



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**GEOMETRİK PARAMETRELERİN PİYANO
TUŞU SAVAKLARIN DEŞARJ KAPASİTESİ
ÜZERİNE ETKİSİNİN SAYISAL VE
DENEYSEL ANALİZİ**

Burak ÇEŞMECİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

EKİM-2022
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Burak ÇEŞMECİ tarafından hazırlanan “Geometrik Parametrelerin Piyano Tuşu Savakların Deşarj Kapasitesi Üzerine Etkisinin Sayısal ve Deneysel Analizi” adlı tez çalışması 04/10/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Şerife Yurdagül KUMCU

.....

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Ali İhsan MARTI

.....

Üye

Doç. Dr. Alpaslan YARAR

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Burak ÇEŞMECİ

Tarih: 04.10.2022

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GEOMETRİK PARAMETRELERİN PİYANO TUŞU SAVAKLARIN DEŞARJ KAPASİTESİ ÜZERİNE ETKİSİNİN SAYISAL VE DENEYSEL ANALİZİ

Burak ÇEŞMECİ

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ali İhsan MARTİ

2022, 103 Sayfa

**Jüri
Dr. Öğr. Üyesi Ali İhsan MARTİ
Doç. Dr. Şerife Yurdağül KUMCU
Doç. Dr. Alpaslan YARAR**

Dolusavaklar su yapıları içerisinde önemli bir yer tutan, taşkın durumlarında önemli fonksiyonları olan hidrolik yapılardır. Yapılan çalışmalar incelendiğinde açık kanallar üzerine yerleştirilen klasik (keskin kenarlı, geniş başlıklı) ve labirent savaklar ile ilgili bir çok çalışma bulunmaktadır. Literatürde yeni ve güncel bir savak tipi olarak yer alan Piyano Tuşu Savaklar (PKW) bu tez kapsamında çalışılmıştır. Piyano tuşu savaklar labirent tipi savakların geliştirilmiş ve değiştirilmiş versiyonudur. Bu çalışmada literatürde yer alan D tipi PKW için farklı geometrik parametrelerin değiştirilmesi iledeşarj verimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bunun için savak yüksekliği (P), Savak genişliği (L), Giriş/Çıkış tuş genişliği (W_i/W_o), Giriş/Çıkış tuş eğimleri (S_i/S_o) parametreleri üzerinde bir dizi nümerik analizler hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımı olan ANSYS-Fluent programında çalışılmıştır. Tez kapsamında $P=150$ ve 200 mm, $P_K=W_i/W_o=1.00, 1.25, 1.50$ ve $L= 200, 300,400$ mm boyutları kullanılarak savak yüksekliği, savak genişliği ve tuş genişliklerinin değişimlerinin farklı PKW modelleri arasında ve aynı savak yüksekliklerine sahip keskin kenarlı savaklar arasında karşılaştırma yapılmıştır. Analizler sonucunda akışlara ait su yüzü profilleri Akışkan Hacimleri Yöntemi (VOF) kullanılarak okunmuştur. Yapılan çalışmalar sonucunda en verimli savak modelinin ise Model 12'ye ait olduğu ve klasik (keskin kenarlı) savaklara göre de daha verimli olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: ANSYS-Fluent, HAD, Piyano Tuşu Savak, PKW, Savak Hidroliği.

ABSTRACT

MS THESIS

THE NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE EFFECT OF THE GEOMETRIC PARAMETERS ON THE DISCHARGE CAPACITY OF THE PIANO KEY WEIRS

Burak ÇEŞMECİ

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Civil Engineering**

Advisor: Assist. Prof. Dr. Ali İhsan MARTİ

2022, 103 Pages

Jury

**Assist Prof. Dr. Ali İhsan MARTİ
Assoc. Prof. Dr. Şerife Yurdagül KUMCU
Assoc. Prof. Dr. Alpaslan YARAR**

Spillways are hydraulic structures that have an important place in water structures and have important functions in flood situations. When the studies are examined, there are many studies on classical (with sharp edges, wide head) and labyrinth weirs placed on open channels. Piano Key Weirs (PKW), which is a new and current type of weir in the literature, has been studied within the scope of this thesis. Piano key weirs are the improved and modified version of labyrinth type weirs. In this study, the effect of changing different geometric parameters on the discharge efficiency for D type PKW in the literature was investigated. For this, ANSYS-Fluent worked with the program that, a computational fluid dynamics (HAD) software, performs a series of numerical analyses on weir height (P), weir width (L), Entry/Exit key width (W_i/W_o), Entry/Exit key slopes (S_i/S_o) parameters. In the scope of the thesis, using the values of $P=150$ and 200 mm, $P_K=W_i/W_o=1.00, 1.25, 1.50$, and $L= 200, 300, 400$ mm dimensions, the comparisons were made between the variations in weir height, channel width and key widths of different PKW models and between the sharp-edged weirs having same weir height. As a result of the analyses, the water surface profiles of the streams were read using the Fluid Volumes Method (VOF), and it was found that the most efficient sluice model belongs to Model 12.

Keywords: ANSYS-Fluent, CFD, Piano Key Weir, PKW, Weir Hydraulic.

ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca göstermiş olduğu sabır ve özveri ile hiçbir zaman desteğini esirgemeyen, çalışmalarım boyunca bana yol gösteren, başta değerli danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ali İhsan MARTİ hocama teşekkürü bir borç bilirim.

ANSYS-Fluent programı başta olmak üzere tüm çalışmalarım boyunca bilgi ve birikimleri ile bana yardımcı olan Arş. Gör. Dr. Ali YILDIZ hocama ve yüksek lisans eğitimim boyunca değerli zamanını ayırarak sorularıma hoşgörüsüyle yanıt veren ve yol gösteren Doç. Dr. Meral BÜYÜKYILDIZ hocam başta olmak üzere Konya Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Hidrolik Anabilim Dalı'nda görev yapan tüm değerli hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca beni destekleyen, yardım eden başta Arş. Gör. Elif Nur ŞAKALAK olmak üzere yanımda bulunan arkadaşlarıma ve hayatım boyunca her zaman yanımda olan, almış olduğum tüm kararlarda maddi-manevi beni destekleyen, bana olan güvenlerini hep hissettiren sevgili aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Burak ÇEŞMECİ
KONYA-2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	xii
ÇİZELGELER LİSTESİ	xvii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	6
3.1. Savak Hidroliği	6
3.1.1. Keskin kenarlı savaklar	7
3.1.2. Geniş başlıklı savaklar	8
3.1.3. Ogee tipi savaklar	10
3.1.4. Labirent tipi savaklar	11
3.1.5. Piyano tuşu tipi savaklar	13
3.1.5.1. Piyano tuşu savaklarda kullanılan parametreler.....	13
3.1.5.2. Piyano tuşu savak tipleri	21
3.1.5.3. Deşarj kapasitesini etkileyen geometrik parametreler	23
3.1.5.4. Piyano tuşu savak hidroliği	24
3.2. Deneysel Çalışma	30
3.2.1. Deney düzeneği.....	31
3.3. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği	49
3.3.1. Geometrik modelin oluşturulması	51
3.3.2. Hesap ağlarının (meshlerin) oluşturulması	52
3.3.3. Sınır şartlarının tanımlanması	54
3.3.3.1. Akışkan hacmi (VOF) yöntemi.....	54
3.1.3.2. Türbülans modeli	55
3.4. Fluent Programında Modelin Tanımlanması ve Analizi.....	56
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	65
4.1. Deneysel Modellerin Sonuçları	79
4.1.1. $P_K=1.00$ için savak yükü - debi karşılaştırması	67
4.1.2. $P_K=1.25$ için savak yükü - debi karşılaştırması	67
4.1.3. $P_K=1.50$ için savak yükü - debi karşılaştırması	68
4.1.4. Tip 1 savak modellerinde savak yükü - debi karşılaştırması	69
4.1.5. Tip 2 savak modellerinde savak yükü - debi karşılaştırması	70

4.1.6. Tip 3 savak modellerinde savak yükü - debi karşılaştırması	70
4.1.7. Tip 4 savak modellerinde savak yükü - debi karşılaştırması	71
4.1.8. Sayısal model sonuçlarının kıyaslanması	72
4.2. Deneysel Modellerin Debi Katsayısı (C_d) – Boyutsuz Savak Yükü (H/P)	
Sonuçları	72
4.2.1. $P_K=1.00$ debi katsayısı – boyutsuz savak yükü karşılaştırması	73
4.2.2. $P_K=1.25$ debi katsayısı – boyutsuz savak yükü karşılaştırması	73
4.2.3. $P_K=1.50$ debi katsayısı – boyutsuz savak yükü karşılaştırması	74
4.2.4. Tip 1 için debi katsayısı – boyutsuz savak yükü karşılaştırması	75
4.2.5. Tip 2 için debi katsayısı – boyutsuz savak yükü karşılaştırması	76
4.2.6. Tip 3 için debi katsayısı – boyutsuz savak yükü karşılaştırması	77
4.2.7. Tip 4 için debi katsayısı – boyutsuz savak yükü karşılaştırması	78
4.3. Sayısal Modellerin Sonuçları.....	79
4.4. Deneysel ve Sayısal Modellerin Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	84
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	89
5.1. Sonuçlar	89
5.2. Öneriler	91
KAYNAKLAR	92
EKLER	96

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

a_1, b_1, c_1, d_1	: Ampirik katsayılar
α	: Yan duvar açısı
μ	: Dinamik viskozite
ε	: Türbülans kinetik enerjisi kayıp oranı
ω	: Spesifik dağılıma oranı
B	: PKW'nin membadan mansaba toplam uzunluğu
B_b	: Oturum alanı genişliği
B_h	: Yan duvarların boyu
B_i	: Giriş tuşu (<i>inlet</i>) rampasının konsol boyu
B_o	: Çıkış tuşu (<i>outlet</i>) rampasının konsol boyu
B_u	: PKW'lerde burun uzunluğu
C_d	: Debi katsayısı
C_{dw}	: Deşarj katsayısı
C_{PW}	: Pişano tuşu savak debi katsayısı
F	: Akışkan hacmi fonksiyonu
g	: Yerçekimi ivmesi (m/s^2)
h	: Nap yükü (m)
H	: Savak membasındaki akım yüksekliği
H_1	: Membadaki toplam enerji yüksekliği
k	: Türbülans kinetik enerjisi
L	: Savak boyu
l_c	: Labirent savaklarda duvar uzunluğu
L_{ef}	: Efektif savak boyu
L_u	: Birim PKW efektif savak boyu
n	: PKW'nin gelişmiş uzunluk oranı
n_u	: Birim PKW efektif savak boyunun savak açıklığına oranı
N_u	: PKW birim sayısı
P	: Savak kret yüksekliği (m)
P_b	: PKW tabanından giriş ve çıkış tuşu rampaları kesişim noktasına mesafe
P_i	: Memba (<i>inlet</i>) tarafındaki savak yüksekliği
P_K	: PKW'de giriş tuşunun çıkış tuşuna oranı
P_m	: Giriş ve çıkış tuşlarının kesişim merkezi ile kret arasındaki mesafe
P_o	: Mansap (<i>outlet</i>) tarafındaki savak yüksekliği
R	: Parapet duvar yüksekliği
Q	: Debi
q_t	: Birim debi
r	: Deşarj oranı düzeltme faktörü
Re	: Reynolds Sayısı
S_i	: Giriş tuşu eğimi
S_o	: Çıkış tuşu eğimi
T_i	: Giriş tuşunun kret kalınlığı
T_o	: Çıkış tuşunun kret kalınlığı
T_s	: Yan duvar kalınlığı
t_w	: Labirent savaklarda duvar kalınlığı
V_1	: Membadaki ortalama akım hızı (m/s)

V_c	: Kritik hız
W	: Savaşın toplam genişliği
W_i	: Giriş tuşu genişliği
W_o	: Çıkış tuşu genişliği
W_u	: Birim PKW genişliği
y_1	: Membadaki su derinliği
y_c	: Kritik derinlik



Kısaltmalar

CFD	: Computational Fluid Dynamics
DNS	: Direkt Nümerik Benzetim
EDF	: Electricité de France
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
ICOLD	: Uluslararası Büyük Barajlar Komisyonu
LNH	: Ulusal Hidrolik Laboratuvarı
PKW	: Piyano Tuşu Savak
PKSW	: Piyano Tuşu Yan Savak
RNG	: Renormalization Group
RPKW	: Dikdörtgensel Piyano Tuşu Savaklar
TPKW	: Trapez Piyano Tuşu Savak
VOF	: Akışkan Hacmi Yöntemi



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1 Geometrik yapılarına göre savakların sınıflandırılması (a) Keskin kenarlı savak, (b) Geniş başlıklı savak, (c) Ogee savak	6
Şekil 3.2 Keskin kenarlı savak kesiti ve üzerinden geçen akım	7
Şekil 3.3 Keskin kenarlı savaklarda plaka tipleri (a) dikdörtgen, (b) üçgen, (c) trapez ...	8
Şekil 3.4 Geniş başlıklı savak kesiti ve üzerinden geçen akım	9
Şekil 3.5 Ogee tipi savak kesiti ve üzerinden geçen akım.....	11
Şekil 3.6 Labirent tipi savak	11
Şekil 3.7 Labient tipi savakların parametreleri.....	13
Şekil 3.8 Lemperiere ve Ouamane tarafından tasarlanan ilk PKW modelinin plan ve kesiti.....	14
Şekil 3.9 Piyano tuşu savak boy kesiti	16
Şekil 3.10 İnşaat halinde bir PKW dolusavak örneği (Gloriettes Barajı-Fransa).....	16
Şekil 3.11 Goulours ve Saint-Marc Barajı (Fransa)	17
Şekil 3.12 Malarce Barajı (Fransa) ve Black Esk Barajı (Birleşik Krallık)	17
Şekil 3.13 Charmines Barajı (Fransa) ve Von Phong Barajı (Vietnam)	17
Şekil 3.14 PKW en kesiti, birim PKW ve kullanılan parametreler	20
Şekil 3.15 3D PKW görüntüsü ve kullanılan yaygın parametreler	20
Şekil 3.16 Mevcut PKW'lerin harita üzerinde gösterimi	20
Şekil 3.17 Piyano tuşu savak tiplerine ait literatürde yer alan en kesit ve görünüşler ...	22
Şekil 3.18 PKW'lerde farklı debi kapasitesi formüllerinin karşılaştırılması.....	29
Şekil 3.19 PKW üzerinde yapılan sayısal ve deneysel çalışma sonuçlarının karşılaştırılması	30
Şekil 3.20 Deneysel çalışmalarda kullanılan açık kanalın genel görüntüsü.....	31
Şekil 3.21 Kumanda frekans panosu	32
Şekil 3.22 Ultrasonik debimetre	32
Şekil 3.23 Su yüksekliğinin ölçülmesi ve kullanılan limnometre	33
Şekil 3.24 MDF'den imal edilmiş pkw modelleri	34
Şekil 3.25 Çalışmada kullanılan D tipi PKW örneği.....	35
Şekil 3.26 Model 1'in 3D modeli ve kanala yerleştirilmesi	36
Şekil 3.27 Model 2'nin 3D modeli ve kanala yerleştirilmesi	36
Şekil 3.28 Model 3'ün 3D modeli ve kanala yerleştirilmesi	36
Şekil 3.29 Model 4'ün 3D modeli ve kanala yerleştirilmesi	37

Şekil 3.30 Model 5'in 3D modeli ve kanala yerleştirilmesi	37
Şekil 3.31 Model 6'nın 3D modeli ve kanala yerleştirilmesi	37
Şekil 3.32 Model 7'nin 3D modeli ve kanala yerleştirilmesi	38
Şekil 3.33 Model 8'in 3D modeli ve kanala yerleştirilmesi	38
Şekil 3.34 Model 9'un 3D modeli ve kanala yerleştirilmesi	38
Şekil 3.35 Model 10'un 3D modeli ve kanala yerleştirilmesi	39
Şekil 3.36 Model 11'in 3D modeli ve kanala yerleştirilmesi	39
Şekil 3.37 Model 12'nin 3D modeli ve kanala yerleştirilmesi	39
Şekil 3.38 P=15 cm keskin kenarlı savak 3D modeli ve açık kanala yerleştirilmesi	40
Şekil 3.39 P=20 cm keskin kenarlı savak 3D modeli ve açık kanala yerleştirilmesi	40
Şekil 3.40 Model 1'de Q=25.45 l/s debide oluşan akım	41
Şekil 3.41 Model 2'de Q=5.53 l/s debide oluşan akım	41
Şekil 3.42 Model 3'te Q=10.98 l/s debide oluşan akım	42
Şekil 3.43 Model 4'te Q=31.11 l/s debide oluşan akım	42
Şekil 3.44 Model 5'te Q=6.52 l/s debide oluşan akım	43
Şekil 3.45 Model 6'da Q=25.82 l/s debide oluşan akım	43
Şekil 3.46 Model 7'de Q=45.62 l/s debide oluşan akım	44
Şekil 3.47 Model 8'de Q=30.03 l/s debide oluşan akım	44
Şekil 3.48 Model 9'da Q=11.22 l/s debide oluşan akım	45
Şekil 3.49 Model 10'da Q=24.72 l/s debide oluşan akım	45
Şekil 3.50 Model 11'de Q=20.39 l/s debide oluşan akım	46
Şekil 3.51 Model 12'de Q=24.76 l/s debide oluşan akım	46
Şekil 3.52 P=15 cm'lik savakta (a) Q=5.04 l/s, (b) Q=14.36 l/s, (c) Q=20.07 l/s, (d) Q=40.22 l/s debilerde oluşan akımlar	47
Şekil 3.53 P=20 cm'lik savakta (a) Q=2.23 l/s, (b) Q=10.12 l/s, (c) Q=24.98 l/s, (d) Q=40.97 l/s debilerde oluşan akımlar	48
Şekil 3.54 ANSYS-Fluent programı arayüzü	51
Şekil 3.55 AutoCAD programında 3D modellerin oluşturulması	51
Şekil 3.56 Kanal geometrisinin mesh'lere ayrılmış hali.....	52
Şekil 3.57 Kanalin giriş kısmı (inlet) ve çıkış kısmı (outlet).....	53
Şekil 3.58 Kanalda duvar (wall) olarak tanımlanan yüzeyler ve kanalın iç kesiti	53
Şekil 3.59 Akışkan hacminin ağ üzerinde dağılımı	54
Şekil 3.60 Fluent'te 3D model, inlet (mavi), outlet (kırmızı) gösterimi	56
Şekil 3.61 Akış analizinde veri değerlerinin giriş penceresi	57

Şekil 3.62 Türbülans modelinin seçilmesi.....	58
Şekil 3.63 Run Calculation değerlerinin gösterilmesi	59
Şekil 3.64 Model 1'in analiz sonucu ($Q = 5$ l/s).....	60
Şekil 3.65 Model 2'nin analiz sonucu ($Q = 10$ l/s).....	60
Şekil 3.66 Model 3'ün analiz sonucu ($Q = 15$ l/s).....	61
Şekil 3.67 Model 4'ün analiz sonucu ($Q = 20$ l/s).....	61
Şekil 3.68 Model 5'in analiz sonucu ($Q = 25$ l/s).....	62
Şekil 3.69 Model 6'nın analiz sonucu ($Q = 30$ l/s).....	62
Şekil 3.70 Model 7'nin analiz sonucu ($Q = 35$ l/s).....	63
Şekil 3.71 Model 8'in analiz sonucu ($Q = 40$ l/s).....	63
Şekil 3.72 $P=15$ cm keskin kenarlı savak analiz sonucu ($Q = 30$ l/s)	64
Şekil 3.73 $P=20$ cm keskin kenarlı savak analiz sonucu ($Q = 30$ l/s)	64
Şekil 4.1 Deneysel çalışmalarda ölçülen Q-H değerleri.....	66
Şekil 4.2 $P_K=1.00$ savaklarda ölçülen Q-H değerleri	67
Şekil 4.3 $P_K=1.25$ savaklarda ölçülen Q-H değerleri	68
Şekil 4.4 $P_K=1.50$ savaklarda ölçülen Q-H değerleri	69
Şekil 4.5 Tip 1 savak modellerinde ölçülen Q-H değerleri	69
Şekil 4.6 Tip 2 savak modellerinde ölçülen Q-H değerleri	70
Şekil 4.7 Tip 3 savak modellerinde ölçülen Q-H değerleri	71
Şekil 4.8 Tip 4 savak modellerinde ölçülen Q-H değerleri	71
Şekil 4.9 Keskin kenarlı savak modellerinde ölçülen Q-H değerleri	72
Şekil 4.10 $P_K=1.00$ savaklarda C_d-H/P karşılaştırması.....	73
Şekil 4.11 $P_K=1.25$ savaklarda C_d-H/P karşılaştırması.....	74
Şekil 4.12 $P_K=1.50$ savaklarda C_d-H/P karşılaştırması.....	75
Şekil 4.13 Tip 1 savak modellerinde C_d-H/P karşılaştırması	76
Şekil 4.14 Tip 2 savak modellerinde C_d-H/P karşılaştırması	77
Şekil 4.15 Tip 3 savak modellerinde C_d-H/P karşılaştırması	78
Şekil 4.16 Tip 4 savak modellerinde C_d-H/P karşılaştırması	79
Şekil 4.17 ANSYS-Fluent'te Ölçülen Q-H değerleri	80
Şekil 4.18 Savak yükü okunacak noktanın belirlenmesi	81
Şekil 4.19 30 l/s debi için Model 1'deki su yükseklikleri	81
Şekil 4.20 30 l/s debi için Model 2'deki su yükseklikleri	82
Şekil 4.21 30 l/s debi için Model 3'teki su yükseklikleri	82
Şekil 4.22 30 l/s debi için Model 4'teki su yükseklikleri	83

Şekil 4.23 30 l/s debi için P=15cm keskin kenarlı savak su yükseklikleri.....	83
Şekil 4.24 30 l/s debi için P=20cm keskin kenarlı savak su yükseklikleri.....	84
Şekil 4.25 Model 1’de deneysel ve nümerik model karşılaştırması (Q=10 l/s)	85
Şekil 4.26 Model 4’te akımın üstten görünümü (deneysel çalışma) (a) Q=11.03 l/s, (b) Q=20.51 l/s, (c) Q=31.11 l/s, (d) Q=45.11 l/s debilerde oluşan akımlar .	85
Şekil 4.27 Model 4’te üstten akımın görünümü (Fluent analizi) (a) Q=10 l/s, (b) Q=20 l/s, (c) Q=30 l/s, (d) Q=45 l/s debilerde oluşan akımlar	86
Şekil 4.28 P=20 cm keskin kenarlı savakta deneysel ve nümerik model karşılaştırması (Q=5 l/s).....	86
Şekil 4.29 Tip 1’e ait deneysel ve sayısal çalışmalarda ölçülen Q-H değerlerinin karşılaştırılması.....	87
Şekil 4.30 Keskin kenarlı savaklarda deneysel ve sayısal çalışmalarda ölçülen Q-H değerlerinin karşılaştırılması.....	88
Şekil 4.31 En verimli (Model 12) ile en az verimli (Model 3) savakta ölçülen Q-H değerlerinin karşılaştırılması.....	88

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 3.1 PKW’lerde kullanılan parametreler ve açıklamaları	19
Çizelge 3.2 Mevcut barajlarda kullanılan parametreler.....	21
Çizelge 3.3 Literatürde yer alan çalışmalarda kullanılan parametreler	23
Çizelge 3.4 Çalışmada kullanılan geometrik parametre bilgileri	35



1. GİRİŞ

Savaklar, açık kanallarda, akarsularda veya barajlarda suyun akışına dik olarak yerleştirilerek debinin ölçülmesi, suyun mansaba iletilmesi, su derinliğinin düzenlenmesi taşkın durumunda (nehirlerden veya barajlardan) fazla suyu tahliye etmek gibi farklı amaçlar doğrultusunda tasarlanarak geliştirilen önemli hidrolik yapılardır.

Günümüze kadar yapılmış olan çalışmaları incelediğimizde barajlarda meydana gelen hasarların (yaklaşık 1/3'ünün) dolu savakların kapasitesindeki yetersizlikten kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Mevcut su yapıları projelerine baktığımızda olası maksimum taşkın debisinin bazı durumlarda yetersiz geldiğini ve artırılması gerektiği sonucuna ulaşılmaktadır. Barajlardaki var olan dolu savaklar bu debiyi karşılayabilecek durumda değilse taşkın depolama kapasitesinin arttırılması için çözüm aranmalıdır. ABD'de yapılan çalışmalarda ileri hidrolojik metotlar kullanılarak barajlarda böylesi taşkın tehlikesinin olup olmadığı incelenmektedir (İspir, 2018).

1900'lü yılların başından itibaren su kaynakları ve su yapıları üzerinde ciddi çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Bu doğrultuda günümüze kadar en başta barajlar ve açık kanallar olmak üzere diğer tüm hidrolik yapılarda birçok gelişme kaydedilmiş ve halen de çalışmalara büyük hızla devam edilmektedir. Ancak son yıllarda insanların doğrudan ya da dolaylı bir şekilde sebep olduğu küresel ısınma, çevre kirliliği gibi çeşitli olumsuzluklardan dolayı gözlenen iklim değişiklikleri ve buna bağlı olarak yağış rejimindeki düzensizlikler her geçen gün artmaktadır. İklim değişikliğinin etkisiyle, yağış miktarlarında bir trend yakalanamamakta ve bu düzensiz yağışlardaki artışların gerçekleşmesiyle sular kontrol altına alınamamaktadır ve su yapılarında çeşitli riskler ortaya çıkmaktadır. Hidrolik yapılarındaki bu risklere uygun çözüm yöntemleri geliştirilemeyince de başta insanlar olmak üzere tüm canlılar ve yapılar su taşkınları gibi felaketlerle karşı karşıya kalmaktadır.

Yapılan çalışmalar ve ilerleyen teknoloji sayesinde su yapılarında, deşarj kapasitesinin savağın etkili kret boyu ile orantılı olduğu bilinmektedir. Deşarj kapasitesinin artırılması için yeni çözüm önerileri geliştirilmektedir. Savaklardaki bu etkili kret boyunu artırmak için uzun süredir doğrusal savaklar yerine labirent savaklar kullanılmaktadır. Labirent savaklara benzer olarak tasarlanan piyano tuşu savaklar (PKW) ise güncel çalışmaların başında gelmektedir. Günümüzde araştırmacıların dikkatini çekmekte, konu güncelliğini sürdürmekte ve konuyla ilgili özgün çalışmalar, araştırmalar da yapılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, dikdörtgen kesitli doğrusal kanalda, farklı akım koşulları altında deneysel ve sayısal olarak PKW analizleri yapılarak literatüre katkı sağlanması amaçlanmıştır. Hidrolik performanslarını incelemek amacı ile literatürde yer alan dikdörtgen D tipi modelin farklı geometrik koşullar altında bir dizi ve sayısal analizler yapılarak akım özelliklerinin deşarj kapasitesi üzerindeki etkisi incelenecektir. Çalışmanın sayısal modellemesinde, açık kanal hidroliği problemlerinin çözümünde başarılı sonuçlar veren ANSYS-Fluent programı kullanılacaktır. Yapılması planlanan tüm bu çalışmaların sonucunda konuyla ilgili sınırlı sayıda olan literatüre katkı sağlanması, konuyla ilgili daha sonraki çalışmalara ışık tutarak bu alandaki eksikliklerin giderilmesine destek olması beklenmektedir.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Lemperiere ve Ouamane (2006), $h/p < 0.6$ sınır şartında kret boyunun (L) savak genişliğine (W) oranını ifade eden “birim genişlik uzunluk oranı” ($n=L/W$) değerinin artması ile düşük nap yükünde deşarj veriminin de arttığını belirtmişlerdir. Daha sonraki çalışmalarında Lemperiere (2009), n değerinin, $4 < n < 7$ değer aralığında olması gerektiğini ve en uygun n değerinin $n=5$ olduğunu belirtmiştir. Ouamane (2011), piyano tuşu savaklarda L/W değerinin artması ile deşarj veriminin de sürekli arttığını bildirmiştir.

Hien ve ark. (2006), farklı L/W oranlarına sahip modeller üzerine yaptıkları araştırmalarda ($n = 4, 5$ ve 7) küçük nap yüküne sahip çalışmalarda $n=7$ olan modellerin daha verimli olduğunu ifade etmişlerdir. Deşarj verimine ek, maliyet ve üretim kolaylığı açısından ise $n=5-6$ arasında olan modellerin daha avantajlı olduğunu söylemişlerdir.

Lemperiere ve Oumane (2006), giriş tuşu genişliğinin çıkış tuşu genişliğine oranı $P_K (W_i/W_o)$ üzerinde çalışmalar yapmışlar. $P_K = 0.67, 1.0, 1.5$ olan ince duvarlı piyano tuşu savak geometrilerini test etmişlerdir. Bu çalışmalar sonucunda artan W_i/W_o oranı ile deşarj verimliliğinin arttığını bildirmişlerdir.

Lemperiese (2009) tarafından yapılan çalışmalarda optimum P_K değerinin 1.25 olduğu ifade edilmiştir ve uygulamalardaki ilk PKW örnekleri olan Goulours Barajında P_K değeri 1.43 ve Saint-Marc Barajında ise 1.41’dir.

Pralong ve ark. (2011), giriş ve çıkış tuşlarının genişlikleri üzerinde çalışmalar yürütmüşlerdir. Yapılan çalışmalarda değişen nap yükü altında W_i/W_o oranının değiştiği ve optimum P_K değerinin sürekli 1’in üzerinde olduğunu gözlemlemişlerdir. Aynı zamanda bu çalışmaları bilgisayar ortamında Flow-3D programını kullanarak da teyit etmişlerdir.

Anderson ve Tullis (2011), farklı nap yükleri altında yaptıkları çalışmalarda optimum P_K değerin $1.25 \leq W_i / W_o \leq 1.5$ sınır aralığında elde etmişlerdir. 2013 yılında yaptıkları bir başka çalışmada ise $0.67 \leq W_i/W_o \leq 1.5$ aralığında W_i / W_o oranının artması ile deşarj kapasitesinin de arttığını söylemişlerdir.

Blancher ve ark. (2011), piyano tuşu savak ile labirent savağı karşılaştırmışlardır. Yaptıkları çalışmalar sonucunda piyano tuşu savaklarda deşarj verimliliğin %20’ye kadar ulaşabileceği sonucuna varmışlardır. Ayrıca labirent savaklara kıyasla inşaat maliyetinde tasarruf sağlandığını da bildirmişlerdir.

Nayan Sharma (2012), deneysel olarak yaptığı çalışmada piyano tuşu savaklardan elde edilen deşarjları klasik savaklardan elde edilen deşarjlar ile karşılaştırmıştır. Klasik

bir savak üzerinden deşarj kapasitesi dikkate alındığında, piyano tuş savağın klasik veya ogee tipi diğer savaklara göre daha avantajlı olduğu belirtilmiştir.

Paxson ve ark. (2012) açık kanallarda ve baraj rehabilitasyonlarında, piyano tuşu savaklar, labirent savaklar ve klasik dolu savakların yapısal ve hidrolik davranışları ile maliyetleri hakkında avantaj ve dezavantajlarını incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada piyano tuşu savakların da labirent savaklar gibi deşarj verimini artırmak için inşa edildiğini ifade etmişlerdir. Piyano tuşu savakların sahip oldukları konsol ayaklar sayesinde küçük oturma alanına sahip olduklarını ve sınırlı alanlarda avantaj sağladığını ve piyano tuşu savakların benzer yük boşaltma özelliklerine sahip labirent savaklara göre beton hacmi olarak %40 daha az olabileceğini belirtmişlerdir.

Karaeren (2014), barajlarda dolusavak kapasitelerini artırmak için kullanılan birkaç yöntemi ele almıştır. Bu kapsamda labirent ve piyano tuşu savakların tasarım metotları incelenmiş ve mevcut durumdaki 5 farklı baraj için uyarlanmıştır. Klasik savaklara göre etkili kret uzunluğunun önemli derecede arttığını ve buna bağlı olarak da dolu savak kapasitesinin arttığını ifade etmiştir.

M. Shaheer ve Talib Mansoor (2015), tarafından yapılan çalışmada piyano tuşu savakların performansı ile normal keskin kenarlı savakların performansını karşılaştırmayı amaçlamıştır. Piyano tuşu savaklar ve keskin kenarlı savak için deneysel çalışmadan elde edilen deşarj verileri regresyon analizi kullanılarak karşılaştırılmış, piyano tuşu savakların normal bir savağa göre daha iyi performans gösterdiği bulunmuştur.

Khassaf ve Al-Baghdadi (2015), yaptıkları bir dizi çalışmada planda dikdörtgen olmayan piyano tuşu savaklarını deneysel olarak incelemişlerdir. Yapılan çalışmalar sonucunda yan duvar açısının bir dereceye kadar arttırılmasının deşarj katsayısını arttırdığını bildirmişlerdir.

Mehboudi ve ark. (2017), farklı akış koşulları altında trapez piyano tuşu savak (TPKW) modelleri üzerinden akış rejimlerini incelemişlerdir. Labirent savaklar ve dikdörtgen piyano tuşu savaklar (RPKW) ile ilgili önceki çalışmalara benzer şekilde, TPKW üzerindeki akış rejimleri üç farklı kategoride (nap, geçiş, bastırılmış) incelemişlerdir. Yapılan çalışmalar sonucunda TPKW'lerde, tutunma, sıçrama ve yaylanma akışı, dikdörtgen şekle kıyasla daha yüksek H/P değerlerinde meydana gelmiştir. Bu savaklar üzerindeki akış davranışının genel olarak benzer olduğu ve farklı plan formlarına bağlı olarak küçük farklılıklar olduğunu gözlemlemişlerdir.

Safarzadeh ve Noroozi (2017), planda yamuk (trapez) bir piyano tuşu savak ile bir dikdörtgen piyano tuşu savak ile karşılaştırması yaparak, aynı büyütme oranına (L/W

≈ 5) sahip trapez piyano tuşu savakların dikdörtgen olanlara göre yaklaşık %20 daha verimli olabileceğini belirtmişlerdir

Ademoğlu (2019), piyano tuşu savaklardaki mevcut verilerin yetersiz olmasından dolayı akış davranışları daha iyi tayin edebilmek ve hidrolik davranışları daha iyi çözümleyebilmek adına genel tasarım yöntemi oluşturmayı amaçlamıştır. Bu doğrultuda Flow-3D programı kullanılarak önceki çalışmalarda bulunan ve deşarj kapasitesine etki eden boyutsuz temel parametrelerini (L_u/W_u , P/W_u , W_i/W_o) araştırmak için 29 model üzerinde çalışmalar yapılmıştır.

Yousef Sangsefidi ve ark. (2021), dolusavak sistemlerinin deşarj kapasitesini geliştirmek için etkili bir çözüm olarak piyano tuşu savaklara odaklanmışlardır. Giriş ve çıkış tuşlarındaki akış davranışını, farklı plan şekillerine (dikdörtgen, yamuk ve üçgen) sahip PKW'lerin deşarj kapasitesini analiz etmek için deneysel olarak incelemişlerdir. Yapılan çalışmalar sonucunda savak uzunluğunun ve giriş tuşunun savak genişliğine oranlarının artırılması ile çıkış tuşunda akış havalandırma rejimlerinin daha yüksek memba suyu oranlarına eriştiğini göstermişlerdir.

Deepak Singh ve Munendra Kumar (2021), yaptıkları çalışmada, şekli, geometrisi, yapısal bütünlüğü ve deşarj kapasitesini karşılaştırarak dolusavak deşarj kapasitesini artırmak ve baraj riskini azaltmak için piyano tuşu savakların kullanımını incelemişlerdir. Ayrıca, havalandırma, yaklaşım akışı etkisi, tortu taşınması, rezervuarın temizlenmesi, enerji kaybı ve savak ekonomisi gibi diğer temel tasarım konuları arasında incelemeler yapmışlardır.

Kılıç (2020), farklı kret yükseklikleri (0.12, 0.16, 0.20) ve savak açıklıklarında (0.25, 0.5, 0.75) piyano tuşu yan savaklar (PKSW) üzerinde çalışmalarda bulunmuştur. Bir dizi deneysel ve Flow-3D programını kullanarak da nümerik analizler yapmıştır. Piyano tuşu yan savakların hidrolik karakteristiklerini detaylı olarak incelemiştir. Çalışma kapsamında A, B, C ve D tipi dikdörtgen PKSW ve C tipi trapez piyano tuşu yan savaklar için deşarj verimliliği incelenmiş, C tipi trapez modelin daha verimli olduğunu bildirmiştir.

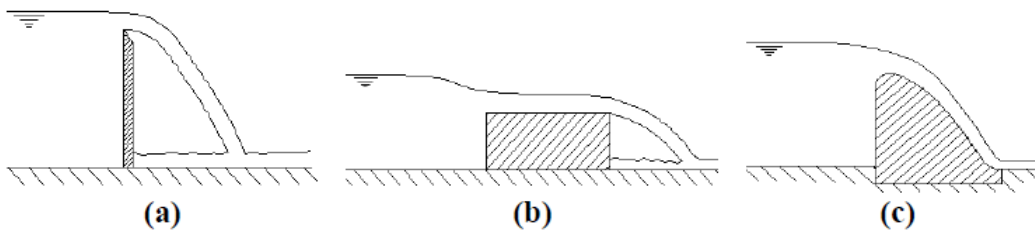
3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde piyano tuşu savaklar (PKW) hakkında yapılan teorik çalışmalara yer verilmiştir. İlk olarak savaklar ve çeşitleri hakkında daha sonra ise PKW'ler, geometrik tipleri ve deşarj etki eden parametreler hakkında ikinci olarak da deneysel çalışmalar hakkında bilgiler verilmiştir. Son olarak Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ve bu çalışmanın nümerik modellemesinde kullanılan ANSYS-Fluent paket programı ile ilgili analiz aşamaları ele alınmıştır.

