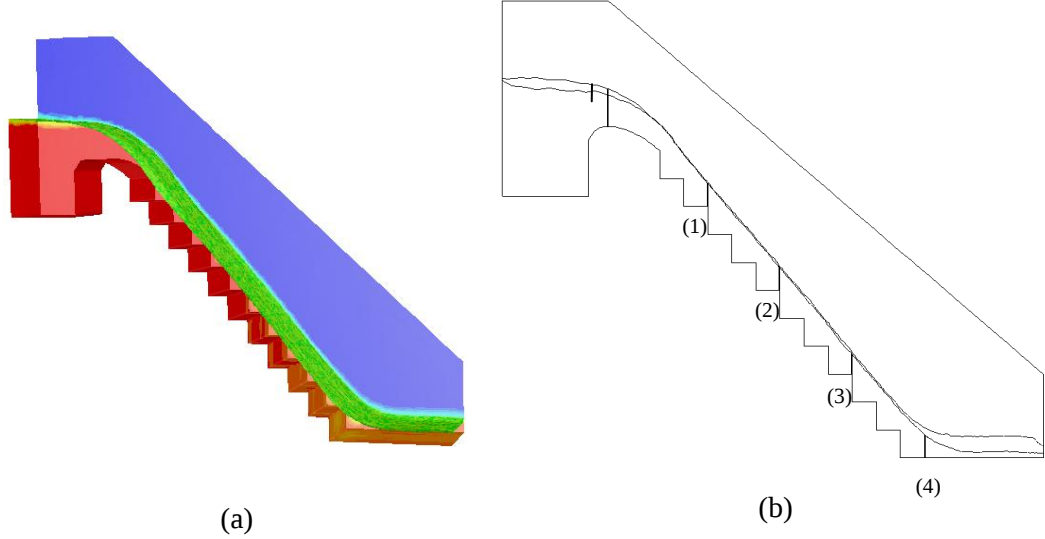
Şekil 4.30’da 50° şüt açılı dolusavak için Gambit yazılımı yardımıyla oluşturulmuş olan sonlu eleman ağı görülmektedir.



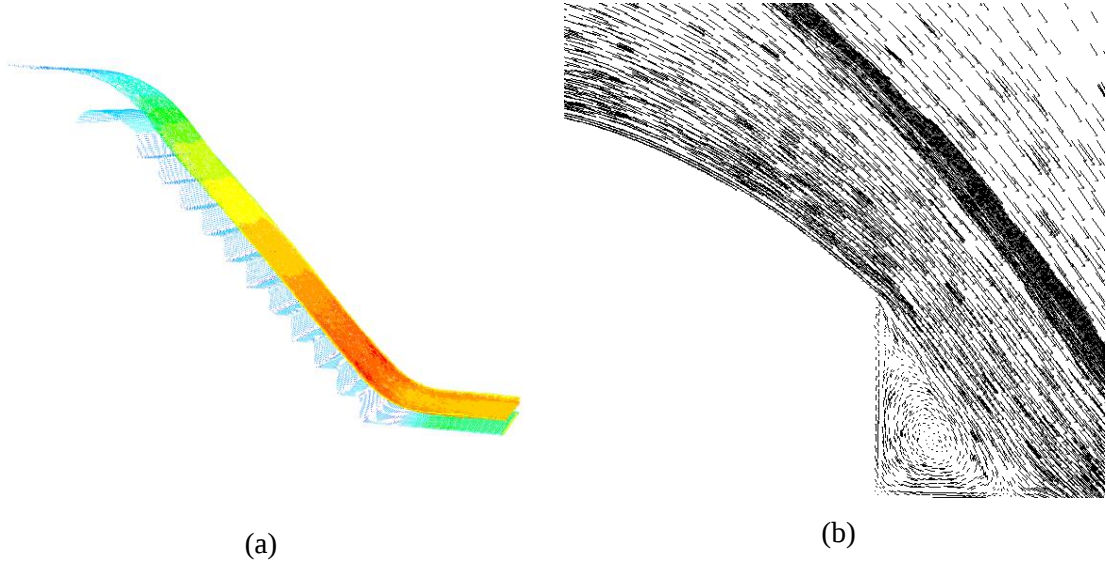
Şekil 4.30 50° şüt açılı dolusavak modeline ait sonlu eleman ağı yapısı

Şekil 4.30’da görülen sonlu eleman ağı oluşturulurken önce yüzeyler için sonlu eleman ağı oluşturulmuştur. Basamaklı dolusavak modelinin taban kısmını oluşturan yüzeyler seçilmiş ve Fluent yazılımının “Mesh-Faces” bölümünde “Quad-Pave” komutu kullanılarak bu yüzeyler sonlu elemanlara bölünmüştür. Bu tezde çalışılan çözüm modelleri için yapılan birçok

denemeden sonra yüzeylerde en uygun sonlu elemanların “Quad-Pave” komutu ile oluşturulabilindiği belirlenmiştir. Daha sonra yazılımın “Size Function” menüsünden taban yüzeylerindeki sonlu elemanlar baz alınmak suretiyle büyüme fonksiyonu tanımlanmıştır. Büyüme fonksiyonu, oluşturulacak olan hacme ait sonlu eleman sayısını doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle farklı çözümler için farklı büyüme fonksiyonları tanımlanmıştır.

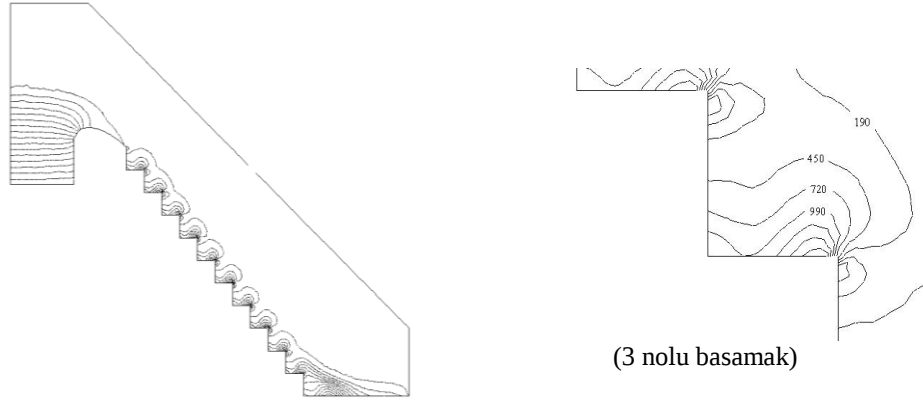
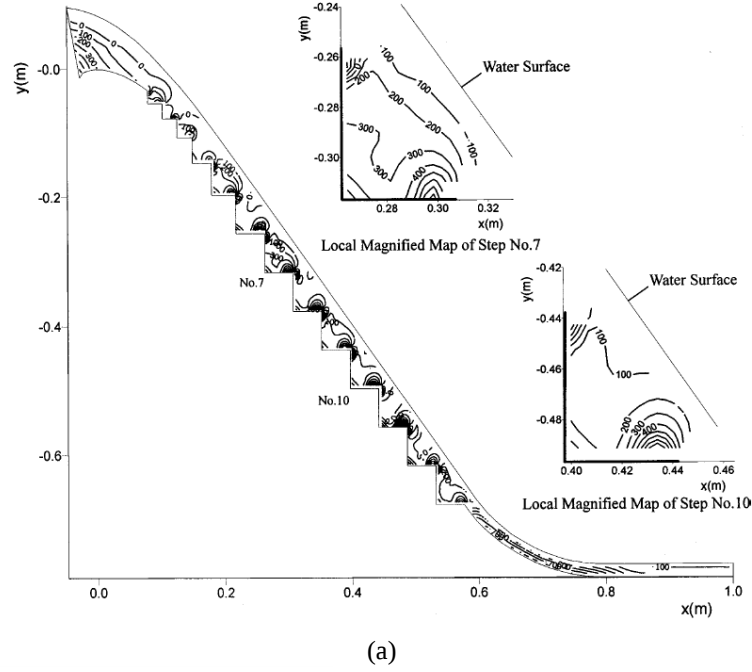


Şekil 4.31 50° taban açılı modelin sayısal analiz sonucu elde edilen iki fazlı akım görüntüsü ve enerji ölçüm noktaları. (1), (2), (3), (4) ölçüm alınan noktaları göstermektedir.



Şekil 4.32 50° taban açılı modelin sayısal analiz sonucu elde edilen hız vektörleri

Şekil 4.31’de 50° taban eğimli modelin sayısal analiz sonucu elde edilen iki fazlı akım görüntüsü ve modelin enerji ölçümlerinin yapıldığı noktaları görülmektedir. Bu şekilde yeşil renkle gösterilen yüzey, hava-su ara yüzeylerini göstermektedir. Şekil üzerinde ayrıca kritik akım derinliğinin, basamak üzerlerinde oluşan akım derinliklerinin ve hızların ölçüldüğü

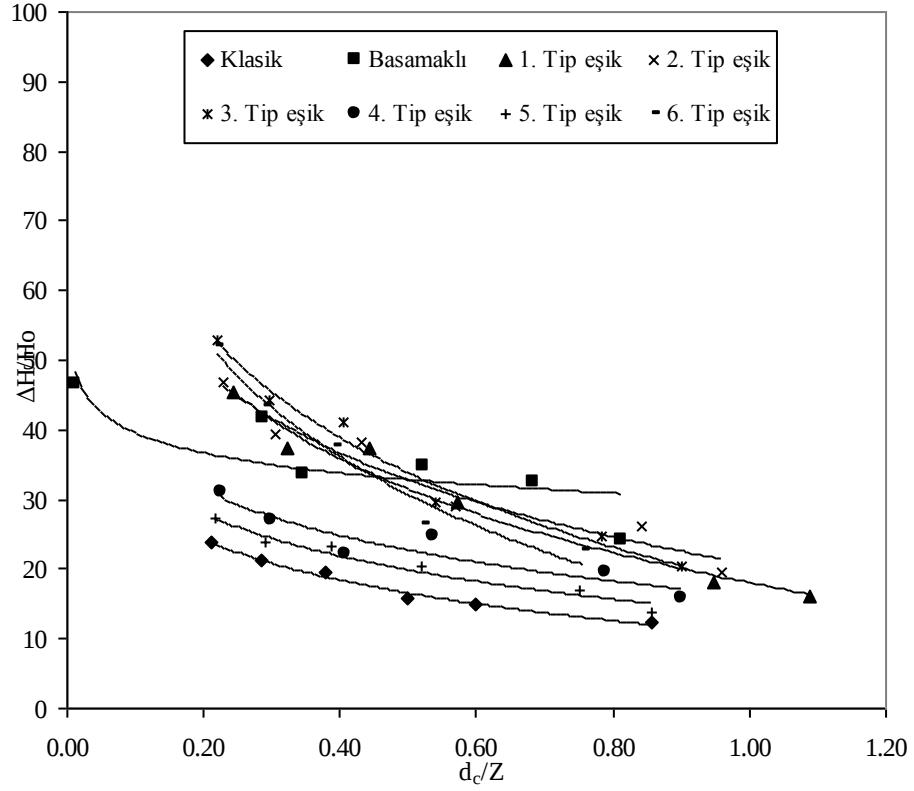


Şekil 4.34 50° şüt açılı model için Cheng ve diğ. [51] tarafından verilen ve mevcut çalışmayla çizilen eş basınç eğrileri

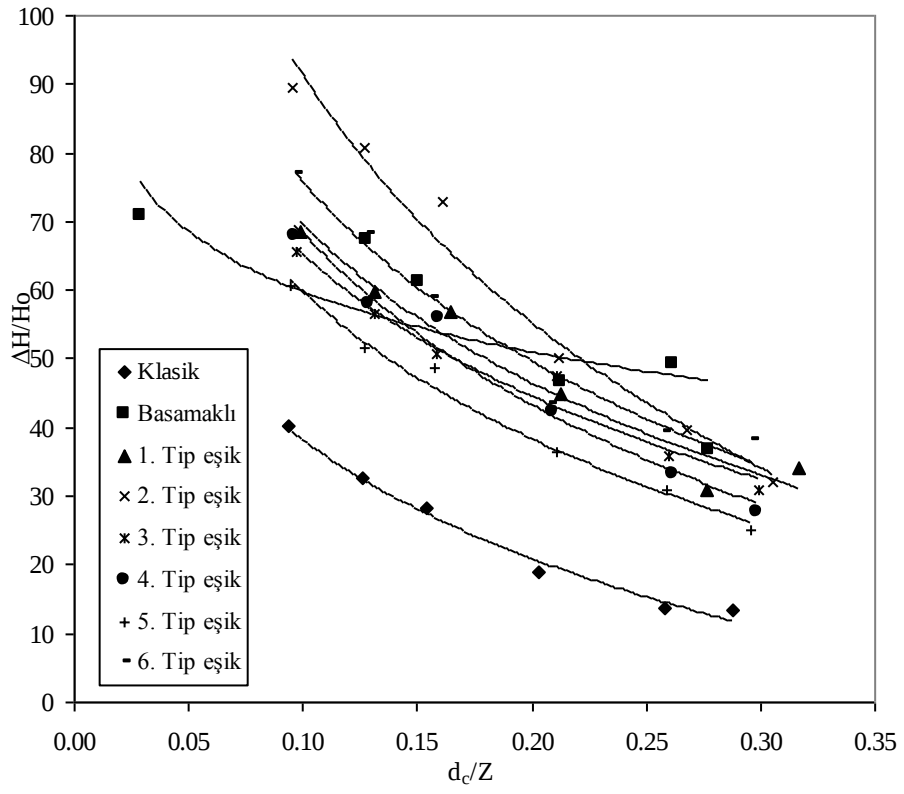
Şekil 4.34 (a)'daki 7 nolu basamak ile Şekil 4.34 (b)'deki 3 nolu basamağın dolusavak kretinden düşey olarak kot farkları yaklaşık olarak aynıdır.

Yukarıda verilen 50° şüt açılı model için, Fluent yazılımı yardımıyla yapılan sayısal analizler sonucunda elde edilen enerji sönümlenme oranları, aşağıda verilen Şekil 4.35, 4.36, 4.37 ve 4.38'de farklı eşik tipleri birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Şekil 4.31 (b)'de gösterildiği gibi modelin dört farklı noktası için enerji sönümlenme oranları hesaplanmıştır. $Z=4$ olarak gösterilen mansap havuzu tabanındaki enerji sönümlenme oranları, literatürde verilen eşitliklerle de kıyaslanmıştır. Şekil 4.35 ve Şekil 4.38'de çizilmiş olan eğrilerin azalım eğimleri Şekil 4.36 ve Şekil 4.37'de verilmiş olanlara göre daha yüksektir. Tüm şekillerde, d_c/Z değerleri arttıkça $\Delta H/H_0$ oranları azalmıştır. Klasik (basamaksız) dolusavak modellerine ait enerji sönümlenme oranları en düşük değerler olmuştur. $Z=3$ ve $Z=4$ için verilen grafiklerde, farklı

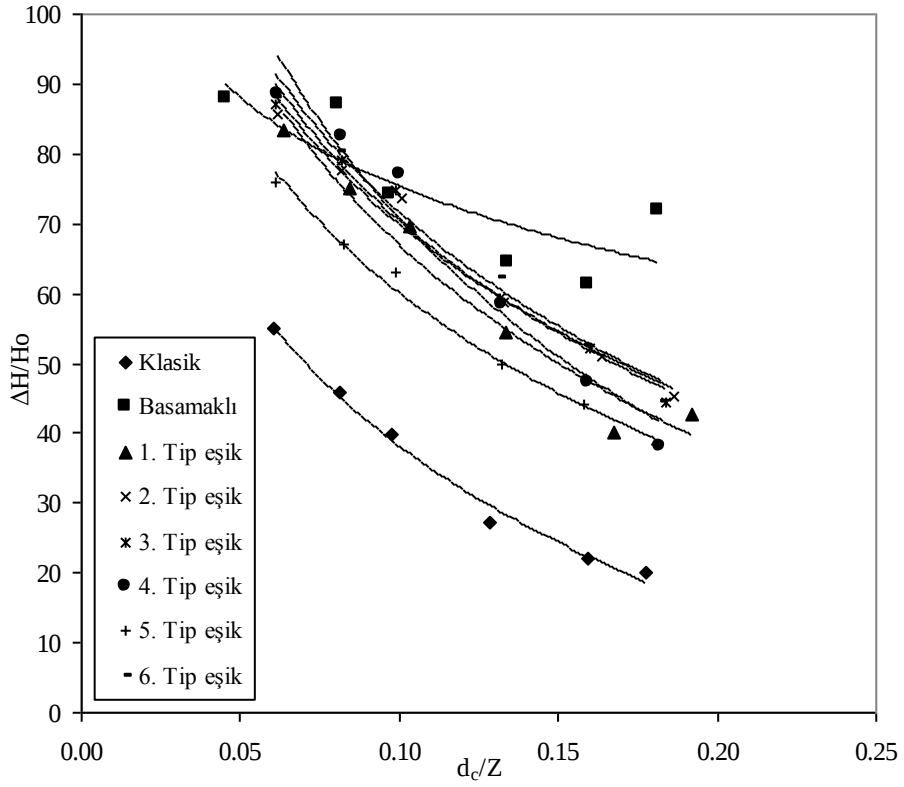
eşik tiplerine sahip basamaklı dolusavak modellerinin enerji sönümlenme eğrilerinin birbirlerine daha yakın olduğu görülmektedir. Her bir Z değeri için verilen şekle göre, d_c/Z değerleri arttıkça enerji sönümlenme eğrileri birbirlerine yakınlaşmıştır. Şekil 4.38’de klasik (basamaksız) dolusavak modeline ve Boes ve Hager [19] tarafından verilen eşitliğe göre çizilmiş olan enerji sönümlenme eğrileri en düşük değerlerde olmuştur.



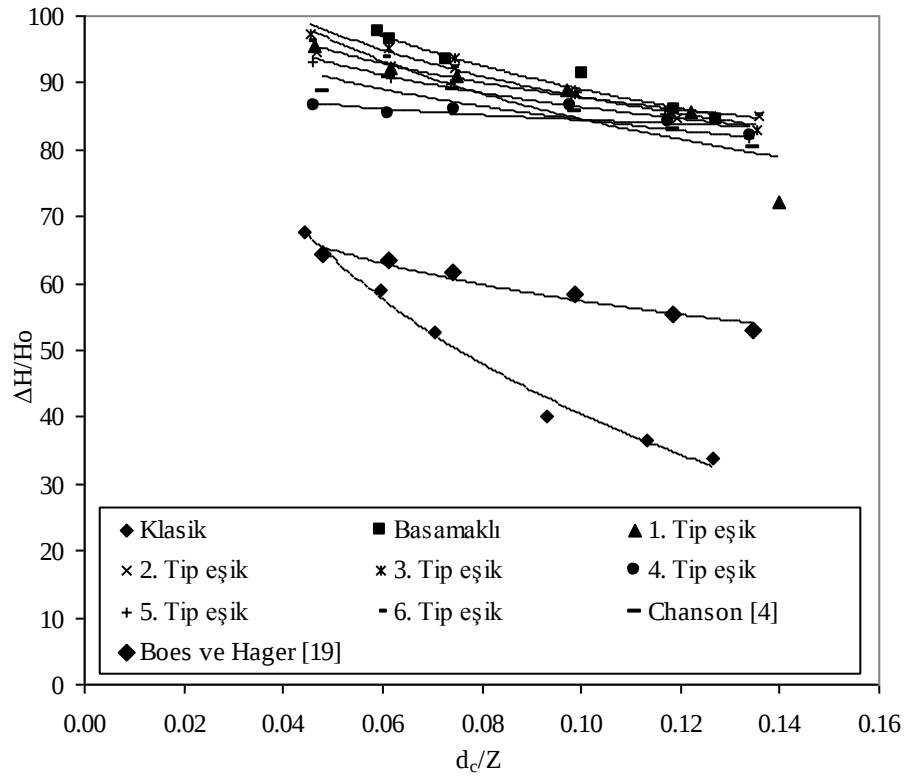
Şekil 4.35 $\alpha=50^\circ$ ve $Z=1$ için farklı basamak tiplerinde enerji sönümlenme oranları



Şekil 4.36 $\alpha=50^\circ$ ve $Z=2$ için farklı basamak tiplerinde enerji sönümlenme oranları

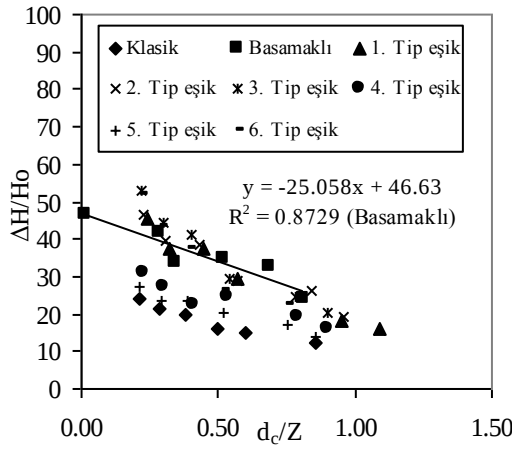


Şekil 4.37 $\alpha=50^\circ$ ve $Z=3$ için farklı basamak tiplerinde enerji sönümlenme oranları

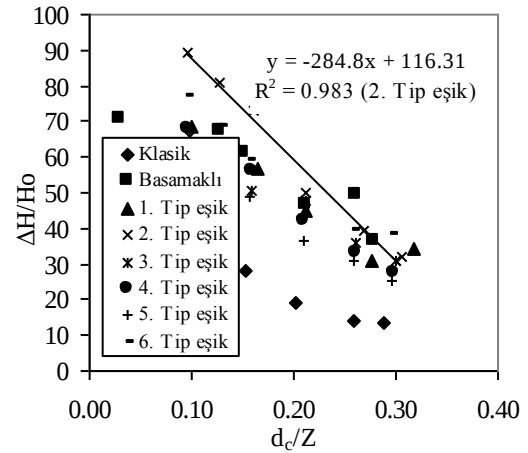


Şekil 4.38 $\alpha=50^\circ$ ve $Z=4$ için farklı basamak tiplerinde enerji sönümlenme oranları

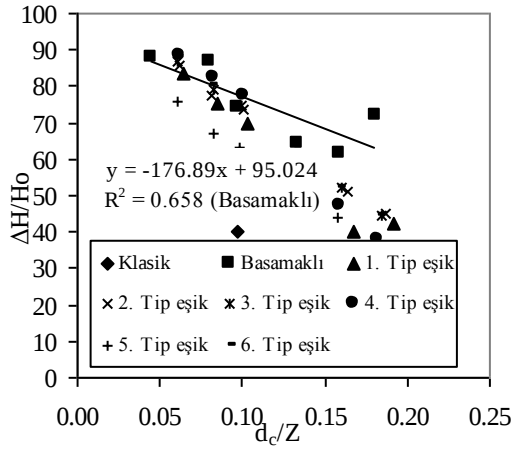
Şekil 4.39'da 50° şüt açılı modelin $Z=1, 2, 3$ ve 4 noktalarında enerji sönümlenme oranları en yüksek olan eşik tipleri için yeniden grafikler çizilmiş ve bu eşik tiplerine ait enerji sönümlenme oranları için birinci dereceden eğriler uydurulmuştur. Bu eğriler incelendiğinde $Z=1$ ve $Z=4$ noktalarındaki eğimlerin $Z=2$ ve $Z=3$ noktalarındaki eğimlerden düşük olduğu görülmektedir. Buradan, dolusavak şütünün giriş ve çıkış kısımlarında enerji sönümlenme oranlarının, d_c/Z değerinin artmasıyla daha düşük oranda azaldığı sonucuna varılmaktadır. Bu durumun; dolusavak şütünün giriş ve çıkış kısımlarında akımın hızındaki değişimlerin daha düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



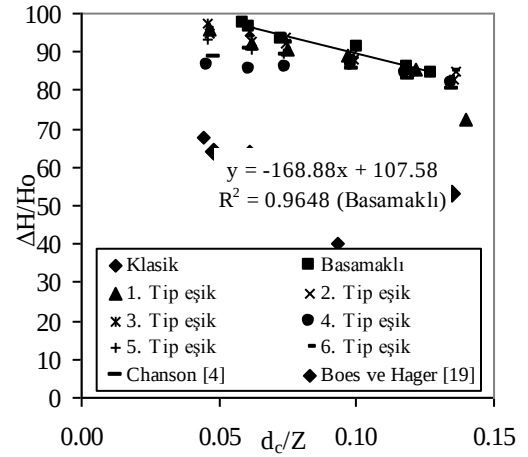
(a) ($Z=1$)



(b) ($Z=2$)



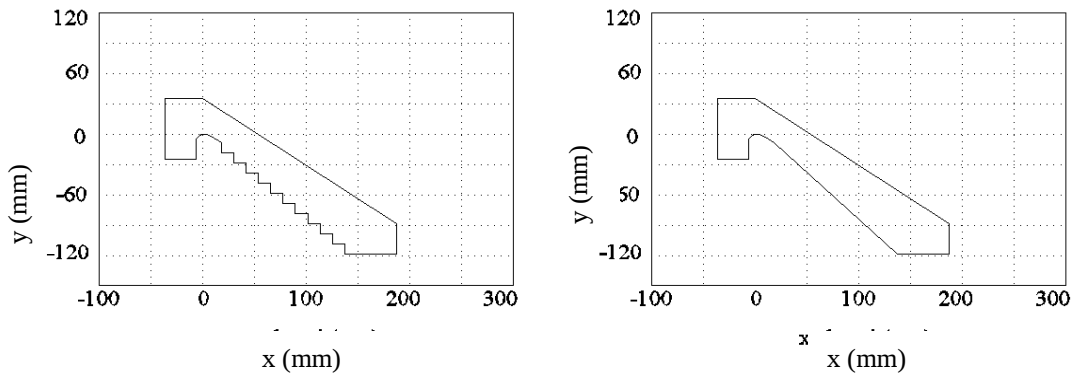
(c) ($Z=3$)



(d) ($Z=4$)

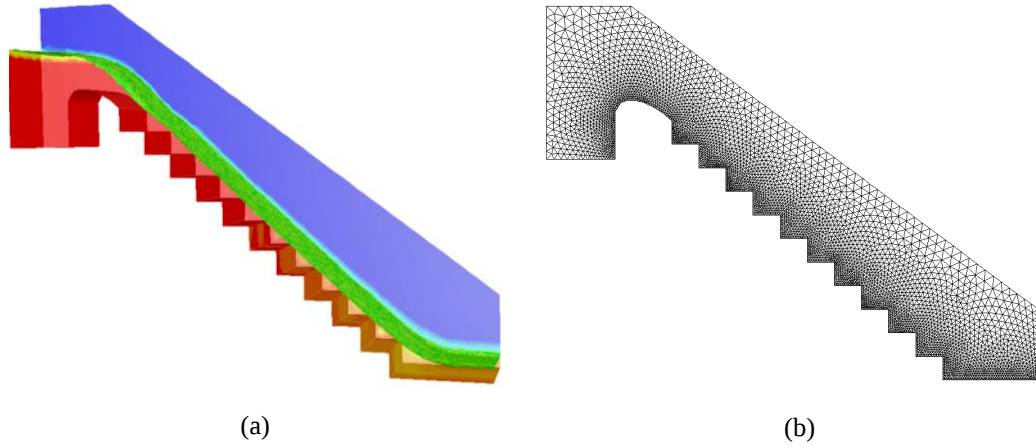
Şekil 4.39 $\alpha=50^\circ$ şüt açılı modelde, farklı Z değerleri için en yüksek enerji sönmüleme oranları.

4.2.2 Şüt Açısı 40° Olan Dolusavak İçin Oluşturulan Sayısal Modeller



Şekil 4.40 40° şüt açılı dolusavak modelinin geometrisi

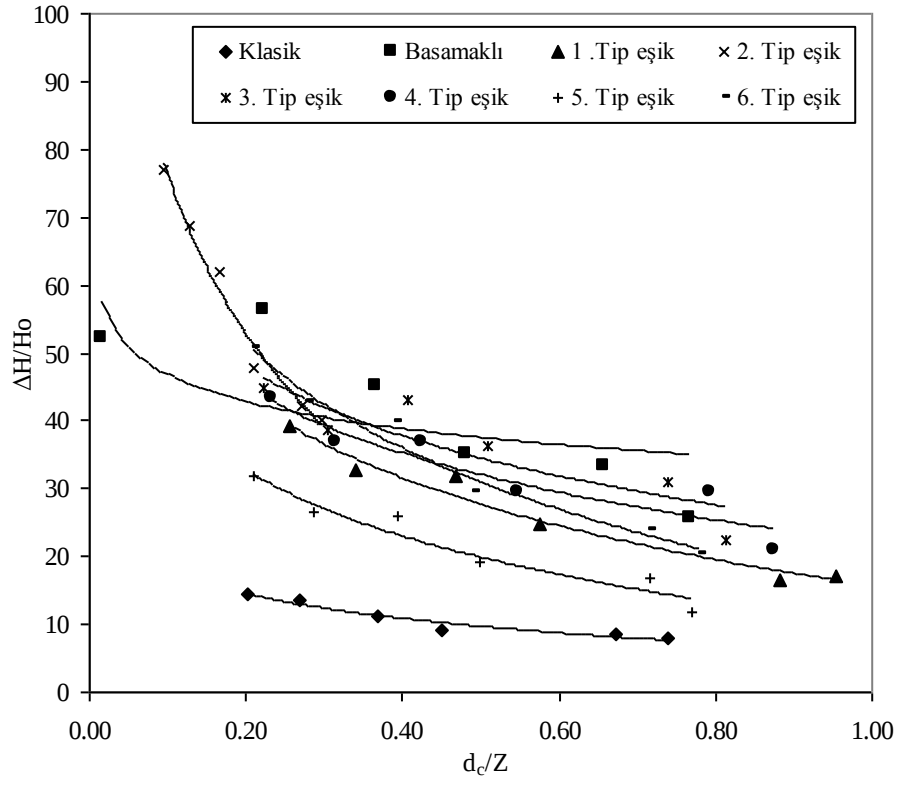
Şekil 4.40’da 40° şüt açılı dolusavak modelinin basamaklı ve basamaksız (klasik) durumlarına ait geometrileri görülmektedir. Sayısal analizler yapılırken bu şekilde verilmiş olan ve Şekil 4.16’da görülen eşik tipleri ile oluşturulmuş olan modeller kullanılmıştır. 40° şüt açılı dolusavak modelinde; basamak yükseklikleri 10 cm, genişlikleri ise 11.92 cm olarak boyutlandırılmıştır. Modelin dolusavak kreti ile mansap havuzu tabanı arasındaki kot farkı ise; 118.7 cm dir.



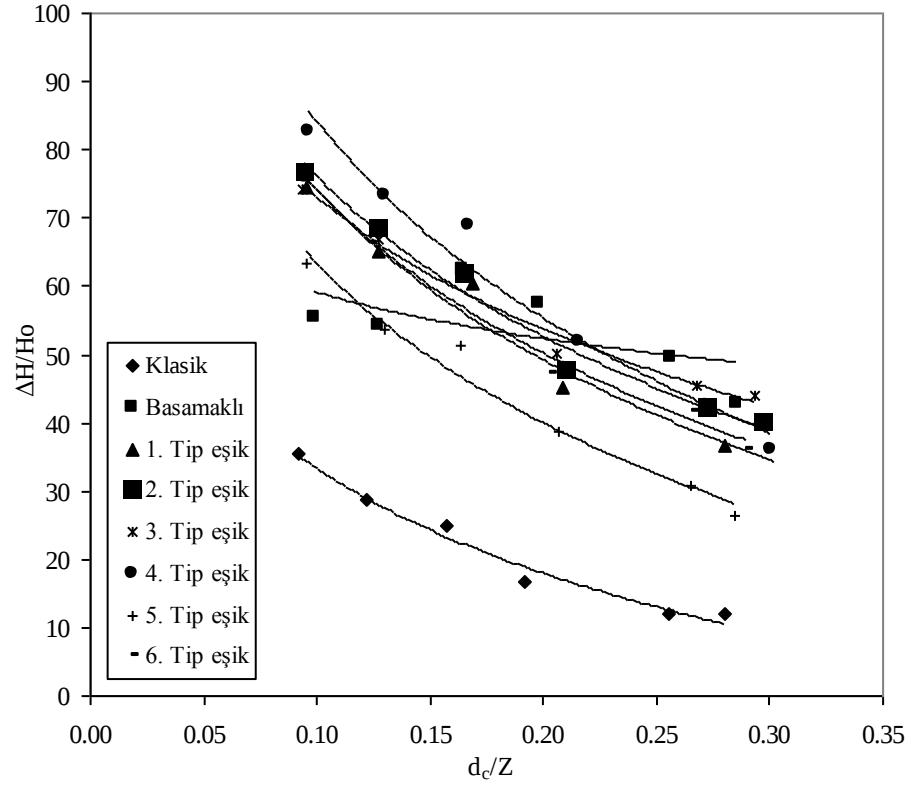
Şekil 4.41 40° şüt açılı dolusavak modelinin sonlu eleman ağı yapısı ve iki fazlı akım görüntüsü

Şekil 4.41 (a)’da 40° şüt açılı basamaklı dolusavak modelinin yapılan sayısal analiz sonucunda elde edilmiş olan iki fazlı akım görüntüsü verilmiştir. Şekil 4.41 (b)’de ise aynı dolusavak modelinin Fluent yazılımıyla oluşturulmuş olan üç boyutlu sonlu eleman ağının iki boyutlu görüntüsü görülmektedir.

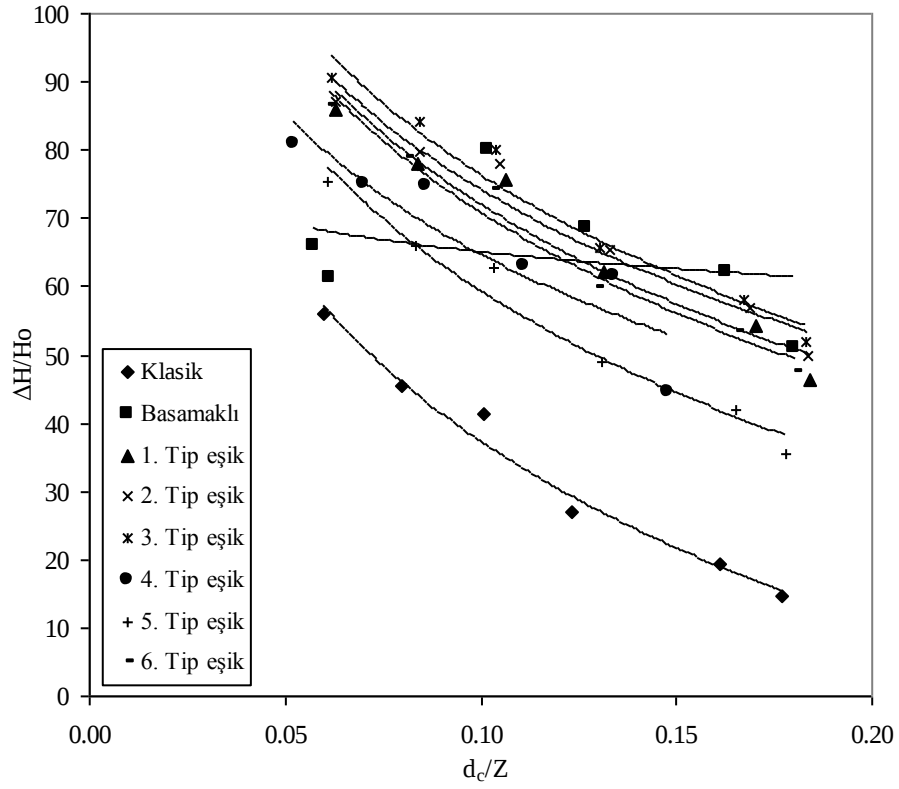
Yukarıda verilen 40° şüt açılı model için, Fluent yazılımı yardımıyla yapılan sayısal analizler sonucunda elde edilen enerji sönümlenme oranları, aşağıda verilen Şekil 4.42, 4.43, 4.44 ve 4.45’de farklı eşik tipleri birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Şekil 4.31 (b)’de gösterildiği gibi modelin dört farklı noktası için enerji sönümlenme oranları hesaplanmıştır. $Z=4$ olarak gösterilen mansap havuzu tabanındaki enerji sönümlenme oranları, literatürde verilen eşitliklerle de kıyaslanmıştır. Şekil 4.42 ve Şekil 4.45’de çizilmiş olan eğrilerin azalım eğimleri Şekil 4.43 ve Şekil 4.44’de verilmiş olanlara göre daha yüksektir. Tüm şekillerde, d_c/Z değerleri arttıkça $\Delta H/H_0$ oranları azalmıştır. Klasik (basamaksız) dolusavak modellerine ait enerji sönümlenme oranları en düşük değerler olmuştur. $Z=3$ ve $Z=4$ için verilen grafiklerde, farklı eşik tiplerine sahip basamaklı dolusavak modellerinin enerji sönümlenme eğrilerinin birbirlerine daha yakın olduğu görülmektedir. $Z=4$ ölçüm noktası için verilen Şekil 4.45’e göre, d_c/Z değerleri arttıkça enerji sönümlenme eğrileri birbirlerine yaklaşmıştır. Şekil 4.45’de klasik (basamaksız) dolusavak modeline ve Boes ve Hager [19] tarafından verilen eşitliğe göre çizilmiş olan enerji sönümlenme eğrileri en düşük değerlerde olmuştur.