3.1. Savak Hidroliği

Savaklar, yüzyıllardır hidrolik mühendisleri tarafından akış ölçümü, enerji dağıtımı, akış yönlendirme, akış derinliğinin düzenlenmesi, taşkın geçişi ve diğer araçlar için kullanılan en eski ve en basit hidrolik yapılar arasındadır. Birçok farklı savak türünün tanımı çok basit ve benzer olmasına rağmen, her birinin uygulama ve hidrolik davranışı oldukça farklıdır (Borghei ve ark. 1999). Savaklar aynı zamanda akarsularda su seviyesini düzenlemek, akımı kontrol etmek; barajlarda olası taşkın sularını güvenli şekilde tahliye etmek amacıyla kanal en kesitine dik olarak inşa edilen önemli su yapılarındandır.

Savaklar geometrik yapılarına göre farklı isimlendirilir ve farklı özelliklere sahiptirler (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Geometrik yapılarına göre savakların sınıflandırılması (a) keskin kenarlı savak, (b) geniş başlıklı savak, (c) ogee tipi savak (Bal, 2011)

Savaklar, keskin kenarlı savaklar ve geniş başlıklı savaklar olmak üzere iki grupta sınıflandırılır. Ayrıca bu sınıflandırmalara ek olarak da ogee, labirent ve piyano tuşu tipi savaklar da yer almaktadır. Genellikle savak tanımları ve geometrik şekilleri birbirlerine benzese de hidrolik davranış olarak birbirlerinden farklıdırlar. Bu bölümde savak çeşitleri hakkında bilgiler verilecektir.

Yanal yüzeylerde daralma olmayan savaklar için genellikle Denklem (3.1) kullanılmaktadır (Henderson, 1966).

$$Q = C_d \frac{2}{3} H^{3/2} \sqrt{2g} W \quad (3.1)$$

bu eşitlikte Q debiyi (m^3/s), C_d debi katsayısını, H kret üzerindeki toplam yükü (m), g yer çekim ivmesini (m/s^2) ve W ise kret uzunluğunu (m) ifade etmektedir. Denklem (3.1)'deki toplam yük, (3.2) eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$H = h + \frac{V_1^2}{2g} \quad (3.2)$$

burada h nap yükünü (m) ve V_1 ise membada ortalama akım hızını (m/s) ifade eder. Debi katsayısı için ise yanal daralma olmayan savaklarda $H/P < 5$ için Rehbock (1929), Denklem (3.3)'ü önermiştir.

$$C_d = 0.611 + 0.08 \frac{H}{P} \quad (3.3)$$

3.1.2. Geniş başlıklı savaklar

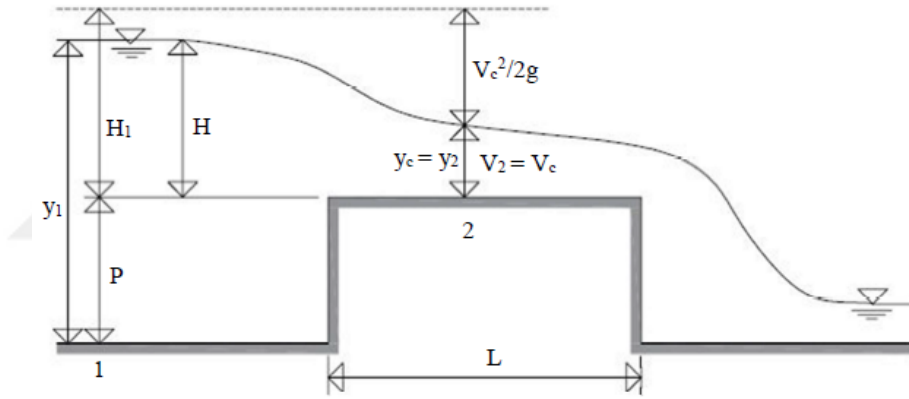
Akış yönünde sonlu kret genişliğine sahip savaklara geniş başlıklı savaklar denir. Pratikte çok çeşitli boyuna ve enine kret şekilleri kullanıldığı için savakların davranışlarını genellemek pratik olarak zordur (Subramanya 2009). Geniş başlıklı savakların savak geometrisine bağlı olarak üçgen, dikdörtgen ve trapez savaklar şeklinde farklı tipleri vardır. Literatürde farklı tipleri bulunsa da hidrolik analiz bakımından genellikle dikdörtgen tipi üzerinden hesaplamalar yapılmaktadır.

Geniş başlıklı savakları, yatay bir tepe uzunluğuna sahip yapılar teşkil etmektedir. Burada savak üzerinde oluşan basınçların hidrostatik basınç olduğu kabul edilir. İdeal bir tasarım açısından, savak yüksekliği ve genişliği için $0.08 \leq H_1/L \leq 0.5$ aralığında olması istenir. Eğer H_1/L oranı 0.08'den küçük ise savak yüzeyinde oluşan enerji kayıpları ihmal

edilemez; eğer H_1/L oranı 0.50'den büyük ise savak üzerinde hidrostatik basınç dağılımı oluşmaz (French 1986).

Geniş başlıklı savaklar, akarsu veya açık kanallarda akış kontrolü ve debi ölçülmesi gibi hidrolik analizlerde kullanılan en yaygın su yapılarından biridir. Bu tip savaklarda en iyi verimin alınabilmesi için belirli kriterleri göz önüne alarak tasarlanmaları ve inşa edilmeleri önemlidir. Açık kanalda, akım en kesitini tamamen kapatacak şekilde konumlandırılan savak yapıları üzerinden geçecek akım için yeterli yükseklik mevcut ise burada oluşan akış, “kritik akış” olarak adlandırılmaktadır (Çengel ve Cimbala, 2015).

Şekil 3.4'te 1 ve 2 noktaları arasında enerji kaybının olmadığını kabul edersek L genişliğinde verilen savak üzerindeki akış derinliği, kritik akışı temsil etmektedir; şeklin genelinde de geniş başlıklı savak üzerindeki akım modeli gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Geniş başlıklı savak kesiti ve üzerinden geçen akım (Ghaznawi, 2019)

Burada, H membada savak üzerindeki su yüksekliği, H_1 membada oluşan toplam enerji yüksekliği, y_1 membada su derinliği, y_c kritik derinlik, V_c kritik hız ve P savak yüksekliğidir.

Şekil 3.4'te gösterilen geniş başlıklı savaklar üzerinde meydana gelen kritik akım (V_c) ile kanalda düzgün seviyede bir su yüzeyi oluşmakta ve böylece kanallarda debi kontrolü yapılabilmektedir.

Geniş başlıklı savaklarda, membadaki toplam enerji (3.4), kritik hız (3.5) ve kritik derinlik (3.6) aşağıdaki eşitlikler ile hesaplanır.

$$H_1 = y_c + \frac{V_c^2}{2g} = \frac{3}{2}y_c \quad (3.4)$$

$$V_c = \sqrt{gy_c} \quad (3.5)$$

$$y_c = \frac{2}{3}H_1 \quad (3.6)$$

ideal birim debi (3.7) eşitliği ile hesaplanır.

$$q_t = V_c y_c = \frac{2}{3} \sqrt{\left(\frac{2}{3}g\right)H_1^3} = 1.705H_1^{3/2} \quad (3.7)$$

enerji kayıpları ve ikinci noktanın derinliği, kritik derinliğe eşit olmadığı için birim debi (q_t), debi katsayısı (C_d) ile çarpılır.

$$q = q_t C_d \quad (3.8)$$

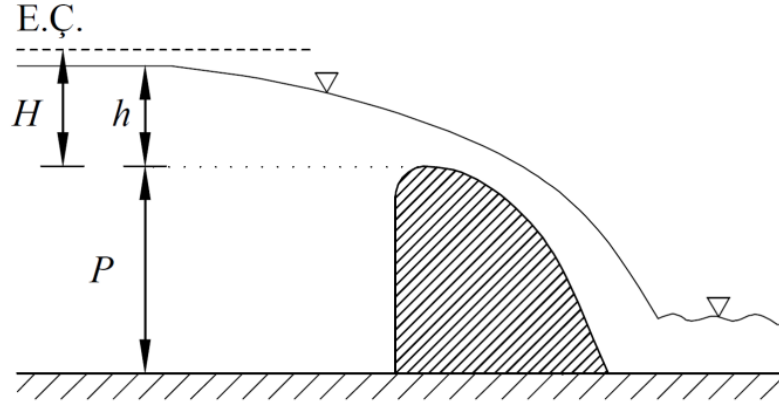
$$Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2gb} H^{3/2} \quad (3.9)$$

(3.8) ve (3.9) bağıntılarında kullanılan debi katsayısı (C_d) geniş başlıklı savaklarda (3.10) eşitliği ile hesaplanır.

$$C_d = \frac{Q}{\frac{2}{3} \sqrt{2gb} H^{3/2}} \quad (3.10)$$

3.1.3. Ogee tipi savaklar

Ogee tipi dolusavaklar, hidrolik yapılar arasında kullanılan bir başka dolusavak türüdür. Bu tip savaklarda yüksek güvenlik faktörü, savağın işlevsel uygunluğu, sel suyu kontrol kapasitesi gibi faktörler diğer türdeki savaklara kıyasla tercih edilmesinin başında yer almaktadır. Ayrıca ogee tipi dolusavaklar tasarlanırken keskin bir yüzeyden akan suyun aldığı şekle göre taban yapısına şekil verilir. Bu sebeple ogee tipi savaklarda maksimum verimlik elde edilebilmektedir. Şekil 3.5'te gösterildiği gibi ogee tipi savaklar, tepe noktasının mansap kısmına doğru olmak üzere eğrisel bir profilden oluşmaktadır (Kocaer, 2019).



Şekil 3.5. Ogee tipi savak kesiti ve üzerinden geçen akım (Kılıç, 2020)

3.1.4. Labirent tipi savaklar

Savakların kret uzunluklarını arttırmak, dolu savaklarda deşarj kapasitelerini artırmak için kullanılan etkili yöntemlerden biridir. Labirent ismi savakların mevcut geometrisinden gelmektedir ve bu dolusavaklar, üçgen veya trapez şeklindeki lineer savakların bir düzlem boyunca kırıklı (zikzak) ve birbirine eklenmiş biçimde oluşan formudur (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 Labirent tipi savak (Brazos Gölü, Texas)

Labirent tipi savaklar, belirli bir dolusavak genişliğinde doğrusal dolusavaklara göre planda çok daha uzun bir savak uzunluğu sağlayan dolusavak tipidir. Toplam kret uzunlukları genellikle standart dolu savağın savak uzunluğunun üç - beş katıdır. Deşarj

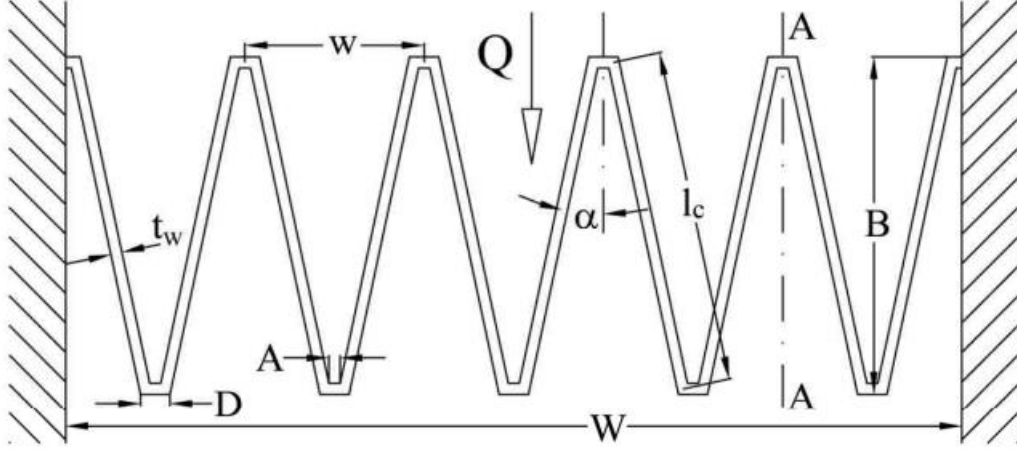
kapasitesi ise doğrusal veya standart dolu savağın deşarj kapasitesinin yaklaşık iki katı olmaktadır (Tullis ve ark., 1995).

Kret uzunluğunda sağlanan bu artış, labirent dolusavakların deşarj edilen debiyi arttırmasını ya da sabit bir debinin daha düşük su yüksekliklerinden geçirilmesini sağlar ve rezervuar su seviyesini düşürür. Bu savaklar özellikle topoğrafyanın dolusavak genişliğini sınırlandırdığı alanlar için avantajlıdır. Bunun yanı sıra kolay inşaatı ve geleneksel savaklara göre daha güvenilir olması labirent dolusavakların tercih edilme sebebidir (İspir, 2018).

Labirent savak lineer ve standart ogee kretine sahip savaklar ile karşılaştırıldığında, labirent savağın önemli avantajları olduğu görülmektedir. Labirent savağın toplam uzunluğu savak genişliğinin üç ile beş katı kadar artırılabilir. Deşarj kapasitesi nap yüküne göre değişmekte ve küçük nap yükünde daha verimli olmaktadır. Konuyla ilgili yapılan çalışmalarda da belirtildiği üzere labirent savağın debi katsayısı aynı genişlikte dikdörtgen bir savağın debi katsayısından 1.5–4.5 kat daha fazladır. Konuyla ilgili diğer bir önemli çalışmada, labirent savaklardan taşkın debisinin oluşturacağı rezervuar su seviyesi için memba hacminin sınırlı olduğu veya topoğrafyanın dolusavak genişliğini sınırlandırdığı zamanlarda yararlanmanın oldukça avantajlı olduğu belirtilmiştir (Emiroğlu ve ark. 2010).

Labirent savak üzerinden savaklanan akım dört ana şekilde oluşmakta olup bunlar; tam havalanmış, kısmi havalanmış, geçiş akım ve batık akım şeklindedir (Yıldız ve Üzücek, 1993).

Labirent dolusavak tasarımında birçok parametre etkilidir ve bu parametreleri optimize etmek zordur. Şekil 3.7’de bir labirent tipi savağın plan görünüşü verilmektedir.



Şekil 3.7. Labirent tipi savakların parametreleri (Crookston, 2010)

Burada W kanal genişliği, w labirent genişliği, B labirent savak uzunluğu, α labirent açısı, t_w duvar kalınlığı ve l_c savak duvar uzunluğunu ifade etmektedir.

Labirent savakların projelendirilmesi için lineer bir savağın temel eşitliği kullanılabilmektedir (3.11);

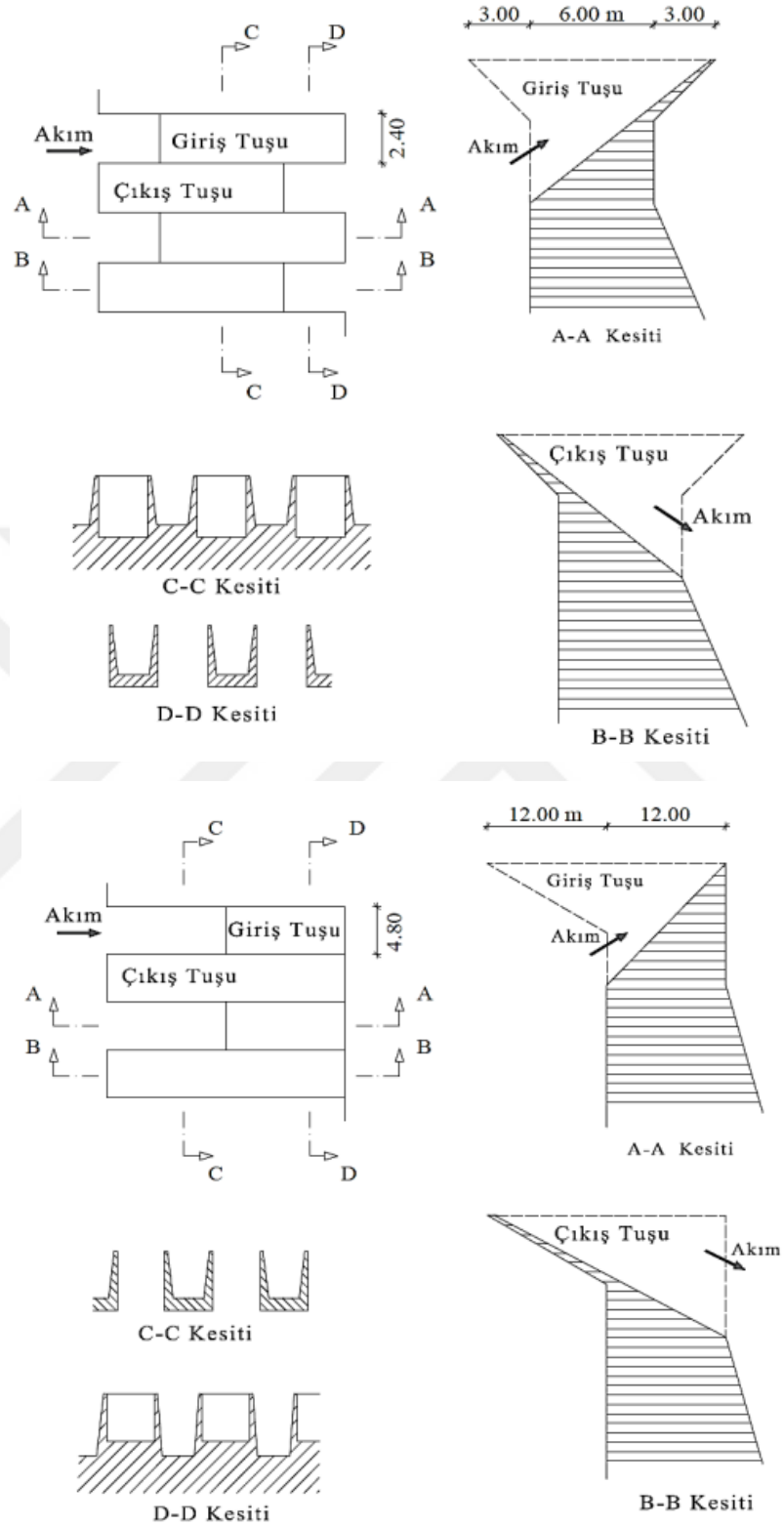
$$Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} L_{ef} H^{2/3} \quad (3.11)$$

Burada L_{ef} savağın etkili uzunluğunu ve H ise kret üzerindeki nap yükünü ifade etmektedir.

3.1.5. Piyano tuşu tipi savaklar

Piyano tuşu savaklar (PKW), ilk çalışmaları 2003 yılında Lempérière ve Ouamane tarafından tasvir edilen, ilk örnekleri dikdörtgen şeklinde planda gösterilen ve geleneksel labirent savak geometrisinin geliştirilmiş bir tasarımıdır (Şekil 3.8). İlk geliştiriciler, tasarımda kolayca inşa edilebilecek, yapısal olarak ekonomik ve daha küçük bir ayak izine sahip yeni bir labirent savak türü üretmeyi amaçladılar (Lempérière ve Ouamane, 2003).

Piyano tuşu savağı, geleneksel labirent savaklara alternatif olarak geliştirilmiştir. Piyano tuşu savak şeklinin plan görünüşü dikdörtgendir. Labirent savak tepe noktası dikey olmasına rağmen, piyano tuşu savağının tepe noktası dikey değil eğimlidir. Bu özelliğinden dolayı “Piyano Tuşu Savaklar” olarak adlandırılmışlardır (Karaeren, 2014).



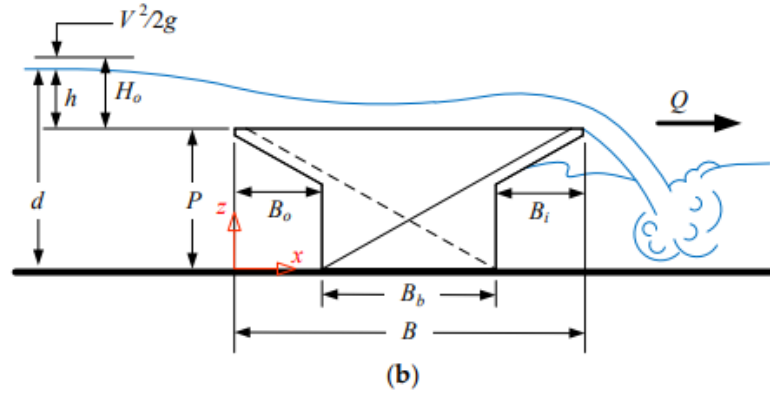
Şekil 3.8 Lemperiere ve Ouamane (2003) tarafından tasarlanan ilk PKW modelinin plan ve kesiti

1997 yılında Pierre Londe (ICOLD Onursal Başkanı) ve Francois Lemperiere tarafından Fransa’da kurulan HydroCoop, özellikle taşkın kontrolü, dolusavaklar ve çökeltme konularına odaklanarak, bünyesinde yer alan uzman mühendisler ile baraj mühendisliğinde gelişmekte olan ülkelere yardım ve uluslararası teknik iş birliğini teşvik etmek için kurulmuş, kâr amacı gütmeyen bir sivil toplum kuruluşudur.

HydroCoop öncülüğünde, beş yıl süren 50’den fazla hidrolik test yapılmıştır. Bu çalışmalarda, savağı mevcut ya da yeni inşa edilmekte olan ağırlık baraj üzerine yerleştirebilmek, birim debinin $100 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ’yi geçmesini sağlamak ve “creager” savağın dört katı kapasite elde etmek gibi kolay ve her ülkenin yerel kaynakları ile inşa edilmesine olanak sağlayacak hedefler belirlenmiştir. İlk model testleri, 1999 yılında Fransa’da, Ulusal Hidrolik Laboratuvarında (Laboratoire National d’Hydraulique Electricite France, LNH), Roorke Üniversitesi (Hindistan) ve 2002 yılında Cezayir’de Biskra Üniversitesinde yapılmış, bu testler sonucunda PKW’nin mevcut geometrisini oluşturacak şekiller belirlenmiştir (Kılıç, 2020).

PKW’lerin mevcut labirent savaklardan farklı ve avantajlı birkaç yönü bulunmaktadır. Bunlar, piyano tuşu savakların memba ve/veya mansapta konsollarının bulunması ve bu durumun labirent savakların aksine PKW yapıların daha küçük ayak izine yol açan çıkıntılara sahip olmasından yararlanılmasıdır (Schleiss, 2011). PKW’lerin yapısında mevcut olan rampalar (giriş/çıkış tuşları) sayesinde düşey duvar yüksekliğini azaltıldığından, donatı ihtiyacı ile yapının maliyeti azalmaktadır. Bu küçük ayak izleri sayesinde mevcut dar ve sınırlı alanlara sahip durumlarda büyük deşarj kapasitesi isteyen hidrolik problemlerde çözüm avantajı sunulmaktadır. Yapılan çalışmalarda piyano tuşu savağın, labirent savağa kıyasla daha verimli olduğu (Anderson ve Tullis, 2011), verim artışının da %20’ye kadar çıktığı görülmüştür (Blancher ve ark. 2011). PKW’lerin uygulanması, düz lineer dolusavaklara kıyasla deşarj kapasitesini üç kata kadar artması, mevcut ve yeni ağırlık barajlarında inşaat kapasitesi, ekonomik verimlilik, daha az bakım maliyeti, basit yapı ve inşaat kolaylığı gibi çeşitli avantajlar sunar (Lempérière ve Ouamane, 2006).

Şekil 3.9’da piyano tuşu savaklara ait bir boy kesit ve Şekil 3.10’da ise örnek bir PKW dolu savağı gösterilmektedir.



Şekil 3.9 Piyano tuşu savak boy kesiti (Sangsefidi ve ark., 2021)

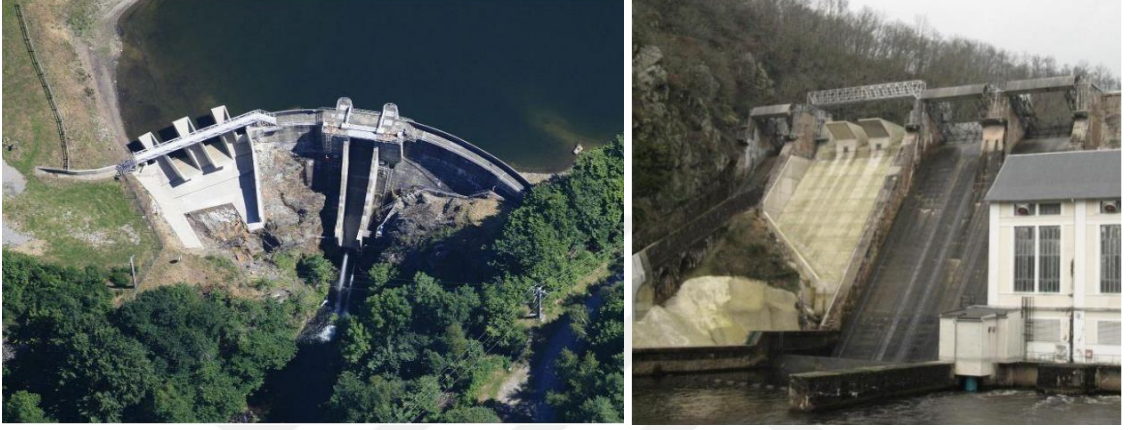


Şekil 3.10 İnşaat halinde bir PKW dolu savak örneği (Gloriettes Barajı-Fransa)

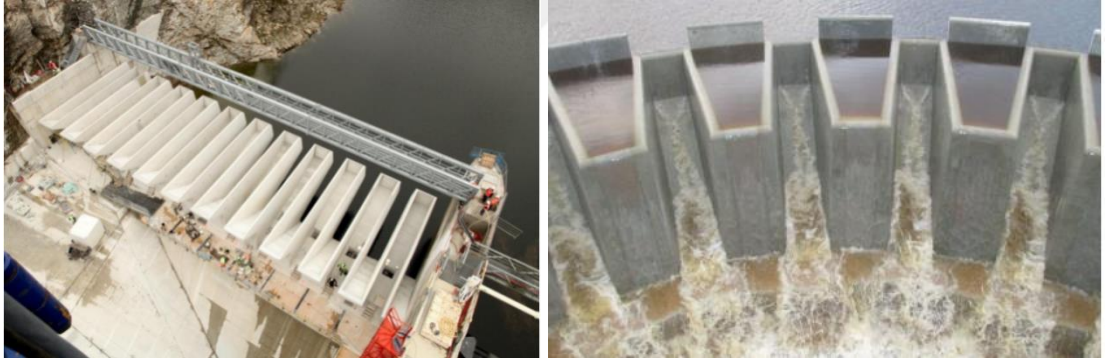
HydroCoop her şeyden önce, tüm dünyadaki geliştirme projeleri için verimli ve inşa edilmesi kolay bir savak şekli arayan piyano anahtar setini tasarladı. Prekast elemanların kullanımı ve tek bir parametreye dayalı bir tasarım için büyük ve spesifik bir deşarj kapasitesine izin veren bir şekil aradı. Bu hedefe nihayet ulaşıldı ve geliştirildi. İlk PKW, 2006 yılında Electricité de France (EDF) tarafından Goulours Barajı'nın rehabilitasyonu için inşa edilmiştir. O zamandan beri EDF, Fransa'da baraj

rehabilitasyonu için birkaç PKW projesi geliştirdi. 2010 yılından bu yana, PKW, Asya ve Afrika'da yeni baraj projeleri için de çalışılmaktadır.

2006 yılında yapılan Goulours Barajı'nın ardından daha sonraki yıllarda deşarj kapasitelerini artırmak amacıyla Saint-Marc (2008), Malarce (2012), Black Esk (2013), Charmines (2015), Van Phong (2015) ve daha birçok barajda bu PKW uygulaması yapılmıştır.



şekil 3.11 Goulours Barajı ve Saint-Marc Barajı (Fransa)



şekil 3.12 Malarce Barajı (Fransa) ve Black Esk Barajı (Birleşik Krallık)



şekil 3.13 Charmines Barajı (Fransa) ve Van Phong Barajı (Vietnam)

Fransa, Goulours'da dünya çapındaki ilk PKW dolusavağını inşa ettikten sonra EDF, yetersiz deşarja sahip barajları rehabilite etmek için başka PKW projeleri başlatmaya karar verdi. 2008'den 2015'e kadar 8 PKW ünitesi daha inşa edildi. Yakın gelecekte birkaç ünitenin daha yapılması planlanmaktadır (Laugier ve ark., 2017).

Cezayir, Avustralya, Kanada, Hindistan, İskoçya, Güney Afrika, Sri Lanka, İsviçre ve ABD'de PKW projeleri üzerinde çalışıyorlar (Erpicum ve ark., 2011).

PKW'ler, yeni projelerin veya mevcut barajların rehabilitasyonu (genellikle deşarj kapasitesini artırma amaçlı) için nehirde, bir ağırlık barajının tepesinde veya bir rezervuar kıyısında yer almaktadır. Şimdiye kadar PKW hakkında mevcut olan çoğu bilgi, Belçika (2011), Fransa (2013) ve Vietnam'da (2017) düzenlenen üç büyük çalıştayın ardından derlenerek üç ayrı kitapta yayınlanmıştır.

3.1.5.1. Piyano tuşu savaklarda kullanılan parametreler

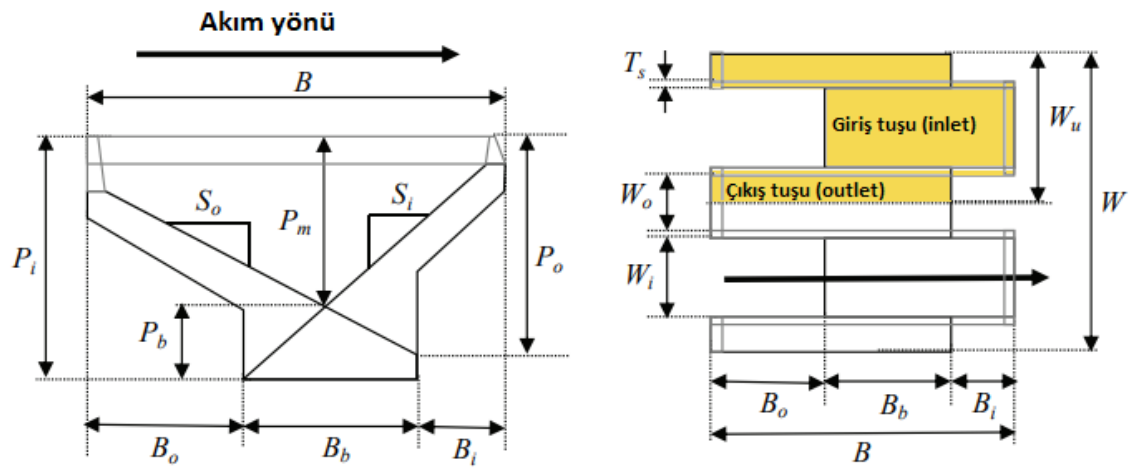
PKW geometrisi ilk bakışta oldukça basit görünse de, geometrisi potansiyel olarak 20'den fazla bağımsız parametre ile yönetilmektedir. PKW ile ilgili olarak uluslararası bilimsel çalışmaların terminolojik bir birlik içinde olması gerektiriyordu. Lausanne Üniversitesi Hidrolik Yapılar Laboratuvarı, Liège Üniversitesi hidrolik laboratuvarı ve EDF – Hidro Mühendislik Merkezi'ni içeren bir çalışma grubu, mevcut PKW terminolojisini geliştirdi (Pralong, 2011). Bu adlandırma kuralı, daha önce var olan mevcut labirent kuralıyla mümkün olduğu kadar örtüşmektedir (Tullis, 1995). Bu terminoloji, 2011 yılında Liege'de düzenlenen PKW ve labirent dolusavaklar üzerine yapılan ilk çalıştayda sunulmuştur.

Çizelge 3.1'de piyano tuşu savaklarda kullanılan parametreler gösterilmiştir. Kullanılan *i* alt indisleri giriş tuşunu (*inlet*), kullanılan *o* alt indisleri ise çıkış tuşunu (*outlet*) temsil etmektedir.

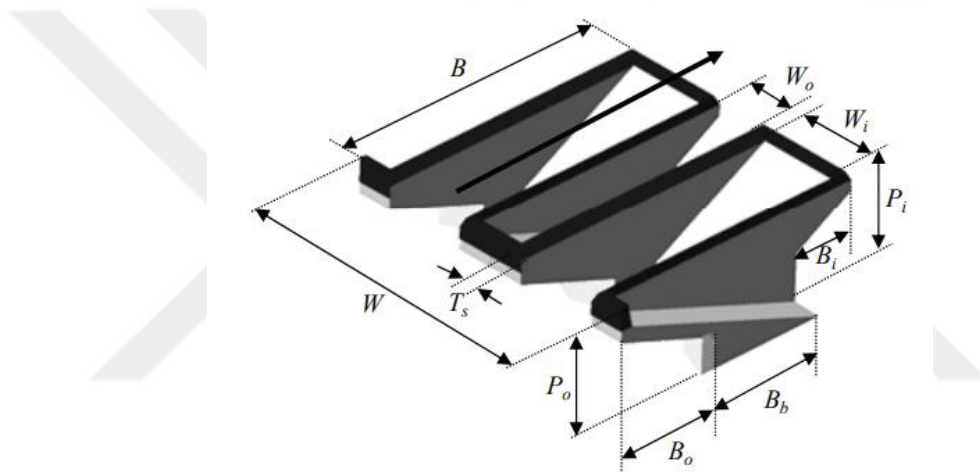
Çizelge 3.1. PKW’lerde kullanılan parametreler ve açıklamaları

Parametre	Açıklama
B	PKW’nin membadan mansaba toplam uzunluğu ($B=B_i+B_o+B_b$)
B_i	Giriş tuşu (<i>inlet</i>) rampasının konsol boyu
B_o	Çıkış tuşu (<i>outlet</i>) rampasının konsol boyu
B_b	Oturum alanı genişliği
B_h	Yan duvarların boyu
P_i	Memba (<i>inlet</i>) tarafındaki savak yüksekliği
P_o	Mansap (<i>outlet</i>) tarafındaki savak yüksekliği
P_b	Zeminden giriş ve çıkış tuşlarının kesişimine kadar olan dik mesafe
P_m	Giriş ve çıkış tuşlarının kesişim merkezi ile kret arasındaki mesafe
S_i	Giriş tuşu eğimi
S_o	Çıkış tuşu eğimi
W_i	Giriş tuşu genişliği
W_o	Çıkış tuşu genişliği
W	Savağın toplam genişliği
W_u	Birim PKW genişliği
T_i	Giriş tuşunun kret kalınlığı
T_o	Çıkış tuşunun kret kalınlığı
T_s	Yan duvar kalınlığı
L	Efektif savak boyu
L_u	Birim PKW efektif savak boyu ($L_u=W_i+W_o+2B_h+2T_s$)
N_u	Birim PKW sayısı
n	PKW’nin gelişmiş uzunluk oranı ($n=L/W$)
n_u	Birim PKW’nin gelişmiş uzunluk oranı ($n_u=L_u/W_u$)
B_n	Burun uzunluğu
a	Yan duvar açısı

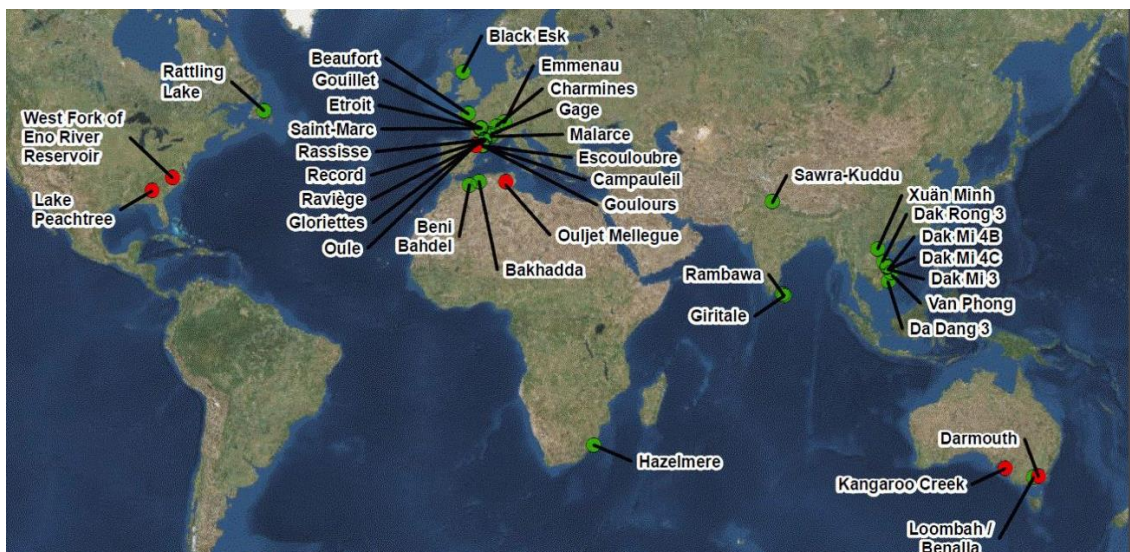
“Birim PKW” piyano tuşu savaklarda tekrarlayan geometrileri ifade etmekte olup, bir giriş tuşu (*inlet key*), iki yarım çıkış tuşu (*outlet key*) ve iki yan duvardan oluşmaktadır. Şekil 3.14’te bir PKW en kesiti ve birim PKW, Şekil 3.15’te 3D PKW gösterilmiştir. Çizelge 3.2’de mevcut barajlarda kullanılan parametre bilgileri verilmiştir, Şekil 3.16’da ise Dünya üzerindeki PKW dağılımları gösterilmiştir.



Şekil 3.14 PKW en kesiti, birim PKW ve kullanılan parametreler



Şekil 3.15 3D PKW görüntüsü ve kullanılan yaygın parametreler (Pralong ve ark., 2011)



Şekil 3.16 Mevcut PKW'lerin harita üzerinde gösterimi

Çizelge 3.2 Mevcut barajlarda kullanılan parametreler (Laugier ve ark., 2017)

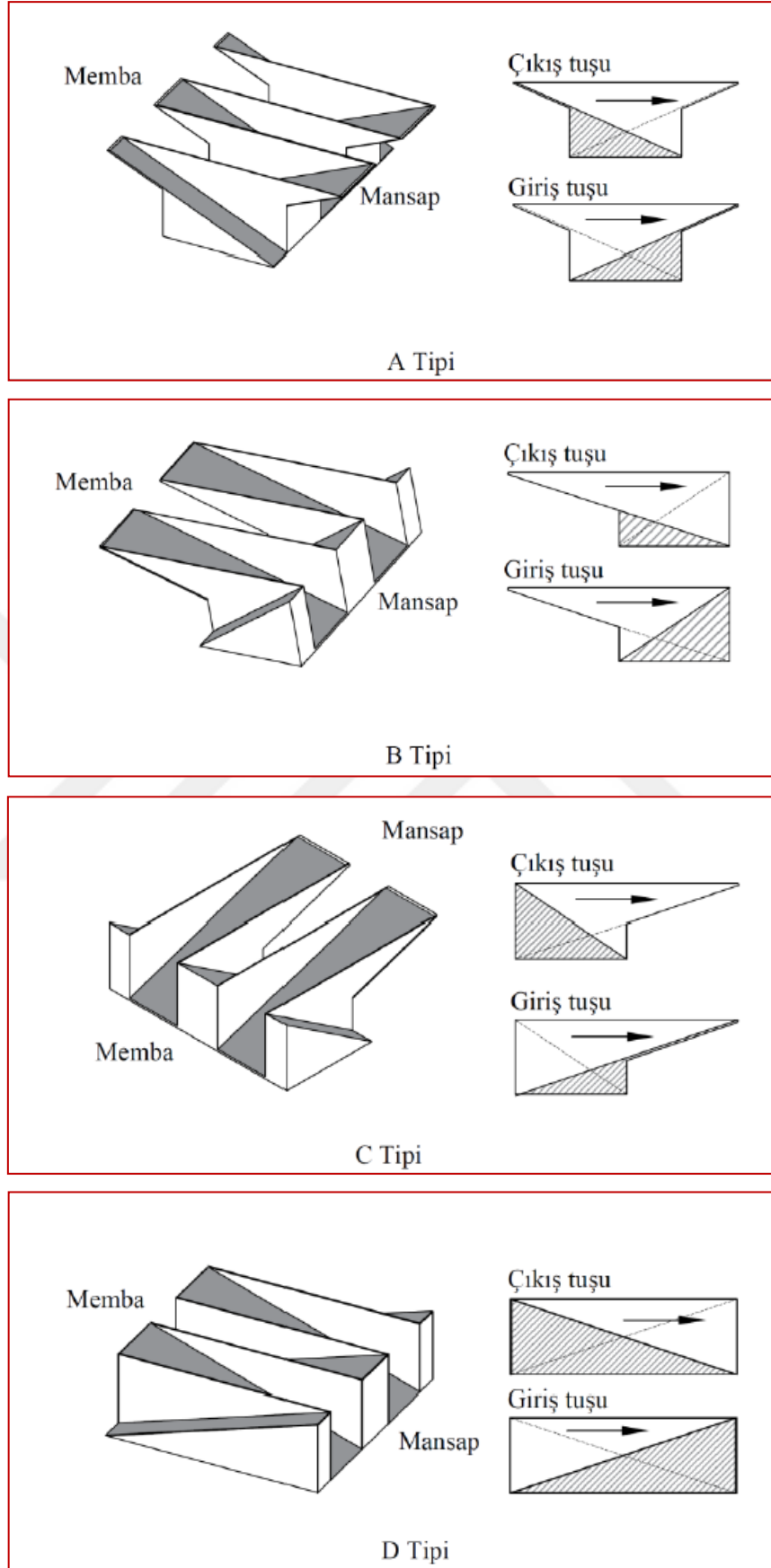
Baraj	B	Bi	Bo	Bb	P	W	Wi	Wo	Ts	L	Burun Yapısı
Goulours	9.3	1.5	3.35	4.4	3.1	12	2.7	1.5	0.2	59	Üçgen
St Marc	12.7	4	4	4.7	4.2	18	3.1	2.2	0.25	77	Üçgen
Etroit	12.2	2	3.2	7	5.3	18.7	2.45	1.5	0.35	78	Üçgen
Gloriettes	10	2.6	3.5	3.6	3	18.5	2.3	1.5	0.25	86.8	Yuvarlak
Escoul.	5.1	1.2	1.2	2.7	1.8	4.8	1.3	0.9	0.3	22	Üçgen
Malarce	13.46	2.03	6.63	4.8	4.4	42.5	1.25	1.58	0.2	350	Üçgen
Campaul.	13.1	2.8	4.9	3.5	5.35	16.55	1.55	1.4	0.35	115	Üçgen
Gage	13	3	4	6	6	26.6	1.6	1.3	0.25	208	Üçgen
Record	9.45	2.5	4.5	4.5	3	12.5	1.52	1.52	0.3	258	Üçgen

3.1.5.2. Pişano tuşu savak tipleri

Lempérière ve Ouamane, doğrusal olmayan savaklar üzerinde yeni bir sistematik şeklin kavramsal davranışını gösteren ilk kişilerdi. İlk olarak PKW prototiplerini Tip A ve B olarak adlandırdılar. Daha sonra birçok araştırmacı PKW'leri, farklı geometrilere dayalı dört tipte (Tip A, B, C ve D) sınıflandırmıştır (Şekil 3.17). PKW'nin yapısı farklı unsurların bir araya gelmesi olarak da tanımlanabilir. Bu isimlendirmede dikkate alınan birleşenler temel yapı ve yan yapılarıdır. Giriş tuşu, çıkış tuşu ve yan duvarlar (konsollar) temel yapıyı; tasarımda yer alan burunlar ve parapet duvarlar ise isteğe bağlı olan yan yapılarıdır.

Memba ve mansap konsollarının olup olmamasına bağlı olarak farklı pişano tuşu savak tipleri mevcuttur. Şekil 3.17'de en kesit ve görünüşleri verilen bu tipler şu şekildedir;

- Hem membada hem de mansapta konsol içeren A tipi,
- Sadece membada konsola sahip olan B tipi,
- Sadece mansapta konsolu bulunan C tipi
- Hem membada hem de mansapta konsol içermeyen D tipi olarak tanımlanmaktadır (Lemperiere vd. 2011).



Şekil 3.17 Piyano tuşu savak tiplerine ait literatürde yer alan en kesit ve görünüşler (Kılıç, 2020)

3.1.5.3. Deşarj kapasitesini etkileyen geometrik parametreler

Piyano tuşu savakların deşarj kapasitesi, birçok geometrik parametrenin bir fonksiyonu olup bu parametrelerin boşaltma kapasitesine etkisini incelemek amacı ile laboratuvarlarda prototipler üzerinde yapılmış birçok çalışma mevcuttur (Lemperiere ve Oumane, 2006; Leite Ribeiro ve ark. 2012). Günümüzde ilerleyen teknoloji sayesinde, bu prototiplerin bilgisayar altında modellenerek analizlerinin yapılması da ivme kazanmıştır. Literatüre katkıda bulunan modellerin bir kısmına ait özellikler Çizelge 3.3'te verilmiştir. Çalışmalarda kullanılan parametrelere ilgili değerler sunularak günümüze kadar savak tasarımına katkı sağlanmıştır.

Yapılan çalışmalar neticesinde PKW'nin deşarj veriminde etkili olan başlıca parametrelerin, efektif savak boyu (L), savak yüksekliği (P_i), tuş genişlikleri (W_i ve W_o) ve konsolların boyları (B_i ve B_o) olduğu tespit edilmiştir

Çizelge 3.3 Literatürde yer alan çalışmalarda kullanılan parametreler (Kılıç, 2020)

Çalışmalar	Tip	n	W_i/W_o	S_i	S_o
Lemperiere ve Oumanne, 2003	A	6	1	1.5	1.5
Lemperiere ve Oumanne, 2003	B	6	1	0.75	1.5
Barcouda ve ark., 2006	A	6	1.2	2	2
Barcouda ve ark., 2006	B	6	1.2	1	2
Lemperiere ve Oumanne, 2006	A	4-8.5	1	1.99	1.99
Lemperiere ve Oumanne, 2006	B	4-6	1	1	2
Hien ve ark., 2006	A	4-7	1.5	-	-
Laugier, 2007	A	5	1.43	2.05	2.05
Ribeiro ve ark., 2009	A	4.94-6.66	1.23-1.57	1.67-2.70	1.72-2.04
Erpicum ve ark., 2010	-	4.15	1	-	-
Anderson, 2011	A	5.19	1.26	-	-
Machiels, 2012	A	4.29	1.44	-	-
Cicero ve ark., 2013	A	4.6	1	0.556	0.556
Cicero ve ark., 2013	B	4.6	1	0.902	0.402
Cicero ve ark., 2013	C	4.6	1	0.402	0.902

3.1.5.4. Piyano tuşu savak hidroliği

Noui ve Ouamane (2013) tarafından PKW'lerin deşarj kapasitesi ve farklı geometrik parametreleri arasında boyutsal bir analiz yapılmıştır. PKW üzerindeki akış hızının, PKW'nin deşarj kapasitesini doğrudan veya ters yönde etkileyen çeşitli geometrik parametrelere sahip olduğu tanımlanmıştır. Bir PKW boyunca toplam deşarj, Denklem 3.12'de gösterildiği gibi birkaç parametrenin bir fonksiyonudur.

$$Q = f(\rho, g, \mu, \sigma, t, H_t, L, P, P_b, W, W_i, W_o, B, S_i, S_o, \alpha, T_s, R, N) \quad (3.12)$$

burada Q, PKW boyunca akan toplam debiyi temsil eder. ρ , μ ve σ , akan sıvının sıvı özelliklerini (sırasıyla yoğunluk, dinamik viskozite ve yüzey gerilimi) temsil eder. g yerçekimi ivmesi, t, akan sıvının sıcaklığıdır. H_t , PKW'ler üzerindeki membadaki hidrolik yükü ($h_t + V_t^2/2g$) temsil eder; burada h_t , savak üzerindeki su yüzeyi seviyesi ve V_t $v_t^2/2g$ ortalama hız yüksekliğidir.

Diğer geometrik parametreler PKW ile ilgilidir,

burada L toplam kret uzunluğunu,

P, PKW'nin yüksekliğini,

P_b akış yaklaşma derinliğini,

W PKW'nin toplam genişliğini,

W_i ve W_o sırasıyla giriş ve çıkış tuşları genişliklerini

B ($B_i + B_b + B_o$) kenar savak uzunluğunu; B_i ve B_o sırasıyla giriş ve çıkış tuşlarındaki çıkıntı bölümlerini ve B_b taban uzunluğunu,

S_i ve S_o sırasıyla giriş ve çıkış tuşlarının eğimlerini,

α PKW'nin giriş/çıkış tuşlarının tepe noktası ve yan duvar savağı arasındaki açığı,

T_s PKW yan duvarının kalınlığını,

R parapet duvarının yüksekliğini ve

N döngü sayısını temsil eder.

Bazı araştırmacılar, keskin kenarlı dikdörtgen savak için genel deşarj denklemini temel alarak serbest akış koşulları altında piyano tuşu savakların deşarj taşıma kapasitesini (3.13) ile hesaplar:

$$Q = \frac{2}{3} C_{dw} W \sqrt{2g} H^{3/2} \quad (3.13)$$

burada Q , savak üzerinden geçen teorik deşarjı (m^3/s) temsil eder, C_{dw} deşarj katsayısıdır, deşarj katsayısının w alt indisi deşarjın tahmin edildiğini ifade eder, W savak genişliğidir (m), g yerçekiminden kaynaklanan ivmedir (m/s^2) ve H , PKW (m) üzerindeki toplam yükü temsil eder (Machiel ve ark., 2011)

Bununla birlikte, bazı araştırmacılar PKW ile geliştirilmiş uzunluk ile ilgili deşarj katsayısını şu şekilde ifade etmektedirler;

$$Q = \frac{2}{3} C_{dL} L \sqrt{2g} H^{3/2} \quad (3.14)$$

burada C_{dL} , PKW için deşarj katsayısıdır; boşalma katsayısının alt simgesi L , PKW'nin geliştirilmiş tepe uzunluğu (L) kullanılarak tahmin edilen deşarjı ifade eder (Leite R., ve ark, 2011). PKW'lerin hidroliği ile ilgili olarak, kullanılacak prototip yapısına bağlı olarak çeşitli tasarım metotları mevcuttur.

Kabiri-Samani ve Javaheri (2012), PKW Tip A, B ve C'nin serbest akışlı ve batık akış koşulları altında deşarj hesaplaması için Denklem (3.12)'yi kullanmışlardır. Spesifik deşarj 0.025 ila 0.175 $m^3/s/m$ arasında değişmektedir. Ayrıca, Denklem (3.12)'nin yalnızca serbest taşma için geçerli olduğunu öne sürülmüştür. Burada C_d , çeşitli ilgili geometrik parametrelerin bir fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır:

$$C_d = \left[0.212 \left(\frac{H}{P} \right)^{-0.675} * \left(\frac{L}{W} \right)^{0.377} * \left(\frac{W_i}{W_o} \right)^{0.426} * \left(\frac{B}{P} \right)^{0.306} * e^{1.504 \frac{B_o}{B} + 0.093 \frac{B_i}{B}} \right] + 0.606 \quad (3.15)$$

burada H , PKW üzerindeki yüksekliği (m) ve H_d mansap su yüksekliğidir. Daha sonra, Denklem (3.15) aşağıdaki sınırlamalara tabi tutulmuştur:

$$H > 30 \text{ mm},$$

$$0.1 \leq H / P \leq 0.6,$$

$$2.5 \leq L / W \leq 7,$$

$$1 \leq B / P \leq 2.5,$$

$$0.33 \leq W_i / W_o \leq 1.22,$$

$$0 \leq B_i / B \leq 0.26,$$

$$0 \leq B_o / B \leq 0.26 \text{ ve}$$

$$H_d / H \leq 0.6 \text{ şeklindedir.}$$

PKW'nin batık koşullardaki deşarj katsayısını hesaplamak için:

$$C_d = \left[1 - 0.858 \left(\frac{H_d}{H} \right) + 2.628 \left(\frac{H_d}{H} \right)^2 - 2.489 \left(\frac{H_d}{H} \right)^3 \right] * \left(\frac{L}{W} \right)^{0.055} \quad (3.16)$$

$$2.5 \leq L / W \leq 6,$$

$$1 \leq B / P \leq 2.5,$$

$$0.33 \leq W_i / W_o \leq 1.22,$$

$$0 \leq B_i / B \leq 0.26,$$

$$0 \leq B_o / B \leq 0.26 \text{ ve}$$

$$H_d / H > 0.6 \text{ sınırlamalarına tabidir.}$$

Leite Ribeiro ve ark. (2012), Tip A PKW modelleri üzerinde sistematik bir deneysel çalışma yürütmüş ve akışı etkileyen birincil ve ikincil parametreleri tanımlamıştır. PKW debi-savak yükü ilişkisini, artan deşarj oranını (r) dört düzeltme faktörü cinsinden (w,p,b ve a) ifade etmişlerdir;

$$r = 1 + 0.24 \left(\frac{(L-W)P_i}{WH} \right)^{0.9} w p b a \quad (3.17)$$

burada r iyileştirme deşarj oranını ($r = Q_{PKW}/Q_s$), Q_{PKW} l/s cinsinden PKW üzerindeki deşarjı temsil eder ve Q_s , l/s cinsinden doğrusal keskin kenarlı savak deşarjıdır. Geliştirme oranı r, öncelikle aşağıdaki anahtar parametrelerden etkilenir: Taşma uzunluğu L (m), savak genişliği W (m), savak yüksekliği P_i (m) ve taşma derinliği H (m). Tuş genişlikleri, çıkıntı uzunlukları ve parapet duvarlarının katkılarını hesaba katmak için ikincil parametreler de kullanıldı.

$$w = \left(\frac{W_i}{W_o} \right)^{0.05} \quad (3.18)$$

burada w giriş ve çıkış tuş oranının etkisini,

$$p = \left(\frac{P_o}{P_i} \right)^{0.25} \quad (3.19)$$

p , giriş ve çıkış tuşlarının yükseklik farkını,

$$b = 0.3 + \left(\frac{B_i + B_o}{B} \right)^{-0.5} \quad (3.20)$$

b , herhangi bir parapet duvarının varlığını belirtmek için çıkıntı uzunluklarının etkisini,

$$a = 1 + \left(\frac{R_o}{P_o} \right)^2 \quad (3.21)$$

α , parapet duvarının varlığını temsil etmektedir.

Anderson ve Tullis farklı tiplerdeki PKW'ler üzerinde birkaç yıl boyunca (2011-2013) deneysel çalışmalar yapmışlardır. Daha sonra Crookston ve ark. (2016) debi katsayısı için Denklem (3.22)'yi önermişlerdir.

$$C_{PW} = \left[\frac{1}{a_1 + b_1 \left(\frac{H}{P} \right) + \frac{c_1}{\left(\frac{H}{P} \right)}} + d_1 \right] * \frac{L}{W} \quad (3.22)$$

burada, a_1 , b_1 , c_1 , d_1 ampirik katsayılar olup,

$W_i / W_o = 1.00$ için sırasıyla 0.5091, 10.29, 0.09712 ve 0.1164;

$W_i / W_o = 1.25$ için sırasıyla 0.4216, 9.412, 0.1027 ve 0.1114 değerlerini almaktadırlar.

Cicero ve ark. (2013), üç farklı (A, B ve C) PKW tipi kullanarak yapmış oldukları çalışma sonucunda; B tipinin, A tipine göre %5-%10 daha verimli, C tipinin ise A tipinden %15 daha az verimli olduğunu bulmuşlardır. A tipi için %1.3, B tipi için %0.9, C tipi için %1.0 hata oranı ile Denklem (3.23)'deki debi katsayısı formülü sunulmuştur.

$$C_{PW} = \left[a_0 + a_1 \left(\frac{H}{P} \right) + a_2 \left(\frac{H}{P} \right)^2 + a_3 \left(\frac{H}{P} \right)^3 + a_4 \left(\frac{H}{P} \right)^4 \right] \quad (3.23)$$

Abdul-Hassan ve ark. (2018) B tipi PKW üzerinde farklı parametrelerin etkisini (savak genişliği, uzunluğu, giriş ve çıkış tuşlarının genişlikleri vb) incelemek, memba ve mansap savak yükseklikleri farkının debi katsayısına etkilerini araştırmak üzere çok sayıda deney yürütmüş ve Denklem (3.24)'i önermişlerdir.

$$C_{PW} = \left[0.8816 \left(\frac{H}{P} \right)^{-0.8539} + \left(\frac{L}{W} \right)^{0.3619} + \left(\frac{W_i}{W_o} \right)^{0.0802} * \exp \left(0.0527 \frac{B}{P} - 1.2182 \frac{P_i}{P_o} \right) \right] + 0.534 \quad (3.24)$$

Denklem (3.24) aşağıdaki sınırlamalara tabi tutulmuştur;

$$3 \leq L / W \leq 7,$$

$$1.5 \leq B/P \leq 5,$$

$$0.5 \leq W_i / W_o \leq 2.0,$$

$$1.5 \leq B / P \leq 5,$$

$$0.7 \leq P_i / P_o \leq 2.0,$$

$$B_o / P = 0.25,$$

$$P_d / P = 0.6 \text{ sınırlamalarına tabidir.}$$

Xinlei Guo ve ark. (2019), debi katsayısı için A tipi PKW modeli ile yapmış oldukları çalışmalar sonucunda Denklem (3.25)'i önermişlerdir.

$$C_{PW} = \left[0.1 + 0.285 \left(\frac{L}{W} \right)^{0.45} * \left(\frac{W_i}{W_o} \right)^{0.05} * \left(\frac{B}{P} \right)^{0.1} * \left(\frac{H}{P} \right)^{-0.465} \right] \quad (3.25)$$

Denklem (3.25)'de kullanılan etkili parametreler ise (3.26)'da gösterilmiştir.

$$C_{PW} = f \left(\frac{H}{P}, \frac{L}{W}, \frac{B}{P}, \frac{W_i}{W_o}, \frac{T_s}{H}, \frac{P_p}{P} \right) \quad (3.26)$$

Denklem (3.25) aşağıdaki sınırlamalara tabi tutulmuştur:

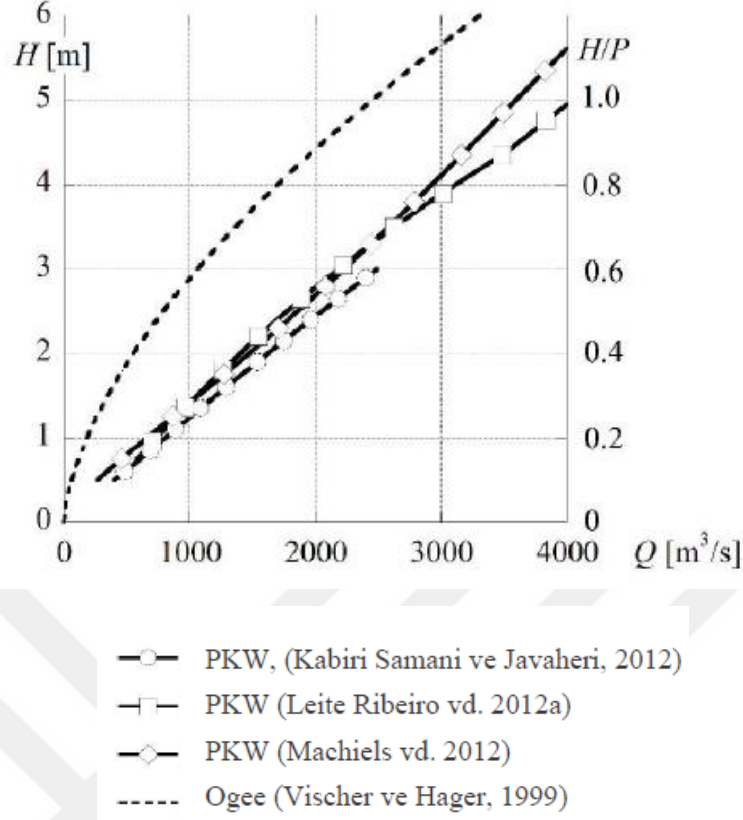
$$H / P > 0.1,$$

$$2.5 < L / W < 8.5,$$

$$0 < W_i / W_o < 2.45 \text{ ve}$$

$$1 < B / P < 6, \text{ burada parapet duvar yüksekliği ve kret şeklinin etkisi ihmal edilmiştir.}$$

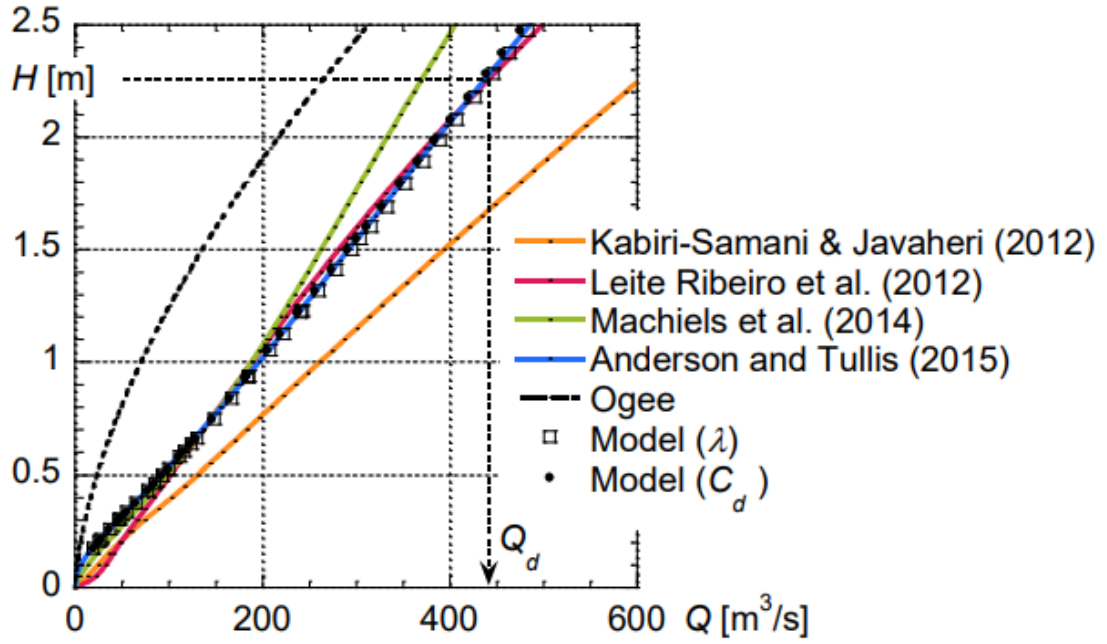
Pfister ve ark. (2013), hidrolik tasarım için literatürdeki debi kapasitesi-katsayısı formüllerini karşılaştırmışlardır. Yapılan çalışmalar ile elde edilen kapasite değerleri ile H/P oranı arasındaki değerler grafik üzerinde Şekil 3.18'de verilmiştir.



Şekil 3.18 PKW’lerde farklı debi kapasitesi formüllerinin karşılaştırılması (Pfister ve Schleiss, 2013)

PKW üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda debi kapasitelerinin birbirlerine yakın, en yüksek deşarj kapasitesine sahip olan formülün ise yukarıda verilen grafikte Kabiri-Samani ve Javaheri’ye ait ampirik formül (3.15) olduğu görülmektedir.

Crookston ve ark. (2016), Eno Nehri üzerinde yer alan West Fork Barajı’nın dolusavak kapasitesini artırabilmek için PKW’ler üzerinde bir takım sayısal analizler yapmışlardır. Anderson (2011) tarafından yapılan deneyler ile karşılaştırıldığında yapılan analizlerin sonuçları doğrulanmıştır. Şekil 3.19’daki grafikte PKW’ler ve ogee tipi savak için diğer araştırmacıların elde ettiği değerler gösterilmiştir.



Şekil 3.19 PKW üzerinde yapılan sayısal ve deneysel çalışma sonuçlarının karşılaştırılması (Crookston ve ark. 2016)

Denys, Lempérière tarafından geliştirilen farklı metodolojilerin yanı sıra PKW dolu savağı ile ilgili bazı temel standart tasarım önceliklerini ve akış kaynaklı salınımları tartışmış; Leite Ribeiro, Machiels, Anderson ve diğ., PKW üzerindeki deşarj katsayısını hesaplamak için deşarj Denklem (3.14)'i kullanmış ve sonuçları Lempérière tarafından geliştirilen metodoloji ile karşılaştırmıştır. Buna rağmen Anderson ve Tullis, Lempérière denkleminin doğru olduğunu bildirmişlerdir; ancak bu denklem yalnızca ICOLD tarafından tanımlanan referans geometrisi için geçerlidir (Singh ve Kumar, 2021).

3.2. Deneysel Çalışma

Farklı geometrik parametrelerin, PKW modelleri üzerindeki etkisinin incelenmesi ile ilgili deneysel çalışmalar Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarında yürütülmüştür. Laboratuvar ortamında çalışılan savak modellerinin, aynı zamanda HAD tabanlı bir paket program olan ANSYS-Fluent ile 3D modellemesi ve analizi yapılmış, modellenen kanal-savak akımları incelenmiştir.

3.2.1. Deney düzeneği

Tez çalışmasının önemli bir basamağı olan deneysel çalışmalar Şekil 3.20’de gösterilen dikdörtgen kesite sahip açık kanalda gerçekleştirilmiştir. Kanalin genişliği 60 cm, derinliği 50 cm ve uzunluğu 6 m’dir. Betonarme yapıdan meydana gelen memba ve mansap haznelerin arasına açık kanal yerleştirilmiştir. Kanalin taban ve yan duvarları ise cam malzemeden yapılmış olup çelik konstrüksiyon ile kanal güçlendirilmiştir.



Şekil 3.20 Deneysel çalışmalarda kullanılan açık kanalın genel görüntüsü

Deneysel çalışmalarda su akımını iletebilmek amacıyla açık kanalın iki ucunda yer alan memba ve mansap hazneleri çelik borular yardımıyla birbirine bağlanarak akımın devir daimi sağlanmıştır. Membadan iletilen su, çelik boru üzerinde yer alan pompa sayesinde mansap haznesine ulaşan suyun tekrardan mambadaki hazneye basılmasını sağlamaktadır. Pompaların frekansı ise Şekil 3.21’de gösterilen kumanda panosu ile kontrol edilebilmektedir. Kanala iletilen debi burada ayarlanabilmektedir.



Şekil 3.21 Kumanda frekans panosu

Ultrasonik debimetre ile kanala iletilen debi ölçülmektedir. Şekil 3.22’de gösterilen ultasonik debimetre çelik boru üzerinde ve iki hazne arasında konumlandırılmıştır.



Şekil 3.22 Ultrasonik debimetre

Her bir deneysel çalışmada piyano tuşu savakların memba ve mansabında savak yükü okuması yapılmıştır. Bu deneysel çalışmalarda su yüksekliği okunması şekildeki limnometreler ile yapılmıştır (Şekil 3.23).



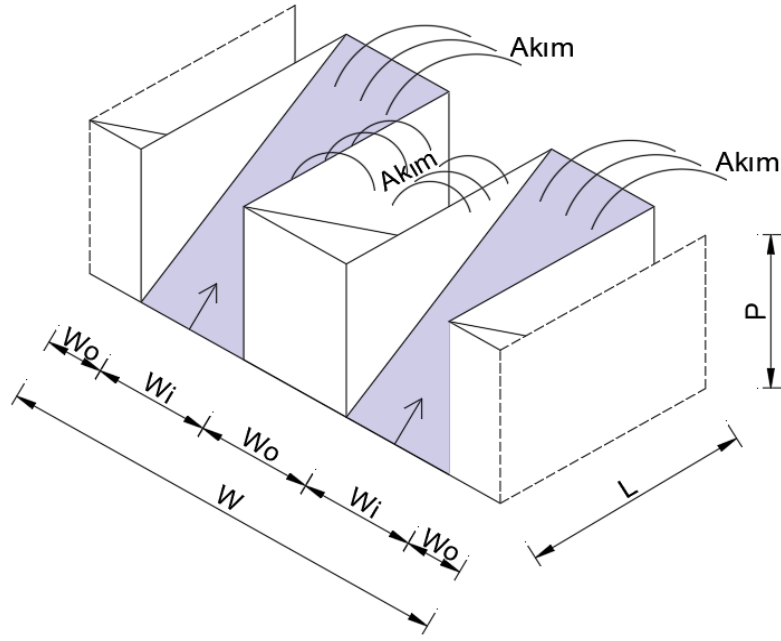
Şekil 3.23 Su yüksekliğinin ölçülmesi ve kullanılan limnimetre

Deneylerde kullanılan PKW'ler 3mm kalınlığında ve suya dayanıklı MDF malzemesinden imal edilmiştir. Her bir modelin parçaları AutoCAD'de çizilmiş daha sonra lazer kesim makinesi ile ayrı ayrı plakalar elde edilmiştir. Her bir model silikon yapıştırıcı ile monte edilmiştir. Oluşturulan modellerin her biri deney sırasında hareket etmemesi için kanal en kesitine yerleştirildikten sonra şeffaf silikon ile sabitlenmiştir. Bu tez çalışmasında kullanılan PKW modelleri Şekil 3.24'te gösterilmiştir.



Şekil 3.24 MDF'den imal edilmiş PKW modelleri

Bu tez kapsamında 12 farklı D tipi PKW tasarlanmıştır. Bunlar sırasıyla $P_K=W_i/W_o=1.00, 1.25$ ve 1.50 şeklinde 3 gruba ayrılmıştır. Çalışmalarda kullanılan D tipi model Şekil 3.25'te gösterilmiş, modellere ait geometrik parametreler ise Çizelge 3.4'te verilmiştir.

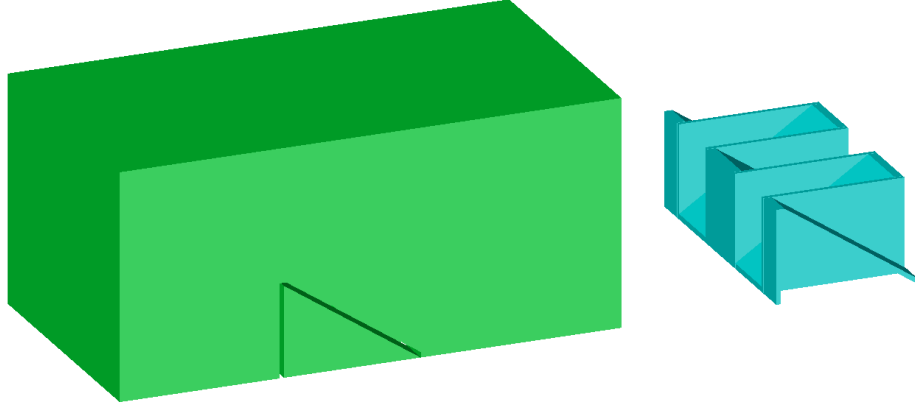


Şekil 3.25 Çalışmada kullanılan D tipi PKW örneği

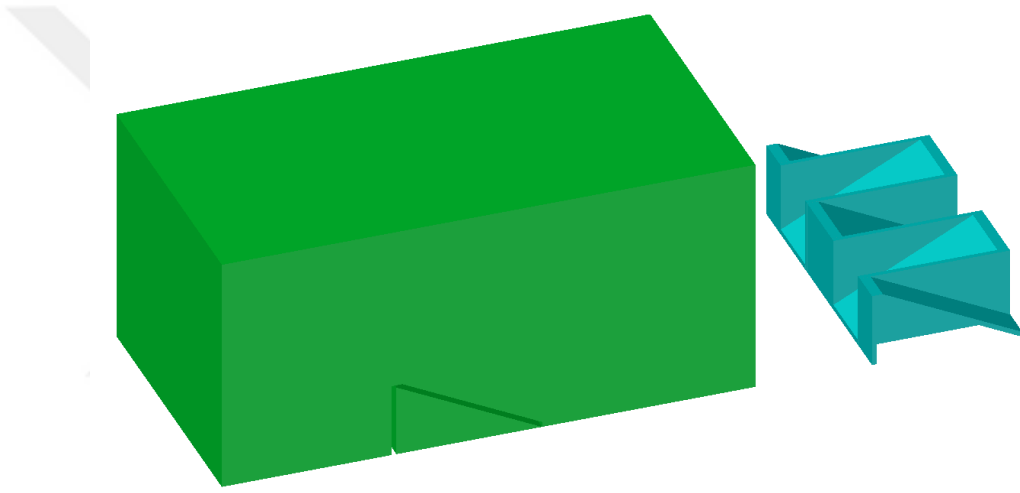
Çizelge 3.4 Çalışmada kullanılan geometrik parametre bilgileri

Model	W_i (mm)	W_o (mm)	P_k (mm)	P (mm)	L (mm)	S_i (mm)	S_o (mm)
1	147	147	1.00	200	300	0.75	0.75
2	147	147	1.00	150	300	0.5	0.5
3	147	147	1.00	150	200	0.75	0.75
4	147	147	1.00	150	400	0.375	0.375
5	163.25	130.6	1.25	200	300	0.75	0.75
6	163.25	130.6	1.25	150	300	0.5	0.5
7	163.25	130.6	1.25	150	200	0.75	0.75
8	163.25	130.6	1.25	150	400	0.375	0.375
9	176.4	117.6	1.50	200	300	0.75	0.75
10	176.4	117.6	1.50	150	300	0.5	0.5
11	176.4	117.6	1.50	150	200	0.75	0.75
12	176.4	117.6	1.50	150	400	0.375	0.375

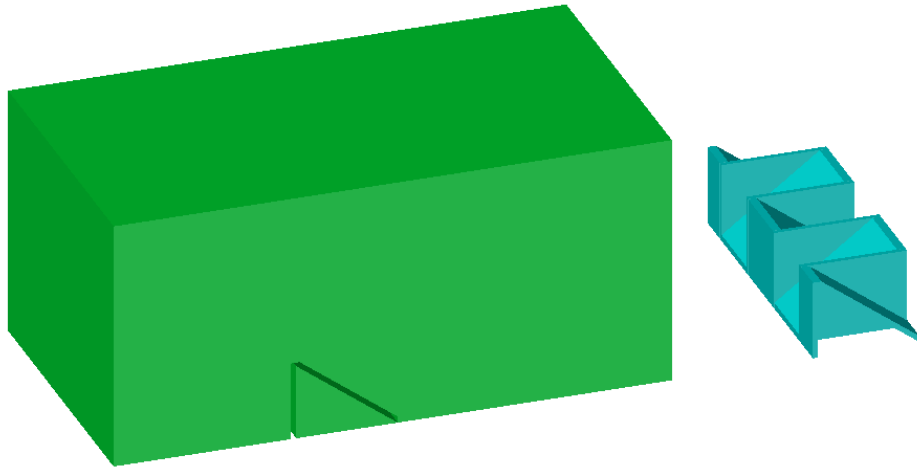
Çizelge 3.4'te verilen 12 modelden ayrıca 150 mm ve 200 mm yüksekliğinde (P) ve 600 mm genişliğinde (L) iki ayrı keskin kenarlı savak da kullanılmıştır. Şekil 3.26-37'de Çizelge 3.4'te verilen parametrelerin AutoCAD programında çizilen 3D modelleri; Şekil 3.37-38'de ise keskin kenarlı savak modelleri gösterilmektedir.