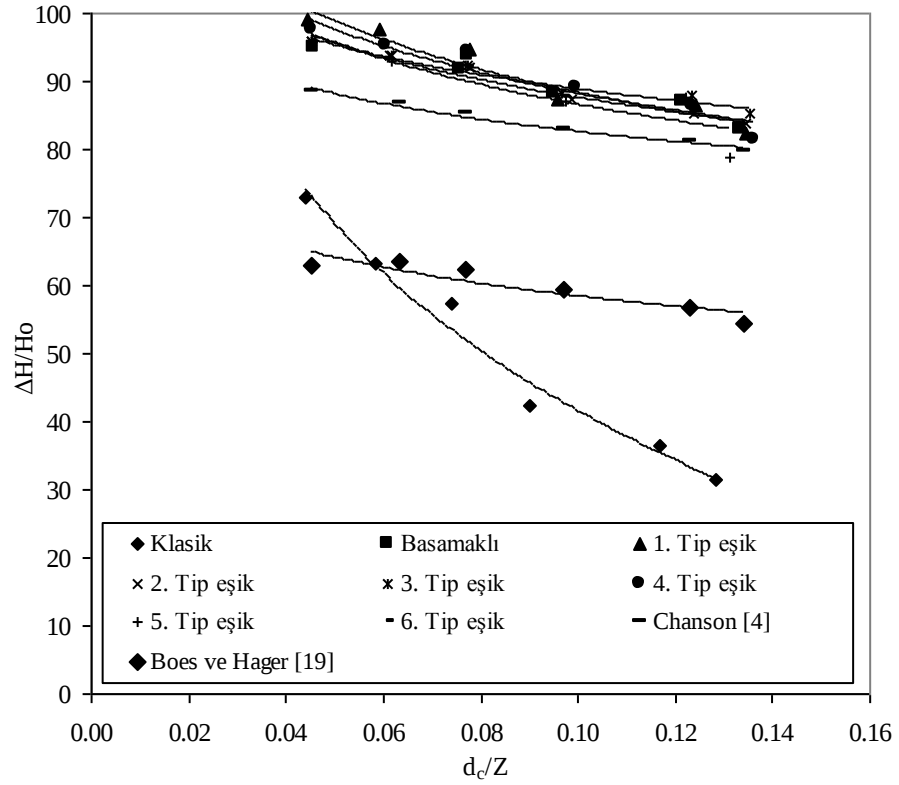
Şekil 4.42 $\alpha=40^\circ$ ve $Z=1$ için farklı basamak tiplerinde enerji sönümlenme oranları



Şekil 4.43 $\alpha=40^\circ$ ve $Z=2$ için farklı basamak tiplerinde enerji sönümlenme oranları

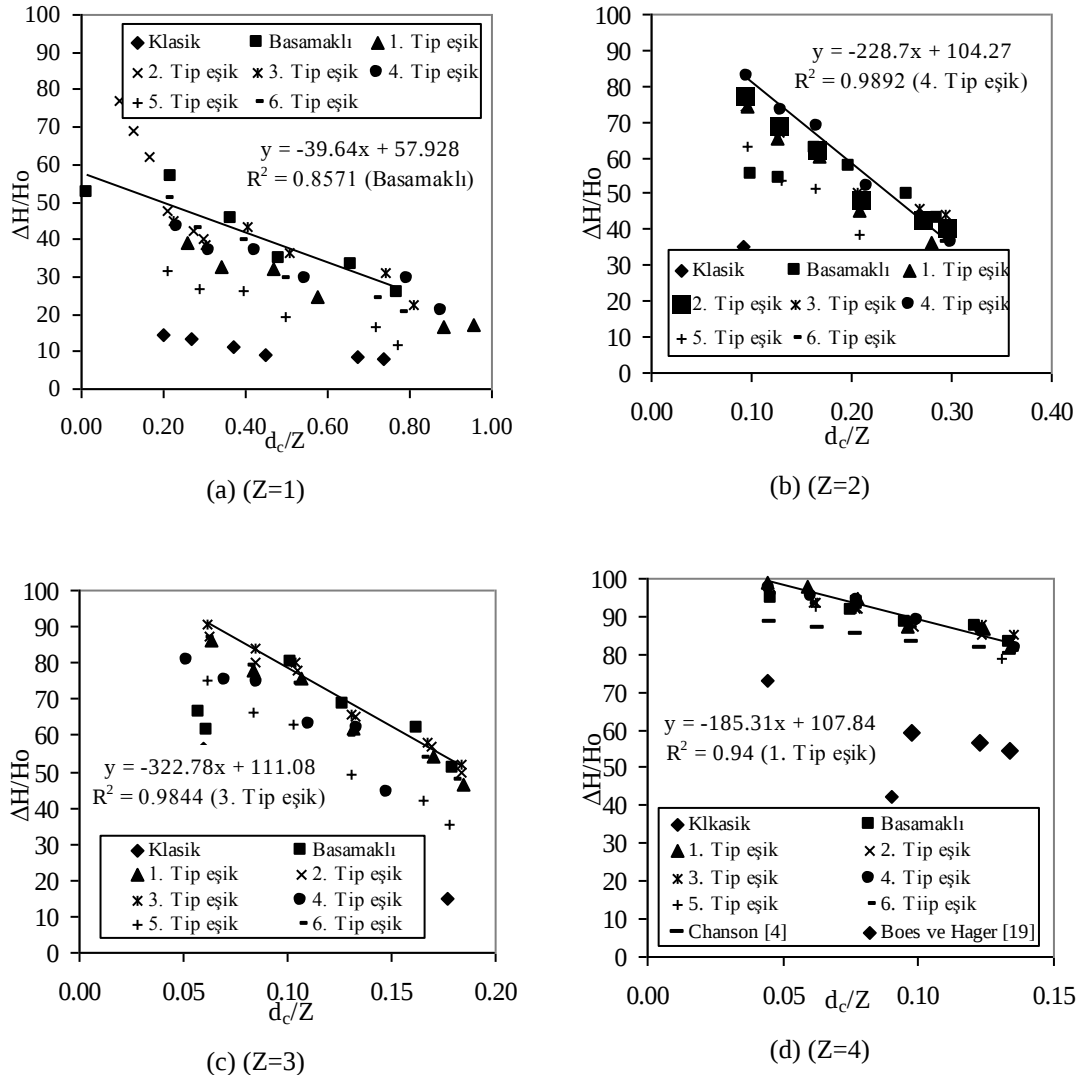


Şekil 4.44 $\alpha=40^\circ$ ve $Z=3$ için farklı basamak tiplerinde enerji sönümlenme oranları



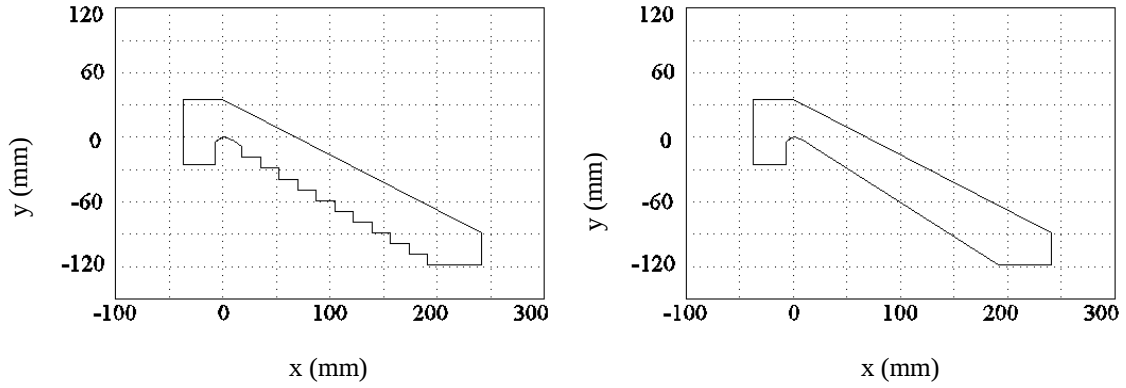
Şekil 4.45 $\alpha=40^\circ$ ve $Z=4$ için farklı basamak tiplerinde enerji sönümlenme oranları

Şekil 4.46'da 40° şüt açılı modelin $Z=1, 2, 3$ ve 4 noktalarında enerji sönümlenme oranları en yüksek olan eşik tipleri için yeniden grafikler çizilmiş ve bu eşik tiplerine ait enerji sönümlenme oranları için birinci dereceden eğriler uydurulmuştur. Bu eğriler incelendiğinde $Z=1$ ve $Z=4$ noktalarındaki eğimlerin $Z=2$ ve $Z=3$ noktalarındaki eğimlerden düşük olduğu görülmektedir. Buradan, dolusavak şütünün giriş ve çıkış kısımlarında enerji sönümlenme oranlarının, d_c/Z değerinin artmasıyla daha düşük oranda azaldığı sonucuna varılmaktadır. Bu durumun; dolusavak şütünün giriş ve çıkış kısımlarında akımın hızındaki değişimlerin daha düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



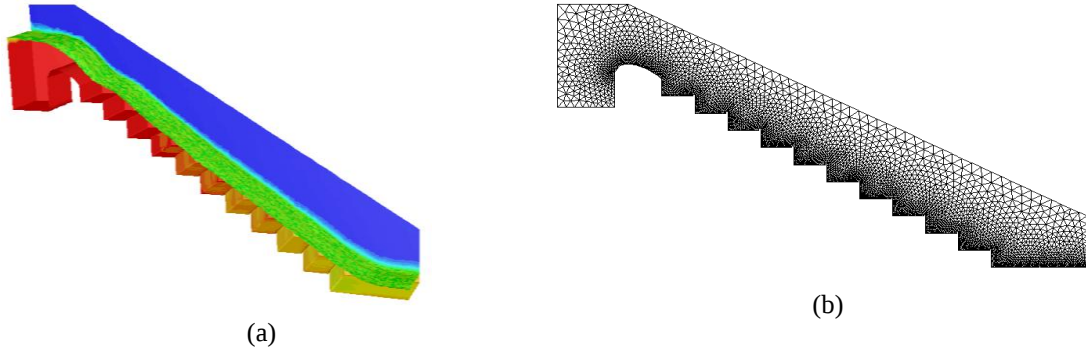
Şekil 4.46 $\alpha=40^\circ$ şüt açılı modelde, farklı Z değerleri için en yüksek enerji sönümleme oranları.

4.2.3 Şüt Açısı 30° Olan Dolusavak İçin Oluşturulan Sayısal Modeller



Şekil 4.47 30° şüt açılı dolusavak modelinin geometrisi

Şekil 4.47’de 30° şüt açılı dolusavak modelinin basamaklı ve basamaksız (klasik) durumlarına ait geometrileri görülmektedir. Sayısal analizler yapılırken bu şekilde verilmiş olan ve Şekil 4.16’da görülen eşik tipleri ile oluşturulmuş olan modeller kullanılmıştır. 30° şüt açılı dolusavak modelinde; basamak yükseklikleri 10 cm, genişlikleri ise 17.32 cm olarak boyutlandırılmıştır. Modelin dolusavak kreti ile mansap havuzu tabanı arasındaki kot farkı ise; 118.7 cm dir.

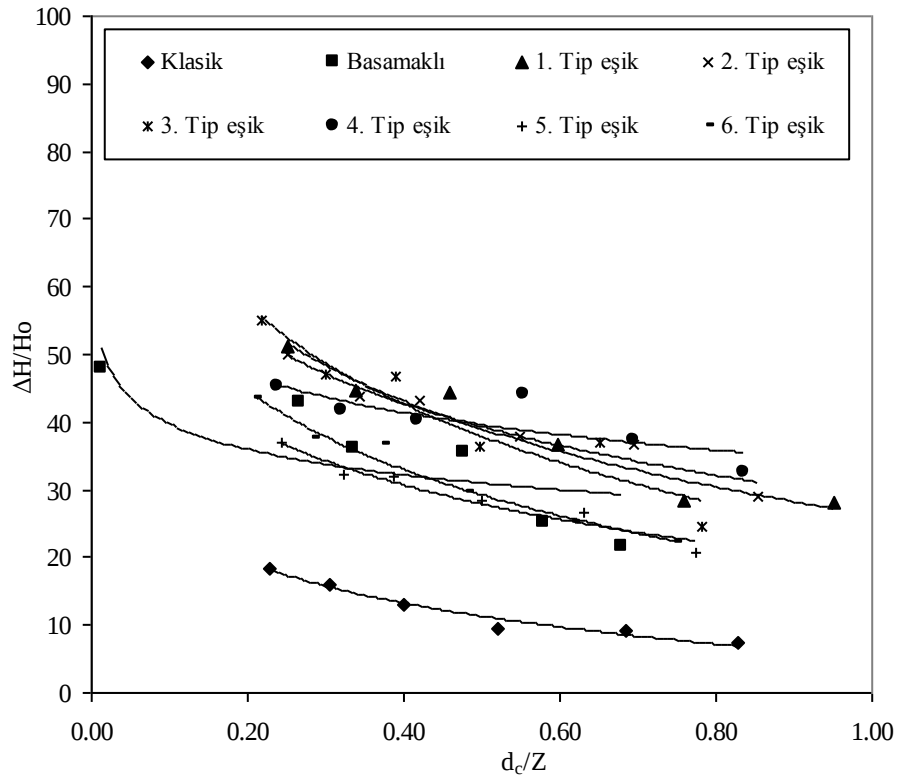


Şekil 4.48 30° şüt açılı dolusavak modelinin sonlu eleman ağı yapısı ve iki fazlı akım görüntüsü

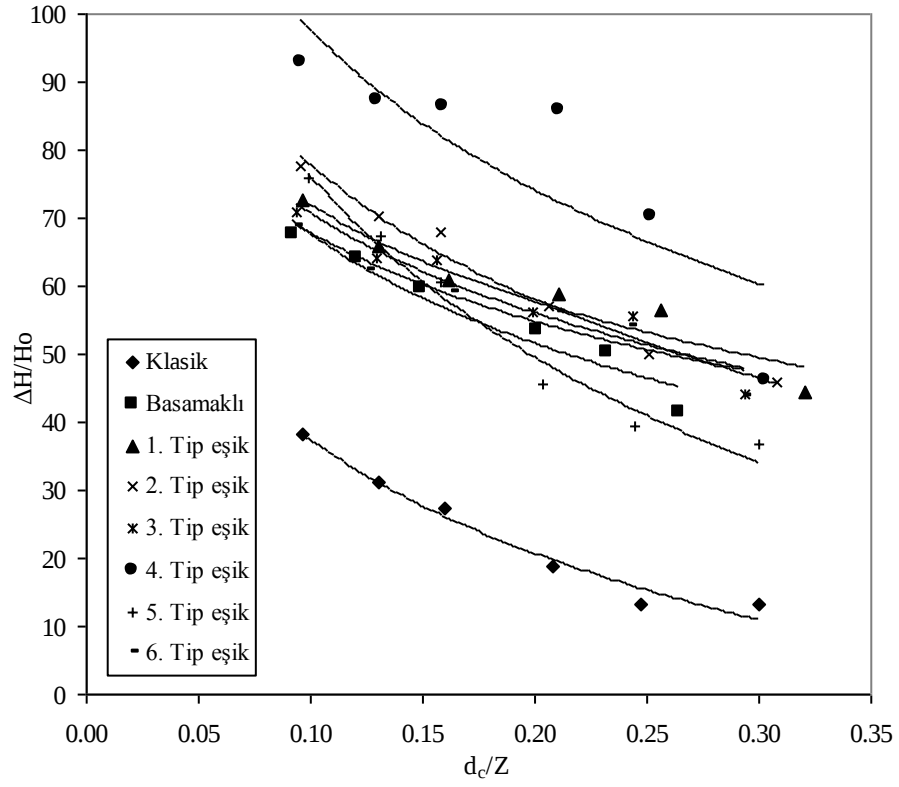
Şekil 4.48 (a)’da 30° şüt açılı basamaklı dolusavak modelinin yapılan sayısal sonucunda elde edilmiş olan iki fazlı akım görüntüsü verilmiştir. Şekil 4.48 (b)’de ise aynı dolusavak modelinin Fluent yazılımıyla oluşturulmuş olan üç boyutlu sonlu eleman ağının iki boyutlu görüntüsü görülmektedir.

Yukarıda verilen 30° şüt açılı model için, Fluent yazılımı yardımıyla yapılan sayısal analizler sonucunda elde edilen enerji sönümlenme oranları, aşağıda verilen Şekil 4.49, 4.50, 4.51 ve 4.52’de farklı eşik tipleri birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Şekil 4.31 (b)’de gösterildiği gibi modelin dört farklı noktası için enerji sönümlenme oranları hesaplanmıştır. Z=4 olarak

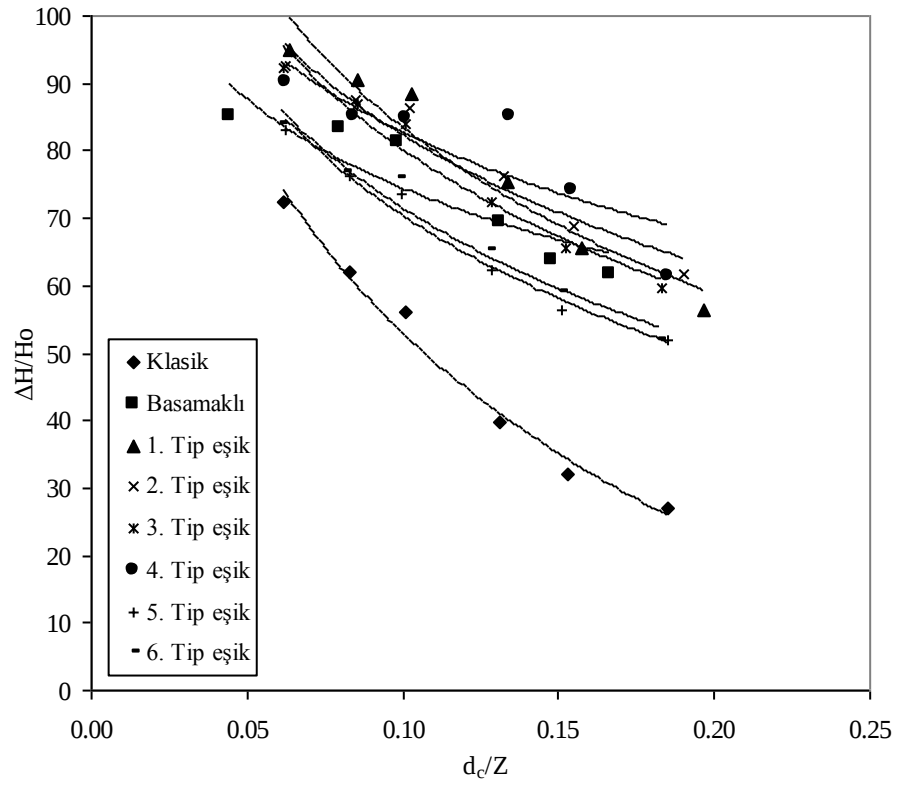
gösterilen mansap havuzu tabanındaki enerji sönümlenme oranları, literatürde verilen eşitliklerle de kıyaslanmıştır. Şekil 4.49 ve Şekil 4.52’de çizilmiş olan eğrilerin azalım eğimleri Şekil 4.50 ve Şekil 4.51’de verilmiş olanlara göre daha yüksektir. Tüm şekillerde, d_c/Z değerleri arttıkça $\Delta H/H_0$ oranları azalmıştır. Klasik (basamaksız) dolusavak modellerine ait enerji sönümlenme oranları en düşük değerler olmuştur. $Z=3$ ve $Z=4$ için verilen grafiklerde, farklı eşik tiplerine sahip basamaklı dolusavak modellerinin enerji sönümlenme eğrilerinin birbirlerine daha yakın olduğu görülmektedir. Şekil 4.52’de klasik (basamaksız) dolusavak modeline ve Boes ve Hager [19] tarafından verilen eşitliğe göre çizilmiş olan enerji sönümlenme eğrileri en düşük değerlerde olmuştur.