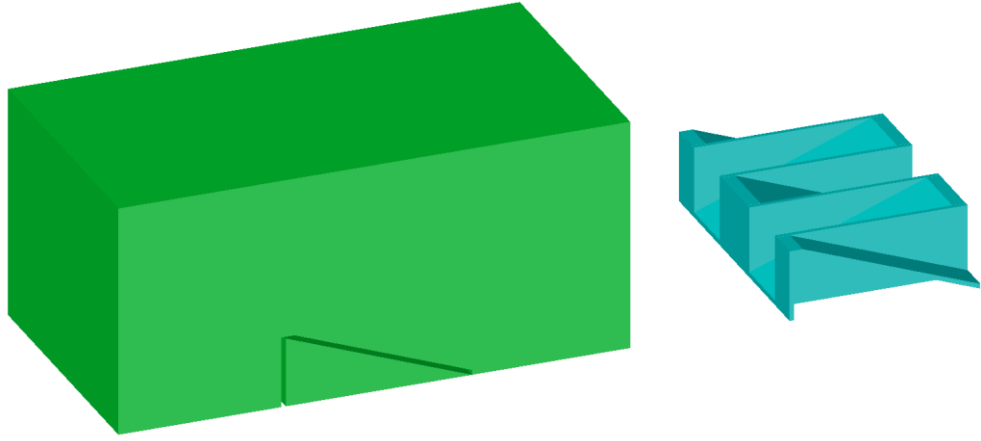
Şekil 3.26 Model 1'in 3D modeli ve açık kanala yerleştirilmesi



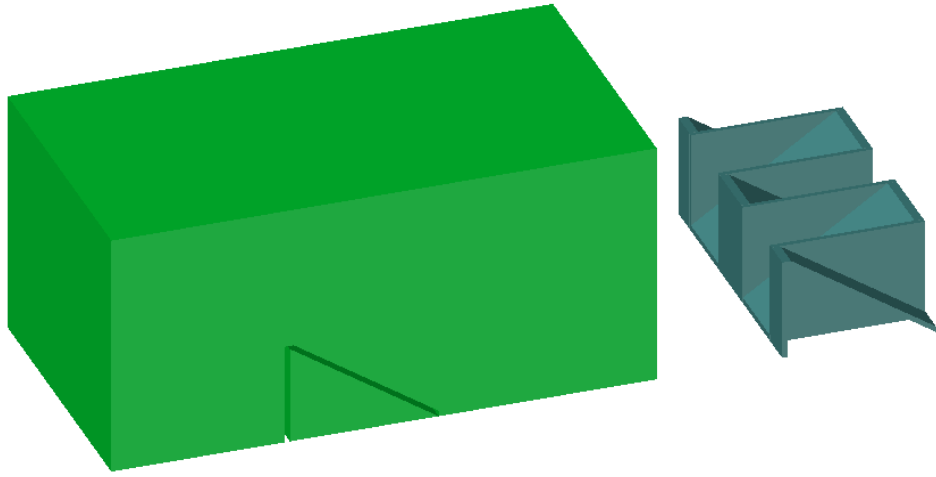
Şekil 3.27 Model 2'nin 3D modeli ve açık kanala yerleştirilmesi



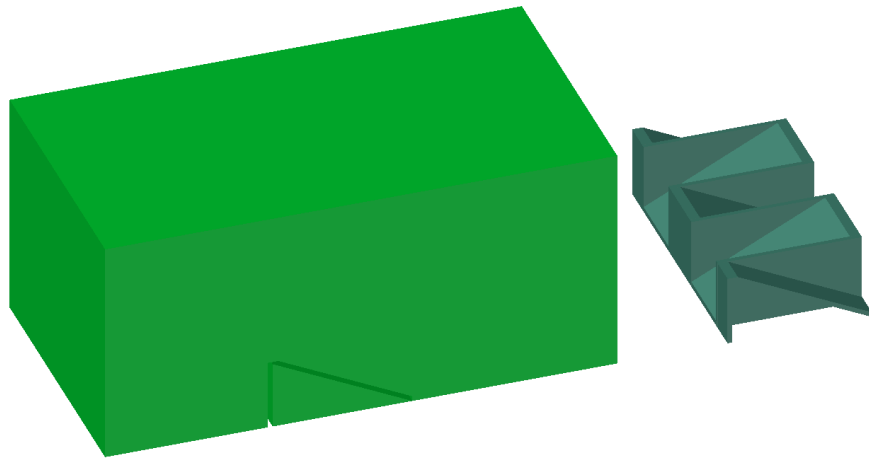
Şekil 3.28 Model 3'ün 3D modeli ve açık kanala yerleştirilmesi



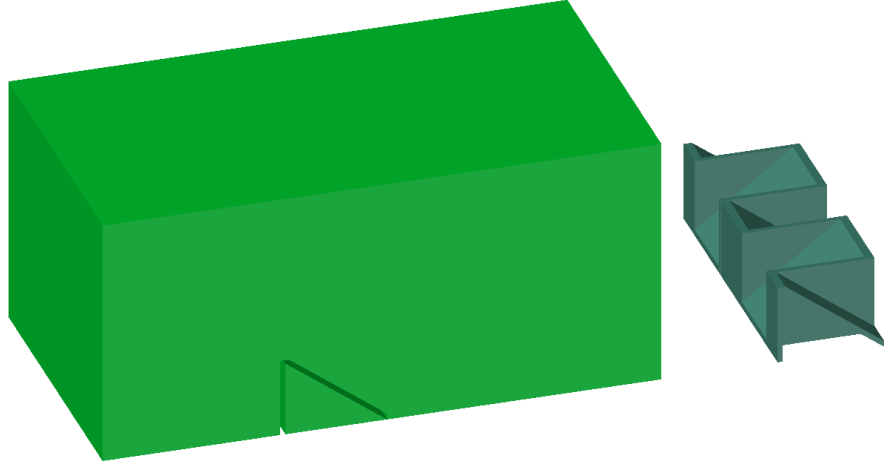
Şekil 3.29 Model 4'ün 3D modeli ve açık kanala yerleştirilmesi



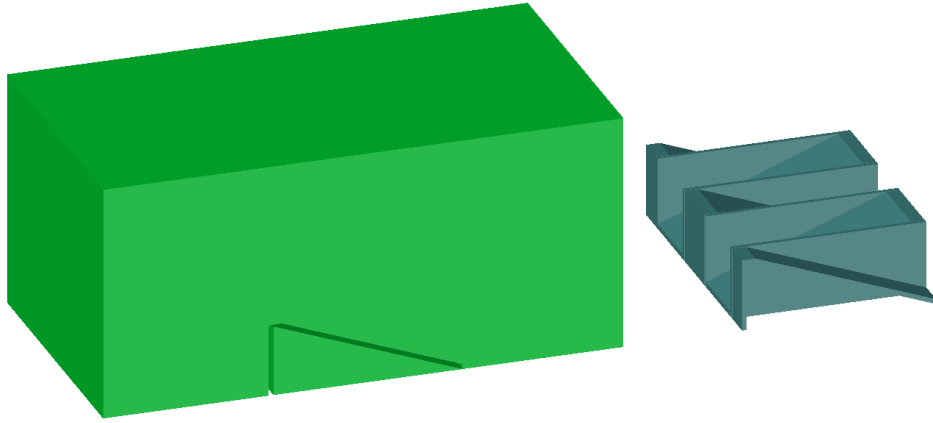
Şekil 3.30 Model 5'in 3D modeli ve açık kanala yerleştirilmesi



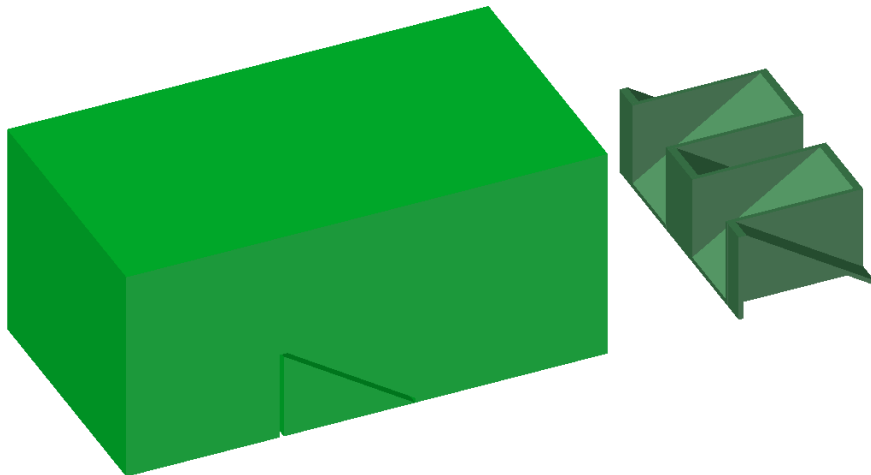
Şekil 3.31 Model 6'nın 3D modeli ve açık kanala yerleştirilmesi



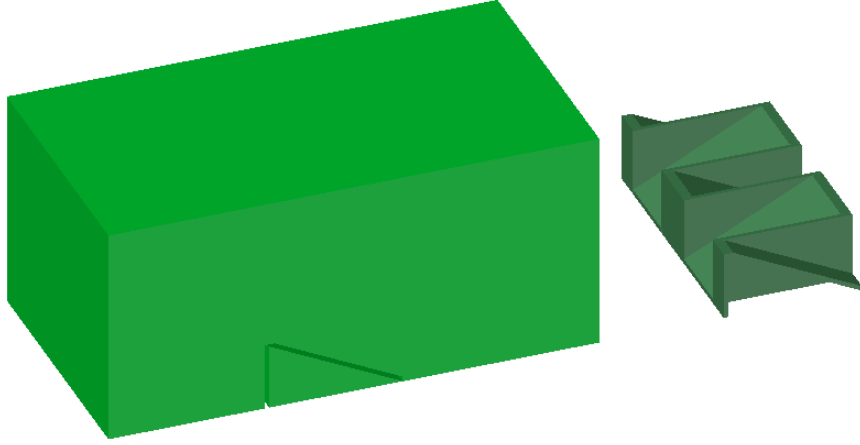
Şekil 3.32 Model 7'nin 3D modeli ve açık kanala yerleştirilmesi



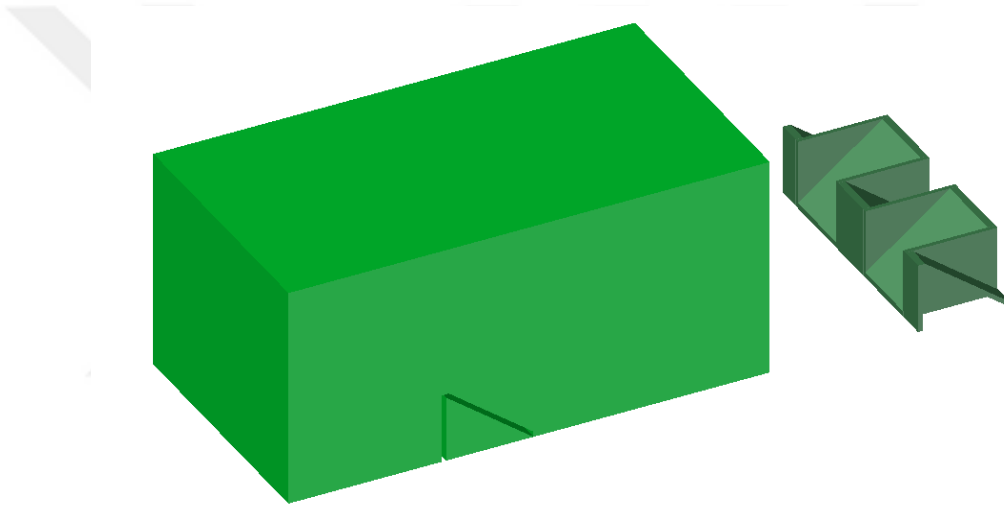
Şekil 3.33 Model 8'in 3D modeli ve açık kanala yerleştirilmesi



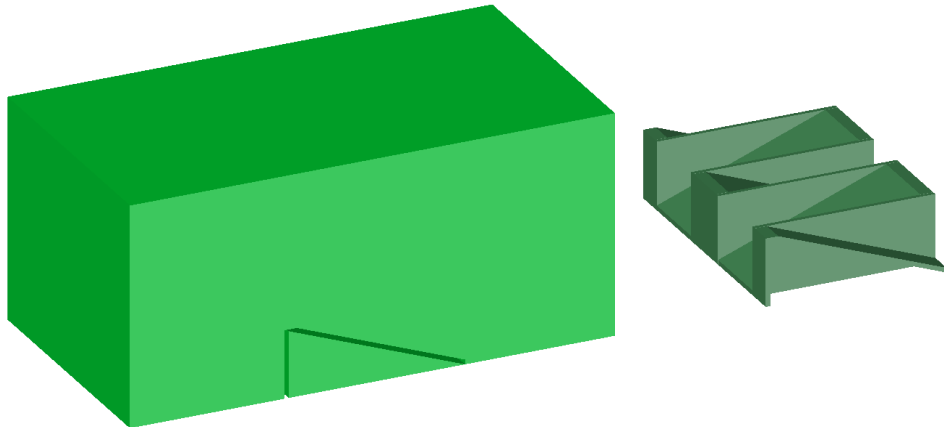
Şekil 3.34 Model 9'un 3D modeli ve açık kanala yerleştirilmesi



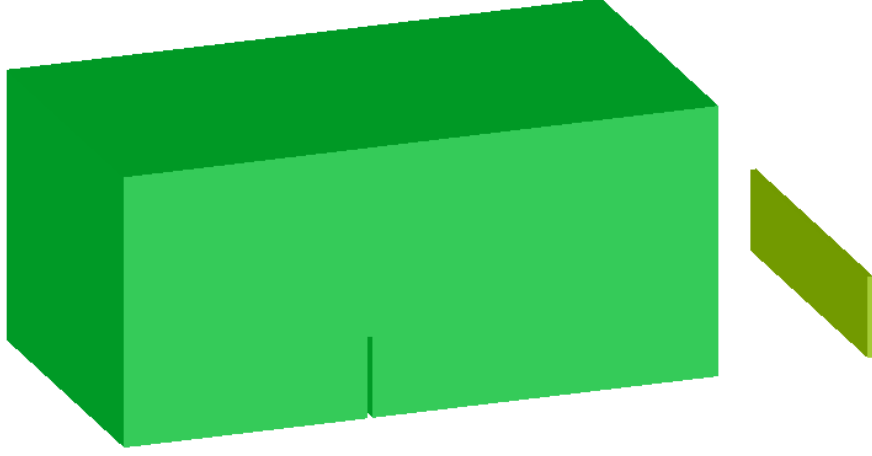
Şekil 3.35 Model 10'un 3D modeli ve açık kanala yerleştirilmesi



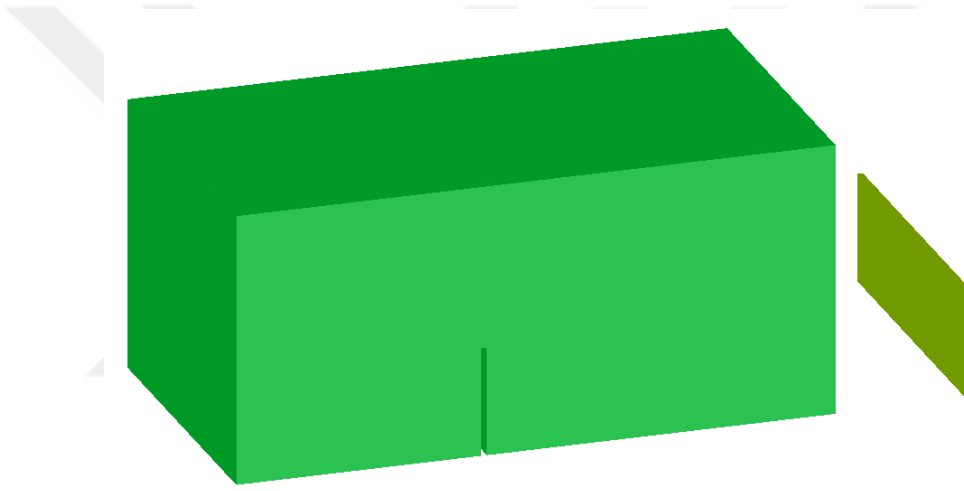
Şekil 3.36 Model 11'in 3D modeli ve açık kanala yerleştirilmesi



Şekil 3.37 Model 12'nin 3D modeli ve açık kanala yerleştirilmesi



Şekil 3.38 $P=15$ cm keskin kenarlı savak 3D modeli ve açık kanala yerleştirilmesi



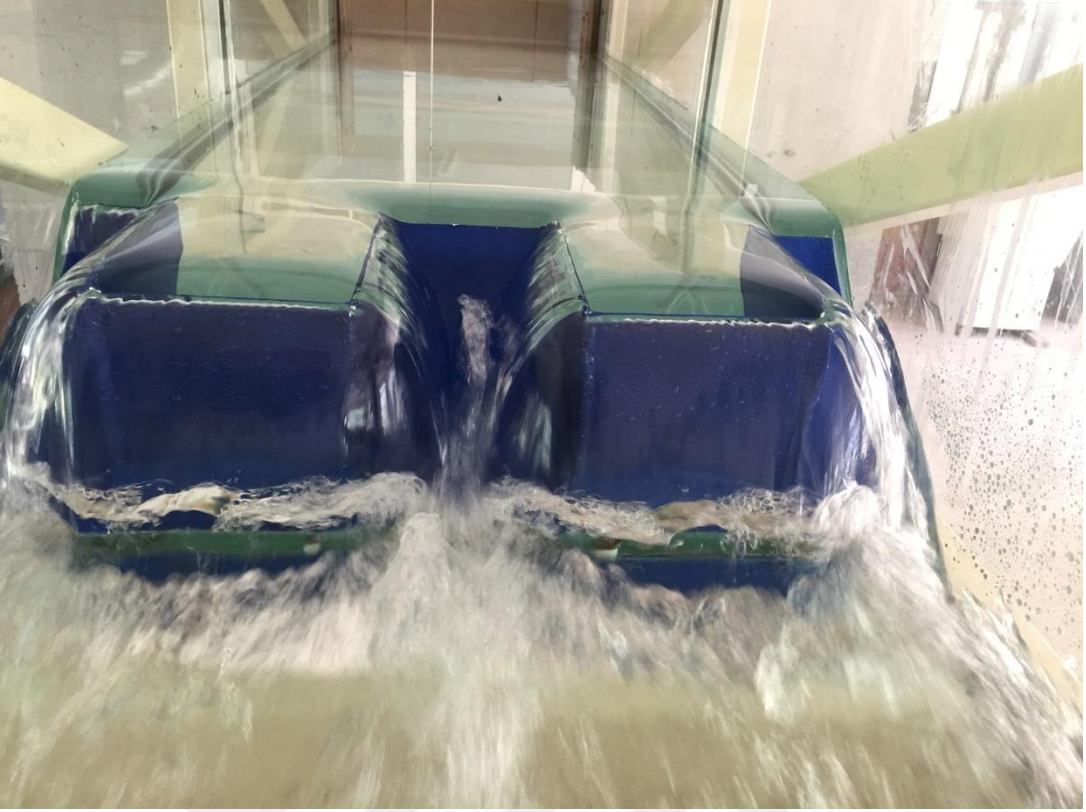
Şekil 3.39 $P=20$ cm keskin kenarlı savak 3D modeli ve açık kanala yerleştirilmesi



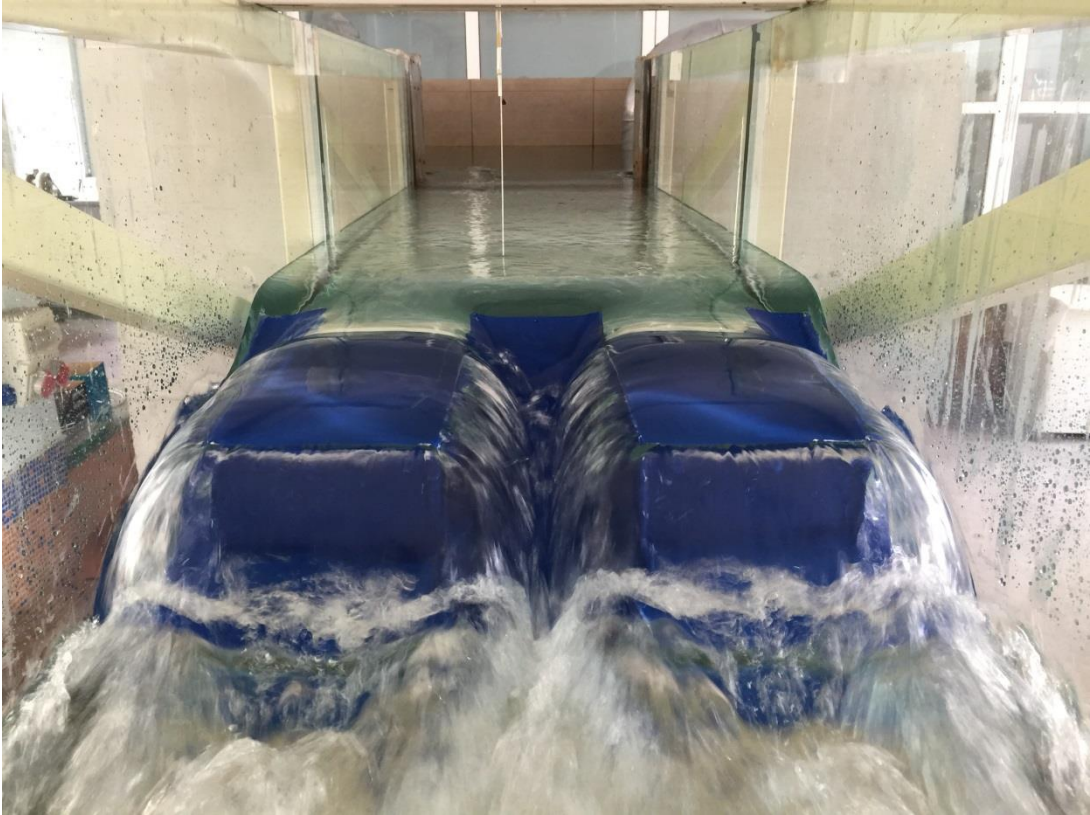
Şekil 3.40. Model 1’de $Q=25.45$ l/s debide oluşan akım



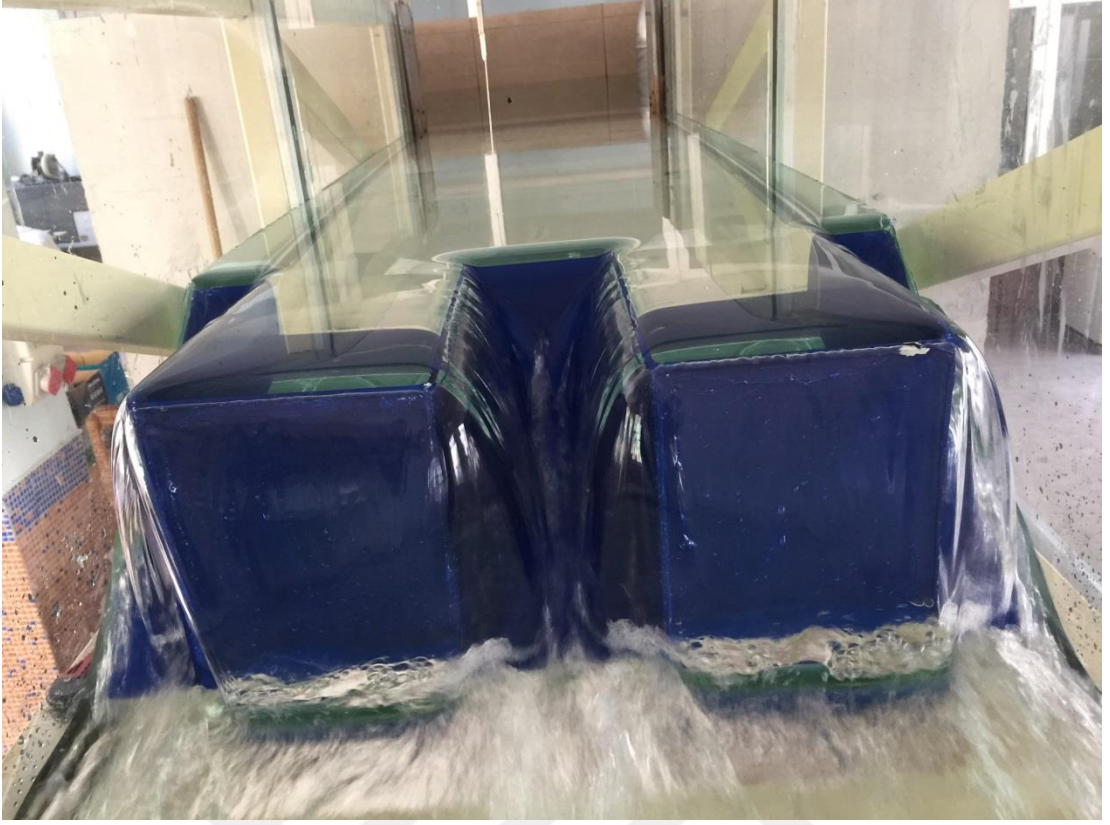
Şekil 3.41 Model 2’de $Q=5.53$ l/s debide oluşan akım



Şekil 3.42 Model 3'te $Q=10.98$ l/s debide oluşan akım



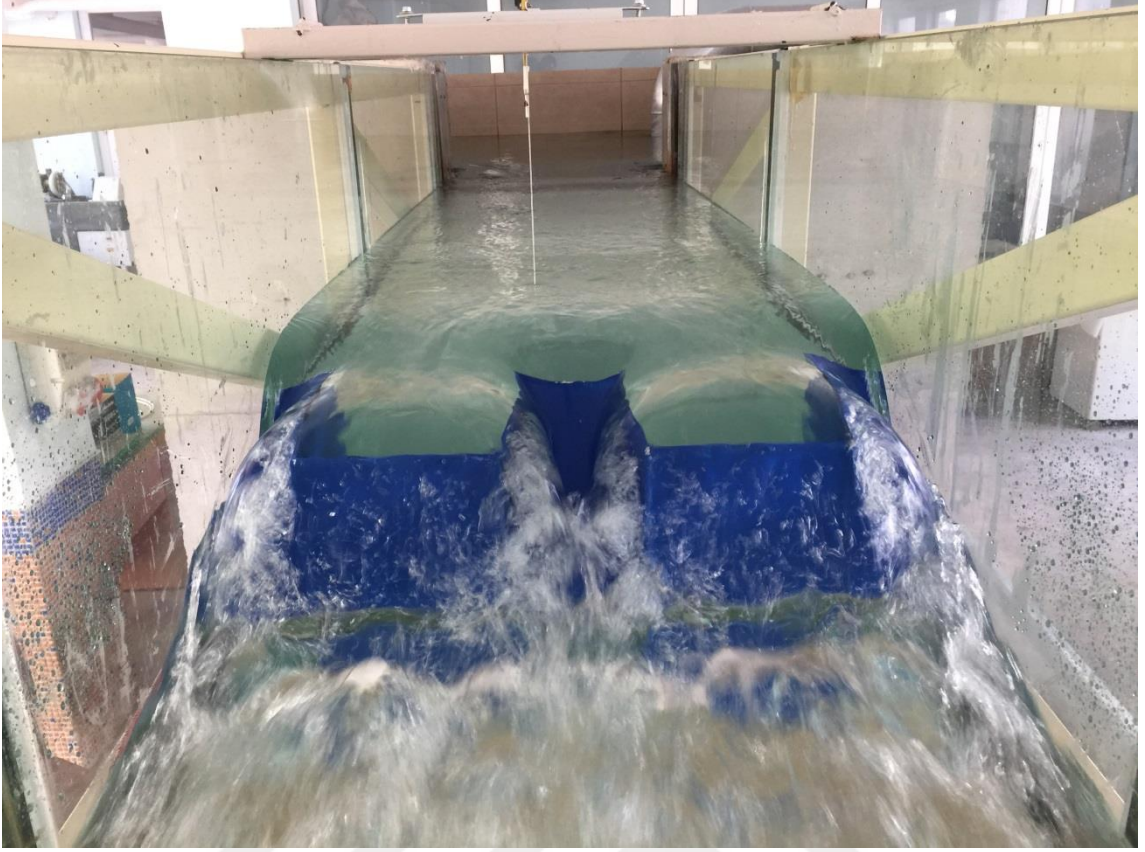
Şekil 3.43 Model 4'te $Q=31.11$ l/s debide oluşan akım



Şekil 3.44 Model 5'te $Q=6.52$ l/s debide oluşan akım



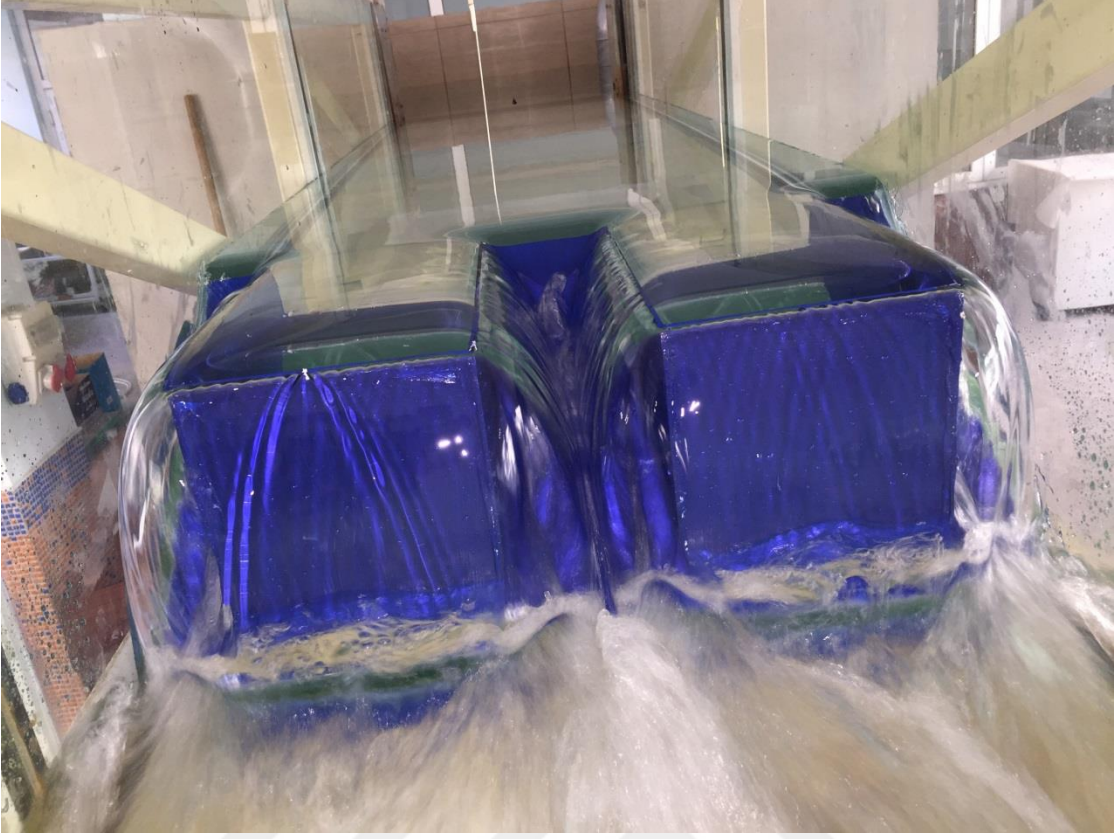
Şekil 3.45 Model 6'da $Q=25.82$ l/s debide oluşan akım



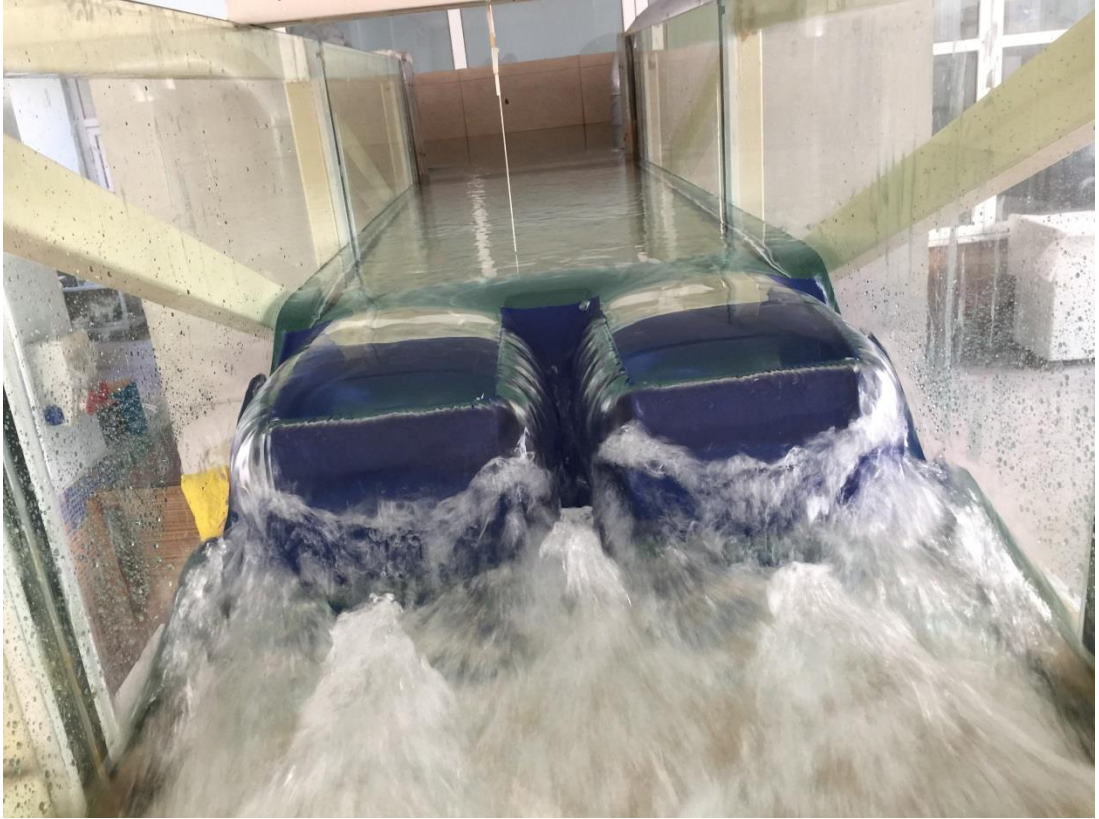
Şekil 3.46 Model 7’de $Q=45.62$ l/s debide oluşan akım



Şekil 3.47 Model 8’de $Q=30.03$ l/s debide oluşan akım



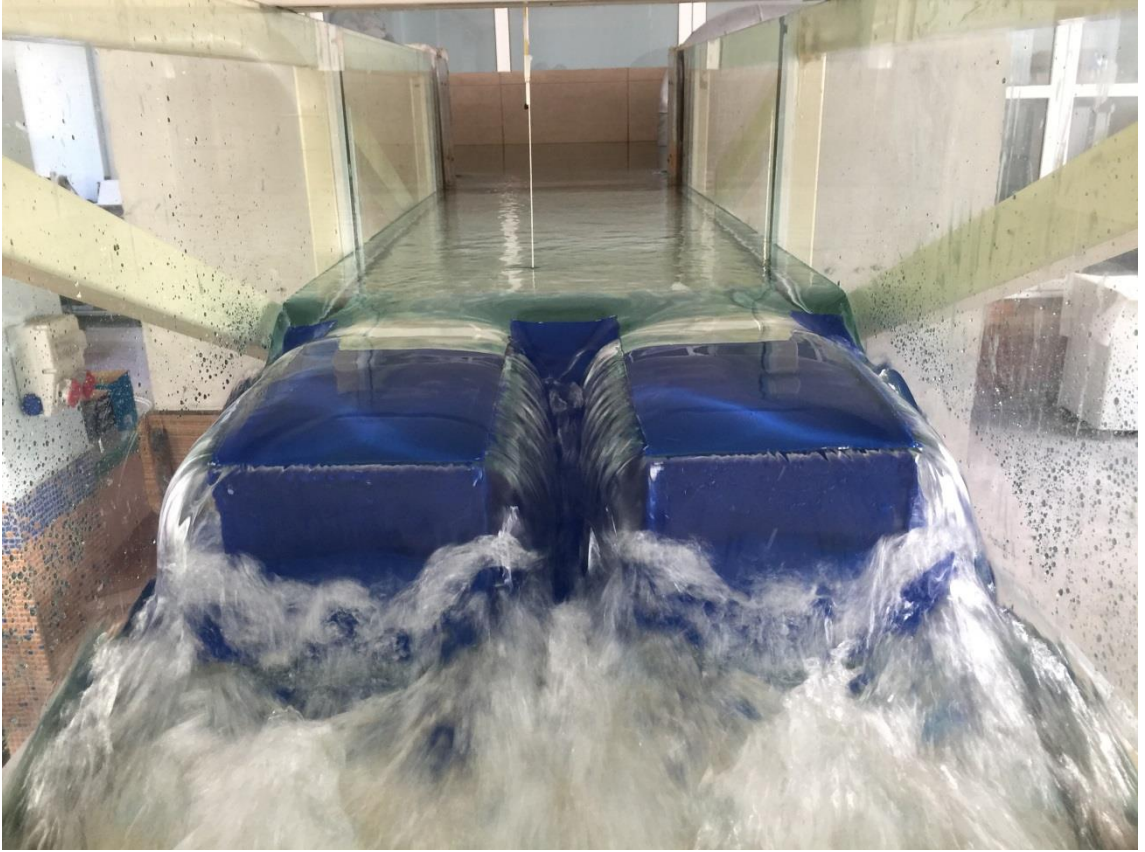
Şekil 3.48 Model 9'da $Q=11.22$ l/s debide oluşan akım



Şekil 3.49 Model 10'da $Q=24.72$ l/s debide oluşan akım



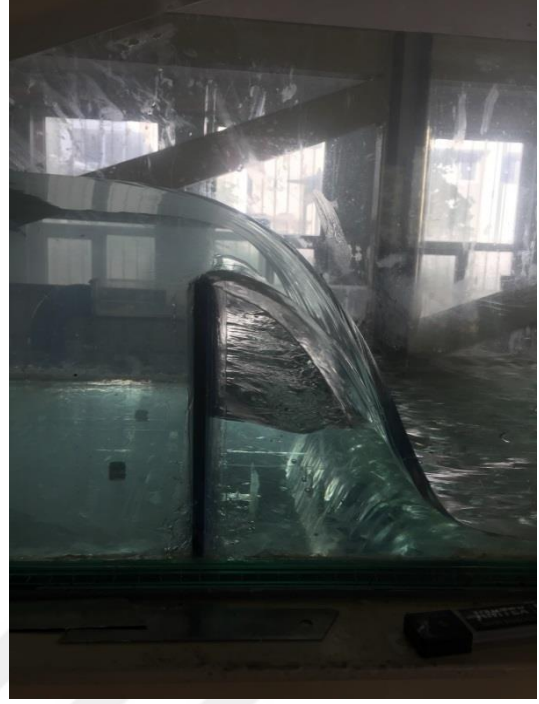
Şekil 3.50 Model 11’de $Q=20.39$ l/s debide oluşan akım



Şekil 3.51 Model 12’de $Q=24.76$ l/s a debide oluşan akım



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.52 $P=15$ cm'lik savakta (a) $Q=5.04$ l/s, (b) $Q=14.36$ l/s, (c) $Q=20.07$ l/s, (d) $Q=40.22$ l/s debilerinde oluşan akımlar



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.53 $P=20$ cm'lik savakta (a) $Q=2.23$ l/s, (b) $Q=10.12$ l/s, (c) $Q=24.98$ l/s, (d) $Q=40.97$ l/s debilerinde oluşan akımlar

3.3. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) veya İngilizce adı ile *Computational Fluid Dynamics* (CFD), akışkanlar mekaniğinin bir alt dalı olup, akışkan/akış ile ilgili problemlerin daha iyi tayin edilebilmesi, ortamdaki akışın etkilerinin ve sonuçlarının daha iyi bir biçimde saptanabilmesi, yorumlanabilmesi amacıyla teorik ve nümerik yöntemleri baz alarak bilgisayar ortamında yapılan hesaplama yöntemlerine denmektedir. HAD ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde nümerik ilk örnek olarak Lewis Fry Richardson tarafından 1922’de yapılan hava tahmin sistemi gösterilebilir (Aksoy, 2019).