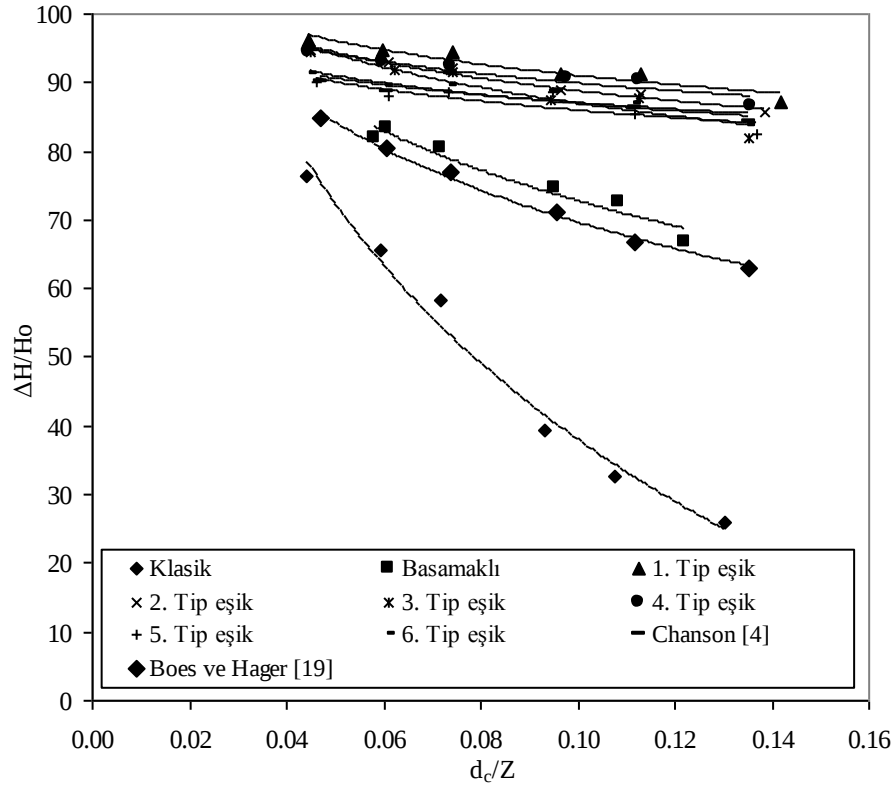
Şekil 4.49 $\alpha=30^\circ$ ve $Z=1$ için farklı basamak tiplerinde enerji sönümlenme oranları



Şekil 4.50 $\alpha=30^\circ$ ve $Z=2$ için farklı basamak tiplerinde enerji sönümlenme oranları

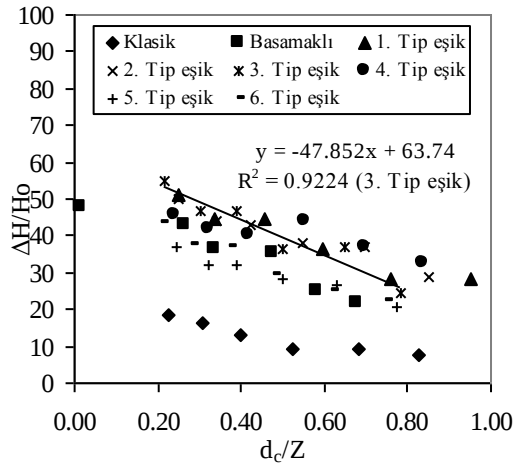


Şekil 4.51 $\alpha=30^\circ$ ve $Z=3$ için farklı basamak tiplerinde enerji sönümlenme oranları

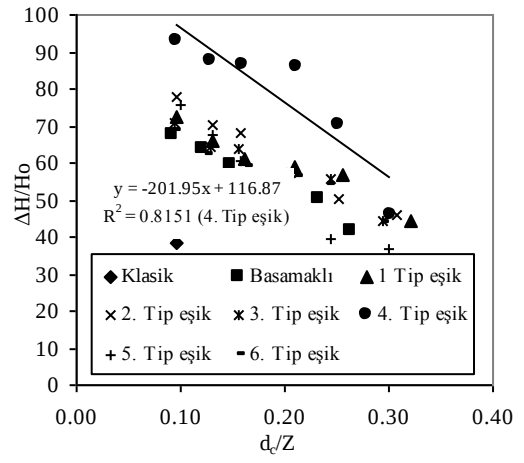


Şekil 4.52 $\alpha=30^\circ$ ve $Z=4$ için farklı basamak tiplerinde enerji sönümlenme oranları

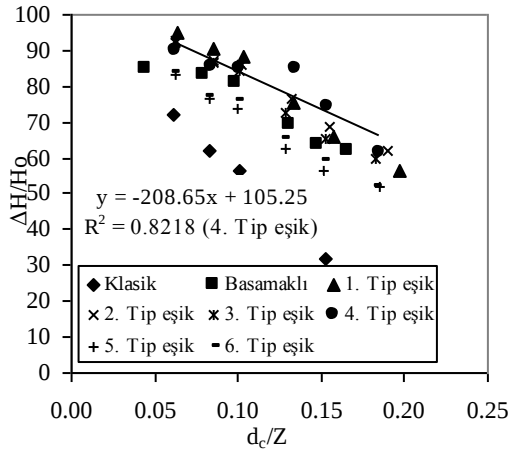
Şekil 4.53'te, 30° şüt açılı modelin $Z=1$, 2, 3 ve 4 noktalarında enerji sönümlenme oranları en yüksek olan eşik tipleri için yeniden grafikler çizilmiş ve bu eşik tiplerinin enerji sönümlenme oranları için birinci dereceden eğriler uydurulmuştur. Bu eğriler incelendiğinde $Z=1$ ve $Z=4$ noktalarındaki eğimlerin $Z=2$ ve $Z=3$ noktalarındaki eğimlerden düşük olduğu görülmektedir. Buradan, dolusavak şütünün giriş ve çıkış kısımlarında enerji sönümlenme oranlarının, d_c/Z değerinin artmasıyla daha düşük oranda azaldığı sonucuna varılmaktadır. Bu durumun; dolusavak şütünün giriş ve çıkış kısımlarında akımın hızındaki değişimlerin daha düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



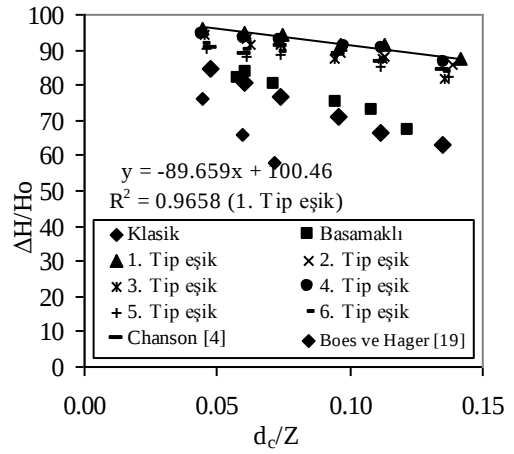
(a) ($Z=1$)



(b) ($Z=2$)



(c) ($Z=3$)



(d) ($Z=4$)

Şekil 4.53 $\alpha=30^\circ$ şüt açılı modelde, farklı Z değerleri için en yüksek enerji sönümleme oranları.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Eşikli ve eşiksiz basamaklı dolusavakların enerji sönümleme özelliğinin sayısal analizlerle belirlenmesi amacıyla yapılan bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

5.1 Sonuçlar

- Basamaklı dolusavakların enerji sönümleme oranları, klasik dolusavaklara göre oldukça fazladır.
- Debi değerleri ve d_c/Z oranları arttıkça enerji sönümleme oranları azalmaktadır.
- Eşiksiz basamaklı dolusavaklar için yapılan sayısal analizler sonucunda; boşaltım kanalı taban açısı 30° olan modelde enerji sönümleme oranlarının $0.40\text{--}0.240\text{ m}^2/\text{s}$ arasındaki birim debi değerleri için %84–94 aralığında meydana geldiği ve bu oranın 51.3° ve 60° taban açılı modellerin enerji sönümleme oranlarından daha fazla olduğu belirlenmiştir. Taban açıları 51.3° ve 60° olan boşaltım kanalı modellerine ait enerji sönümleme oranlarının ise birbirine yakın değerler olduğu saptanmıştır. Elde edilen sonuçların teorik eşitlikler ile de uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır.
- Eşiksiz basamaklı dolusavakların sayısal yöntemlerle elde edilen sonuçları, deneysel çalışmayla elde edilmiş olan sonuçlar ile karşılaştırıldığında, yaklaşık olarak %5~9 civarında bir farklılık gözlenmiştir. Bu durum sayısal yöntemlerin güvenilirliğini desteklemektedir.
- Bu çalışma ile, eşikli basamaklı dolusavakların sayısal analizi ilk kez yapılmıştır. 30° şüt açılı modele ait sayısal analizlerde; $0.033\text{ m}^2/\text{s}$ 'lik birim debi değeri için nap akımı, 0.05 ve $0.067\text{ m}^2/\text{s}$ 'lik birim debi değerleri için geçiş akımı ve 0.100, 0.133 ve $0.167\text{ m}^2/\text{s}$ 'lik birim debi değerleri için ise sıçramalı akım meydana geldiği belirlenmiştir.
- 40° şüt açılı model için yapılan sayısal analizlerde; $0.033\text{ m}^2/\text{s}$ 'lik birim debi değeri için nap akımı, 0.05 ve $0.067\text{ m}^2/\text{s}$ 'lik birim debi değerleri için geçiş akımı ve 0.100, 0.133 ve $0.167\text{ m}^2/\text{s}$ 'lik birim debi değerleri için ise sıçramalı akım meydana gelmiştir.
- 50° şüt açılı model için yapılan sayısal analizlerde; 0.033 ve $0.05\text{ m}^2/\text{s}$ 'lik birim debi değerleri için geçiş akımı, 0.067, 0.100, 0.133 ve $0.167\text{ m}^2/\text{s}$ 'lik birim debi değerlerinde ise sıçramalı akım meydana gelmiştir. Oluşan akım tipleri literatürde verilen eşitliklerle de uyumludur.
- Yapılan sayısal analizler sonucunda, d_c/Z değerlerine karşılık gelen enerji sönümleme oranları belirlenmiş ve Ek 1'de tablolar halinde sunulmuştur. Farklı Z değerleri için hesaplanan enerji sönümleme oranlarının, 30° şüt açılı model için; %40.20–92.50, 40° şüt

açılı model için; %56.28–91.27 ve 50° şüt açılı model için ise; %35.51–91.48 aralığında olduğu hesaplanmıştır.

- 30° şüt açılı model için yapılan sayısal analizlerin yaklaşık olarak tamamında 4. Tip eşikli basamaklı dolusavak modeli ile en yüksek enerji sönümleme değerlerine ulaşılmıştır. 50° şüt açılı model için ise eşiksiz basamaklı dolusavak modeli ile en yüksek enerji sönümleme oranları elde edilmiştir. 40° şüt açılı model için ise; farklı basamak tiplerinde enerji sönümleme oranları en yüksek değerlere ulaşmıştır.

- 30°, 40° ve 50° şüt açılı modeller için yapılan sayısal analizlerin sonucunda çizilen grafiklerde $Z=1$, $Z=2$, $Z=3$ ve $Z=4$ noktaları için enerji sönümleme oranı en yüksek olan eşik tipine ait değerlere birinci dereceden eğriler uydurulmuştur. Bu eğrilerin eğimlerinin tüm açı değerleri için; $Z=1$ 'de düşük, $Z=2$ ve $Z=3$ 'te daha yüksek ve $Z=4$ için ise düşük değerlerde olduğu görülmüştür. Buradan; basamaklı dolusavağın başlangıç kısmında ve mansap havuzu giriş kısmında debi değerlerinin değişiminin enerji sönümleme oranını daha az, ancak boşaltım kanalı boyunca daha fazla etkilediği sonucuna varılmıştır. Bu durumun, akımın hızının boşaltım kanalı giriş ve çıkışında düşük, boşaltım kanalı boyunca ise daha yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Uygulamada bu husus dikkate alınarak boşaltım kanalı yan duvar yükseklikleri daha dikkatli boyutlandırılabilir.

- Düşük debi değerlerinde sayısal çalışma sonuçlarının daha hassas olabilmesi açısından, modele ait sonlu eleman ağı yapısının iyi seçilmesi ve gerektiğinde sonlu eleman sayısının artırılması daha güvenilir sonuçların alınmasını sağlayacaktır.

- İlk kez bu çalışma ile önerilmiş olan dördüncü tip eşiğin, 30° şüt açılı basamaklı dolusavakta diğer tiplere göre daha fazla enerji sönümleme oranına sahip olduğu belirlenmiştir. 50° şüt açılı modelde ise test edilen eşiksiz basamaklı dolusavak tipi daha fazla enerji sönümleme oranına sahip olmuştur. 40° şüt açılı modelde ise, enerji sönümleme oranları birbirine yakındır. Bu durum, düşük şüt açılarında ve genellikle nap akımı koşullarında dördüncü tip eşiğin, yüksek şüt açılarında ve sıçramalı akım halinde eşiksiz basamaklı dolusavak modelinin enerji sönümleme oranını daha fazla artırdığı sonucunu ortaya koymaktadır. 40° şüt açılı modelde ve genellikle akım tipinin geçiş akımı olması halinde ise, karmaşık ve düzensiz akım koşullarının meydana gelmesi nedeniyle farklı eşik tiplerine ait enerji sönümleme oranları birbirlerine yakın değerler olmuştur.

5.2 Öneriler

Bu çalışmada elde edilen sonuçların ışığı altında, eşikli ve eşiksiz basamaklı dolusavakların sayısal analizi ile ilgili bundan sonra yapılacak çalışmalara yön vermesi bakımından aşağıdaki hususların göz önünde tutulması yararlı olabilir;

- Aynı çalışma farklı basamak yükseklikleri için de yapılabilir.
- Daha farklı eşik tipleri tasarlanarak analizler yapılabilir.
- Farklı boşaltım kanalı açıları için enerji sönümlenme oranları incelenebilir.
- Aynı veya farklı basamak ve eşik tipleri kullanılarak, mansap havuzunda meydana gelecek hidrolik sıçrama boyları incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1]. Knauss, J. 1995. Computation of Maximum Discharge at Overflow Rockfill Dams (a comparison of different model test results). Proc. 13th ICOLD Congres, New Delhi, Q. 50, R.9.
- [2] Chanson, H. and Toombes, L., (2001). Experimental Investigations of Air Entrainment in Transition and Skimming Flows Down a Stepped Chute Application to Embankment Overflow Stepped Spillways. RESEARCH REPORT No. CE 158, Department of Civil Engineering, The University of Queensland, Australia.
- [3] Boes, R.M. and Hager, W.H., (2001). Two-Phase Flow Characteristics of Stepped Spillways. Journal of Hydraulic Engineering.
- [4] Chanson, H.,1994, Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes, Journal of Hydraulic Research IAHR, Vol: 32, No:2, pp 213-215.
- [5] Esery, I.T.S. and Horner M.W., (1978). The Hydraulic Design of Stepped Spillway. CIRIA Report, 33.
- [6] Gulliver, J.S. and Wilhems, S.C., (1998). Predictive Capabilities in Oxygen Transfer at Hydraulic Structures. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE, 124 (7), pp: 664–671.
- [7] Peyras, L., Royet, P. and Degoutte, G., 1992, Flow and Energy Dissipation Over Stepped Gabion Weirs, Journal of Hydraulic Engineering ASCE Vol: 118 No:5, pp : 707-717
- [8] Boes, R. M., (1999). Physical Model Study on Two-Phase Cascade Flow, International Association For Hydaulic Research XXVIII Biennial Congres. Graz, Austria.
- [9] Boes, R. M., (2000). Two-Phase Flow and Energy Dissipation on Stepped Spillways. Association of State Dam Safety Officials. Rhode Island.
- [10] Stephenson, D.,1991, Energy Dissipation Down Stepped Spillway Krest. Water Power & Dam Construction, pp: 27-30.
- [11] Frizell, K. H., 1992, Hydraulics of Stepped Spillways for RCC Dams and Dam Rehabilitations, Proc. of the 3rd Specialty Conf. On Roller Compacted Concrete, ASCE, San Diego, CA, USA, pp: 423-439.
- [12] Chanson, H., (1994). Hydraulics of Skimming Flows Over Stepped Channels and Spillways. Journal of Hydraulic Research, 32, 3,pp:445–460.
- [13] Chamani, M. R. and Rajaratnam, F., (1999). Characteristics of Skimming Flow Over Stepped Spillways. Journal of Hydraulic Engineering ASCE Vol: 125, No:4 pp:361-368.
- [14] Boes, R.M. and Hager, W.H., (2003). Two-Phase Flow Characteristics of Stepped Spillways. Journal of Hydraulic Engineering. 129, 9, pp:661-670.
- [15] Baylar, A., Bagatur T. and Emiroglu M. E., (2007).Prediction of Oxygen Content of Nappe, Transition and Skimming Flow Regimes in Stepped-Channel Chutes, Journal of Environmental Engineering and Science, 6(2), 201-208.

- [16] Baylar, A., Bagatur T. and Emiroglu M. E., (2007).Aeration Efficiency with Nappe Flow over Stepped Cascades, Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management, 160 (1), 43-50.
- [17] Baylar, A., Emiroglu M. E. and Bagatur T., (2006).An Experimental Investigation of Aeration Performance in Stepped Spillways, Water and Environment Journal, 20 (1), 35-42.
- [18] Baylar, A., and Emiroglu M. E., (2003).Study of Aeration Efficiency at Stepped Channels, Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water & Maritime Engineering, Vol. 156, No.WM3, 257-263.
- [19] Boes, R., M. and Hager W. H., (2003). Hydraulic Design of Stepped Spillways. Journal of Hydraulic Engineering ASCE Vol: 129, No:9 pp:671-679.
- [20] Ohtsu, I., Yasuda Y. and Takahashi M., (2004). Flow Characteristics of Skimming Flows in Stepped Channels. Journal of Hydraulic Engineering ASCE Vol: 130, No:9 pp:860-869.
- [21] Kaş, İ., (1998). Basamaklı Dolusavaklarda Akım ve Enerjisinin Sönümlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 97s.
- [22] Chanson, H., (2001). The Hydraulics of Stepped Chutes and Spillways. , A.A. BALKEMA Publishers, Tokyo.
- [23] Ellis, J. 1989. Guide to Analysis of Open-Channel Spillway Flow. CIRIA Technical Note No. 134. Londra 2. baskı.
- [24] Chanson, H. 1995a. Hydraulic Design of Stepped Cascades, Channel, Weirs and Spillways. Pergamon, Oxford.
- [25] Rajaratnam, N. 1990. Skimming Flow in Stepped Spillways. JI of Hyd. Engrg., ASCE, Vol. 116, No.4.
- [26] Chanson, H., & Toombes, L. 1997a. Energy Dissipation in Stepped Waterway. In F.M. Holly Jr. And A. Alsaffar (ed.) Proc. 27 th IAHR Congress, San Francisco, USA, Vol. D: 595-600.
- [27] Chanson, H., & Toombes, L. 1997b. Flow Aeration at Stepped Cascades. Research Report No. CE155, Dept. Of Civil Engineering, University of Queensland, Australia, June, 110 pages.
- [28] Chanson, H. 1994b. Hydraulics of Nappe Flow Regime above Stepped Chutes and Spillways. Aust. Civil Engrg Trans., I.E. Aust., Vol. CE36, No. 1.
- [29] Schwartz, H.I. 1964a. Projected Nappes Subject of Harmonic Pressures. Proc. Instn. Civ. Engrs. (London),Vol. 28: 313-36.
- [30] Petrikat, K. 1958. Vibration Tests on Weirs and Bottom Gates. Water Power: 52-57, 99-104, 147-149 & 190-197.
- [31] Petrikat, K. 1978. Model Tests on Weirs, Bottom Outlet Gates, Lock Gates and Harbours Moles. M.A.N. Technical Bulletin, Nurnberg.