HAD (CFD), uzun süreçler ve detaylı akışkanlar mekaniği problemlerinin bilgisayar ortamında büyük matrisler altında denklemler oluşturularak çözümlene işlemidir. Sonlu farklar, sonlu elemanlar, sonlu hacimler gibi metotlar kullanılarak yapılan çözümler ile karmaşık ve uzun soluklu problemlerin bilgisayar performansına bağlı olarak hızlı ve etkili olarak çözülmesi sağlanır. Son yıllarda bilgisayar teknolojilerinde yaşanan hızlı gelişim, HAD paket programlarının da gelişmesine katkıda bulunmuştur. Sıvı ve gaz akışkanlarının katı cisimler ile etkileşiminin sonuçlarını simüle etmektedir ve birçok grafik üzerinden sonuçları bizlere sunmaktadır. Günümüzde kullanılan HAD paket programlarından bazıları şunlardır:

- Fluent
- CFX
- Flow3D
- Flotran
- Flowmaster
- Star CFD
- Simflow
- Polyflow

Bir akışkanın hareketini doğru saptayabilmek için HAD içeriğinde yer alan nümerik çözümler, sonlu elemanlar, sonlu hacimler, sonlu farklar gibi çeşitli yöntemler bulundurmaktadır. Bu nümerik çözümler ile akışkanın hareketine ait karmaşık ve zor formda bulunan denklemler ayrıklaştırılarak çözüme gidilmektedir. Buradaki ayrıklaştırma işlemi, probleme ait nümerik modelin küçük çözüm nokta, eleman veya

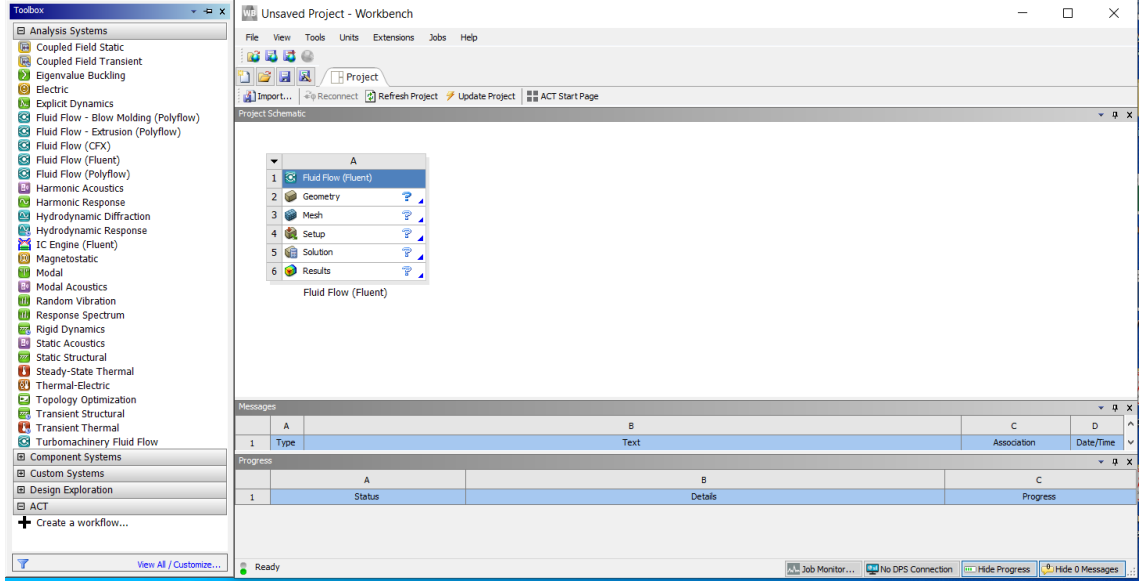
hacimler şeklinde parçalanarak tanımlanmasıdır (Ferziger ve Peric, 1999; Hoffman ve Chiang, 2000).

Sonlu hacimler yöntemi, kısmi diferansiyel denklemleri enerji-kütle korunum prensiplerinden hareketle türetilerek ayrık cebirsel denklemlerine çevirerek çözmeyi sağlar. İşlem bölgesi sonlu hacimlere ayrıştırılarak küçük çözüm bölgeleri oluşturulur. Kısmi diferansiyel denklemler, her bir sonlu hacim bölgesi üzerine uygulanarak karmaşık problem ayrı ayrı cebirsel denklemlere dönüştürülür. Elde edilen bu cebirsel denklemler ile sonlu hacimlerin çözülmesi sağlanmaktadır (Moukalled ve ark., 2016).

HAD tabanlı yazılımlar ile modelleme çalışmaları genel çerçevede üç temel aşamadan oluşur. Bu aşamalar sırasıyla ön-işlem, çözüm ve son-işlem olarak adlandırılabilir (Filinte, 2006). Bu aşamalar sonucunda elde edilen veriler, deney çalışmalarının sonuçları ile kıyaslanarak doğrulukları araştırılır. Söz konusu üç temel aşama kapsamında yapılan çalışmalar aşağıda belirtilmiştir.

1. **Ön-işlem:** Üzerinde çalışma yapılan modele ait geometrinin oluşturulması, çözüm bölgesine ait ağ yapısının oluşturulması, sınır şartlarının belirlenmesi gibi işlemleri kapsayan aşamadır.
2. **Çözüm:** Oluşturulan modele uygun çözüm yöntemi ile hesaplamaların yapıldığı aşamadır.
3. **Son-işlem:** Çözüm tamamlandıktan sonra elde edilen sonuçların alınması ve değerlendirilmesidir (Yıldız, 2019).

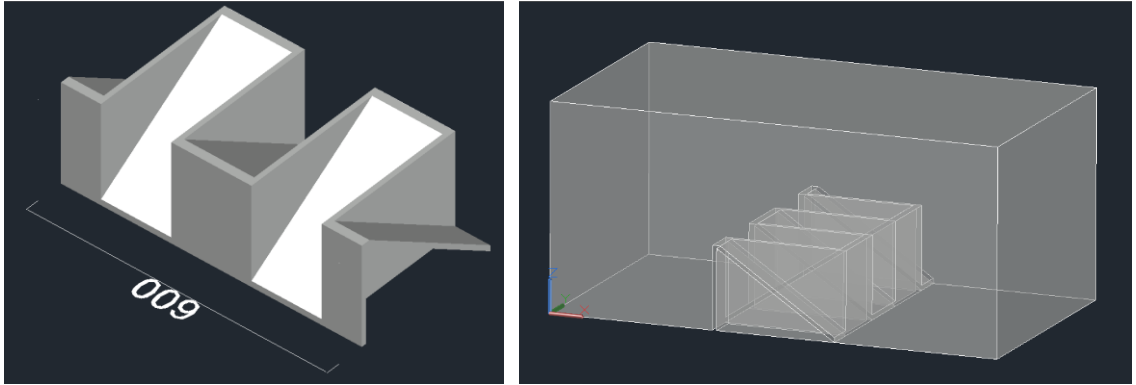
ANSYS-Fluent programında analiz yapılacak modelin sırasıyla: geometrisi oluşturulur, uygun çözüm ağlarına bölünür (mesh), sınır koşulları belirlenerek HAD tabanında problemimiz çözülür (Şekil 3.54).



Şekil 3.54 ANSYS-Fluent programı arayüzü

3.3.1. Geometrik modelin oluşturulması

Çalışmada kullanılacak olan tüm modellerin öncelikle AutoCAD programında 3D modelleri oluşturulmuş (Şekil 3.55 soldaki resim), daha sonra laboratuvarındaki açık kanala uygun bir dikdörtgen prizma model oluşturularak deneylerde ve analizlerde kullanacağımız savak modeli kanalın içine yerleştirilmiştir (Şekil 3.55 sağdaki resim).

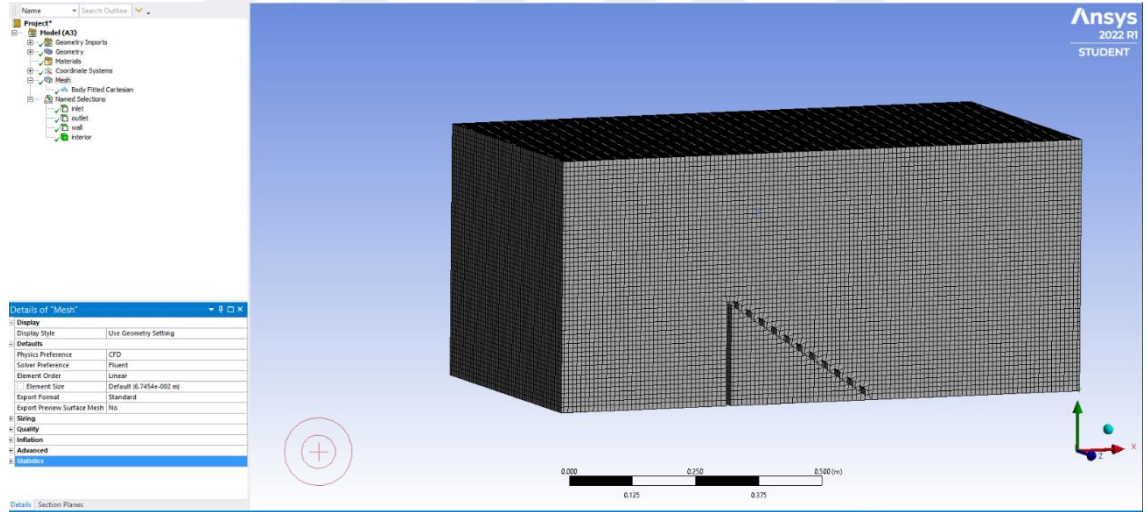


Şekil 3.55 AutoCAD programında 3D modellerin oluşturulması

3.3.2. Hesap ağlarının (meshlerin) oluşturulması

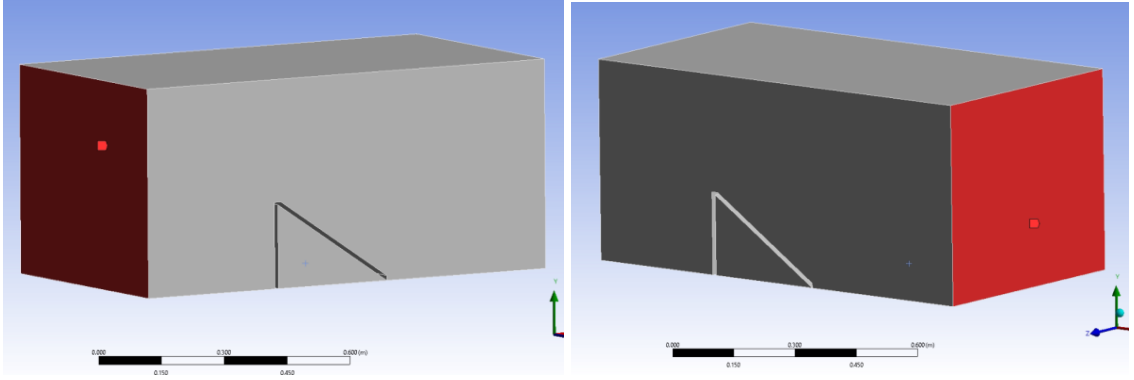
Kanal ve savak geometrisinin tamamlanmasından sonra *Fluid Flow*'da mesh sekmesi kullanılarak oluşturulan geometri çok küçük hücrelere (mesh) bölünür. Matematiksel hesaplamalar mesh ile oluşturulan her bir hücre için ayrı ayrı yapılır ve hesaplamalar sonucunda elde edilen sonuçlar bütün geometri alanını kapsayacak şekilde çözüm ortaya konulur.

Sayısal problemlerin çözümünde doğru sonuçlara ulaşabilmek için mesh boyutlarının ve mesh tipinin uygun bir şekilde oluşturulması ve tanımlanması gerekmektedir. Uygun oluşturulmayan meshlerde hesaplama ağının çözümünde yanıltıcı sonuçlar elde edilmektedir. Oluşturulan meshler Şekil 3.56'da gösterilmiştir. Yapılan analizlerde mesh boyutlarının küçülmesi ile çözümlerin doğruluğu artmakta olup modelin analiz süresi uzamaktadır. Bu sebeple mesh modellemesi ideal oranlarda ayarlanmalıdır. Bu çalışmada 9 mm boyutunda kartezyen mesh modeli kullanılmıştır.

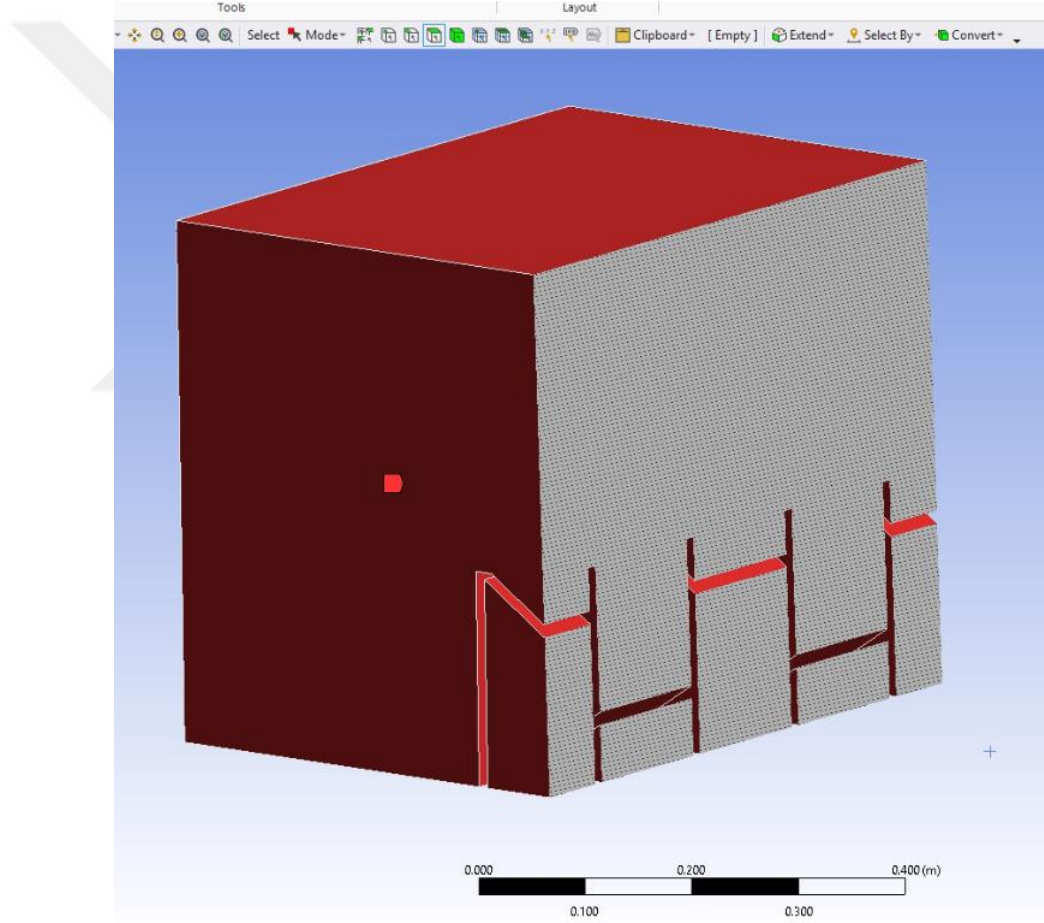


Şekil 3.56 Kanal geometrisinin mesh'lere ayrılmış hali

İdeal ölçülerde meshler ayarlandıktan sonra sınır şartlarını oluşturmak için *Create Named Selection (N)* komutu ile akışın giriş yapacağı yani memba kısmı (*inlet*), çıkış yapacağı yani mansap kısmı (*outlet*), modelin alt, üst ve yan kenarları ve sistemde suyun temas edeceği yüzeyler (*wall*) ve hesaplama yapılacak iç akış bölgesi (*interior*) isimlendirilir. Bu isimlendirmeler sırasıyla Şekil 3.57 ve 3.58'de gösterilmiştir.



Şekil 3.57 Kanalin giriş kısmı (inlet) ve çıkış kısmı (outlet)

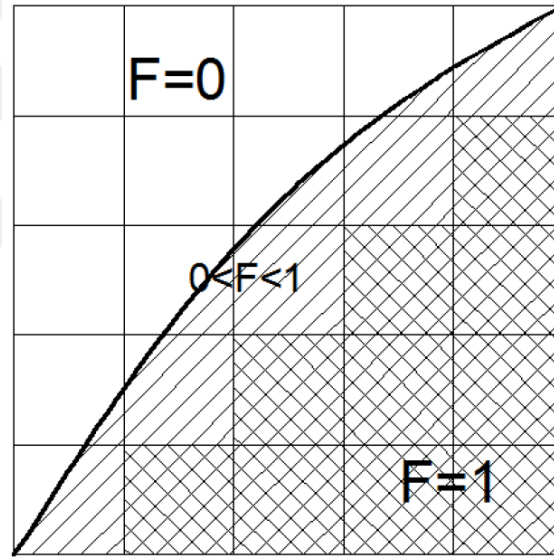


Şekil 3.58 Kanalda duvar (wall) olarak tanımlanan yüzeyler ve kanalın iç kesiti

3.3.3. Sınır şartlarının tanımlanması

3.3.3.1. Akışkan hacmi yöntemi (VOF)

Su ve hava gibi birbirine karışmayan akışkanlar arasındaki ara kesit yüzeyin şekli ve oluşumu, sabit bir Eulerian ağına uygulanabilen akışkan hacmi yöntemi kullanılarak incelenebilmektedir (Hirt ve Nichols,1981). VOF yöntemi ile analizi yapılacak hücrelerin boş, kısmen veya tamamen suyla dolu olduğu belirlenir. Bu yöntem ile hesaplama alanı içerisinde hacimsel doluluk oranını gösteren bir akışkan hacmi (F) tanımlanır. Hesaplama alanı içerisinde bir hücre tamamen su ile doluyorsa $F=1$ değerini, tamamen boş yani hava ile doluyorsa $F=0$ değerini ve kısmen dolu ise hücrede kapladığı yüzde değeri alınır. Şekil 3.59’da hacimsel doluluk oranlarını gösteren F değerleri gösterilmektedir.



Şekil 3.59 Akışkan hacminin ağ üzerindeki dağılımı (İlkentapar, 2015)

Hesaplama alanındaki serbest yüzey, bir eğri yüzeye sahip ise eğriyi çevreleyen küçük hücreler ile oluşturulan bir algoritma sayesinde buradaki bölgenin yeri ve eğimi bulunabilmektedir. VOF yöntemi ile bir modelin serbest yüzeyinin izlenmesi 3 kısımdan oluşmaktadır. İlk olarak serbest yüzeyin yeri bulunur. Daha sonra bulunan bu yüzey, su ve hava arasında keskin bir arakesit olacak şekilde belirlenir. Son olarak bu arakesite sınır şartları uygulanır. Arakesit üzerinde sıfır kayma gerilmesi ve sabit basınç sınır koşulları uygulanmaktadır. Akışkan hacmi fonksiyonu F 'nin değişimi (3.27) diferansiyel denklemi ile hesaplanabilmektedir (İlkentapar, 2015).

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \quad (3.27)$$

Bu denklemde F değeri akışkan ile birlikte hareket etmektedir.

3.3.3.2. Türbülans modelleri

Türbülans modelleme HAD programlarının en önemli öğelerindendir. Geçmişten günümüze kadar türbülanslı akışların çözümü için çok sayıda farklı model ortaya konmuş ve geliştirilmiştir. Bunun sebebi, yapılan bütün teorik çalışmalara rağmen türbülanslı akışları her koşul altında bire bir çözecek bir modelin geliştirilememiş olmasıdır. Türbülans durumu karmaşık bir durum olup bu durumu her zaman doğru bir şekilde ele almak ve doğru analiz yapmak çok zordur. Bu sebeple günümüze kadar geliştirilen türbülans modellerinin hepsinin artı ve eksi yönleri bulunmaktadır. Analizi yapılacak problemin, uygun bir türbülans modelinin belirlenmesi gereklidir. Türbülans modeli analiz sonucunu doğrudan etkileyeceğinden, türbülans seçimi doğru belirlenmezse sonuçların kesinliğinden bahsedilemez ve sonuçlarda ırsama söz konusu olur.

Eğer HAD programları kullanılacak ise bu programlardaki türbülans modellerinin kullandığı hesap yöntemlerinin hangi sınır şartlarına uygun olduğu bilinmelidir. Aynı zamanda problem kurulurken gerektiğinde problemle türbülans modelinin uyumu gözlemlenmelidir.

Türbülans modelleme yöntemleri göz önüne alındığında üç ana başlık öne çıkmaktadır. Bunlar direk numerik benzetim (DNS), ağırlık ortalamalı NavierStokes denklemleri, bu denklemleri baz alan yöntemler ve büyük girdap benzetimi yöntemidir.

Türbülansın davranışını ön gören, çalkantı enerjilerini ve frekansı kullanan ilk iki denklemlilik model Kolmogorov tarafından 1942 yılında oluşturulmuştur (Pomerantz, 2004). Bu tarihten sonra iki denklemlilik modeller giderek türbülans modelleme konusunda yaygınlaşmışlardır. Bunun sebepleri arasında problemlere uygun model seçildiğinde verdikleri sonuçların gerçekçi olması ve yöntemlerin hesap maliyetlerinin düşük olması gösterilmektedir (Aksoy, 2019).

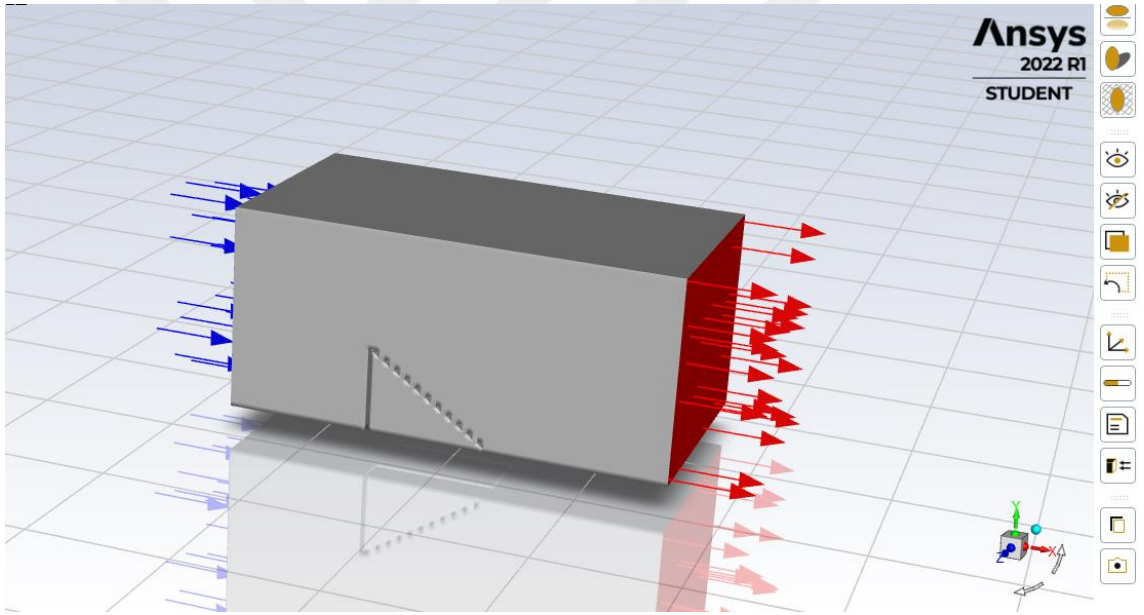
k-ε ve k-ω modelleri günümüzde en çok kullanılan iki farklı türbülans modelidir. Bu türbülans modelleri de kendi içlerinde; gerçekleştirilebilir k-ε, standart k-ε ve RNG

k- ϵ ; standart k- ω , Anahtar k- ω ve SST k- ω şeklinde kendi alt türbülans modellerine ayrılmaktadır.

İki denklemlili türbülans modelleri, iki ayrı taşıma denklemini çözerek, uzunluk ve zaman ölçeklerinin belirlenmesini sağlarlar.

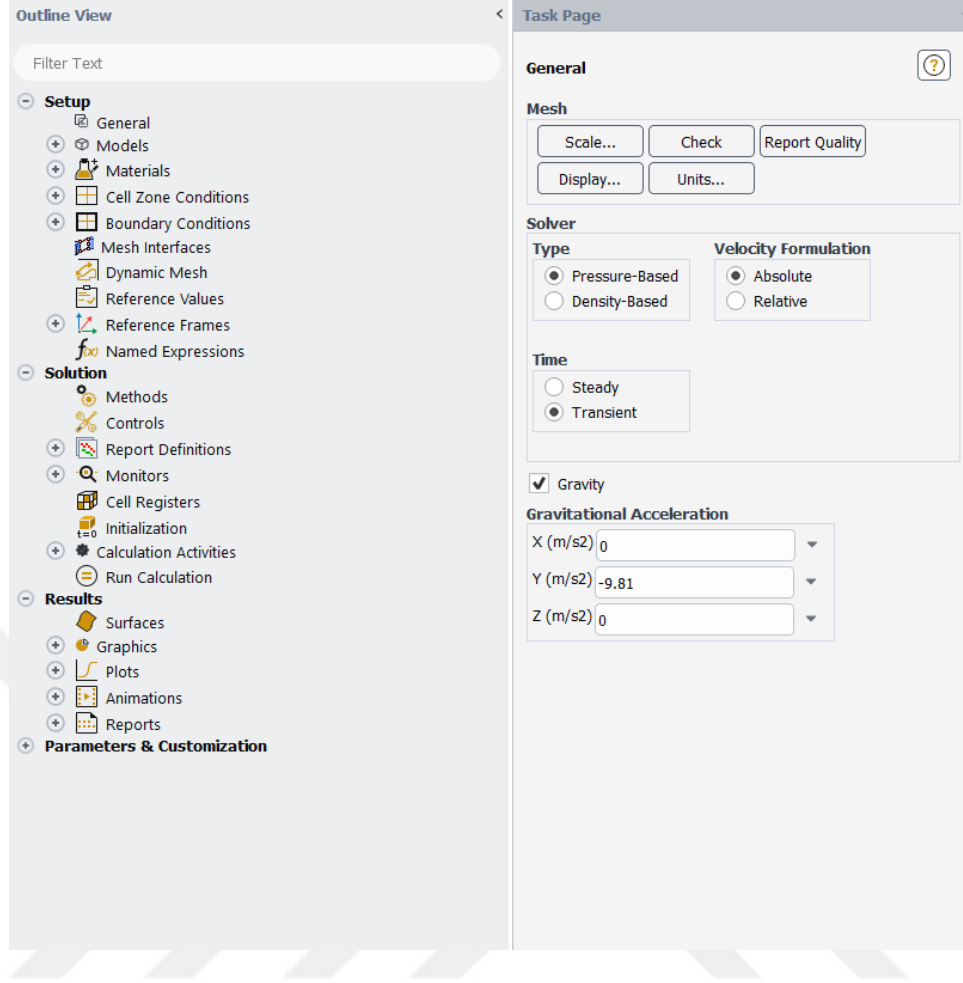
3.4. Fluent Programında Modelin Tanımlanması ve Analizi

Model üzerindeki mesh atama ve sınır bölgelerini atama işlemleri tamamlandıktan sonra Fluid Flow modülünün *Setup* sekmesine geçilir. Şekil 3.60’da Fluent ana ekranında ise geometry ve mesh sekmelerinde oluşturduğumuz model gözükmektedir. Burada mavi oklar inlet olarak tanımlanan modele giren su akışını, kırmızı oklar outlet olarak tanımlanan modelden çıkan su akışını göstermektedir.



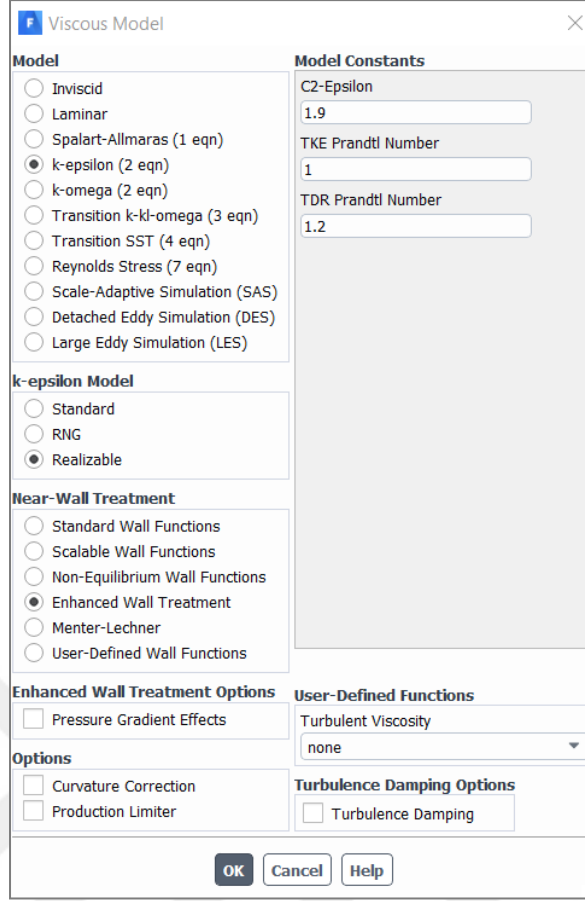
Şekil 3.60 Fluent’te 3D model inlet (mavi) ve outlet (kırmızı) gösterimi

Başlangıç ayarlarının tamamlanmasından sonra Şekil 3.61’de görülen *Outline view* ve *taskpage* penceresinde akış analizi ile ilgili veri tanımlamaları yapılmaktadır. *General* sekmesinde akış tipi olarak *pressure-based*, zamana bağlı olarak çözüm yapması için *transient* seçilmiştir ve sisteme yer çekimi ivmesinin yönü ve değeri “-9.81” girilmiştir.



Şekil 3.61 Akış analizinde veri değerlerinin giriş penceresi

Materials kısmında havaya (air) ek olarak su (water) tanımlanmıştır. Bu çalışmada iki farklı akışkan (su ve hava) analizde yer aldığı için *Volume of Fluid* (VOF) modeli seçilmiştir.. *Phases interaction* ile de suyun yüzey gerilim katsayısı “0.072” değeri girilmiştir. Türbülans modeli olarak ise k-ε Realizable modeli seçilmiştir (Şekil 3.62).



Şekil 3.62 Türbülans modelinin seçilmesi

Model, malzeme ve türbülans modeli ayarlandıktan sonra *Boundary Conditions* ile debinin giriş ve çıkış sınır şartları ayarlanmıştır. Modelin giriş kısmında belirli bir su akışı (debi) sağlamak için *Mass flow inlet* sınır koşulu kullanılmış ve bu çalışmada kullanılacak olan debi (kg/s) tanımlanmıştır. Modelin çıkış kısmında ise açık hava basıncı tanımlanmış olup böylelikle sisteme giren akışın serbest bir şekilde mansaplanması sağlanmıştır. Analiz modeli olarak ise PISO seçilmiştir. Modelimizde başlangıçta su olmayıp hava ile akışa başlaması için *Initialization* sekmesinde yer alan *air volume fraction* değeri “1” olarak ayarlanmıştır (Yıldız, 2022).

Fluent programında, analiz öncesi son olarak iterasyon sayısı (*Number of time steps*) ve iterasyonlarda zaman adım boyutu saniye olarak (*Time step size*) Şekil 3.63’te gösterilen *Run Calculation* kısmına deneme yanılma yoluyla veya deneysel çalışmalara uygun olacak şekilde girilebilmektedir. İterasyon sayısı ve iterasyonlardaki zaman adım boyutuna girilen değerlerin çarpılması bize analiz sonucunun ne kadarlık bir sürede gerçekleşeceğini göstermektedir.

Bu çalışmada model analizi için 5000-10000 iterasyon değeri ve zaman adımı için maksimum 20 yineleme yapılmıştır ayrıca sabit zaman adımı olarak da $\Delta t=0.005$ ve 0.001 sn olarak belirlenmiştir.

Task Page

Run Calculation

Check Case... Preview Mesh Motion...

Time Advancement

Type: Fixed Method: User-Specified

Parameters

Number of Time Steps: 10000 Time Step Size [s]: 0.005

Max Iterations/Time Step: 20 Reporting Interval: 1

Profile Update Interval: 1

Options

☐ Extrapolate Variables

☐ Report Simulation Status

Solution Processing

Statistics

☐ Data Sampling for Time Statistics

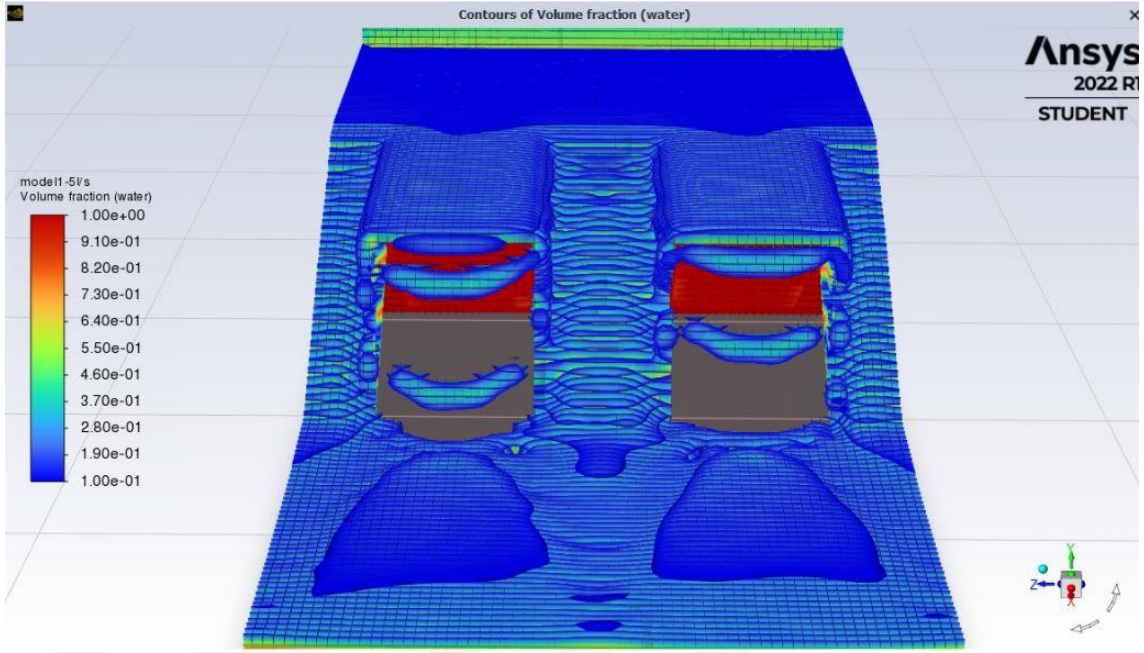
Data File Quantities...