- [32] Rouse, H. 1938. Fluid Mechanics for Hydraulic Engineers. New York: McGraw-Hill.
- [33] Hager, W.H., Bremen, R., & Kawagoshi, N. 1990. Classical Hydraulic Jump: Length of Roller. JI of Hyd. Res., IAHR, Vol. 28, No. 5.
- [34] Horner, M.W. 1969. An Analysis of Flow on Cascades of Steps. Ph.D. thesis, University of Birmingham, UK.
- [35] Chen, C.L. 1990. Unified Theory on Power Laws for Flow Resistance. Journal of Hydraulic Engineering., ASCE, Vol. 117, No. 3:371-389.
- [36] Boes, R.M., & Minor H.E. 2000. Guidelines for the hydraulic design of stepped spillways. Proc., Int. Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways, VAW, ETH Zürich, H.E. Minor & W.H. Hager, eds., Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 163-170.
- [37] Marchi, E. 1961. Il moto uniforme delle correnti liquide nei condotti chiusi e aperti. Energy. Elet., 38 (4), 289-31, (5), 393-413 (in Italian).
- [38] Schröder, R.C.M. 1990. Hydraulische Methoden zur Erfassung von Rauheiten. DVWK Bull. 92, Paul Parey, Germany (in German).
- [39] Tatewar, S.P. & Ingle, R.N. 1996. Resistance to Skimming Flow over Stepped Spillway. Proceeding of International Seminar on Civil Engineering Practices in 21st Century, Roorkee, India Feb. 26-28: 1039-1048.
- [40] Knight, D.W., & Mc Donald, J.A. 1979. Hydraulic Resistance of Artificial Streep Roughness. Journal of Hydraulic Engineering ASCE 105 (6): 675-690.
- [41] Aydın, M.C., 2005, Altıtan alıslı dolusavak havalandırıcıların CFD analizi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 126s
- [43] Savage, B.M., Jhonson, M.C.,(2001). Flow Ower Ogee Spillway: Physical and Numerical Model Case Study., Journal of Hydraulic Engineering ASCE 127 (8): 640-649.
- [44] Behr, M., (2001). Stabilized Space-time Finite Element Formulations for Free-Surface Flows. Communications in Numerical Methods in Engineering, 17, pp: 813-819 Houston, USA.
- [45] Ho, D., Boyes, K., Dononhoo, S. and Cooper, B.,(2003), Numerical Flow Analysis for Spillways. 43rd ANCOLD Conference, Hobart, Tasmania.
- [46] Tabbara, M., Chatila, J. and Awward, R.,(2005). Computational Simulation of Flow Over Stepped Spillways. Computers and Structures, 83, pp: 2215-2224.
- [47] Nguyen, V.T., Nestmann, F.,(2004), Applications of CFD in Hydraulics and River Engineering., International Journal of Computational Fluid Dynamics. Vol 18 (2), pp: 165-174, Germany.
- [48] Adin M.C., Aydın S., (2005). Kars Barajı Yandan Alıslı Dolusavak Teknesinde Üç Boyutlu Analiz Uygulaması, II. Ulusal Su Mühendisliği Sempozyumu, İzmir.

- [49] Chatila, J Tabbara, M.,(2004). Computational Modeling of Flow Over on Ogee Spillways. Computers and Structures, 82, pp: 1805-1812.
- [50] Çelik, F. and Güner,M., (2005). Computational Fluid Dynamics (CFD) Application for Ducted Propeller, Journal of Engineering and Natural Sciences, Sh:127-136, İstanbul.
- [51] Cheng, X., Chen, Y. and Luo, L.,(2006). Numerical Simulation of Air-water Two-Phase Flow Over Stepped Spillways. Science in China Press, Vol 49 (6), pp:674-684.
- [52] Balbay, A., 2007, Toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin yollardaki kar ve buzu eritmek için kullanılmasının deneysel ve teorik olarak araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 116s
- [53] <http://web.anova.com.tr>, 14.01.2007
- [54] <http://fluentusers.com>-Introductory Fluent Notes, Fluent v6.2 Mar 2005
- [55] Fluent 6.2 User's Guide, 2005, Fluent Inc.
- [55] Bracbill, J. U., Kothe, D. B., and Zemach, C.,(1992). A Continuum Method for Modeling Surface Tension, Journal of Computation Physics., 100, pp: 335-354.
- [56] Yasuda, Y. And Ohtsu, I., (1999). Flow Resistance of Skimming Flows in Stepped Channels. Proc., 28th IAHR Congress, H. Bergmann. R. Krainer and H. Beinhalter, eds. (Cd-rom), Graz, Austria, B14.

ÖZGEÇMİŞ

1977 yılında Elazığ'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Elazığ'da tamamladı. 1999 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 2002 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde yüksek lisans tezini tamamlayarak aynı yıl doktora eğitimine başladı. 2000 yılında DSİ 9. Bölge Müdürlüğü'nde, İnşaat Mühendisi olarak göreve başladı. Halen bu görevini yürütmektedir. 2002 yılından bu güne Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Hidrolik Kürsüsünde doktora öğrenimine devam etmektedir.

Ö. Faruk DURSUN

EKLER

EK 1 : Yapılan Sayısal Analizlerden Elde Edilen Sonuçlar

Tablo 1 . Klasik (Basamaksız) dolusavak için yapılan sayısal analizler sonucu elde edilen karakteristik özellikler ($Z=1$)

Açı	Debi (L/s)	d_c	d_c/Z	d	$d \cdot \cos \alpha$	V	$V^2/2g$	H_0	ΔH	$\Delta H/H_0$	$\Delta H/H_0$ (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	
30	10	0.052	0.227	0.015	0.013	2.108	0.227	0.293	0.054	0.185	18.490
	15	0.070	0.306	0.024	0.021	2.230	0.253	0.327	0.053	0.161	16.057
	20	0.083	0.401	0.026	0.023	2.267	0.262	0.328	0.043	0.131	13.139
	30	0.108	0.522	0.043	0.037	2.398	0.293	0.365	0.034	0.094	9.437
	40	0.123	0.683	0.055	0.048	2.360	0.284	0.364	0.033	0.090	9.029
	50	0.149	0.828	0.067	0.058	2.496	0.318	0.406	0.031	0.075	7.534
40	10	0.052	0.202	0.013	0.010	2.281	0.265	0.322	0.047	0.145	14.540
	15	0.069	0.268	0.023	0.018	2.387	0.290	0.356	0.048	0.135	13.508
	20	0.086	0.369	0.024	0.019	2.411	0.296	0.355	0.040	0.113	11.311
	30	0.105	0.451	0.041	0.032	2.523	0.324	0.392	0.036	0.092	9.177
	40	0.134	0.673	0.054	0.042	2.497	0.318	0.393	0.034	0.086	8.552
	50	0.147	0.739	0.067	0.052	2.612	0.348	0.434	0.035	0.080	7.961
50	10	0.052	0.211	0.013	0.008	2.148	0.235	0.320	0.076	0.239	23.934
	15	0.070	0.283	0.022	0.014	2.269	0.262	0.352	0.075	0.213	21.323
	20	0.082	0.378	0.023	0.015	2.301	0.270	0.354	0.069	0.196	19.595
	30	0.108	0.498	0.042	0.027	2.431	0.301	0.390	0.062	0.159	15.874
	40	0.130	0.599	0.057	0.037	2.399	0.293	0.388	0.058	0.149	14.886
	50	0.145	0.858	0.073	0.047	2.535	0.327	0.427	0.053	0.124	12.386

Tablo 2 Klasik dolusavak için yapılan sayısal analizler sonucu elde edilen karakteristik özellikler ($Z=2$)

Açı	Debi (L/s)	d_c	d_c/Z	d	$d \cdot \cos \alpha$	V	$V^2/2g$	H_0	ΔH	$\Delta H/H_0$	$\Delta H/H_0$ (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	
30	10	0.052	0.097	0.010	0.009	2.644	0.356	0.591	0.226	0.382	38.236
	15	0.070	0.130	0.017	0.015	2.857	0.416	0.627	0.196	0.312	31.235
	20	0.083	0.160	0.019	0.017	2.932	0.438	0.627	0.172	0.275	27.466
	30	0.108	0.208	0.033	0.029	3.168	0.512	0.665	0.125	0.188	18.768
	40	0.123	0.247	0.042	0.037	3.254	0.540	0.665	0.089	0.133	13.349
	50	0.149	0.300	0.052	0.045	3.340	0.569	0.706	0.092	0.131	13.090
40	10	0.052	0.092	0.011	0.008	2.776	0.393	0.620	0.219	0.354	35.355
	15	0.069	0.122	0.018	0.013	2.986	0.455	0.656	0.188	0.286	28.646
	20	0.086	0.157	0.019	0.014	3.060	0.477	0.654	0.163	0.249	24.868
	30	0.105	0.192	0.031	0.023	3.292	0.552	0.692	0.116	0.168	16.777
	40	0.134	0.255	0.039	0.030	3.376	0.581	0.694	0.083	0.120	11.983
	50	0.147	0.280	0.047	0.036	3.459	0.610	0.734	0.088	0.119	11.946
50	10	0.052	0.094	0.010	0.006	2.671	0.364	0.617	0.248	0.401	40.110
	15	0.070	0.126	0.017	0.011	2.899	0.428	0.652	0.213	0.326	32.650
	20	0.082	0.154	0.018	0.012	2.997	0.458	0.653	0.184	0.282	28.157
	30	0.108	0.203	0.031	0.020	3.253	0.539	0.690	0.130	0.189	18.900
	40	0.130	0.258	0.041	0.026	3.336	0.567	0.688	0.095	0.138	13.768
	50	0.145	0.288	0.051	0.033	3.419	0.596	0.727	0.099	0.135	13.550

Tablo 3 Klasik dolusavak için yapılan
sayısal analizler sonucu elde edilen karakteristik özellikler (Z= 3)

Açı	Debi (L/s)	d_c	d_c/Z	d	$d \cdot \cos \alpha$	V	$V^2/2g$	H_0	ΔH	$\Delta H/H_0$	$\Delta H/H_0$ (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	
30	10	0.052	0.062	0.007	0.006	2.171	0.240	0.890	0.644	0.723	72.317
	15	0.070	0.083	0.013	0.011	2.587	0.341	0.927	0.575	0.620	61.976
	20	0.083	0.101	0.015	0.013	2.776	0.393	0.926	0.521	0.562	56.210
	30	0.108	0.131	0.028	0.024	3.308	0.558	0.965	0.383	0.397	39.720
	40	0.123	0.153	0.036	0.032	3.500	0.624	0.966	0.310	0.321	32.081
	50	0.149	0.185	0.045	0.039	3.692	0.695	1.006	0.272	0.271	27.054
40	10	0.052	0.060	0.009	0.007	2.789	0.397	0.919	0.516	0.561	56.102
	15	0.069	0.080	0.015	0.012	3.166	0.511	0.956	0.433	0.453	45.340
	20	0.086	0.101	0.016	0.012	3.272	0.546	0.954	0.396	0.415	41.490
	30	0.105	0.123	0.027	0.021	3.714	0.703	0.992	0.268	0.270	27.046
	40	0.134	0.161	0.035	0.027	3.899	0.775	0.994	0.193	0.194	19.400
	50	0.147	0.177	0.043	0.033	4.083	0.850	1.034	0.152	0.147	14.655
50	10	0.052	0.060	0.008	0.005	2.825	0.407	0.917	0.505	0.550	55.048
	15	0.070	0.081	0.014	0.009	3.155	0.507	0.952	0.435	0.457	45.739
	20	0.082	0.098	0.016	0.010	3.322	0.563	0.953	0.380	0.399	39.918
	30	0.108	0.129	0.027	0.017	3.711	0.702	0.990	0.271	0.273	27.344
	40	0.130	0.159	0.035	0.022	3.829	0.747	0.989	0.219	0.222	22.173
	50	0.145	0.178	0.042	0.027	3.947	0.794	1.027	0.206	0.200	20.038

Tablo 4 Klasik dolusavak için yapılan
sayısal analizler sonucu elde edilen karakteristik özellikler (Z= 4m)

Açı	Debi (L/s)	d_c	d_c/Z	d	$d \cdot \cos \alpha$	V	$V^2/2g$	H_0	ΔH	$\Delta H/H_0$	$\Delta H/H_0$ (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	
30	10	0.052	0.044	0.005	0.004	2.364	0.285	1.219	0.930	0.763	76.291
	15	0.070	0.060	0.010	0.008	2.883	0.424	1.257	0.825	0.656	65.632
	20	0.083	0.072	0.012	0.011	3.178	0.515	1.256	0.731	0.582	58.166
	30	0.108	0.093	0.024	0.021	3.876	0.766	1.295	0.508	0.392	39.246
	40	0.123	0.108	0.020	0.017	4.101	0.857	1.296	0.422	0.325	32.528
	50	0.149	0.130	0.039	0.034	4.326	0.954	1.336	0.348	0.261	26.076
40	10	0.052	0.044	0.003	0.003	2.538	0.328	1.219	0.888	0.728	72.844
	15	0.069	0.059	0.007	0.005	2.994	0.457	1.256	0.794	0.632	63.212
	20	0.086	0.074	0.009	0.007	3.215	0.527	1.254	0.720	0.574	57.449
	30	0.105	0.090	0.018	0.013	3.792	0.733	1.292	0.546	0.422	42.231
	40	0.134	0.117	0.015	0.011	3.988	0.811	1.294	0.473	0.365	36.506
	50	0.147	0.128	0.031	0.023	4.184	0.892	1.334	0.418	0.314	31.367
50	10	0.052	0.044	0.004	0.002	2.777	0.393	1.221	0.826	0.676	67.609
	15	0.070	0.060	0.007	0.005	3.161	0.509	1.257	0.743	0.591	59.118
	20	0.082	0.071	0.009	0.006	3.399	0.589	1.258	0.664	0.528	52.750
	30	0.108	0.093	0.017	0.011	3.869	0.763	1.295	0.521	0.403	40.269
	40	0.130	0.113	0.014	0.009	3.992	0.812	1.294	0.473	0.365	36.531
	50	0.145	0.127	0.026	0.017	4.116	0.863	1.332	0.452	0.339	33.908

Tablo 5 Basamaklı dolusavak için yapılan sayısal analizler sonucu elde edilen karakteristik özellikler (Z= 1)

Açı	Debi (L/s)	d _c	d _c /Z	d	d.cosα	V	V ² /2g	H ₀	ΔH	ΔH/H ₀	ΔH/H ₀ (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	
30	10	0.052	0.013	0.022	0.019	1.766	0.159	0.342	0.164	0.480	48.047
	15	0.068	0.266	0.027	0.023	1.878	0.180	0.355	0.152	0.428	42.804
	20	0.083	0.336	0.035	0.030	2.011	0.206	0.370	0.134	0.362	36.186
	30	0.109	0.476	0.050	0.044	2.040	0.212	0.396	0.140	0.354	35.430
	40	0.123	0.580	0.065	0.056	2.219	0.251	0.410	0.103	0.251	25.074
	50	0.137	0.678	0.074	0.064	2.294	0.268	0.424	0.092	0.217	21.721
40	10	0.052	0.221	0.026	0.020	1.590	0.129	0.342	0.193	0.564	56.449
	15	0.068	0.016	0.033	0.025	1.693	0.146	0.358	0.187	0.523	52.293
	20	0.086	0.366	0.040	0.031	1.847	0.174	0.373	0.169	0.452	45.189
	30	0.106	0.482	0.051	0.039	2.060	0.216	0.393	0.137	0.350	34.968
	40	0.134	0.657	0.064	0.049	2.132	0.232	0.421	0.141	0.334	33.393
	50	0.146	0.768	0.074	0.057	2.278	0.265	0.433	0.112	0.258	25.764
50	10	0.052	0.013	0.023	0.015	1.826	0.170	0.345	0.161	0.465	46.519
	15	0.070	0.288	0.028	0.018	1.932	0.190	0.357	0.149	0.416	41.599
	20	0.082	0.347	0.033	0.021	2.097	0.224	0.369	0.124	0.336	33.562
	30	0.111	0.521	0.048	0.031	2.120	0.229	0.398	0.138	0.348	34.751
	40	0.130	0.684	0.062	0.040	2.178	0.242	0.417	0.135	0.324	32.403
	50	0.138	0.812	0.075	0.048	2.319	0.274	0.425	0.103	0.242	24.158

Tablo 6 Basamaklı dolusavak için yapılan sayısal analizler sonucu elde edilen karakteristik özellikler (Z= 2)

Açı	Debi (L/s)	d _c	d _c /Z	d	d.cosα	V	V ² /2g	H ₀	ΔH	ΔH/H ₀	ΔH/H ₀ (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	
30	10	0.052	0.092	0.016	0.014	1.945	0.193	0.642	0.435	0.678	67.781
	15	0.068	0.121	0.020	0.017	2.071	0.219	0.655	0.419	0.640	64.005
	20	0.083	0.149	0.025	0.022	2.208	0.248	0.670	0.400	0.597	59.677
	30	0.109	0.201	0.039	0.034	2.388	0.291	0.696	0.372	0.534	53.408
	40	0.123	0.232	0.049	0.043	2.468	0.310	0.710	0.357	0.503	50.257
	50	0.137	0.264	0.059	0.051	2.704	0.373	0.724	0.300	0.415	41.473
40	10	0.052	0.099	0.038	0.029	2.337	0.278	0.688	0.380	0.553	55.302
	15	0.068	0.127	0.037	0.028	2.382	0.289	0.694	0.376	0.542	54.235
	20	0.086	0.164	0.036	0.020	2.141	0.234	0.673	0.420	0.623	62.335
	30	0.106	0.198	0.040	0.031	2.274	0.264	0.693	0.399	0.576	57.570
	40	0.134	0.256	0.049	0.038	2.531	0.326	0.721	0.357	0.495	49.517
	50	0.146	0.286	0.058	0.045	2.712	0.375	0.733	0.314	0.428	42.777
50	10	0.052	0.029	0.021	0.014	1.853	0.175	0.645	0.456	0.707	70.747
	15	0.070	0.128	0.024	0.016	1.976	0.199	0.657	0.442	0.673	67.324
	20	0.082	0.150	0.027	0.017	2.180	0.242	0.669	0.409	0.612	61.207
	30	0.111	0.212	0.041	0.026	2.604	0.346	0.698	0.326	0.467	46.701
	40	0.130	0.262	0.049	0.031	2.553	0.332	0.717	0.353	0.493	49.293
	50	0.138	0.278	0.058	0.037	2.876	0.422	0.725	0.266	0.367	36.714

Tablo 7 Basamaklı dolusavak için yapılan sayısal analizler sonucu elde edilen karakteristik özellikler (Z= 3)

Açı	Debi (L/s)	d _c	d _c /Z	d	d.cosα	V	V ² /2g	H ₀	ΔH	ΔH/H ₀	ΔH/H ₀ (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	
30	10	0.052	0.044	0.027	0.023	1.511	0.116	0.941	0.802	0.852	85.185
	15	0.068	0.080	0.030	0.026	1.611	0.132	0.955	0.796	0.834	83.403
	20	0.083	0.098	0.038	0.033	1.712	0.149	0.970	0.788	0.812	81.205
	30	0.109	0.131	0.047	0.041	2.272	0.263	0.996	0.692	0.695	69.528
	40	0.123	0.148	0.048	0.042	2.516	0.323	1.010	0.645	0.639	63.906
	50	0.137	0.166	0.055	0.048	2.593	0.343	1.024	0.633	0.619	61.852
40	10	0.052	0.062	0.161	0.123	2.257	0.260	0.987	0.604	0.612	61.225
	15	0.068	0.057	0.102	0.078	2.255	0.259	0.993	0.656	0.660	66.036
	20	0.086	0.102	0.033	0.025	1.824	0.170	0.973	0.778	0.800	79.985
	30	0.106	0.127	0.038	0.029	2.347	0.281	0.993	0.683	0.688	68.761
	40	0.134	0.162	0.047	0.036	2.622	0.350	1.021	0.634	0.621	62.125
	50	0.146	0.180	0.057	0.044	3.012	0.463	1.033	0.526	0.510	50.965
50	10	0.052	0.045	0.008	0.005	1.461	0.109	0.945	0.831	0.880	87.972
	15	0.070	0.081	0.012	0.008	1.510	0.116	0.957	0.833	0.870	87.037
	20	0.082	0.097	0.026	0.017	2.139	0.233	0.969	0.719	0.742	74.227
	30	0.111	0.134	0.037	0.024	2.551	0.332	0.998	0.642	0.644	64.374
	40	0.130	0.160	0.046	0.030	2.672	0.364	1.017	0.623	0.613	61.281
	50	0.138	0.181	0.080	0.052	2.152	0.236	1.025	0.737	0.719	71.939

Tablo 8 Basamaklı dolusavak için yapılan sayısal analizler sonucu elde edilen karakteristik özellikler (Z= 4)

Açı	Debi (L/s)	d _c	d _c /Z	d	d.cosα	V	V ² /2g	H ₀	ΔH	ΔH/H ₀	ΔH/H ₀ (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	
30	10	0.052	0.061	0.012	0.010	1.966	0.197	1.241	1.034	0.833	83.314
	15	0.068	0.058	0.016	0.014	2.039	0.212	1.255	1.029	0.820	81.988
	20	0.083	0.072	0.026	0.023	2.108	0.227	1.270	1.021	0.804	80.390
	30	0.109	0.095	0.036	0.031	2.410	0.296	1.296	0.969	0.748	74.781
	40	0.123	0.108	0.045	0.039	2.507	0.320	1.310	0.951	0.726	72.578
	50	0.137	0.122	0.055	0.048	2.772	0.392	1.324	0.884	0.668	66.796
40	10	0.052	0.046	0.025	0.019	0.926	0.044	1.236	1.173	0.949	94.904
	15	0.068	0.077	0.030	0.023	1.031	0.054	1.257	1.180	0.939	93.852
	20	0.086	0.076	0.038	0.029	1.232	0.077	1.273	1.166	0.916	91.622
	30	0.106	0.095	0.056	0.043	1.475	0.111	1.293	1.139	0.881	88.116
	40	0.134	0.121	0.064	0.049	1.537	0.120	1.321	1.152	0.872	87.197
	50	0.146	0.133	0.071	0.055	1.832	0.171	1.333	1.107	0.831	83.066
50	10	0.052	0.059	0.026	0.017	0.494	0.012	1.242	1.213	0.976	97.638
	15	0.070	0.062	0.031	0.020	0.710	0.026	1.257	1.211	0.963	96.345
	20	0.082	0.073	0.040	0.026	1.082	0.060	1.269	1.184	0.933	93.276
	30	0.111	0.100	0.052	0.033	1.250	0.080	1.298	1.185	0.913	91.289
	40	0.130	0.119	0.059	0.038	1.701	0.147	1.317	1.132	0.859	85.917
	50	0.138	0.128	0.067	0.043	1.789	0.163	1.325	1.118	0.844	84.409

Tablo 9 I. Tip eşikli basamaklı dolusavak için yapılan sayısal analizler sonucu elde edilen karakteristik özellikler (Z= 1)

Açı	Debi (L/s)	d _c	d _c /Z	d	d.cosα	V	V ² /2g	H ₀	ΔH	ΔH/H ₀	ΔH/H ₀ (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	
30	10	0.052	0.251	0.032	0.027	1.502	0.115	0.292	0.149	0.512	51.208
	15	0.070	0.338	0.043	0.037	1.679	0.144	0.327	0.146	0.446	44.589
	20	0.083	0.459	0.048	0.042	1.655	0.140	0.326	0.144	0.444	44.374
	30	0.108	0.597	0.066	0.057	1.850	0.174	0.365	0.134	0.366	36.602
	40	0.123	0.759	0.074	0.064	1.974	0.199	0.367	0.104	0.283	28.316
	50	0.154	0.951	0.082	0.071	2.099	0.225	0.411	0.115	0.280	28.036
40	10	0.052	0.256	0.030	0.023	1.747	0.156	0.294	0.115	0.393	39.258
	15	0.069	0.340	0.041	0.032	1.917	0.187	0.326	0.107	0.329	32.854
	20	0.086	0.467	0.040	0.031	1.939	0.192	0.327	0.105	0.320	31.994
	30	0.106	0.576	0.056	0.043	2.127	0.231	0.363	0.090	0.247	24.699
	40	0.134	0.882	0.068	0.052	2.216	0.250	0.362	0.059	0.164	16.405
	50	0.145	0.954	0.080	0.062	2.306	0.271	0.402	0.069	0.172	17.232
50	10	0.052	0.244	0.017	0.011	1.713	0.150	0.294	0.133	0.453	45.284
	15	0.069	0.324	0.028	0.018	1.911	0.186	0.326	0.122	0.373	37.336
	20	0.082	0.443	0.037	0.024	1.886	0.181	0.327	0.122	0.372	37.231
	30	0.106	0.573	0.046	0.030	2.104	0.226	0.363	0.108	0.297	29.670
	40	0.129	0.949	0.061	0.040	2.241	0.276	0.386	0.070	0.181	18.056
	50	0.148	1.088	0.076	0.049	2.379	0.288	0.402	0.065	0.161	16.135

Tablo 10 1. Tip eşikli basamaklı dolusavak için yapılan sayısal analizler sonucu elde edilen karakteristik özellikler (Z= 2)

Açı	Debi (L/s)	d _c	d _c /Z	d	d.cosα	V	V ² /2g	H ₀	ΔH	ΔH/H ₀	ΔH/H ₀ (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	
30	10	0.052	0.097	0.008	0.007	1.742	0.155	0.589	0.427	0.725	72.515
	15	0.070	0.130	0.016	0.014	1.983	0.200	0.627	0.412	0.657	65.750
	20	0.083	0.162	0.027	0.024	2.076	0.220	0.624	0.381	0.610	61.029
	30	0.108	0.211	0.038	0.033	2.169	0.240	0.665	0.392	0.590	58.967
	40	0.123	0.256	0.033	0.029	2.262	0.261	0.668	0.378	0.566	56.608
	50	0.154	0.321	0.067	0.058	2.575	0.338	0.711	0.315	0.443	44.342
40	10	0.052	0.096	0.004	0.003	1.701	0.147	0.591	0.440	0.745	74.482
	15	0.069	0.127	0.010	0.008	2.034	0.211	0.626	0.407	0.651	65.091
	20	0.086	0.169	0.016	0.012	2.148	0.235	0.626	0.378	0.605	60.454
	30	0.106	0.208	0.037	0.028	2.569	0.336	0.663	0.299	0.450	45.035
	40	0.134	0.280	0.048	0.037	2.743	0.383	0.663	0.242	0.366	36.577
	50	0.145	0.303	0.060	0.046	2.917	0.434	0.702	0.222	0.317	31.686
50	10	0.052	0.099	0.013	0.008	1.867	0.178	0.591	0.405	0.686	68.590
	15	0.069	0.131	0.021	0.013	2.160	0.238	0.626	0.375	0.599	59.907
	20	0.082	0.164	0.023	0.015	2.235	0.255	0.626	0.357	0.570	56.987
	30	0.106	0.212	0.037	0.024	2.586	0.341	0.663	0.298	0.450	44.963
	40	0.129	0.276	0.046	0.030	2.955	0.445	0.686	0.211	0.308	30.767
	50	0.148	0.317	0.056	0.036	2.894	0.427	0.702	0.239	0.341	34.054

Tablo 11 1. Tip eşikli basamaklı dolusavak için yapılan sayısal analizler sonucu elde edilen karakteristik özellikler (Z= 3)

Açı	Debi (L/s)	d_c	d_c/Z	d	$d \cdot \cos \alpha$	V	$V^2/2g$	H_0	ΔH	$\Delta H/H_0$	$\Delta H/H_0$ (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	
30	10	0.052	0.063	0.023	0.020	0.690	0.024	0.888	0.844	0.951	95.071
	15	0.070	0.085	0.032	0.028	1.087	0.060	0.927	0.839	0.905	90.515
	20	0.083	0.103	0.031	0.027	1.259	0.081	0.924	0.816	0.884	88.350
	30	0.108	0.134	0.044	0.038	1.983	0.200	0.965	0.726	0.753	75.273
	40	0.123	0.157	0.055	0.047	2.365	0.285	0.968	0.636	0.657	65.676
	50	0.154	0.197	0.065	0.056	2.747	0.385	1.011	0.570	0.564	56.395
40	10	0.052	0.063	0.017	0.013	1.480	0.112	0.890	0.765	0.860	85.972
	15	0.069	0.084	0.025	0.019	1.896	0.183	0.926	0.723	0.781	78.126
	20	0.086	0.107	0.026	0.020	2.005	0.205	0.926	0.701	0.757	75.694
	30	0.106	0.131	0.038	0.029	2.569	0.336	0.963	0.597	0.620	62.026
	40	0.134	0.170	0.037	0.028	2.845	0.413	0.963	0.522	0.542	54.229
	50	0.145	0.184	0.054	0.041	3.122	0.497	1.002	0.464	0.463	46.322
50	10	0.052	0.064	0.018	0.012	1.630	0.135	0.890	0.743	0.835	83.458
	15	0.069	0.085	0.026	0.017	2.046	0.213	0.926	0.696	0.751	75.122
	20	0.082	0.103	0.029	0.019	2.267	0.262	0.926	0.645	0.697	69.694
	30	0.106	0.134	0.041	0.026	2.847	0.413	0.963	0.523	0.544	54.358
	40	0.129	0.168	0.048	0.030	3.052	0.560	0.986	0.396	0.402	40.157
	50	0.148	0.192	0.054	0.035	3.257	0.541	1.002	0.427	0.426	42.570

Tablo 12 1. Tip eşikli basamaklı dolusavak için yapılan sayısal analizler sonucu elde edilen karakteristik özellikler (Z= 4)

Açı	Debi (L/s)	d_c	d_c/Z	d	$d \cdot \cos \alpha$	V	$V^2/2g$	H_0	ΔH	$\Delta H/H_0$	$\Delta H/H_0$ (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	
30	10	0.052	0.045	0.009	0.007	0.860	0.038	1.217	1.172	0.963	96.297
	15	0.070	0.060	0.017	0.015	1.003	0.051	1.257	1.191	0.947	94.729
	20	0.083	0.074	0.030	0.026	0.932	0.044	1.254	1.184	0.944	94.402
	30	0.108	0.097	0.061	0.053	1.088	0.060	1.295	1.182	0.913	91.290
	40	0.123	0.113	0.043	0.037	1.230	0.077	1.298	1.184	0.912	91.215
	50	0.154	0.142	0.087	0.075	1.372	0.096	1.341	1.170	0.873	87.251
40	10	0.052	0.045	0.008	0.006	0.342	0.006	1.220	1.208	0.990	99.033
	15	0.069	0.059	0.015	0.012	0.569	0.016	1.256	1.228	0.978	97.752
	20	0.086	0.078	0.032	0.024	0.906	0.042	1.256	1.189	0.947	94.733
	30	0.106	0.096	0.064	0.049	1.509	0.116	1.293	1.128	0.873	87.254
	40	0.134	0.124	0.042	0.032	1.670	0.142	1.293	1.119	0.865	86.525
	50	0.145	0.135	0.084	0.065	1.831	0.171	1.332	1.097	0.823	82.326
50	10	0.052	0.047	0.032	0.021	0.805	0.033	1.218	1.164	0.956	95.576
	15	0.069	0.062	0.044	0.029	1.162	0.069	1.256	1.159	0.922	92.249
	20	0.082	0.075	0.045	0.029	1.296	0.086	1.254	1.140	0.909	90.884
	30	0.106	0.097	0.061	0.039	1.430	0.104	1.293	1.150	0.889	88.903
	40	0.129	0.122	0.071	0.046	1.963	0.143	1.316	1.127	0.856	85.618
	50	0.148	0.140	0.083	0.053	2.495	0.317	1.335	0.964	0.722	72.235

Tablo 13 2 Tip eşikli basamaklı dolusavak için yapılan sayısal analizler sonucu elde edilen karakteristik özellikler (Z= 1)

Açı	Debi (L/s)	d _c	d _c /Z	d	d.cosα	V	V ² /2g	H ₀	ΔH	ΔH/H ₀	ΔH/H ₀ (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	
30	10	0.052	0.251	0.042	0.037	1.505	0.115	0.304	0.152	0.499	49.937
	15	0.071	0.343	0.052	0.045	1.687	0.145	0.338	0.148	0.438	43.774
	20	0.083	0.421	0.056	0.049	1.676	0.143	0.337	0.145	0.431	43.093
	30	0.108	0.548	0.061	0.053	1.879	0.180	0.375	0.143	0.380	38.012
	40	0.123	0.695	0.064	0.055	1.892	0.182	0.376	0.138	0.368	36.806
	50	0.151	0.853	0.078	0.068	2.121	0.229	0.418	0.121	0.290	29.009
40	10	0.052	0.236	0.024	0.018	1.652	0.139	0.304	0.147	0.483	48.253
	15	0.070	0.318	0.036	0.028	1.848	0.174	0.337	0.135	0.401	40.140
	20	0.086	0.446	0.038	0.029	1.923	0.188	0.340	0.122	0.360	35.972
	30	0.109	0.565	0.057	0.043	2.151	0.236	0.376	0.097	0.257	25.705
	40	0.134	0.827	0.069	0.053	2.235	0.255	0.373	0.066	0.177	17.684
	50	0.146	0.901	0.080	0.062	2.318	0.274	0.413	0.077	0.187	18.748
50	10	0.052	0.230	0.016	0.010	1.723	0.151	0.303	0.142	0.467	46.725
	15	0.069	0.305	0.026	0.017	1.915	0.187	0.336	0.132	0.394	39.351
	20	0.082	0.432	0.030	0.019	1.928	0.189	0.338	0.130	0.383	38.339
	30	0.108	0.568	0.049	0.032	2.143	0.234	0.375	0.109	0.291	29.121
	40	0.128	0.842	0.059	0.038	2.233	0.254	0.395	0.103	0.261	26.056
	50	0.146	0.961	0.074	0.048	2.365	0.285	0.413	0.080	0.195	19.479

Tablo 14 2 Tip eşikli basamaklı dolusavak için yapılan sayısal analizler sonucu elde edilen karakteristik özellikler (Z= 2)

Açı	Debi (L/s)	d _c	d _c /Z	d	d.cosα	V	V ² /2g	H ₀	ΔH	ΔH/H ₀	ΔH/H ₀ (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	
30	10	0.052	0.095	0.010	0.008	1.570	0.126	0.601	0.468	0.777	77.738
	15	0.071	0.130	0.018	0.016	1.845	0.173	0.638	0.449	0.703	70.343
	20	0.083	0.158	0.019	0.017	1.913	0.186	0.636	0.433	0.680	68.040
	30	0.108	0.206	0.037	0.032	2.248	0.257	0.675	0.385	0.571	57.080
	40	0.123	0.251	0.052	0.045	2.399	0.293	0.677	0.339	0.500	50.016
	50	0.151	0.308	0.067	0.058	2.550	0.331	0.718	0.329	0.458	45.789
40	10	0.05	0.09	0.01	0.01	1.62	0.13	0.60	0.46	0.77	76.97
	15	0.07	0.13	0.01	0.01	1.92	0.19	0.64	0.44	0.69	68.77
	20	0.09	0.17	0.02	0.01	2.12	0.23	0.64	0.40	0.62	61.82
	30	0.11	0.21	0.04	0.03	2.52	0.32	0.68	0.32	0.48	47.81
	40	0.13	0.27	0.05	0.04	2.63	0.35	0.67	0.28	0.42	42.22
	50	0.15	0.30	0.06	0.04	2.74	0.38	0.71	0.29	0.40	40.08
50	10	0.052	0.096	0.008	0.005	1.064	0.058	0.601	0.538	0.895	89.512
	15	0.069	0.127	0.015	0.010	1.484	0.112	0.636	0.514	0.808	80.800
	20	0.082	0.161	0.019	0.012	1.776	0.161	0.638	0.464	0.728	72.826
	30	0.108	0.212	0.037	0.024	2.476	0.312	0.675	0.339	0.502	50.234
	40	0.128	0.268	0.048	0.031	2.764	0.389	0.695	0.275	0.396	39.582
	50	0.146	0.305	0.057	0.037	2.963	0.448	0.713	0.229	0.321	32.063

Tablo 15 2 Tip eşikli basamaklı dolusavak için yapılan sayısal analizler sonucu elde edilen karakteristik özellikler (Z=3)

Açı	Debi (L/s)	d_c	d_c/Z	d	$d \cdot \cos \alpha$	V	$V^2/2g$	H_0	ΔH	$\Delta H/H_0$	$\Delta H/H_0$ (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	
30	10	0.052	0.062	0.019	0.016	0.991	0.050	0.900	0.834	0.927	92.658
	15	0.071	0.085	0.028	0.024	1.359	0.094	0.938	0.820	0.874	87.403
	20	0.083	0.102	0.031	0.027	1.411	0.102	0.936	0.808	0.863	86.305
	30	0.108	0.133	0.046	0.040	1.936	0.191	0.975	0.744	0.763	76.323
	40	0.123	0.155	0.054	0.047	2.249	0.258	0.977	0.673	0.688	68.821
	50	0.151	0.190	0.062	0.054	2.562	0.334	1.018	0.630	0.618	61.841
40	10	0.052	0.063	0.023	0.017	1.391	0.099	0.901	0.785	0.871	87.115
	15	0.070	0.085	0.031	0.023	1.800	0.165	0.937	0.748	0.799	79.879
	20	0.086	0.105	0.027	0.021	1.908	0.186	0.939	0.732	0.780	77.992
	30	0.109	0.133	0.037	0.028	2.469	0.311	0.976	0.637	0.653	65.289
	40	0.134	0.169	0.046	0.036	2.745	0.384	0.974	0.555	0.569	56.931
	50	0.146	0.184	0.056	0.043	3.022	0.465	1.013	0.505	0.498	49.829
50	10	0.052	0.062	0.008	0.005	1.556	0.123	0.900	0.771	0.857	85.683
	15	0.069	0.082	0.015	0.010	1.973	0.198	0.936	0.728	0.777	77.742
	20	0.082	0.101	0.019	0.012	2.153	0.236	0.937	0.689	0.735	73.499
	30	0.108	0.133	0.035	0.022	2.730	0.380	0.975	0.573	0.588	58.757
	40	0.128	0.164	0.045	0.029	2.999	0.458	0.995	0.508	0.510	51.036
	50	0.146	0.187	0.055	0.035	3.193	0.520	1.013	0.458	0.452	45.223