Solution Advancement

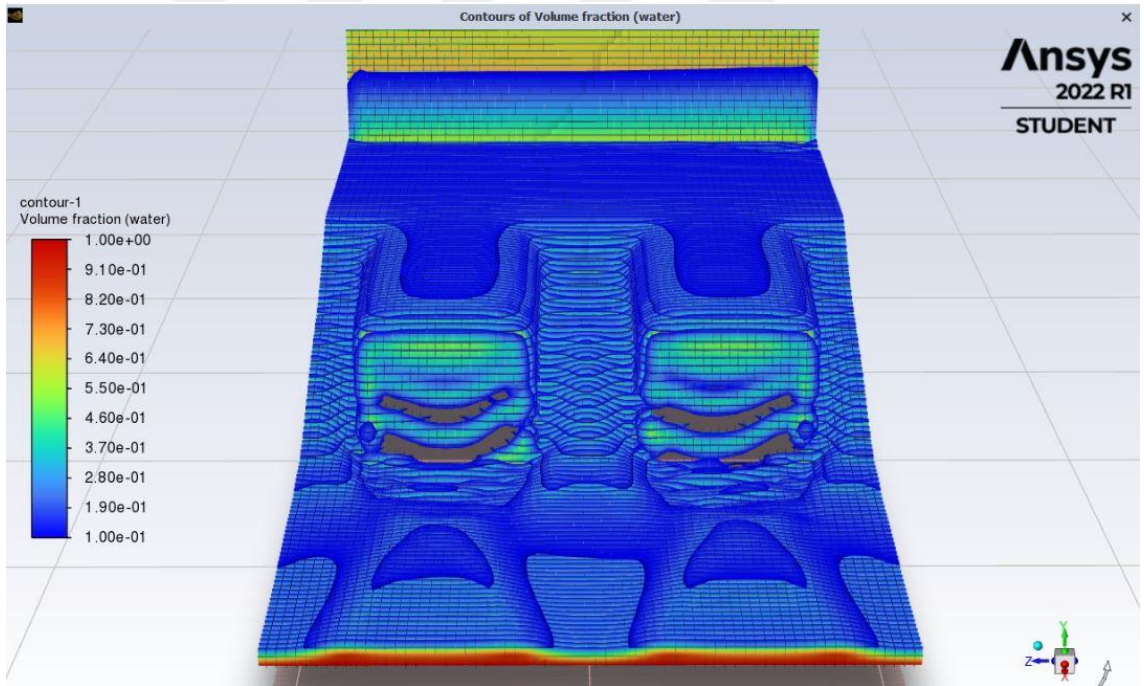
Calculate

Şekil 3.63 Run Calculation değerlerinin gösterilmesi

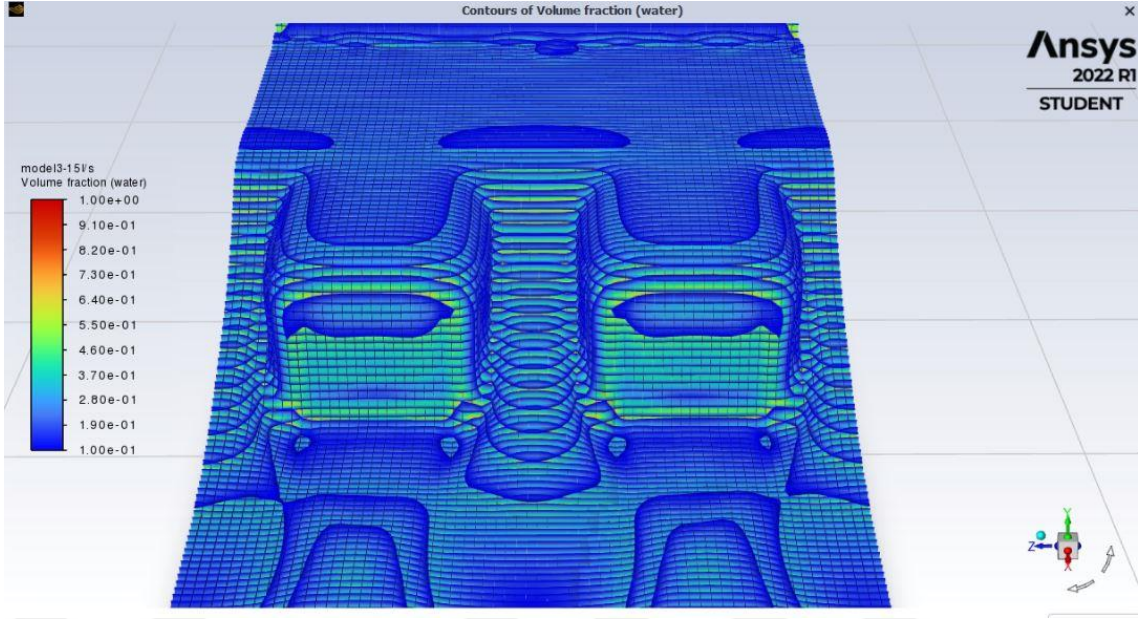
Analizler, *Run calculation* sekmesi ile seçilen tüm parametrelere (denklemler türü, derecesi, türbülans modeli ve alt modelleri vb.) göre çalışmaktadır ve hesaplanmaktadır. Analiz sonucuna göre farklı debilerde her bir model için elde edilen akış şekilleri Şekil 3.64 - 3.74 arasında verilmiştir.



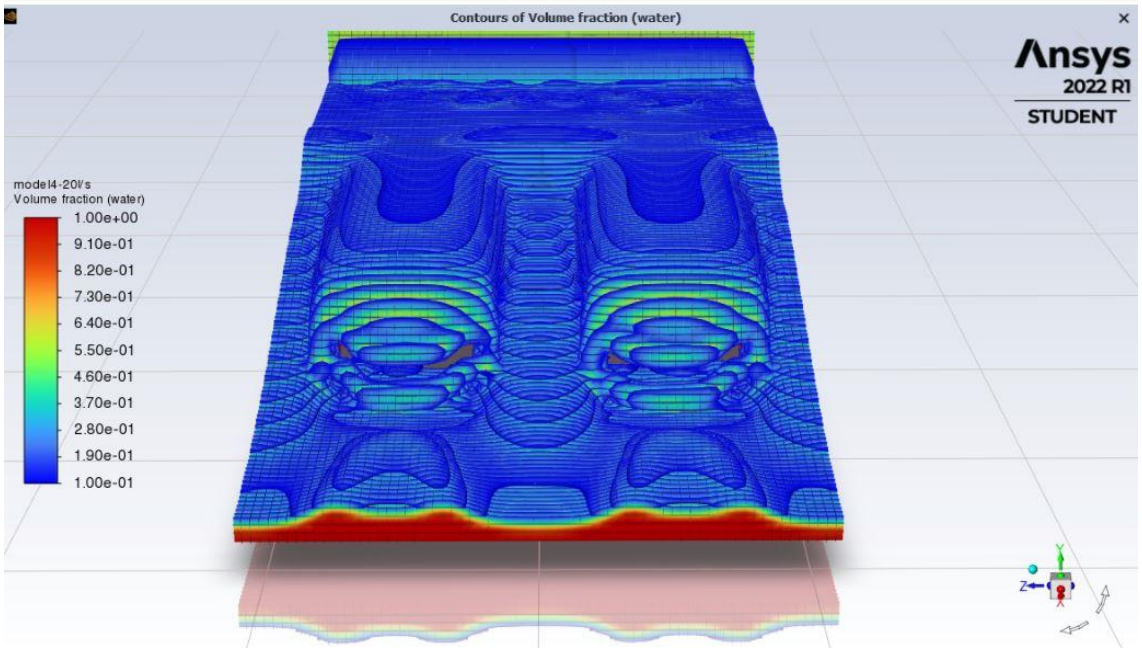
Şekil 3.64 Model 1'in analiz sonucu ($Q=5$ l/s)



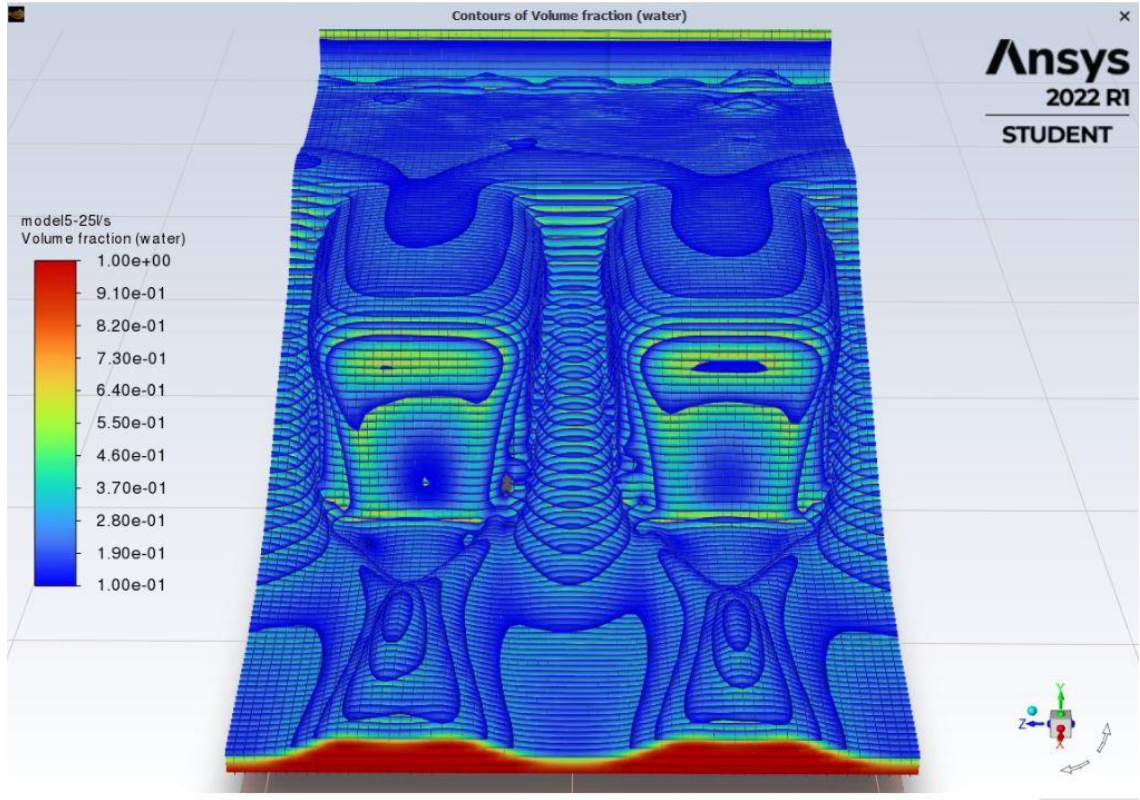
Şekil 3.65 Model 2'in analiz sonucu ($Q=10$ l/s)



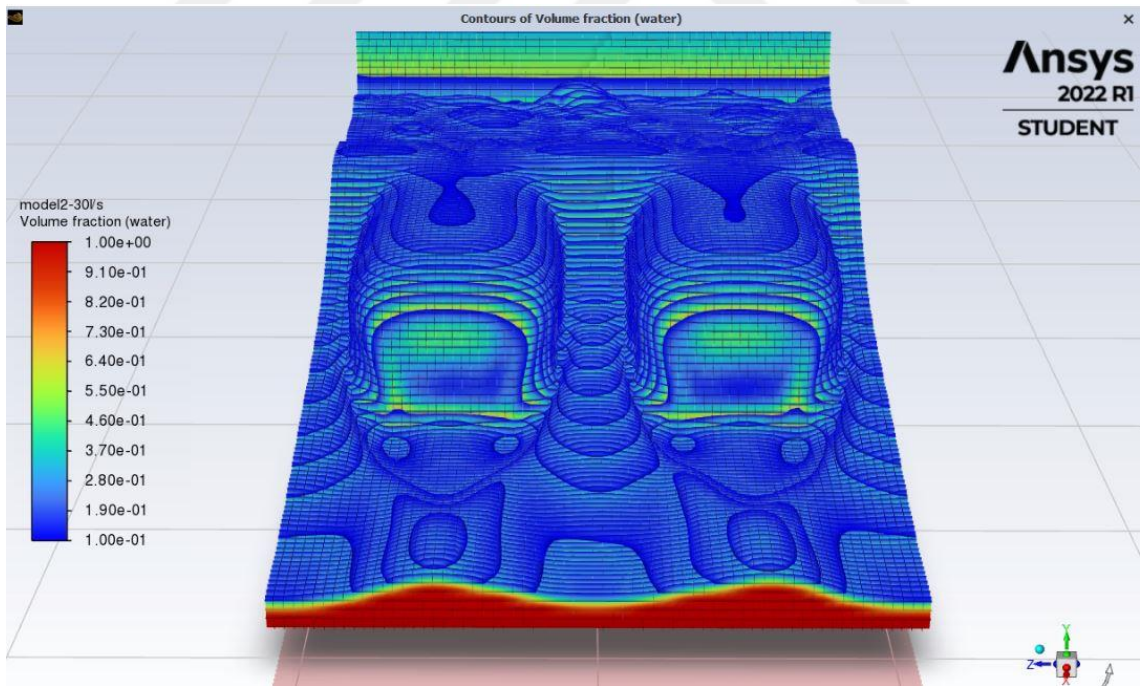
Şekil 3.66 Model 3'ün analiz sonucu ($Q=15$ l/s)



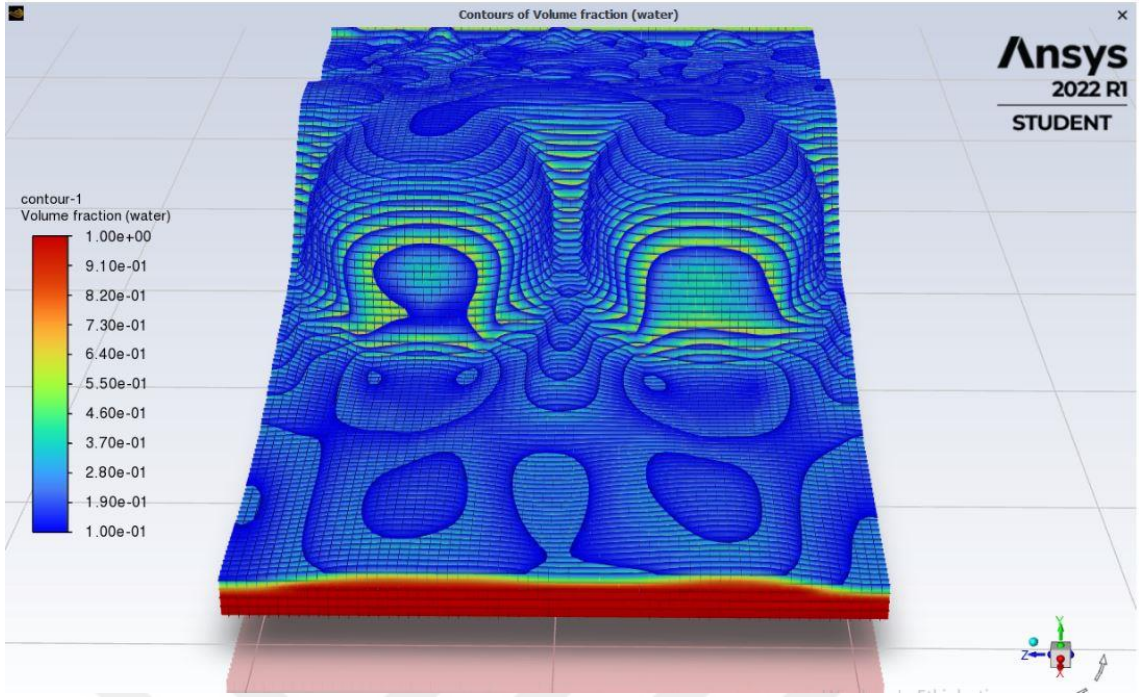
Şekil 3.67 Model 4'ün analiz sonucu ($Q=20$ l/s)



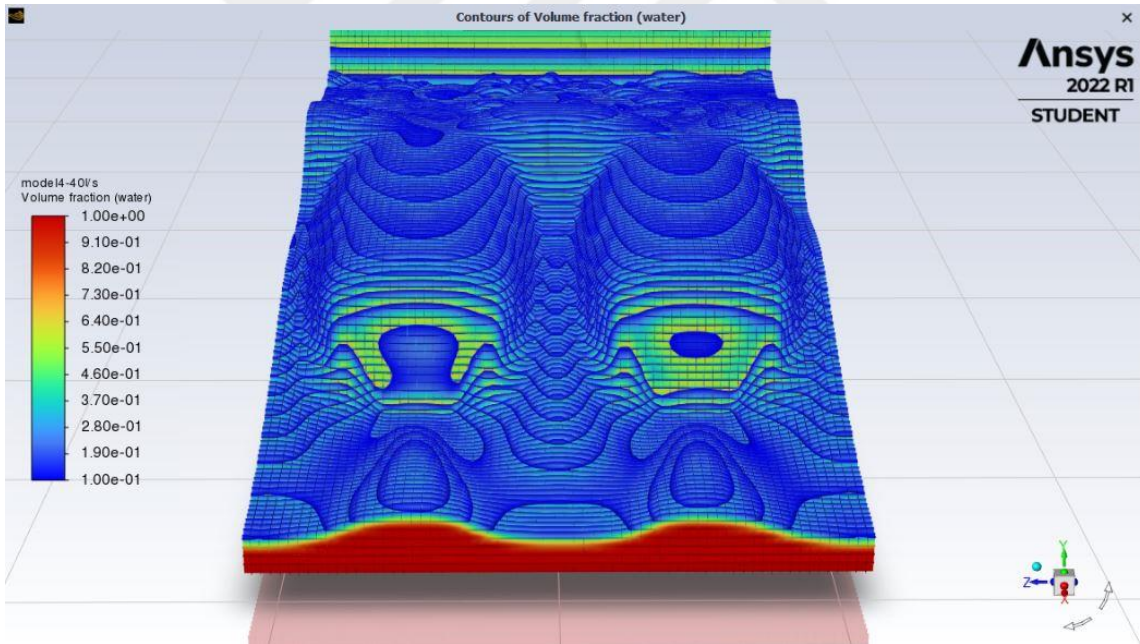
Şekil 3.68 Model 5'in analiz sonucu ($Q=25$ l/s)



Şekil 3.69 Model 6'nın analiz sonucu ($Q=30$ l/s)



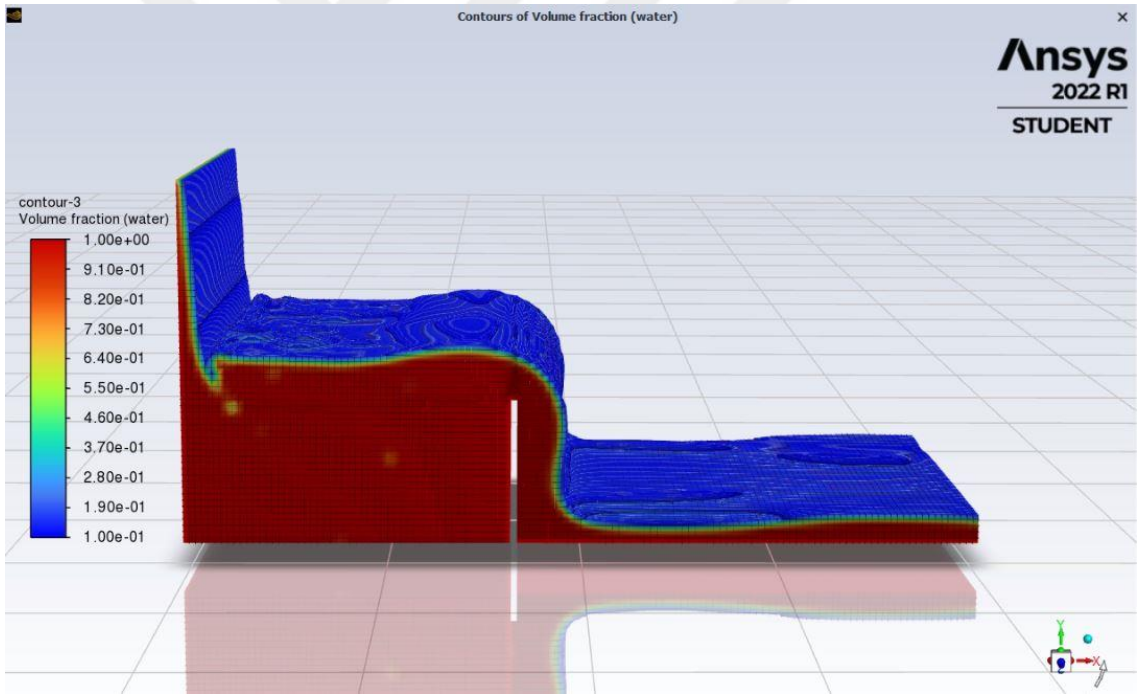
Şekil 3.70 Model 7'nin analiz sonucu ($Q=35$ l/s)



Şekil 3.71 Model 8'in analiz sonucu ($Q=40$ l/s)



Şekil 3.72 P=15 cm keskin kenarlı savak analiz sonucu ($Q=30$ l/s)



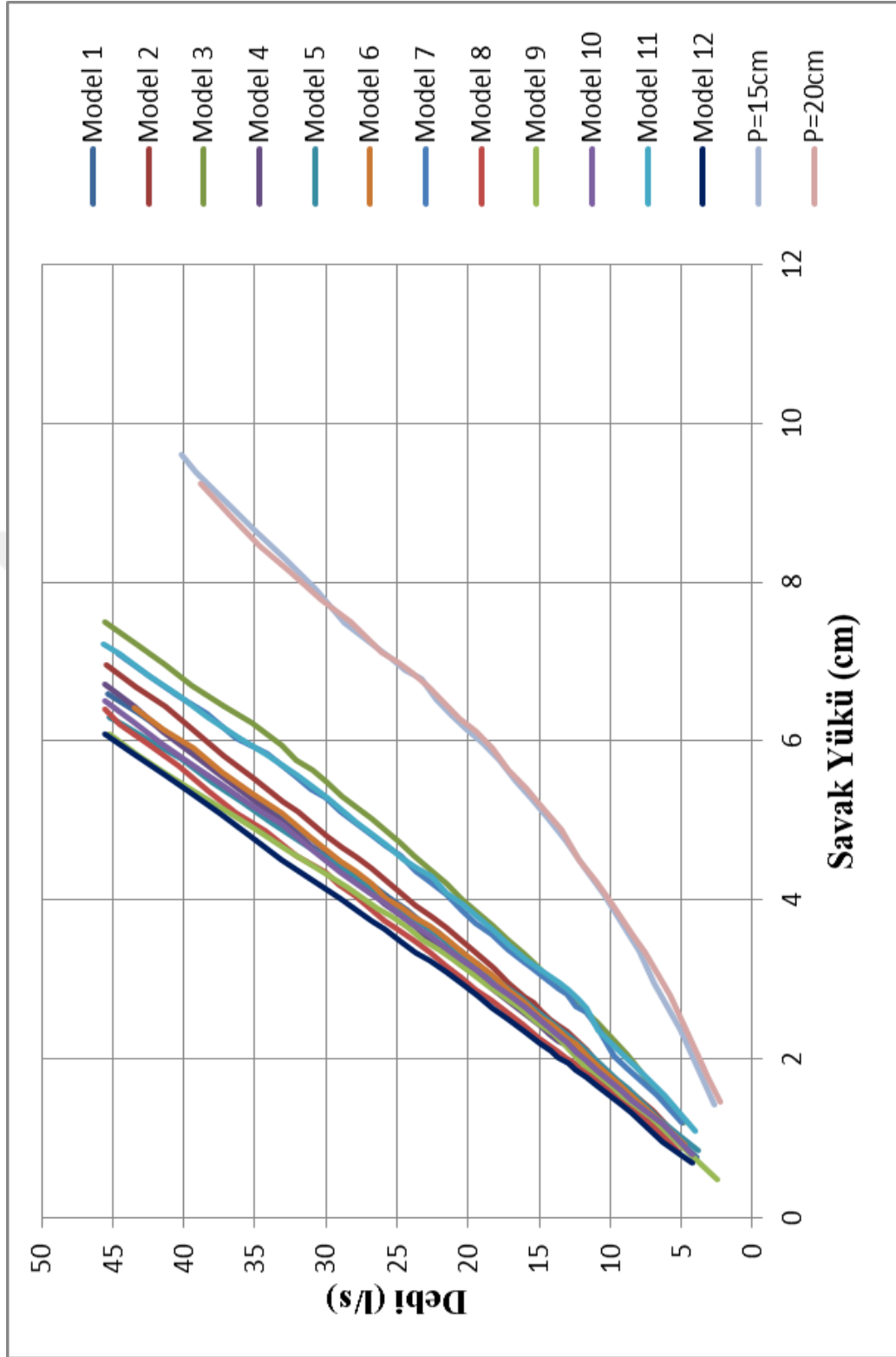
Şekil 3.73 P=20 cm keskin kenarlı savak analiz sonucu ($Q=30$ l/s)

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu tez çalışması kapsamında farklı geometrik parametrelerin (savak yüksekliği, savak genişliği, savak eğimi, tuş genişlikleri) D tipi piyano tuşu savaklar üzerindeki etkisi incelenmiştir. 12 farklı PKW ve 2 adet keskin kenarlı savak modeli oluşturulmuştur. Deneysel ve nümerik model çalışmaları 0-45 l/s debi aralığındaki akımlarda gerçekleştirilmiştir. Savak yüzeyinin 20 cm gerisinde ise savak yükü okumaları limnometre yardımı ile yapılmıştır. Deneysel modellerden elde edilen sonuçlar ile Fluent analiz sonuçlarından elde edilen değerler kıyaslanarak incelenmiştir. Bu bölümde, yapılan çalışmalar neticesinde elde edilen verilerin gösterilmesi ile bu verilerle oluşturulan grafiklerin birbirleriyle kıyaslanması suretiyle ulaşılan sonuçlar yer almaktadır.

4.1. Deneysel Modellerin Debi (Q) - Savak Yükü (H) Sonuçları

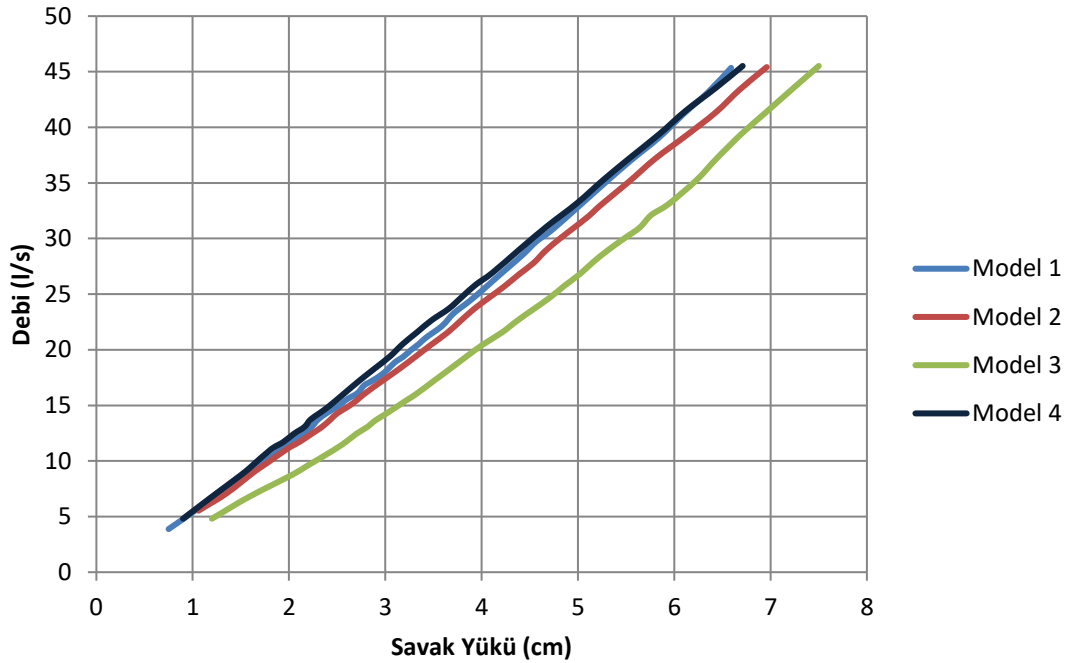
Bu tez kapsamındaki deneysel çalışmalar, Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarında yapılmıştır. Deneyler sırasında pompa frekans kutusu (Şekil 3.21) ile debi değerleri orantılı şekilde yükseltilerek ayarlanmıştır. Pompanın frekans değerleri sırayla arttırılarak farklı debiler altında geçen akım değerleri incelenmiş olup kanaldan geçen her bir debi için savak yüksekliği değerleri kaydedilmiştir. Deneysel çalışmalarda elde edilen debi-savak yükü değerleri EK1-7’de verilmiştir.



Şekil 4.1 Deneysel çalışmalarda ölçülen Q-H değerleri

4.1.1. $P_K=1.00$ için savak yükü - debi karşılaştırması

Laboratuvar ortamında yapılan deneysel çalışmalarda Model 1, 2, 3 ve 4 için elde edilen savak yükü değerleri Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Büyük debileri daha düşük savak yükü ile mansaba geçirmek deşarj verimi için en idealidir. Bu yüzden Şekil 4.2’deki grafik incelendiğinde bütün debi değerlerine karşılık en düşük savak yükü değerlerinin Model 4’e ait olduğu görülmektedir. Bu sonuçlara göre, bu model grubunda ($P_K=1.00$) en verimli savak Model 4 olarak belirlenmiştir. Modeller kendi aralarında incelediğimizde ise verimlilik Model 4 > Model 1 > Model 2 > Model 3 şeklinde elde edilmiştir.

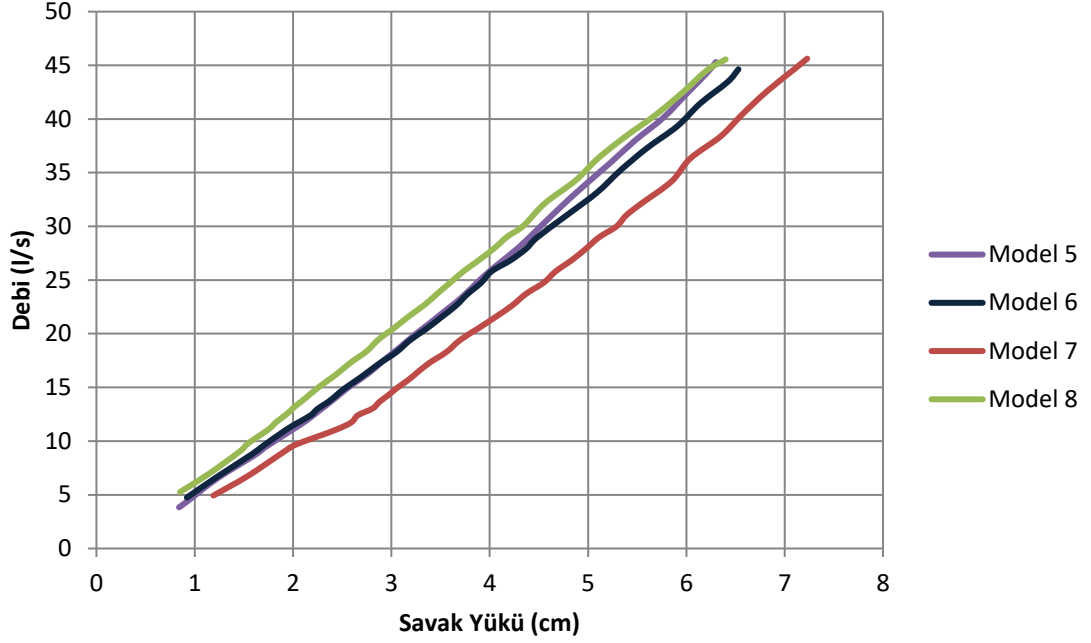


Şekil 4.2 $P_K=1$ savaklarda ölçülen Q-H değerleri

4.1.2. $P_K=1.25$ için savak yükü - debi karşılaştırması

Laboratuvar ortamında yapılan deneysel çalışmalarda Model 5, 6, 7 ve 8 için elde edilen savak yükü değerleri Şekil 4.3’te gösterilmiştir. Büyük debileri daha düşük savak yükü ile mansaba geçirmek deşarj verimi için en idealidir. Bu yüzden Şekil 4.3’teki grafik incelendiğinde bütün debi değerlerine karşılık en düşük savak yükü değerlerinin Model 8’e ait olduğu görülmektedir. Bundan dolayı bu model grubunda ($P_K=1.25$) en verimli

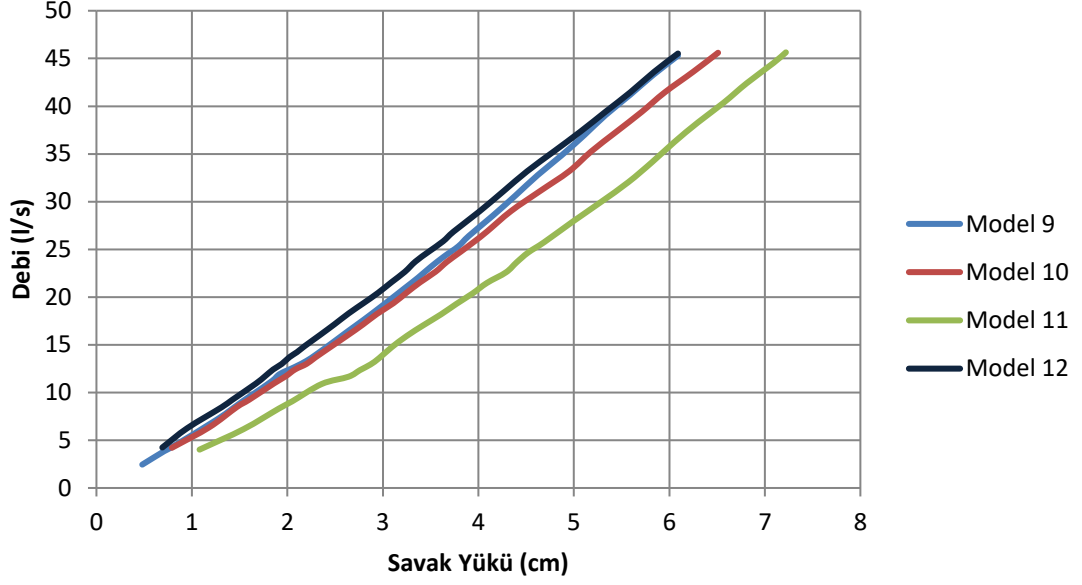
savak Model 8 olarak belirlenmiştir. Bu gruptaki modelleri kendi aralarında incelediğimizde ise verimlilik Model 8 > Model 5 > Model 6 > Model 7 şeklinde elde edilmiştir.



Şekil 4.3 $P_K=1.25$ savaklarda ölçülen Q-H değerleri

4.1.3. $P_K=1.50$ için savak yükü - debi karşılaştırması

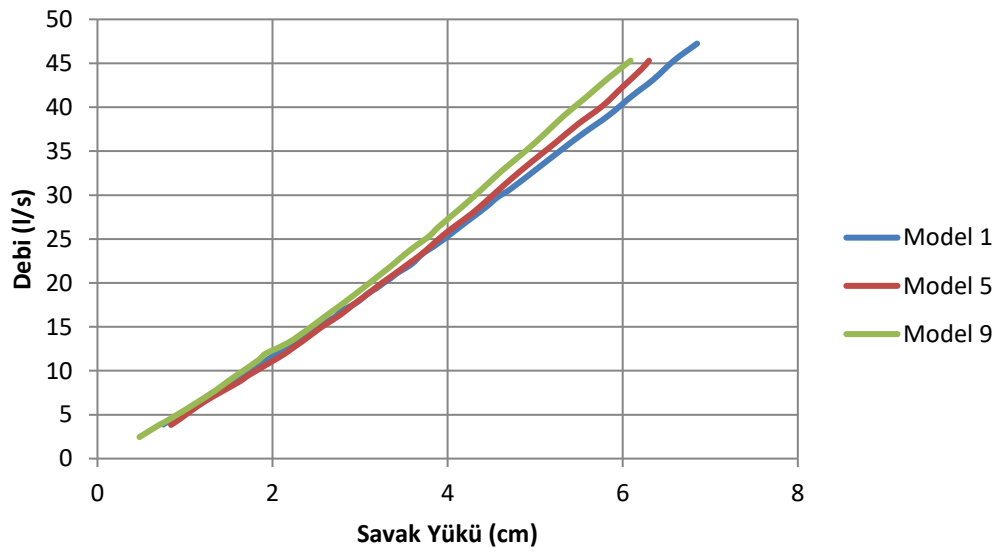
Laboratuvar ortamında yapılan deneysel çalışmalarda Model 9, 10, 11 ve 12 için elde edilen savak yükü değerleri Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Büyük debileri daha düşük savak yükü ile mansaba geçirmek deşarj verimi için en idealidir. Bu yüzden Şekil 4.4'teki grafik incelendiğinde bütün debi değerlerine karşılık en düşük savak yükü değerlerinin Model 12'ye ait olduğu görülmektedir. Bundan dolayı bu model grubunda ($P_K=1.50$) en verimli savak Model 12 olarak belirlenmiştir. Bu gruptaki modelleri kendi aralarında incelediğimizde ise verimlilik Model 12 > Model 9 > Model 10 > Model 11 şeklinde elde edilmiştir.



Şekil 4.4 $P_K=1.5$ savaklarda ölçülen Q-H değerleri

4.1.4. Tip 1 savak modellerinde savak yükü - debi karşılaştırması

$P=15$ cm yüksekliğinde, $L=30$ cm genişlikte sahip ve 3 farklı tuş genişliği için oluşturulan modellerden elde edilen ölçüm değerleri Şekil 4.5'te verilmiştir. Grafikteki değerleri incelediğimizde en verimli savak Model 9 olduğu görülmektedir. Bu model grubunda giriş tuşu genişliğinin (W_i) artması savak yükünü azaltmış, böylelikle daha verimli bir model elde edilmiştir.



Şekil 4.5 Tip 1 savak modellerinde ölçülen Q-H değerleri

4.1.5. Tip 2 savak modellerinde savak yükü - debi karşılaştırması

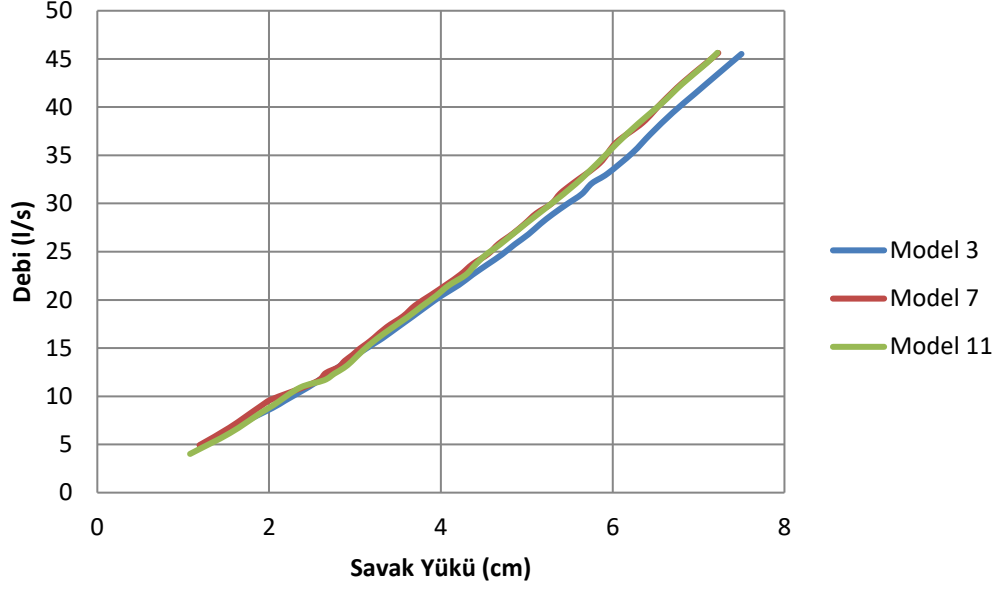
P=15 cm yüksekliğinde, L=30 cm genişlikte ve 3 farklı tuş genişliği için oluşturulan modellerden elde edilen ölçüm değerleri Şekil 4.6'da verilmiştir. Grafikteki değerlerini incelediğimizde en verimli savağın Model 10 olduğu görülmektedir. Bu model grubunda giriş tuşu genişliğinin (W_i) artması savak yükünü azaltmıştır, böylelikle daha verimli bir model elde edilmiştir.



Şekil 4.6 Tip 2 savak modellerinde ölçülen Q-H değerleri

4.1.6. Tip 3 savak modellerinde savak yükü - debi karşılaştırması

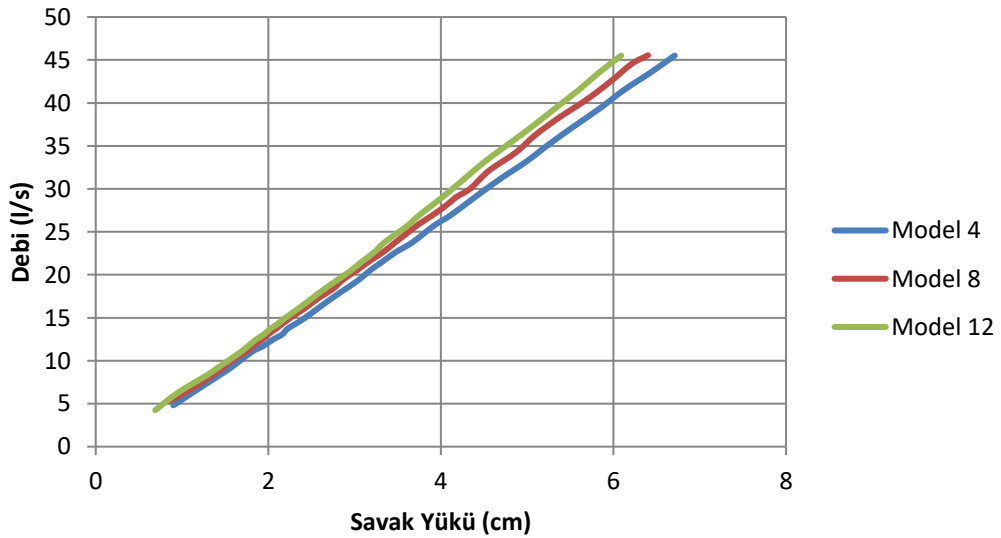
P=15 cm yüksekliğinde, L=20 cm genişlikte ve 3 farklı tuş genişliği için oluşturulan modellerden elde edilen ölçüm değerleri Şekil 4.7'de verilmiştir. Grafikteki değerlerini incelediğimizde Model 7 ve Model 11'de Q-H değerleri birbirlerine çok yakın olduğu görülmüş, EK-4 ve EK-6'daki deney sonuçları incelendiğinde de en verimli savağın Model 11 olduğu görülmüştür. Bu model grubunda giriş tuşu genişliğinin (W_i) artması savak yükünü azaltmış -diğer tip modellere göre daha az etkili olduğu görülmüştür-, böylelikle daha verimli bir model elde edilmiştir.



Şekil 4.7 Tip 3 savak modellerinde ölçülen Q-H değerleri

4.1.7. Tip 4 savak modellerinde savak yükü - debi karşılaştırması

P=15 cm yüksekliğinde, L=40 cm genişlikte ve 3 farklı tuş genişliği için oluşturulan modellerden elde edilen ölçüm değerleri Şekil 4.8’de verilmiştir. Grafikteki değerleri incelediğimizde en verimli savağın Model 12 olduğu görülmektedir. Bu model grubunda giriş tuşu genişliğinin (W_1) artması savak yükünü azaltmış, böylelikle daha verimli bir model elde edilmiştir.



Şekil 4.8 Tip 4 savak modellerinde ölçülen Q-H değerleri

4.1.8. Keskin kenarlı savak modellerinde savak yükü - debi karşılaştırması

Bu tez kapsamında değişen parametreler altında PKW'lerin verime etkisi ve klasik savaklara göre de ne kadar etkili olduğunu görebilmek için $P=15$ cm ve $P=20$ cm yüksekliğinde 2 adet keskin kenarlı savak modelinde bir dizi Q-H değer okuması yapılmıştır. Deney sonuçları Şekil 4.9'daki grafikte verilmiştir. Yapılan ölçüm sonuçlarına (EK-7) bakıldığında 20 cm yüksekliğindeki savak ile daha verimli sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4.9 Keskin kenarlı savak modellerinde ölçülen Q-H değerleri

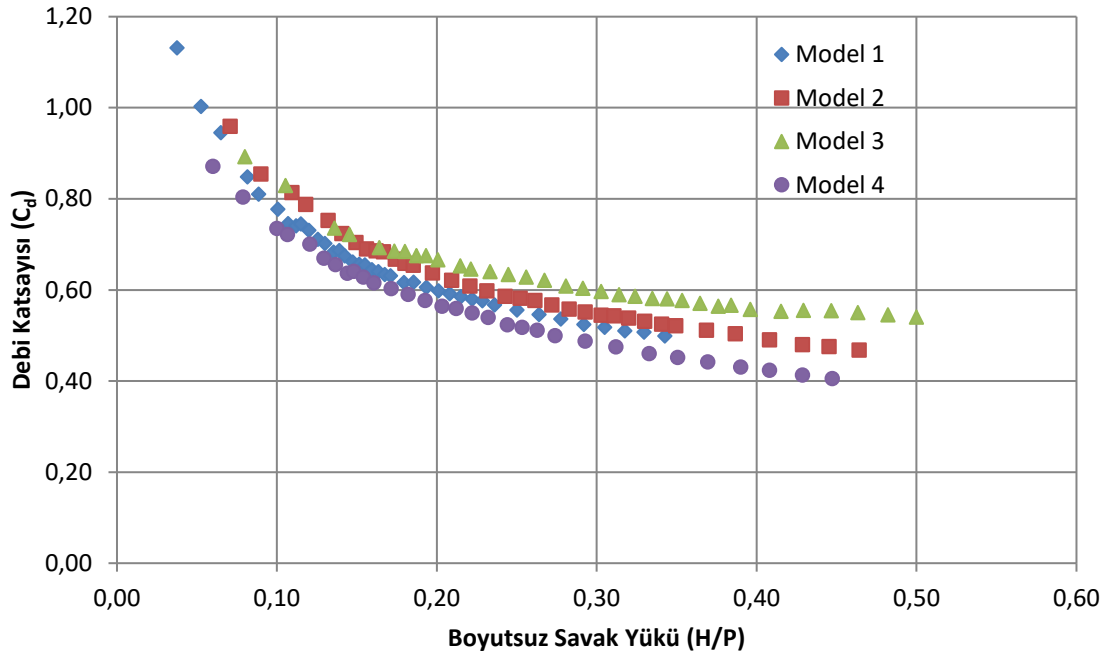
4.2. Deneysel Modellerin Debi Katsayısı (C_d) –Boyutsuz Savak Yükü (H/P)

Sonuçları

4 farklı tipteki modellerin efektif (net) savak uzunlukları sırasıyla $L_{net1}= 178.8$ cm, $L_{net2}= 178.8$ cm, $L_{net3}= 138.8$ cm, $L_{net4}= 218.8$ cm şeklindedir. Deney sonuçlarında, savak katsayıları (C_d) ile tüm modeller arasında karşılaştırma yapıldığında efektif savak uzunluğunun (L_{net}) etkisi ortadan kalkmaktadır. PKW ve lineer savaklar için C_d katsayısı hesaplanırken Denklem (3.14) kullanılmıştır. Elde edilen C_d ve H/P değerleri EK1-EK7 arasında verilmiştir. Savak yükü, efektif savak uzunluğu ve debi değerlerine bağlı olarak elde edilen C_d - H/P grafikleri Şekil 4.10 - 4.16 arasında verilmiştir.

4.2.1. $P_K=1.00$ için debi katsayısı – boyutsuz savak yükü karşılaştırması

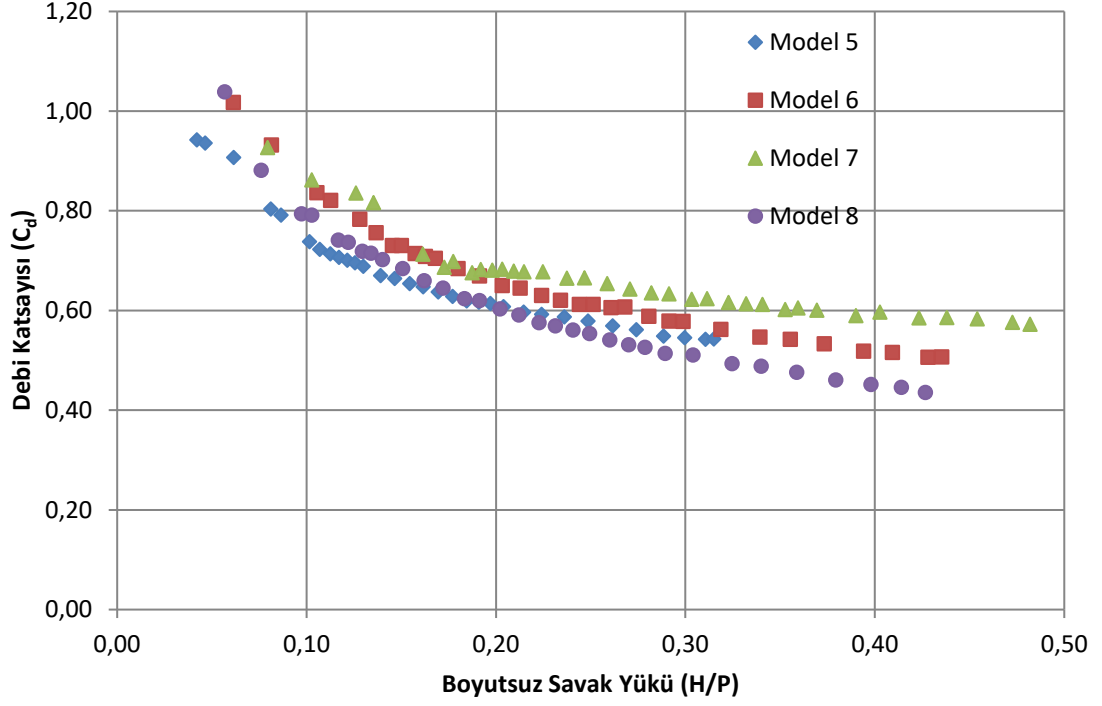
$P_K=1.00$ modellerinde savak katsayıları (C_d) karşılaştırıldığında en iyi debi performansının Model 4'e, en az debi performansının ise Model 3'e ait olduğu görülmektedir. Model 2, 3 ve 4'te savak yüksekliği eşitken, Model 1 ve 2 için ise L_{net} boyutu eşittir.



Şekil 4.10 $P_K=1.00$ savaklarda C_d - H/P karşılaştırması

4.2.2. $P_K=1.25$ için debi katsayısı – boyutsuz savak yükü karşılaştırması

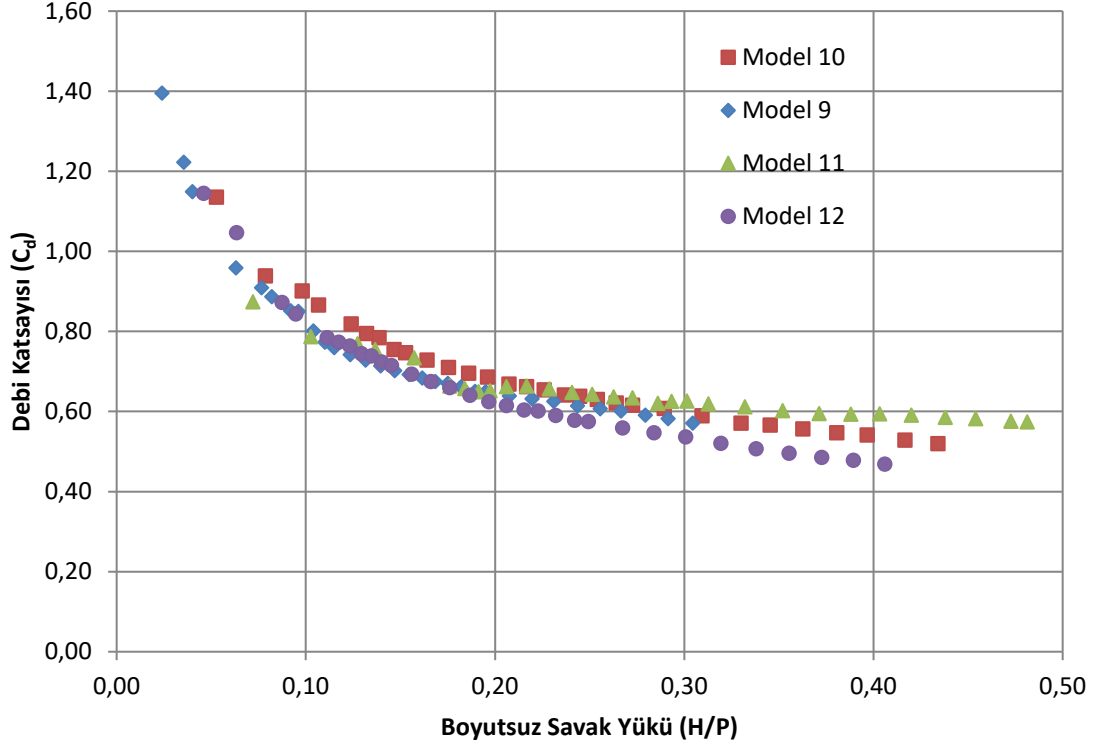
$P_K=1.25$ modellerinde savak katsayıları (C_d) karşılaştırıldığında en iyi debi performansının Model 8'e, en az debi performansının ise Model 7'ye ait olduğu görülmektedir. Model 6, 7 ve 8'te savak yüksekliği eşitken, Model 5 ve 6 için ise L_{net} boyutu eşittir.



Şekil 4.11 $P_K=1.25$ savaklarda C_d - H/P karşılaştırması

4.2.3. $P_K=1.50$ için debi katsayısı – boyutsuz savak yükü karşılaştırması

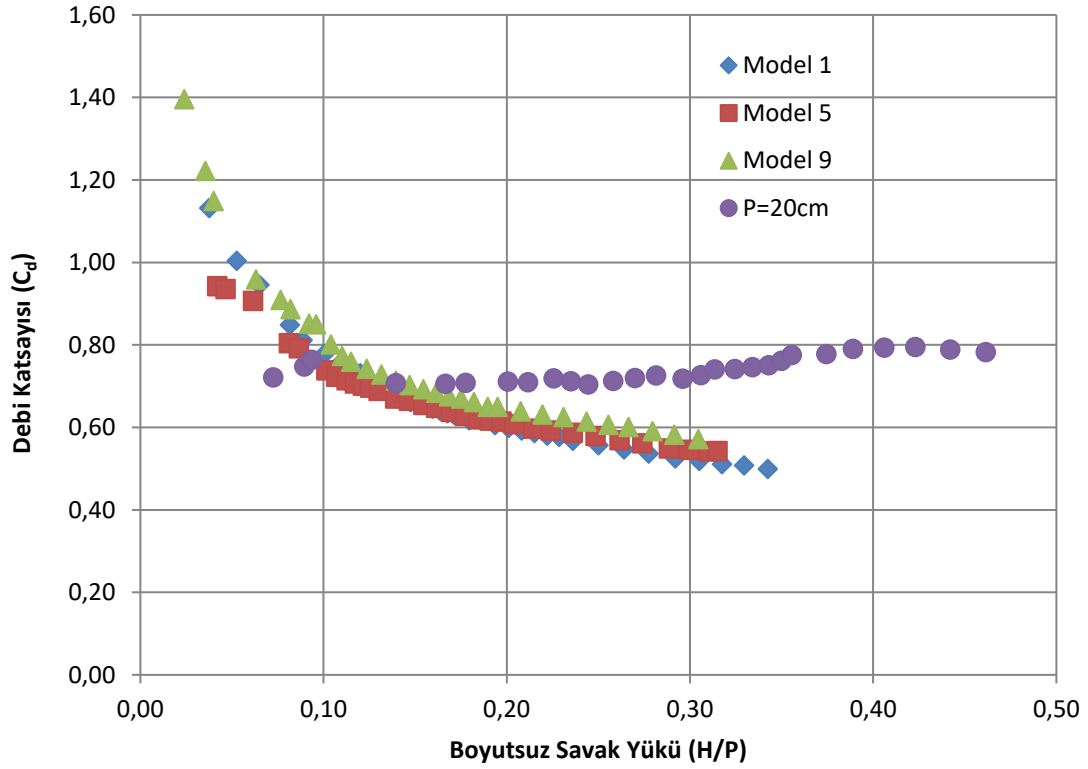
$P_K=1.50$ modellerinde savak katsayıları (C_d) karşılaştırıldığında en iyi debi performansının Model 12'ye, en az debi performansının ise Model 11'e ait olduğu görülmektedir. Model 10, 11 ve 12'de savak yüksekliği eşitken Model 9 ve 10 için ise L_{net} boyutu eşittir.



Şekil 4.12 $P_K=1.5$ savaklarda C_d - H/P karşılaştırması

4.2.4. Tip 1 için debi katsayısı – boyutsuz savak yükü karşılaştırması

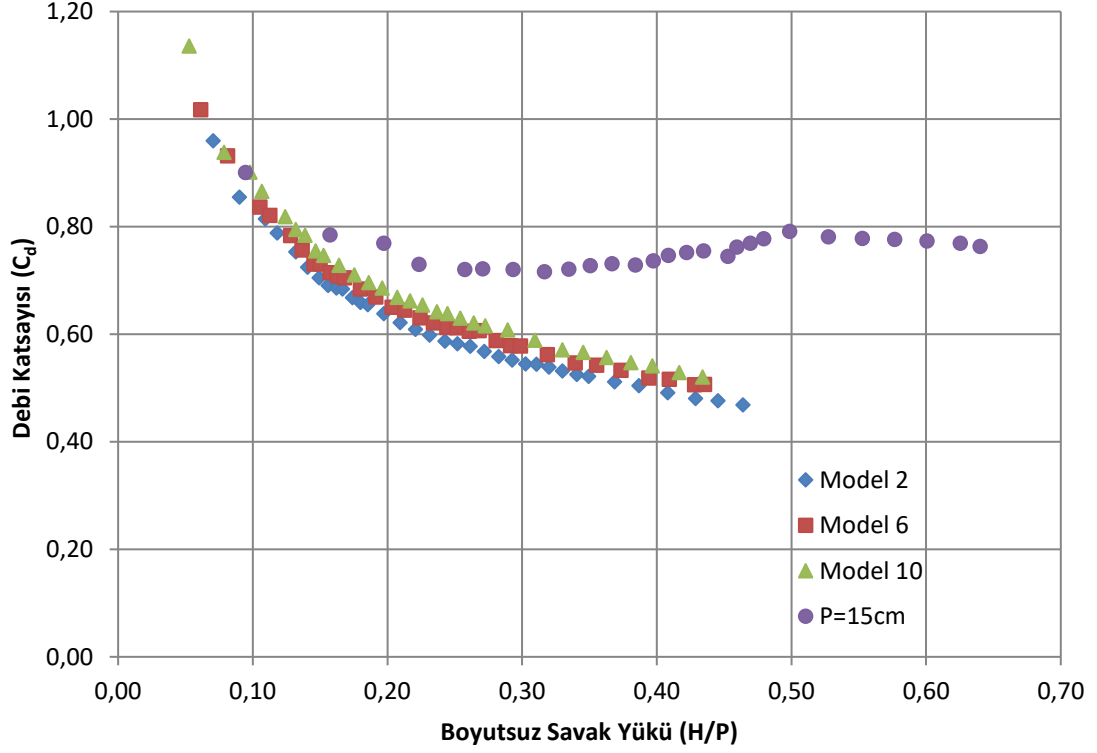
Tip 1 modellerinde $L_{net} = 178.8$ cm ve $P = 20$ cm şeklindedir. Bu modellerde savak katsayıları (C_d) karşılaştırıldığında değerlerin birbirlerine çok benzediği görülürken, $L_{net} = 60$ cm olan keskin kenarlı savağa göre daha iyi debi performansı görülmektedir (Şekil 4.13). Aynı savak yüksekliğine sahip PKW ve lineer savaklarda L_{net} değerinin artması modellerin daha verimli sonuçlar elde etmesini sağlamaktadır.



Şekil 4.13 Tip 1 savak modellerinde C_d -H/P karşılaştırması

4.2.5. Tip 2 için debi katsayısı – boyutsuz savak yükü karşılaştırması

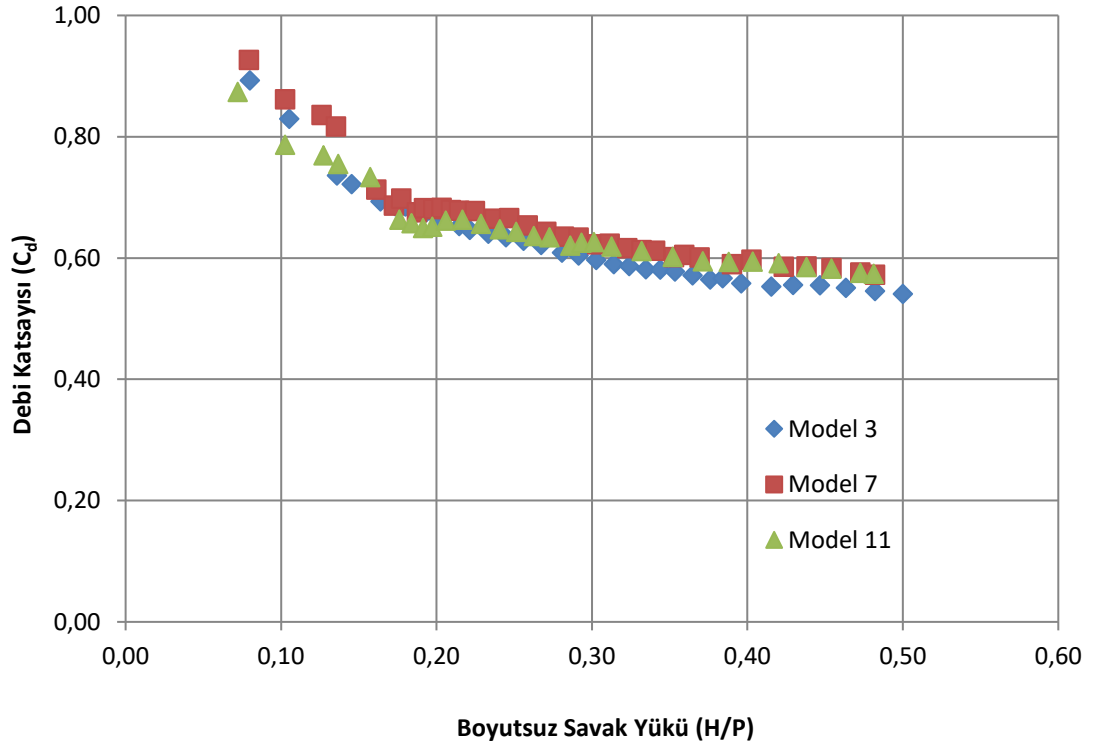
Tip 2 modellerinde $L_{net} = 178.8$ cm ve $P = 15$ cm şeklindedir. Bu modellerde savak katsayıları (C_d) karşılaştırıldığında değerlerin birbirlerine çok benzediği görülürken, $L_{net} = 60$ cm olan keskin kenarlı savağa göre daha iyi debi performansı görülmektedir (Şekil 4.14). Aynı savak yüksekliğine sahip PKW ve lineer savaklarda L_{net} değerinin artması modellerin daha verimli sonuçlar elde etmesini sağlamaktadır.



Şekil 4.14 Tip 2 savak modellerinde C_d -H/P karşılaştırması

4.2.6. Tip 3 için debi katsayısı – boyutsuz savak yükü karşılaştırması

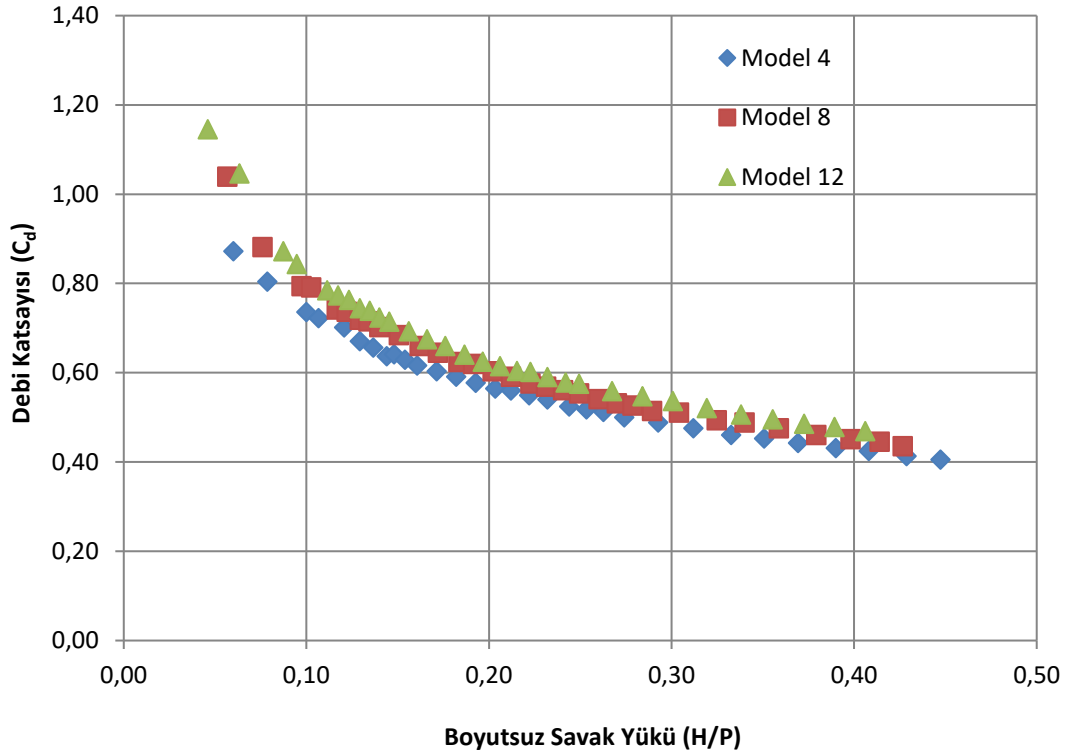
Tip 3 modellerinde $L_{net} = 138.8$ cm ve $P = 15$ cm şeklindedir. Bu modellerde savak katsayıları (C_d) karşılaştırıldığında değerlerin birbirlerine çok benzediği görülmüştür. L_{net} ve P boyutları ihmal edildiğinde birbirlerine yakın performanslar elde edildiği görülmektedir (Şekil 4.15).



Şekil 4.15 Tip 3 savak modellerinde C_d -H/P karşılaştırması

4.2.7. Tip 4 için debi katsayısı – boyutsuz savak yükü karşılaştırması

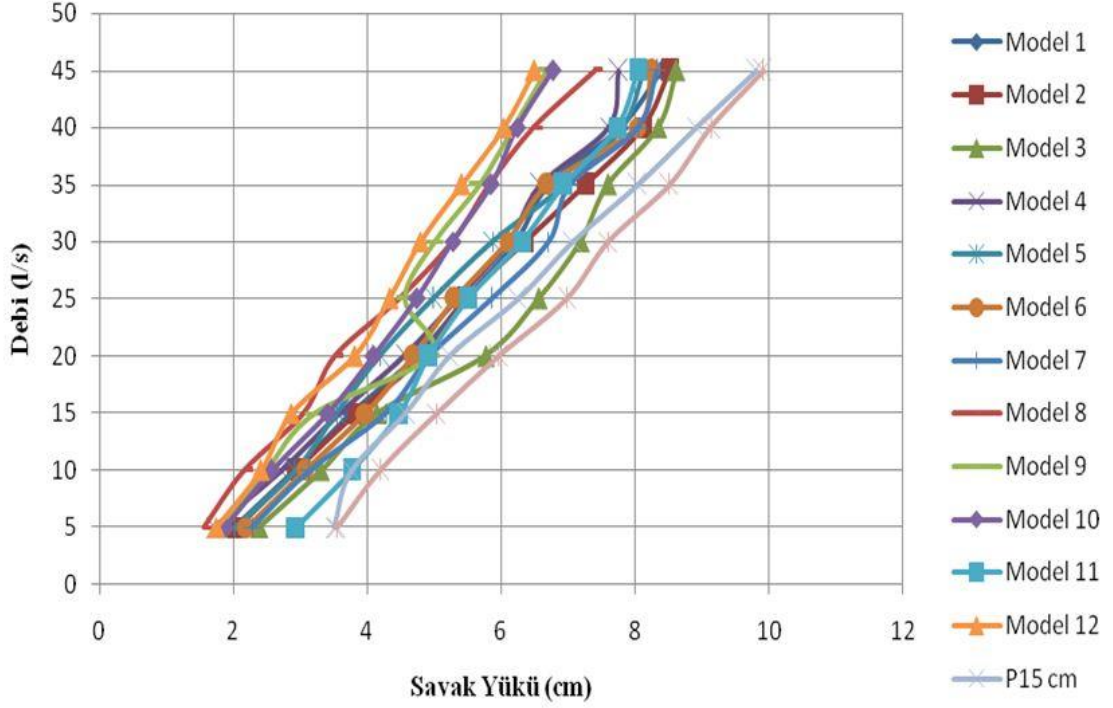
Tip 4 modellerinde $L_{net} = 218.8$ cm ve $P = 15$ cm şeklindedir. Bu modellerde savak katsayıları (C_d) karşılaştırıldığında değerlerin birbirlerine çok benzediği görülmüştür. L_{net} ve P boyutları ihmal edildiğinde birbirlerine yakın performanslar elde edildiği görülmektedir (Şekil 4.16).



Şekil 4.16 Tip 4 savak modellerinde C_d - H/P karşılaştırması

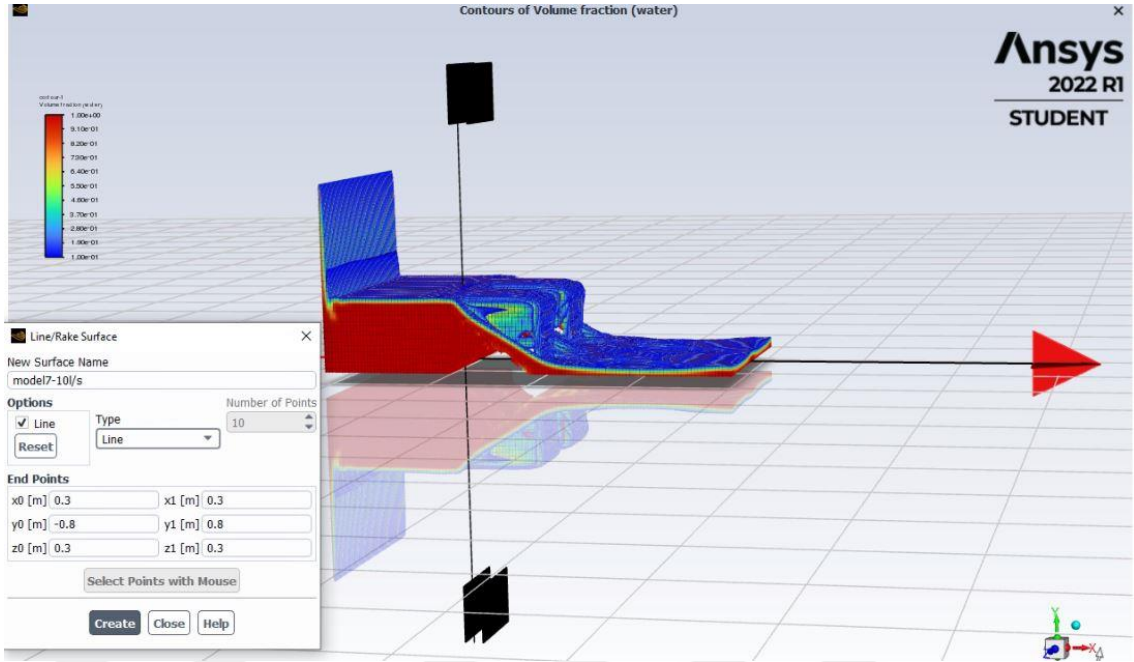
4.3. Sayısal Modellerin Sonuçları

Tez kapsamında çalışılan farklı PKW modeli için ANSYS-Fluent programında sayısal modellemeler yapılmıştır. 5-45 l/s debi aralığında sırayla 9 farklı debide analizler gerçekleştirilmiştir. Modellere ait 3D akış profilleri (Şekil 4.19-4.24), analiz sonundaki XY Plots komutuyla çizdirilmiştir. Okunan savak yükü değerleri Şekil 4.17’de ki grafikte verilmiştir.