Tablo 16 2 Tip eşikli basamaklı dolusavak için yapılan sayısal analizler sonucu elde edilen karakteristik özellikler (Z=4)

Açı	Debi (L/s)	d_c	d_c/Z	d	$d \cdot \cos \alpha$	V	$V^2/2g$	H_0	ΔH	$\Delta H/H_0$	$\Delta H/H_0$ (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	
30	10	0.052	0.045	0.012	0.010	1.018	0.053	1.220	1.156	0.948	94.807
	15	0.071	0.061	0.023	0.020	1.165	0.069	1.258	1.169	0.930	92.950
	20	0.083	0.074	0.032	0.027	1.176	0.071	1.256	1.158	0.922	92.200
	30	0.108	0.097	0.059	0.051	1.346	0.092	1.295	1.152	0.889	88.935
	40	0.123	0.113	0.072	0.062	1.333	0.091	1.297	1.145	0.882	88.221
	50	0.151	0.139	0.085	0.074	1.525	0.119	1.338	1.146	0.856	85.646
40	10	0.052	0.045	0.021	0.016	0.797	0.032	1.221	1.172	0.960	96.027
	15	0.070	0.061	0.032	0.025	1.033	0.054	1.257	1.178	0.937	93.716
	20	0.086	0.078	0.041	0.031	1.161	0.069	1.259	1.158	0.920	92.039
	30	0.109	0.099	0.063	0.048	1.504	0.115	1.296	1.133	0.874	87.386
	40	0.134	0.124	0.071	0.054	1.630	0.135	1.294	1.105	0.853	85.348
	50	0.146	0.135	0.079	0.060	1.755	0.157	1.333	1.116	0.837	83.687
50	10	0.052	0.047	0.035	0.023	0.900	0.041	1.219	1.155	0.947	94.741
	15	0.069	0.062	0.045	0.029	1.120	0.064	1.256	1.163	0.926	92.607
	20	0.082	0.074	0.043	0.028	1.180	0.071	1.257	1.158	0.921	92.149
	30	0.108	0.098	0.055	0.035	1.468	0.110	1.295	1.150	0.888	88.803
	40	0.128	0.119	0.067	0.043	1.761	0.158	1.315	1.114	0.847	84.708
	50	0.146	0.136	0.073	0.047	1.737	0.154	1.333	1.132	0.850	84.957

Tablo 17 3 Tip eşikli basamaklı dolusavak için yapılan sayısal analizler sonucu elde edilen karakteristik özellikler (Z=1)

Açı	Debi (L/s)	d _c	d _c /Z	d	d.cosα	V	V ² /2g	H ₀	ΔH	ΔH/H ₀	ΔH/H ₀ (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	
30	10	0.052	0.218	0.022	0.019	1.554	0.123	0.316	0.174	0.551	55.116
	15	0.072	0.301	0.033	0.028	1.754	0.157	0.349	0.164	0.469	46.914
	20	0.083	0.390	0.037	0.032	1.736	0.154	0.347	0.162	0.466	46.607
	30	0.106	0.498	0.055	0.048	1.959	0.196	0.383	0.139	0.364	36.402
	40	0.123	0.651	0.050	0.044	1.979	0.200	0.385	0.142	0.368	36.842
	50	0.148	0.783	0.076	0.066	2.233	0.254	0.425	0.105	0.247	24.659
40	10	0.052	0.223	0.023	0.017	1.750	0.156	0.315	0.142	0.450	44.958
	15	0.071	0.305	0.034	0.026	1.919	0.188	0.348	0.134	0.386	38.631
	20	0.086	0.406	0.034	0.026	1.840	0.173	0.349	0.150	0.431	43.120
	30	0.108	0.509	0.050	0.038	2.018	0.208	0.385	0.139	0.362	36.167
	40	0.134	0.740	0.050	0.038	2.109	0.227	0.384	0.119	0.311	31.052
	50	0.147	0.812	0.074	0.056	2.313	0.273	0.424	0.095	0.224	22.387
50	10	0.052	0.220	0.016	0.010	1.643	0.138	0.314	0.166	0.530	52.974
	15	0.070	0.297	0.026	0.017	1.860	0.176	0.347	0.154	0.443	44.320
	20	0.082	0.406	0.029	0.019	1.920	0.188	0.350	0.143	0.410	40.969
	30	0.109	0.540	0.048	0.031	2.172	0.241	0.386	0.115	0.297	29.664
	40	0.127	0.784	0.060	0.039	2.280	0.265	0.404	0.100	0.248	24.830
	50	0.146	0.901	0.074	0.048	2.384	0.290	0.423	0.086	0.203	20.296

Tablo 18 3 Tip eşikli basamaklı dolusavak için yapılan sayısal analizler sonucu elde edilen karakteristik özellikler (Z=2)

Açı	Debi (L/s)	d _c	d _c /Z	d	d.cosα	V	V ² /2g	H ₀	ΔH	ΔH/H ₀	ΔH/H ₀ (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	
30	10	0.052	0.094	0.011	0.009	1.822	0.169	0.614	0.436	0.710	70.968
	15	0.072	0.130	0.019	0.017	2.056	0.216	0.649	0.417	0.643	64.252
	20	0.083	0.156	0.029	0.025	2.021	0.208	0.646	0.413	0.639	63.906
	30	0.106	0.199	0.039	0.034	2.281	0.265	0.683	0.384	0.562	56.236
	40	0.123	0.244	0.035	0.030	2.322	0.275	0.686	0.381	0.555	55.537
	50	0.148	0.294	0.063	0.055	2.621	0.350	0.725	0.320	0.442	44.167
40	10	0.052	0.094	0.009	0.007	1.727	0.152	0.613	0.454	0.741	74.106
	15	0.071	0.128	0.016	0.012	1.993	0.202	0.648	0.433	0.669	66.869
	20	0.086	0.164	0.022	0.017	2.138	0.233	0.648	0.398	0.615	61.487
	30	0.108	0.206	0.040	0.031	2.467	0.310	0.685	0.344	0.503	50.273
	40	0.134	0.267	0.049	0.038	2.566	0.335	0.685	0.312	0.455	45.535
	50	0.147	0.293	0.058	0.045	2.665	0.362	0.724	0.318	0.439	43.857
50	10	0.052	0.097	0.019	0.012	1.974	0.199	0.612	0.402	0.656	65.613
	15	0.070	0.131	0.027	0.017	2.273	0.263	0.647	0.366	0.566	56.631
	20	0.082	0.159	0.033	0.021	2.418	0.298	0.649	0.330	0.508	50.817
	30	0.109	0.211	0.039	0.025	2.564	0.335	0.686	0.326	0.475	47.535
	40	0.127	0.260	0.048	0.031	2.874	0.421	0.704	0.253	0.359	35.867
	50	0.146	0.299	0.057	0.037	3.014	0.463	0.723	0.223	0.309	30.855

Tablo 19 3 Tip eşikli basamaklı dolusavak için yapılan sayısal analizler sonucu elde edilen karakteristik özellikler (Z=3)

Açı	Debi (L/s)	d_c	d_c/Z	d	$d \cdot \cos \alpha$	V	$V^2/2g$	H_0	ΔH	$\Delta H/H_0$	$\Delta H/H_0$ (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	
30	10	0.052	0.062	0.023	0.020	0.998	0.051	0.913	0.842	0.922	92.220
	15	0.072	0.086	0.032	0.028	1.379	0.097	0.949	0.824	0.869	86.863
	20	0.083	0.101	0.033	0.029	1.545	0.122	0.946	0.796	0.841	84.116
	30	0.106	0.128	0.045	0.039	2.136	0.233	0.983	0.711	0.724	72.379
	40	0.123	0.152	0.052	0.045	2.401	0.294	0.986	0.647	0.656	65.610
	50	0.148	0.183	0.060	0.052	2.666	0.362	1.025	0.611	0.596	59.609
40	10	0.052	0.062	0.018	0.014	1.183	0.071	0.912	0.827	0.906	90.639
	15	0.071	0.084	0.027	0.021	1.599	0.130	0.948	0.797	0.841	84.094
	20	0.086	0.104	0.026	0.020	1.823	0.169	0.948	0.758	0.800	80.005
	30	0.108	0.131	0.038	0.029	2.464	0.309	0.985	0.646	0.656	65.616
	40	0.134	0.167	0.048	0.037	2.713	0.375	0.985	0.573	0.582	58.189
	50	0.147	0.183	0.057	0.044	2.963	0.448	1.024	0.532	0.520	51.993
50	10	0.052	0.061	0.009	0.006	1.483	0.112	0.911	0.793	0.871	87.071
	15	0.070	0.082	0.016	0.010	1.918	0.188	0.947	0.749	0.791	79.109
	20	0.082	0.099	0.017	0.011	2.117	0.228	0.949	0.709	0.747	74.744
	30	0.109	0.132	0.031	0.020	2.738	0.382	0.986	0.584	0.592	59.196
	40	0.127	0.160	0.045	0.029	2.978	0.452	1.004	0.523	0.521	52.099
	50	0.146	0.184	0.053	0.034	3.236	0.534	1.023	0.455	0.445	44.462

Tablo 20 3 Tip eşikli basamaklı dolusavak için yapılan sayısal analizler sonucu elde edilen karakteristik özellikler (Z=4)

Açı	Debi (L/s)	d_c	d_c/Z	d	$d \cdot \cos \alpha$	V	$V^2/2g$	H_0	ΔH	$\Delta H/H_0$	$\Delta H/H_0$ (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	
30	10	0.052	0.045	0.015	0.013	1.049	0.056	1.223	1.154	0.944	94.352
	15	0.072	0.062	0.026	0.023	1.263	0.081	1.259	1.155	0.918	91.750
	20	0.083	0.074	0.033	0.029	1.229	0.077	1.256	1.150	0.916	91.585
	30	0.106	0.095	0.057	0.050	1.481	0.112	1.293	1.132	0.875	87.521
	40	0.123	0.113	0.047	0.041	1.524	0.118	1.296	1.137	0.877	87.729
	50	0.148	0.135	0.081	0.071	1.836	0.172	1.335	1.093	0.819	81.851
40	10	0.052	0.045	0.017	0.013	0.851	0.037	1.222	1.171	0.959	95.891
	15	0.071	0.062	0.028	0.022	1.052	0.056	1.258	1.180	0.938	93.786
	20	0.086	0.077	0.034	0.026	1.180	0.071	1.258	1.161	0.923	92.297
	30	0.108	0.097	0.055	0.042	1.460	0.109	1.295	1.144	0.883	88.349
	40	0.134	0.123	0.047	0.036	1.545	0.122	1.295	1.137	0.878	87.800
	50	0.147	0.135	0.077	0.059	1.630	0.135	1.334	1.139	0.854	85.401
50	10	0.052	0.046	0.021	0.013	0.602	0.018	1.221	1.189	0.974	97.390
	15	0.070	0.061	0.031	0.020	0.876	0.039	1.257	1.198	0.953	95.314
	20	0.082	0.074	0.037	0.024	1.042	0.055	1.259	1.179	0.937	93.717
	30	0.109	0.099	0.055	0.035	1.516	0.117	1.296	1.144	0.883	88.253
	40	0.127	0.118	0.063	0.040	1.709	0.149	1.315	1.125	0.856	85.599
	50	0.146	0.135	0.069	0.045	1.902	0.184	1.333	1.104	0.828	82.826

Tablo 21 4 Tip eşikli basamaklı dolusavak için yapılan sayısal analizler sonucu elde edilen karakteristik özellikler (Z=1)

Açı	Debi (L/s)	d_c	d_c/Z	d	$d \cdot \cos \alpha$	V	$V^2/2g$	H_0	ΔH	$\Delta H/H_0$	$\Delta H/H_0$ (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	
30	10	0.052	0.239	0.035	0.031	1.645	0.138	0.309	0.140	0.454	45.406
	15	0.070	0.321	0.047	0.040	1.764	0.159	0.342	0.143	0.418	41.780
	20	0.083	0.417	0.055	0.048	1.764	0.159	0.345	0.138	0.402	40.172
	30	0.110	0.553	0.063	0.055	1.764	0.159	0.382	0.169	0.441	44.146
	40	0.123	0.695	0.062	0.054	1.902	0.184	0.379	0.141	0.372	37.200
	50	0.148	0.836	0.082	0.071	2.039	0.212	0.420	0.137	0.326	32.584
40	10	0.052	0.233	0.026	0.020	1.744	0.155	0.309	0.134	0.434	43.371
	15	0.070	0.314	0.038	0.029	1.915	0.187	0.342	0.126	0.369	36.934
	20	0.086	0.424	0.036	0.028	1.934	0.191	0.346	0.127	0.368	36.752
	30	0.111	0.547	0.053	0.040	2.124	0.230	0.383	0.112	0.294	29.365
	40	0.134	0.793	0.054	0.042	2.104	0.226	0.379	0.112	0.295	29.480
	50	0.148	0.876	0.079	0.060	2.311	0.272	0.420	0.087	0.208	20.808
50	10	0.052	0.225	0.016	0.010	1.991	0.202	0.308	0.096	0.312	31.153
	15	0.069	0.299	0.026	0.017	2.132	0.232	0.341	0.092	0.271	27.098
	20	0.082	0.408	0.036	0.023	2.189	0.244	0.344	0.076	0.222	22.202
	30	0.108	0.537	0.046	0.029	2.246	0.257	0.380	0.094	0.246	24.625
	40	0.127	0.789	0.058	0.040	2.346	0.280	0.399	0.078	0.195	19.459
	50	0.145	0.901	0.071	0.046	2.446	0.305	0.417	0.066	0.159	15.895

Tablo 22 4 Tip eşikli basamaklı dolusavak için yapılan sayısal analizler sonucu elde edilen karakteristik özellikler (Z=2)

Açı	Debi (L/s)	d_c	d_c/Z	d	$d \cdot \cos \alpha$	V	$V^2/2g$	H_0	ΔH	$\Delta H/H_0$	$\Delta H/H_0$ (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	
30	10	0.052	0.096	0.016	0.014	0.758	0.029	0.606	0.563	0.929	92.936
	15	0.070	0.129	0.026	0.023	1.066	0.058	0.642	0.562	0.875	87.468
	20	0.083	0.159	0.035	0.030	1.066	0.058	0.644	0.556	0.863	86.342
	30	0.110	0.211	0.043	0.038	1.066	0.058	0.682	0.587	0.860	86.003
	40	0.123	0.252	0.043	0.037	1.797	0.165	0.680	0.478	0.703	70.289
	50	0.148	0.303	0.072	0.062	2.528	0.326	0.720	0.332	0.461	46.132
40	10	0.052	0.097	0.017	0.013	1.346	0.092	0.606	0.501	0.826	82.611
	15	0.070	0.130	0.026	0.020	1.724	0.151	0.642	0.471	0.733	73.294
	20	0.086	0.167	0.029	0.022	1.877	0.179	0.645	0.444	0.688	68.777
	30	0.111	0.216	0.044	0.033	2.403	0.294	0.683	0.355	0.520	51.997
	40	0.134	0.272	0.052	0.040	2.625	0.351	0.680	0.288	0.424	42.427
	50	0.148	0.301	0.061	0.047	2.847	0.413	0.720	0.260	0.361	36.109
50	10	0.052	0.097	0.014	0.009	1.906	0.185	0.606	0.412	0.680	67.998
	15	0.069	0.128	0.022	0.014	2.236	0.255	0.641	0.372	0.580	58.046
	20	0.082	0.159	0.023	0.015	2.296	0.269	0.643	0.360	0.560	55.957
	30	0.108	0.209	0.036	0.023	2.694	0.370	0.680	0.287	0.422	42.209
	40	0.127	0.261	0.046	0.040	2.887	0.425	0.699	0.233	0.334	33.372
	50	0.145	0.298	0.055	0.036	3.081	0.484	0.717	0.198	0.276	27.570

Tablo 23 4 Tip eşikli basamaklı dolusavak için yapılan sayısal analizler sonucu elde edilen karakteristik özellikler (Z=3)

Açı	Debi (L/s)	d_c	d_c/Z	d	$d \cdot \cos \alpha$	V	$V^2/2g$	H_0	ΔH	$\Delta H/H_0$	$\Delta H/H_0$ (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	
30	10	0.052	0.063	0.028	0.024	1.135	0.066	0.905	0.816	0.901	90.107
	15	0.070	0.084	0.036	0.032	1.451	0.107	0.942	0.803	0.853	85.257
	20	0.083	0.101	0.041	0.035	1.451	0.107	0.944	0.801	0.849	84.886
	30	0.110	0.134	0.045	0.039	1.451	0.107	0.982	0.836	0.851	85.093
	40	0.123	0.154	0.054	0.047	2.014	0.207	0.980	0.727	0.741	74.130
	50	0.148	0.185	0.063	0.055	2.576	0.338	1.020	0.627	0.615	61.469
40	10	0.052	0.062	0.043	0.033	1.662	0.141	0.905	0.731	0.808	80.803
	15	0.070	0.083	0.023	0.018	2.067	0.218	0.942	0.707	0.750	75.014
	20	0.086	0.105	0.033	0.025	2.046	0.213	0.945	0.706	0.748	74.764
	30	0.111	0.136	0.042	0.032	2.545	0.330	0.983	0.621	0.631	63.125
	40	0.134	0.169	0.051	0.039	2.571	0.337	0.980	0.605	0.617	61.676
	50	0.148	0.186	0.059	0.045	3.198	0.521	1.020	0.454	0.445	44.469
50	10	0.052	0.062	0.039	0.025	1.239	0.078	0.905	0.802	0.886	88.554
	15	0.069	0.082	0.020	0.013	1.731	0.153	0.941	0.775	0.824	82.406
	20	0.082	0.100	0.028	0.018	1.966	0.197	0.943	0.728	0.772	77.218
	30	0.108	0.132	0.035	0.023	2.747	0.385	0.980	0.573	0.584	58.439
	40	0.127	0.159	0.041	0.040	3.088	0.486	0.999	0.472	0.473	47.280
	50	0.145	0.182	0.048	0.031	3.428	0.599	1.017	0.387	0.381	38.085

Tablo 24 4 Tip eşikli basamaklı dolusavak için yapılan sayısal analizler sonucu elde edilen karakteristik özellikler (Z=4)

Açı	Debi (L/s)	d_c	d_c/Z	d	$d \cdot \cos \alpha$	V	$V^2/2g$	H_0	ΔH	$\Delta H/H_0$	$\Delta H/H_0$ (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	
30	10	0.052	0.045	0.008	0.007	1.102	0.062	1.220	1.151	0.944	94.368
	15	0.070	0.060	0.016	0.014	1.206	0.074	1.257	1.169	0.930	92.973
	20	0.083	0.074	0.026	0.022	1.206	0.074	1.259	1.162	0.923	92.342
	30	0.110	0.098	0.054	0.047	1.206	0.074	1.297	1.176	0.907	90.703
	40	0.123	0.113	0.039	0.034	1.331	0.090	1.295	1.171	0.904	90.390
	50	0.148	0.136	0.082	0.071	1.457	0.108	1.335	1.156	0.866	86.561
40	10	0.052	0.045	0.015	0.011	0.608	0.019	1.220	1.189	0.975	97.511
	15	0.070	0.061	0.025	0.019	0.893	0.041	1.257	1.197	0.952	95.227
	20	0.086	0.077	0.034	0.026	0.946	0.046	1.260	1.188	0.943	94.336
	30	0.111	0.100	0.057	0.043	1.388	0.098	1.298	1.156	0.891	89.093
	40	0.134	0.123	0.045	0.035	1.658	0.140	1.295	1.121	0.865	86.498
	50	0.148	0.136	0.077	0.059	1.928	0.190	1.335	1.087	0.814	81.408
50	10	0.052	0.046	0.030	0.019	1.677	0.143	1.220	1.057	0.867	86.655
	15	0.069	0.061	0.040	0.026	1.759	0.158	1.256	1.073	0.854	85.406
	20	0.082	0.074	0.041	0.027	1.712	0.149	1.258	1.082	0.860	86.006
	30	0.108	0.098	0.055	0.035	1.665	0.141	1.295	1.119	0.864	86.381
	40	0.127	0.118	0.063	0.040	1.811	0.167	1.314	1.106	0.842	84.186
	50	0.145	0.134	0.069	0.045	1.958	0.195	1.332	1.092	0.820	81.981

Tablo 25 5 Tip eşikli basamaklı dolusavak için yapılan sayısal analizler sonucu elde edilen karakteristik özellikler (Z=1)

Açı	Debi (L/s)	d_c	d_c/Z	d	$d \cdot \cos \alpha$	V	$V^2/2g$	H_0	ΔH	$\Delta H/H_0$	$\Delta H/H_0$ (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	
30	10	0.052	0.243	0.048	0.042	1.740	0.154	0.311	0.115	0.370	36.976
	15	0.069	0.322	0.055	0.047	1.918	0.188	0.346	0.111	0.321	32.129
	20	0.083	0.388	0.055	0.047	1.917	0.187	0.345	0.111	0.321	32.078
	30	0.107	0.500	0.055	0.047	2.113	0.228	0.384	0.109	0.284	28.407
	40	0.123	0.631	0.063	0.054	2.115	0.228	0.385	0.102	0.266	26.606
	50	0.151	0.774	0.071	0.061	2.332	0.277	0.428	0.089	0.208	20.847
40	10	0.052	0.211	0.013	0.010	2.009	0.206	0.316	0.100	0.318	31.752
	15	0.071	0.287	0.023	0.018	2.161	0.238	0.348	0.092	0.265	26.535
	20	0.086	0.393	0.026	0.020	2.171	0.240	0.351	0.091	0.259	25.942
	30	0.109	0.498	0.044	0.034	2.335	0.278	0.386	0.074	0.192	19.189
	40	0.134	0.717	0.057	0.043	2.325	0.275	0.383	0.064	0.167	16.684
	50	0.144	0.770	0.069	0.053	2.501	0.319	0.421	0.049	0.117	11.730
50	10	0.052	0.216	0.013	0.009	2.080	0.221	0.315	0.086	0.272	27.180
	15	0.070	0.290	0.023	0.015	2.213	0.250	0.347	0.083	0.238	23.777
	20	0.082	0.387	0.032	0.021	2.207	0.248	0.351	0.082	0.233	23.318
	30	0.110	0.519	0.042	0.027	2.348	0.281	0.387	0.079	0.205	20.459
	40	0.127	0.751	0.056	0.036	2.426	0.300	0.405	0.069	0.170	16.988
	50	0.145	0.858	0.069	0.045	2.505	0.320	0.422	0.058	0.137	13.656

Tablo 26 5 Tip eşikli basamaklı dolusavak için yapılan sayısal analizler sonucu elde edilen karakteristik özellikler (Z=2)

Açı	Debi (L/s)	d_c	d_c/Z	d	$d \cdot \cos \alpha$	V	$V^2/2g$	H_0	ΔH	$\Delta H/H_0$	$\Delta H/H_0$ (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	
30	10	0.052	0.099	0.038	0.033	1.494	0.114	0.609	0.462	0.759	75.860
	15	0.069	0.131	0.045	0.039	1.837	0.172	0.646	0.435	0.674	67.351
	20	0.083	0.158	0.038	0.033	2.079	0.220	0.644	0.391	0.606	60.641
	30	0.107	0.204	0.045	0.039	2.557	0.333	0.684	0.312	0.456	45.579
	40	0.123	0.245	0.055	0.047	2.686	0.368	0.686	0.271	0.395	39.484
	50	0.151	0.300	0.064	0.056	2.815	0.404	0.728	0.269	0.369	36.886
40	10	0.052	0.095	0.015	0.012	2.050	0.214	0.614	0.389	0.632	63.248
	15	0.071	0.130	0.023	0.018	2.352	0.282	0.648	0.348	0.538	53.767
	20	0.086	0.163	0.026	0.020	2.412	0.297	0.650	0.334	0.514	51.394
	30	0.109	0.207	0.039	0.030	2.767	0.390	0.686	0.266	0.387	38.747
	40	0.134	0.265	0.047	0.036	2.932	0.438	0.684	0.210	0.307	30.651
	50	0.144	0.285	0.054	0.042	3.097	0.489	0.721	0.190	0.264	26.404
50	10	0.052	0.094	0.009	0.006	2.146	0.235	0.612	0.372	0.607	60.699
	15	0.070	0.127	0.017	0.011	2.437	0.303	0.647	0.333	0.515	51.538
	20	0.082	0.157	0.020	0.013	2.508	0.321	0.650	0.317	0.488	48.771
	30	0.110	0.211	0.035	0.023	2.848	0.413	0.687	0.251	0.365	36.506
	40	0.127	0.259	0.045	0.029	2.997	0.458	0.705	0.217	0.309	30.862
	50	0.145	0.295	0.055	0.036	3.147	0.505	0.722	0.182	0.252	25.178

Tablo 27 5 Tip eşikli basamaklı dolusavak için yapılan sayısal analizler sonucu elde edilen karakteristik özellikler (Z=3)

Açı	Debi (L/s)	d _c	d _c /Z	d	d.cosα	V	V ² /2g	H ₀	ΔH	ΔH/H ₀	ΔH/H ₀ (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	
30	10	0.052	0.063	0.035	0.030	1.556	0.123	0.907	0.754	0.831	83.083
	15	0.069	0.083	0.040	0.035	1.927	0.189	0.946	0.722	0.763	76.345
	20	0.083	0.100	0.035	0.030	2.071	0.219	0.944	0.695	0.737	73.669
	30	0.107	0.129	0.040	0.035	2.564	0.335	0.984	0.615	0.625	62.455
	40	0.123	0.151	0.047	0.041	2.766	0.390	0.986	0.556	0.564	56.355
	50	0.151	0.185	0.054	0.047	2.968	0.449	1.028	0.532	0.518	51.795
40	10	0.052	0.061	0.012	0.010	2.058	0.216	0.913	0.688	0.753	75.315
	15	0.071	0.083	0.020	0.015	2.452	0.306	0.948	0.626	0.661	66.068
	20	0.086	0.103	0.021	0.016	2.569	0.336	0.950	0.598	0.629	62.903
	30	0.109	0.131	0.034	0.026	3.060	0.477	0.986	0.483	0.490	48.983
	40	0.134	0.165	0.032	0.025	3.273	0.546	0.984	0.413	0.420	42.013
	50	0.144	0.178	0.051	0.039	3.486	0.619	1.021	0.362	0.355	35.488
50	10	0.052	0.061	0.011	0.007	2.042	0.212	0.912	0.692	0.759	75.910
	15	0.070	0.082	0.018	0.012	2.425	0.300	0.947	0.636	0.671	67.140
	20	0.082	0.099	0.018	0.012	2.576	0.338	0.950	0.600	0.632	63.167
	30	0.110	0.132	0.030	0.019	3.059	0.477	0.987	0.491	0.498	49.751
	40	0.127	0.158	0.039	0.025	3.245	0.537	1.005	0.443	0.441	44.108
	50	0.145	0.181	0.048	0.031	3.431	0.600	1.022	0.392	0.383	38.315

Tablo 28 5 Tip eşikli basamaklı dolusavak için yapılan sayısal analizler sonucu elde edilen karakteristik özellikler (Z=4)

Açı	Debi (L/s)	d _c	d _c /Z	d	d.cosα	V	V ² /2g	H ₀	ΔH	ΔH/H ₀	ΔH/H ₀ (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	
30	10	0.052	0.046	0.042	0.037	1.285	0.084	1.217	1.096	0.901	90.074
	15	0.069	0.061	0.050	0.044	1.438	0.105	1.256	1.107	0.881	88.150
	20	0.083	0.074	0.042	0.037	1.437	0.105	1.254	1.112	0.887	88.687
	30	0.107	0.095	0.050	0.044	1.436	0.105	1.294	1.145	0.885	88.512
	40	0.123	0.112	0.062	0.054	1.631	0.136	1.296	1.107	0.854	85.402
	50	0.151	0.137	0.074	0.064	1.824	0.170	1.338	1.105	0.826	82.556
40	10	0.052	0.045	0.019	0.014	0.854	0.037	1.223	1.172	0.958	95.796
	15	0.071	0.062	0.028	0.022	1.158	0.068	1.258	1.168	0.928	92.837
	20	0.086	0.077	0.034	0.026	1.164	0.069	1.260	1.165	0.924	92.449
	30	0.109	0.097	0.052	0.040	1.578	0.127	1.296	1.129	0.871	87.129
	40	0.134	0.122	0.045	0.034	1.571	0.126	1.294	1.134	0.876	87.642
	50	0.144	0.131	0.068	0.052	2.130	0.231	1.331	1.048	0.787	78.709
50	10	0.052	0.046	0.025	0.016	1.141	0.066	1.221	1.138	0.932	93.231
	15	0.070	0.062	0.035	0.022	1.369	0.095	1.257	1.139	0.906	90.628
	20	0.082	0.074	0.036	0.023	1.443	0.106	1.260	1.131	0.897	89.737
	30	0.110	0.099	0.049	0.032	1.517	0.117	1.297	1.148	0.885	88.498
	40	0.127	0.117	0.058	0.037	1.749	0.156	1.315	1.122	0.853	85.320
	50	0.145	0.134	0.066	0.042	1.981	0.200	1.332	1.090	0.818	81.813

Tablo 29 6 Tip eşikli basamaklı dolusavak için yapılan sayısal analizler sonucu elde edilen karakteristik özellikler (Z=1)

Açı	Debi (L/s)	d _c	d _c /Z	d	d.cosα	V	V ² /2g	H ₀	ΔH	ΔH/H ₀	ΔH/H ₀ (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	
30	10	0.052	0.211	0.020	0.017	1.785	0.162	0.318	0.138	0.435	43.535
	15	0.070	0.283	0.030	0.026	1.947	0.193	0.352	0.133	0.377	37.672
	20	0.083	0.374	0.034	0.029	1.945	0.193	0.352	0.129	0.368	36.803
	30	0.107	0.482	0.052	0.045	2.120	0.229	0.389	0.115	0.295	29.522
	40	0.123	0.618	0.047	0.041	2.217	0.251	0.390	0.098	0.252	25.231
	50	0.149	0.749	0.072	0.062	2.314	0.273	0.431	0.096	0.222	22.231
40	10	0.052	0.210	0.016	0.012	1.686	0.145	0.318	0.161	0.506	50.629
	15	0.069	0.278	0.026	0.020	1.887	0.181	0.351	0.150	0.426	42.630
	20	0.086	0.391	0.029	0.022	1.935	0.191	0.353	0.140	0.398	39.756
	30	0.108	0.491	0.047	0.036	2.165	0.239	0.390	0.115	0.294	29.401
	40	0.134	0.717	0.044	0.033	2.264	0.261	0.388	0.093	0.240	23.962
	50	0.146	0.781	0.073	0.056	2.363	0.285	0.428	0.088	0.205	20.496
50	10	0.052	0.219	0.018	0.012	1.665	0.141	0.318	0.165	0.519	51.885
	15	0.069	0.291	0.029	0.019	1.880	0.180	0.351	0.152	0.434	43.354
	20	0.082	0.392	0.029	0.019	1.991	0.202	0.354	0.133	0.376	37.615
	30	0.109	0.522	0.047	0.030	2.248	0.258	0.391	0.103	0.264	26.386
	40	0.127	0.756	0.063	0.040	2.328	0.276	0.410	0.093	0.227	22.683
	50	0.146	0.869	0.073	0.047	2.407	0.295	0.428	0.086	0.200	20.020

Tablo 30 6 Tip eşikli basamaklı dolusavak için yapılan sayısal analizler sonucu elde edilen karakteristik özellikler (Z=2)

Açı	Debi (L/s)	d _c	d _c /Z	d	d.cosα	V	V ² /2g	H ₀	ΔH	ΔH/H ₀	ΔH/H ₀ (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	
30	10	0.052	0.094	0.013	0.011	1.882	0.180	0.616	0.424	0.688	68.822
	15	0.070	0.126	0.023	0.020	2.105	0.226	0.652	0.407	0.624	62.361
	20	0.083	0.164	0.023	0.020	2.201	0.247	0.651	0.384	0.590	59.001
	30	0.107	0.211	0.039	0.034	2.297	0.269	0.689	0.386	0.561	56.082
	40	0.123	0.243	0.038	0.033	2.357	0.283	0.690	0.374	0.542	54.194
	50	0.149	0.294	0.065	0.056	2.637	0.354	0.731	0.320	0.438	43.833
40	10	0.052	0.093	0.011	0.008	1.676	0.143	0.616	0.464	0.754	75.405
	15	0.069	0.124	0.019	0.015	2.000	0.204	0.651	0.432	0.664	66.418
	20	0.086	0.162	0.022	0.017	2.147	0.235	0.652	0.401	0.614	61.446
	30	0.108	0.203	0.038	0.029	2.563	0.335	0.690	0.326	0.472	47.219
	40	0.134	0.266	0.034	0.026	2.714	0.375	0.688	0.287	0.417	41.662
	50	0.146	0.290	0.061	0.046	2.864	0.418	0.728	0.263	0.362	36.191
50	10	0.052	0.097	0.021	0.013	1.590	0.129	0.616	0.474	0.769	76.921
	15	0.069	0.128	0.029	0.019	1.919	0.188	0.651	0.445	0.683	68.316
	20	0.082	0.157	0.027	0.017	2.221	0.251	0.653	0.385	0.589	58.883
	30	0.109	0.208	0.038	0.024	2.680	0.366	0.691	0.301	0.435	43.501
	40	0.127	0.258	0.063	0.040	2.763	0.389	0.710	0.280	0.394	39.443
	50	0.146	0.297	0.058	0.037	2.847	0.413	0.728	0.278	0.382	38.161

Tablo 31 6 Tip eşikli basamaklı dolusavak için yapılan sayısal analizler sonucu elde edilen karakteristik özellikler (Z=3)

Açı	Debi (L/s)	d_c	d_c/Z	d	$d \cdot \cos \alpha$	V	$V^2/2g$	H_0	ΔH	$\Delta H/H_0$	$\Delta H/H_0$ (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	
30	10	0.052	0.061	0.015	0.013	1.619	0.134	0.915	0.768	0.840	83.987
	15	0.070	0.082	0.023	0.020	1.977	0.199	0.952	0.732	0.769	76.937
	20	0.083	0.099	0.025	0.021	2.022	0.208	0.950	0.721	0.758	75.823
	30	0.107	0.128	0.039	0.034	2.469	0.311	0.989	0.645	0.652	65.169
	40	0.123	0.151	0.037	0.032	2.710	0.374	0.991	0.584	0.590	58.988
	50	0.149	0.183	0.058	0.050	2.951	0.444	1.031	0.537	0.521	52.070
40	10	0.052	0.061	0.018	0.014	1.470	0.110	0.915	0.791	0.865	86.477
	15	0.069	0.081	0.026	0.020	1.882	0.181	0.951	0.751	0.789	78.919
	20	0.086	0.103	0.026	0.020	2.103	0.225	0.952	0.707	0.742	74.223
	30	0.108	0.130	0.038	0.029	2.693	0.370	0.990	0.591	0.597	59.693
	40	0.134	0.166	0.038	0.029	2.907	0.431	0.989	0.529	0.535	53.477
	50	0.146	0.180	0.056	0.043	3.121	0.496	1.028	0.489	0.475	47.537
50	10	0.052	0.061	0.013	0.008	1.409	0.101	0.915	0.805	0.880	88.036
	15	0.069	0.081	0.021	0.013	1.858	0.176	0.951	0.762	0.801	80.112
	20	0.082	0.099	0.022	0.014	1.993	0.202	0.953	0.737	0.773	77.279
	30	0.109	0.132	0.035	0.023	2.627	0.352	0.991	0.616	0.622	62.200
	40	0.127	0.159	0.063	0.040	2.936	0.439	1.010	0.530	0.525	52.472
	50	0.146	0.183	0.053	0.034	3.244	0.536	1.028	0.457	0.445	44.481

Tablo 32 6 Tip eşikli basamaklı dolusavak için yapılan sayısal analizler sonucu elde edilen karakteristik özellikler (Z=4)

Açı	Debi (L/s)	d_c	d_c/Z	d	$d \cdot \cos \alpha$	V	$V^2/2g$	H_0	ΔH	$\Delta H/H_0$	$\Delta H/H_0$ (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	
30	10	0.052	0.045	0.015	0.013	1.360	0.094	1.219	1.112	0.912	91.211
	15	0.070	0.060	0.025	0.022	1.467	0.110	1.257	1.126	0.895	89.541
	20	0.083	0.074	0.031	0.027	1.442	0.106	1.255	1.122	0.894	89.393
	30	0.107	0.095	0.053	0.046	1.417	0.102	1.294	1.146	0.886	88.550
	40	0.123	0.112	0.044	0.038	1.605	0.131	1.296	1.126	0.869	86.925
	50	0.149	0.135	0.074	0.065	1.731	0.153	1.336	1.119	0.837	83.741
40	10	0.052	0.045	0.022	0.017	0.837	0.036	1.219	1.167	0.957	95.686
	15	0.069	0.060	0.032	0.025	1.087	0.060	1.256	1.171	0.932	93.240
	20	0.086	0.077	0.038	0.029	1.167	0.069	1.257	1.158	0.921	92.149
	30	0.108	0.097	0.056	0.043	1.515	0.117	1.295	1.135	0.877	87.657
	40	0.134	0.122	0.048	0.037	1.679	0.144	1.294	1.113	0.860	86.042
	50	0.146	0.133	0.070	0.054	1.843	0.173	1.333	1.106	0.830	82.970
50	10	0.052	0.046	0.019	0.013	0.844	0.036	1.219	1.170	0.960	95.993
	15	0.069	0.060	0.030	0.019	1.070	0.058	1.256	1.179	0.938	93.841
	20	0.082	0.074	0.034	0.022	1.225	0.076	1.258	1.160	0.922	92.192
	30	0.109	0.098	0.051	0.033	1.552	0.123	1.296	1.140	0.880	87.975
	40	0.127	0.118	0.063	0.040	1.649	0.139	1.315	1.135	0.864	86.377
	50	0.146	0.135	0.069	0.045	1.746	0.155	1.333	1.133	0.850	85.000