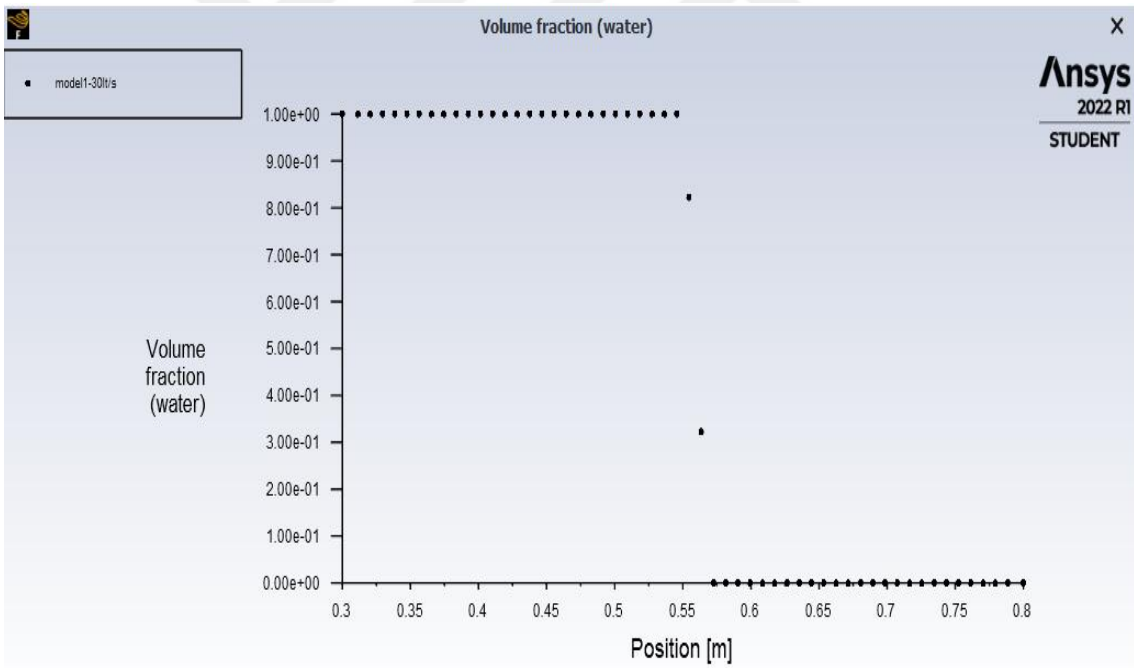


Şekil 4.17 ANSYS-Fluent'te ölçülen Q-H değerleri

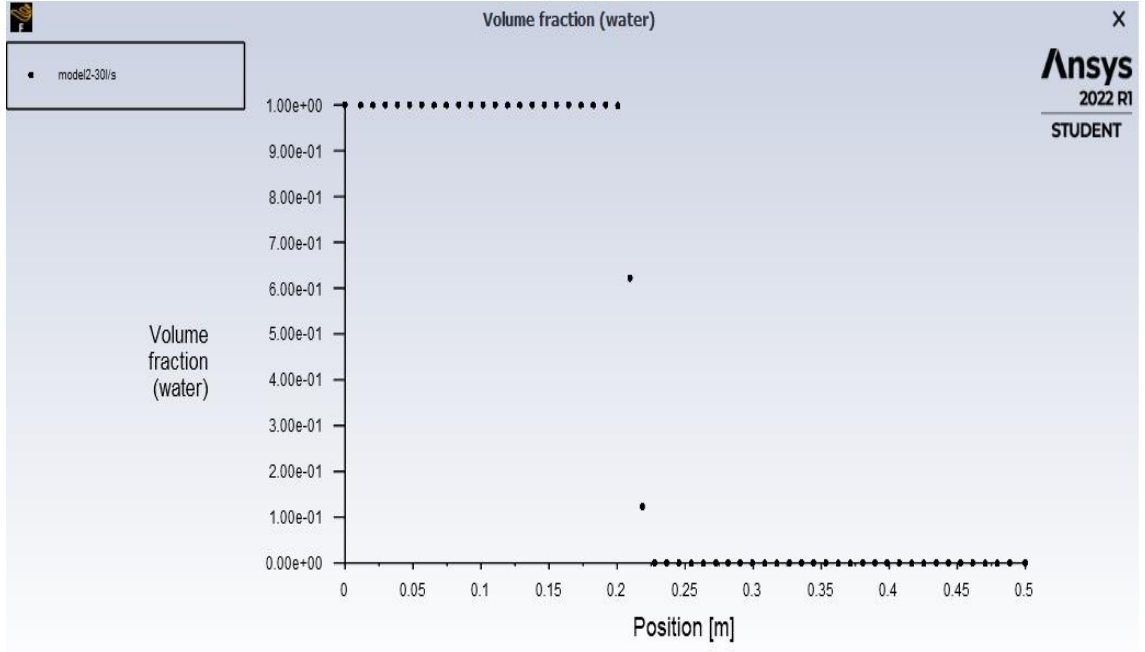
Nümerik analizler, ANSYS-Fluent programında tüm modeller için sırasıyla yapılmıştır. PKW modellerin karmaşık yapısından ve kullanılan bilgisayarın performansına bağlı olarak çalıştırılan her bir analizin süresi 2-3 gün arasında gerçekleşmiştir. Analizler sonucunda XY Plots sekmesi ile su yüzü profilleri çizdirilmiştir. Burada VOF yöntemine göre tam dolu akımlar (su) 1 değerine karşılık gelirken tam boş mesh hücreleri (hava) ise 0 değerini göstermektedir. Mesh hücrelerindeki su doluluk oranına göre de bu değer 0-1 arasında değer almaktadır. Savak yükü değerini okumak istediğimiz noktayı belirlemek için ise savak yükünü okumak istediğimiz noktanın koordinatları girilerek lineer bir grafik elde edilmektedir (Şekil 4.18). Buradaki grafikten hücrelerin doluluk oranına göre 0 ila 1 arasında değerler okunmaktadır. Buradan elde edilen değerlere göre enterpolasyon yapılarak savak yükü elde edilmektedir.



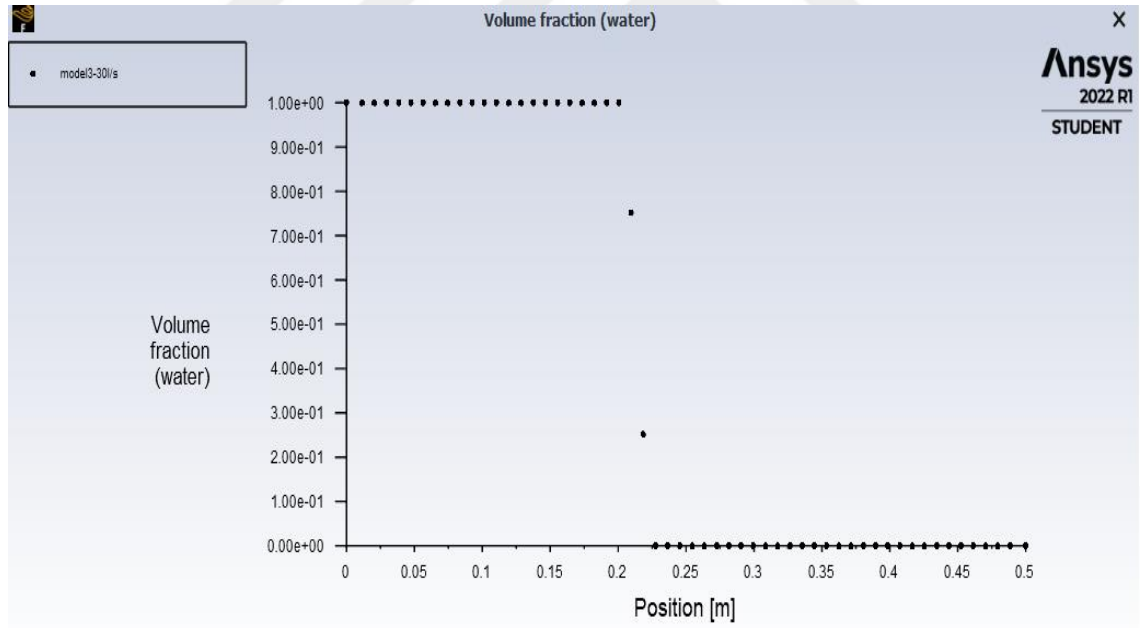
Şekil 4.18 Savak yükü okunacak noktanın belirlenmesi



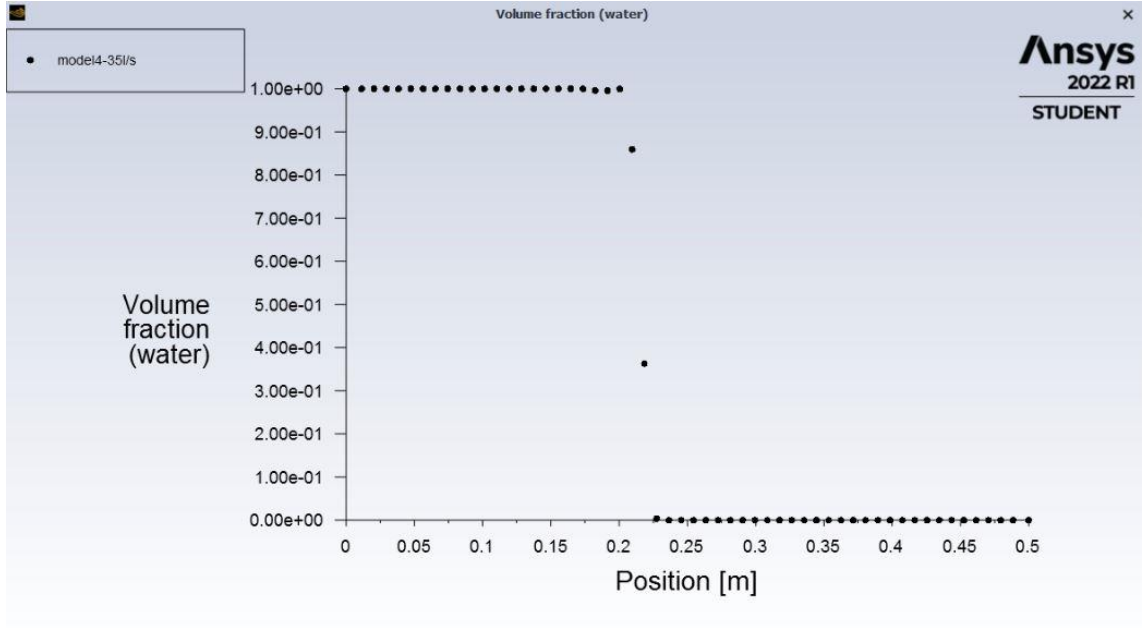
Şekil 4.19 30l/s debi için Model 1'deki su yükseklikleri



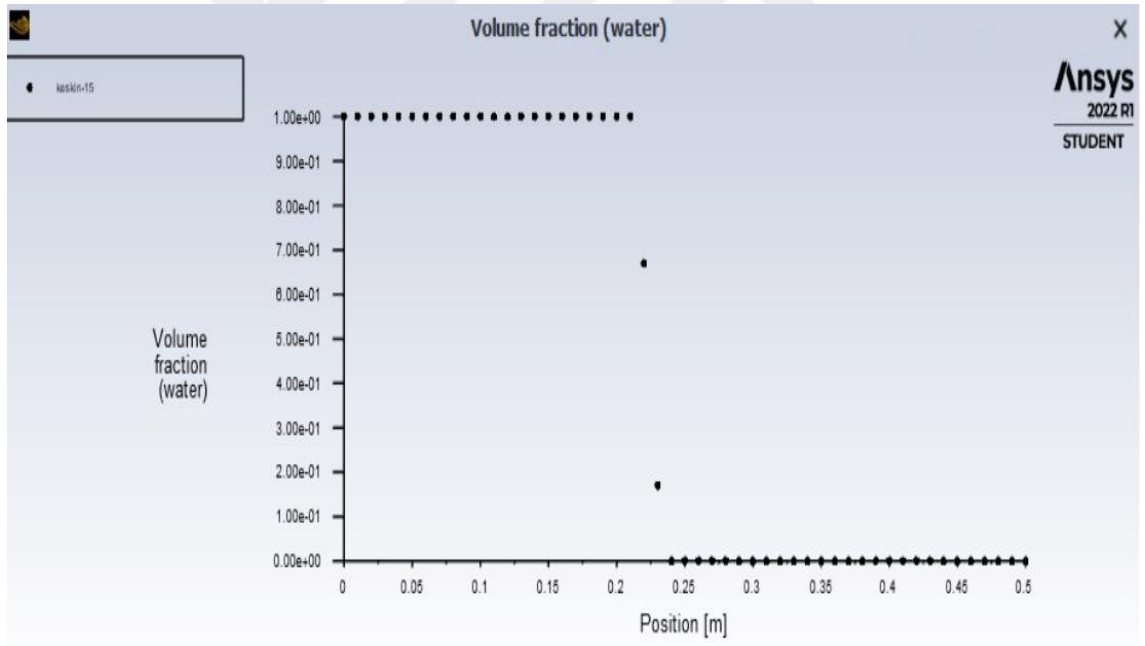
Şekil 4.20 30l/s debi için Model 2'deki su yükseklikleri



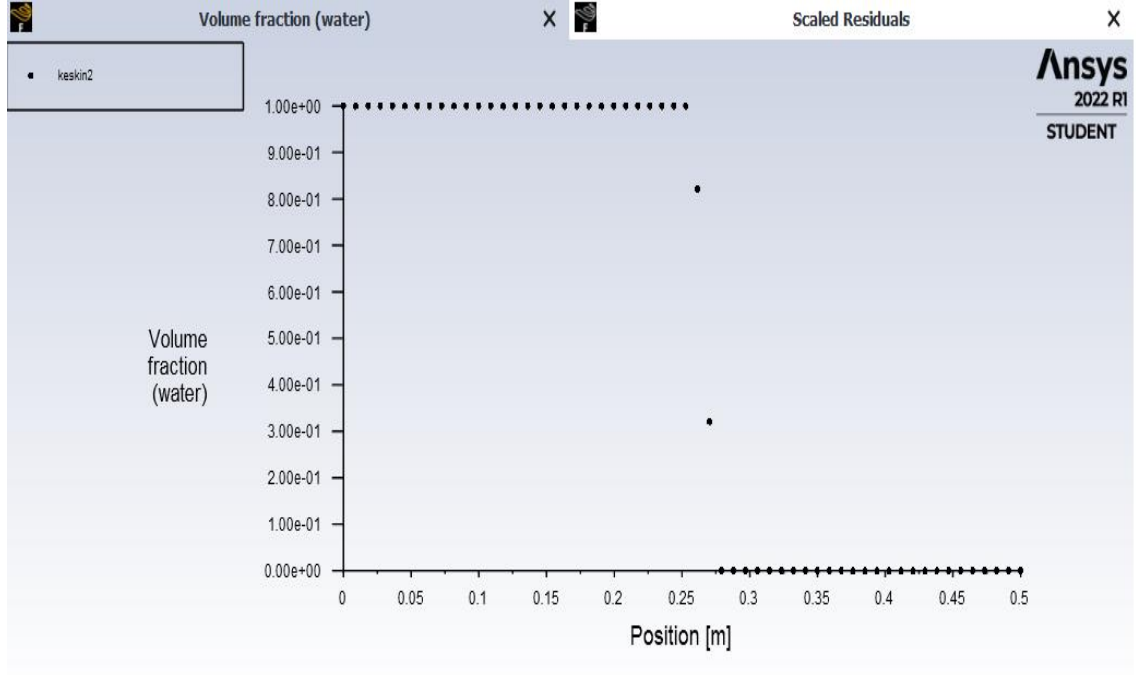
Şekil 4.21 30l/s debi için Model 3'teki su yükseklikleri



Şekil 4.22 30l/s debi için Model 4'teki su yükseklikleri



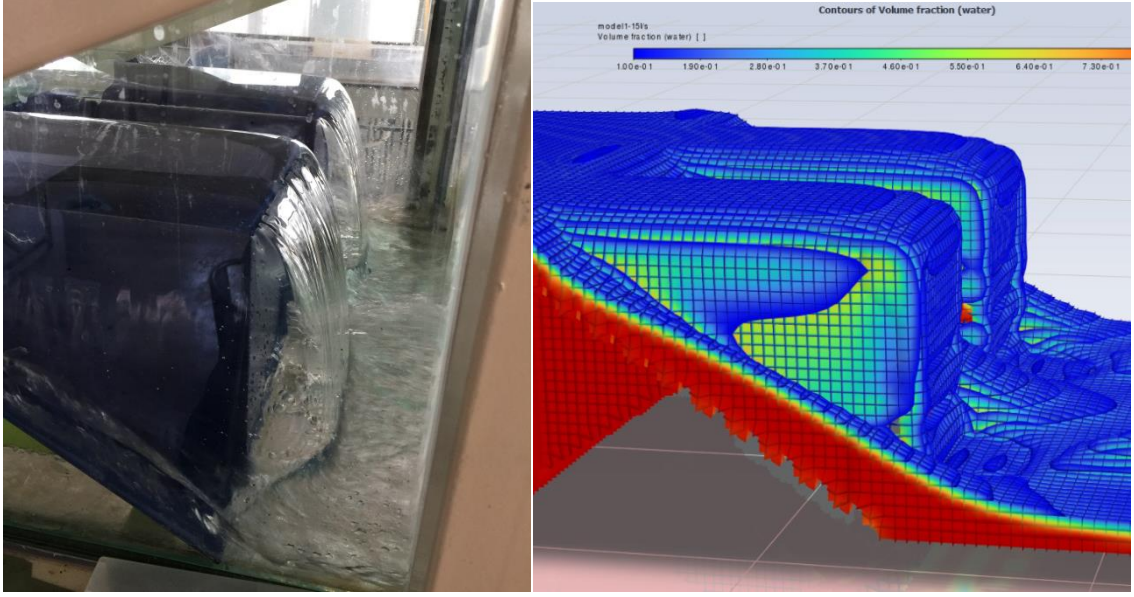
Şekil 4.23 30l/s debi için P=15cm keskin kenarlı savak su yükseklikleri



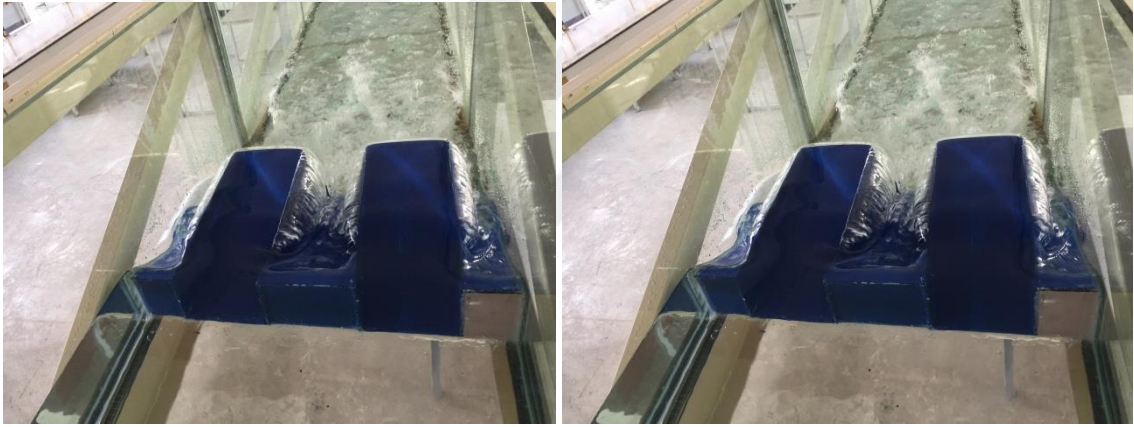
Şekil 4.24 30l/s debi için P=20 cm keskin kenarlı savak su yükseklikleri

4.4. Deneysel ve Sayısal Model Sonuçlarının Karşılaştırılması

Bu tez kapsamında, laboratuvarda yapılan deneysel ve ANSYS-Fluent programında yapılan sayısal çalışmalar titizlikle yürütülmüştür. Deneysel çalışmalarda ölçüm yapan kişinin, sayısal çalışmalarda ise kullanılan birçok parametrenin sonuçları doğrudan/dolaylı şekilde etkilediği unutulmamalıdır. Şekil 4.25'te iki farklı çalışmada yan yüzeylerde oluşan su akışları gösterilmiştir. Şekil 4.26 ve Şekil 4.27'de farklı debilerdeki Model 4'teki su akışlarının üstten görünümü, Şekil 4.28'de ise P=20 cm'lik keskin kenarlı savaktaki su akışları bir arada verilmiştir.

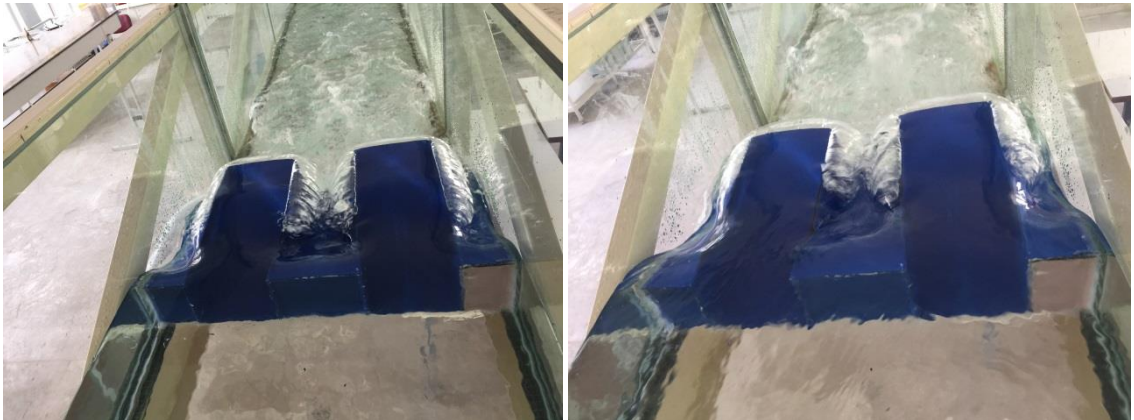


Şekil 4.25 Model 1’de deneysel ve nümerik model karşılaştırması ($Q=10$ l/s)



(a)

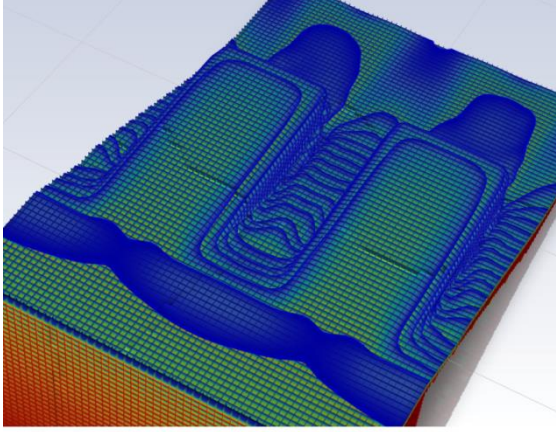
(b)



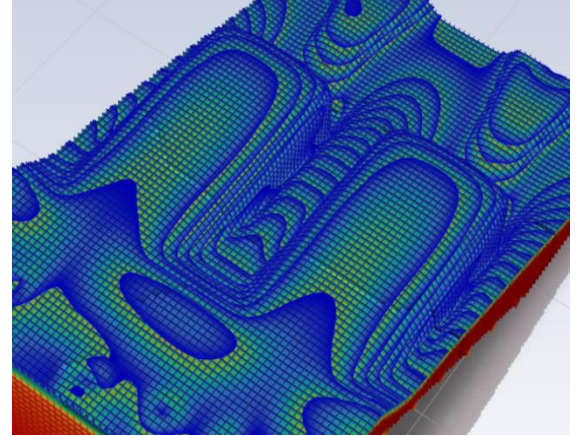
(c)

(d)

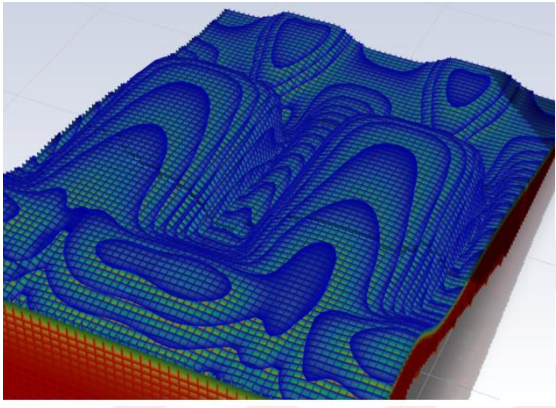
Şekil 4.26 Model 4’te üstten akımın görünümü (deneysel çalışma) (a) $Q=11.03$ l/s, (b) $Q=20.51$ l/s, (c) $Q=31.11$ l/s, (d) $Q=45.11$ l/s debilerde oluşan akımlar



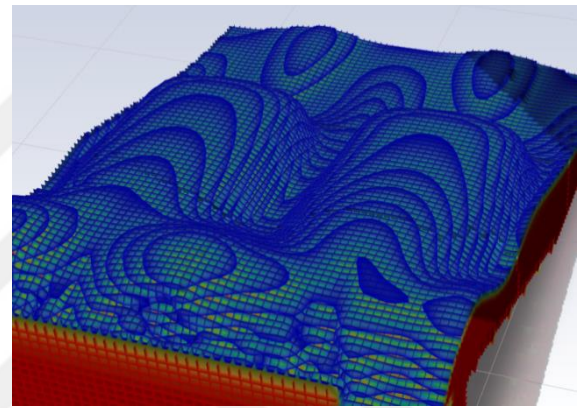
(a)



(b)

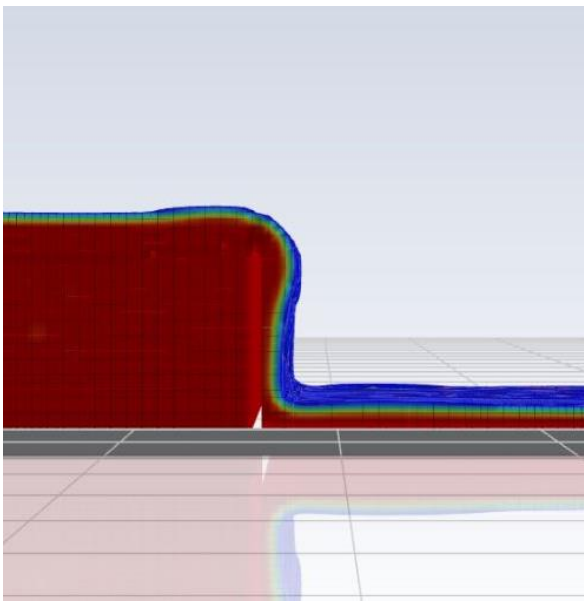


(c)



(d)

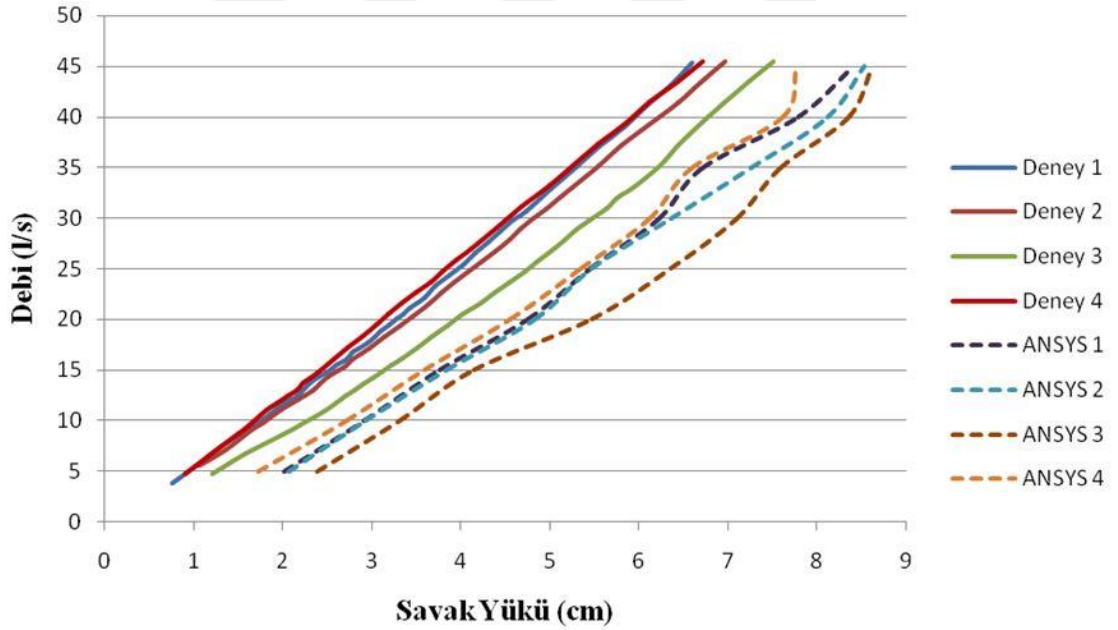
Şekil 4.27 Model 4'te üstten akımın görünümü (Fluent analizi)
 (a) $Q=10$ l/s, (b) $Q=20$ l/s, (c) $Q=30$ l/s, (d) $Q=45$ l/s



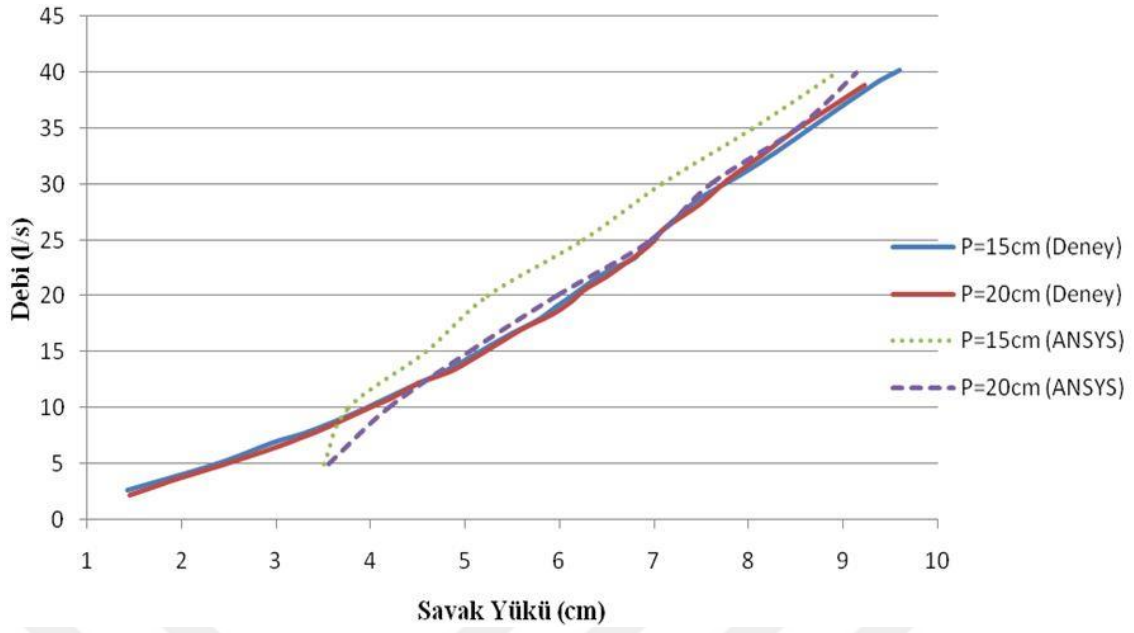
Şekil 4.28 $P=20$ cm keskin kenarlı savakta deneysel ve nümerik model karşılaştırması ($Q=5$ l/s)

Deneyssel ve nümerik çalışmalarda elde edilen sonuçların karşılaştırıldığı grafik Şekil 4.29’da verilmiştir. İki farklı ortamda elde edilen grafiklerin kendi içlerinde paralellik gösterdiği görülmektedir. Bilgisayar analizlerinde kullanılan her bir parametrede (modelin oluşturulması, mesh boyutları, sınır şartları, başlangıç koşulları, iterasyon sayısı vb.) literatüre uygun şekilde seçilip kullanılmasına rağmen, mevcut mesh boyutlarının ve iterasyon ve zaman adım değerinin etkisi ile deneyssel çalışmada elde edilen değerlerden daha büyük değerler elde edilmiştir (EK-8). Ancak iki farklı durumda –deneyssel ve sayısal çalışma- elde edilen debi-savak yükleri ile çizilen grafikler literatüre uygun şekilde oluşmuştur.

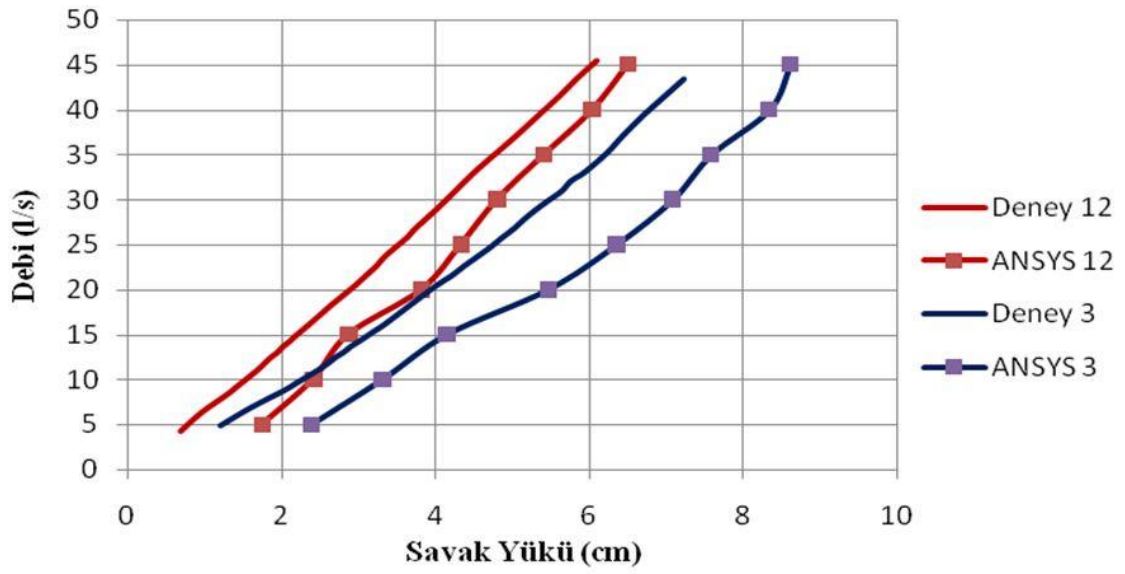
Şekil 4.29’da Tip 1’e ait modellerin deneyssel ve CFD analizinden elde edilen Q-H grafiklerinde savak yükleri bir arada verilmiştir. Grafikteki değerler farklılık gösterse de iki farklı çalışmanın grafikleri incelendiğinde en verimli savak modelinin Model 4; en az verimli savak modelinin ise Model 3 olduğu görülmektedir. Deneyssel ve nümerik analizlerden elde edilen sonuçların paralellik gösterdiği görülmektedir.



Şekil 4.29 Tip 1’e ait deneyssel ve sayısal çalışmalarda ölçülen Q-H değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.30 Keskin kenarlı savaklarda deneysel ve sayısal çalışmalarda ölçülen Q-H değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.31 En verimli (Model 12) ile en az verimli (Model 3) savakta ölçülen Q-H değerlerinin karşılaştırılması

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu tez çalışması kapsamında D tipi piyano tuşu savaklarda geometrik parametrelerin değiştirilmesi (savak yüksekliği, savak genişliği, tuş genişlikleri, tuş eğimleri) ve farklı debiler altında (0-45 l/s) HAD tabanlı ANSYS-Fluent programı kullanılarak bir dizi nümerik analiz yapılmıştır. Analizlerde hassasiyetin aynı derecede olması için mesh türü, boyutu ve sayıları ön çalışmalar sonucunda optimize edilerek ayarlanmıştır. Akışkan hacmi yöntemi içinde faz-1 için su (*water*), faz-2 için hava (*air*) tanımlanmış, türbülans modeli olarak ise literatürde yaygın bir yeri olan Realizable k- ϵ modeli seçilmiştir.

Nümerik analizler sonucunda modellerin kendi içlerinde incelenmesi sonucunda;

Model 2, 3 ve 4 için savak yükseklikleri 15 cm olacak şekilde sabit tutulup savak genişlikleri değiştiğinde, büyükten küçüğe doğru sıralama Model 4 (40cm) > Model 2 (30cm) > Model 3 (20cm) şeklinde olup savak yüklerinin de sıralaması Model 4 < Model 2 < Model 3 şeklinde sıralanmıştır. Böylelikle $P_K=1.00$ modellerinde sabit savak yüksekliğinde tuş uzunluklarının artması ile savak yükleri arasında doğrusal bir ilişki oluşmuştur.

Model 1 ve 2 için ise savak (tuş) uzunlukları 30 cm olacak şekilde sabit tutulup savak (tuş) yükseklikleri değişmiştir. Savak yükseklikleri arasındaki ilişki Model 1 (20cm) > Model 2 (15cm) şeklinde iken, savak yükleri arasında Model 1 < Model 2 şeklinde bir ilişki oluşmuştur. Burada da savak (tuş) yüksekliğinin artması savak yükünü azalmıştır.

Benzer şekilde $P_K=1.25$ ve $P_K=1.50$ savak modellerinde sırasıyla Model 8 (Tip 4) ve Model 12 (Tip 4) daha verimli sonuçlar elde edilmiştir.

Yapılan çalışmanın amacı doğrultusunda büyük debileri savaklama sayesinde daha küçük savak yükleri mansap kısmına geçirilebilmektir. Bu çalışmada kullanılan parametreleri incelediğimizde ise tuş yüksekliğinin ve genişliğinin artması ile en düşük savak yükü değeri elde edilmiştir. Bu doğrultuda Şekil 4.1'deki grafik ve EK1-7 arasındaki deney sonuçları incelendiğine en verimli savak olarak, Model 12 olarak görülmektedir. Şekil 4.17'deki grafik ve EK-8'deki CFD sonuçları incelendiğinde yine en verimli savağın Model 12'ye ait olduğu görülmektedir. Model 12 ve $P=20$ cm'lik savakta $Q=30$ l/s debiye karşılık gelen değerler incelendiğinde; PKW'nin keskin kenarlı

savağa göre %46 daha etkili olduğu hesaplanmıştır. Model 12 ve Model 3, Q_{max} (45.52l/s) değerleriyle karşılaştırıldığında ise Model 12'nin Model 3'e göre %18.8 daha verimli olduğu görülmüştür.

P_K değerleri üzerinde karşılaştırma yapıldığı zaman aynı tip tüm modellerde verim $P_K=1.50 > P_K=1.25 > P_K=1.00$ şeklinde olup giriş tuşu genişliğinin artması ile daha verimli sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

Debi katsayısı ve boyutsuz savak yükü grafiklerinin incelenmesi sonucunda, Şekil 4.10-4.12'deki grafiklerde L_{net} değerinin artması ile daha etkili C_d katsayısı elde edilmiştir.

PKW ve keskin kenarlı savaklarda yapılan deney sonuçlarından elde edilen debi (Q) – savak yükü (H) okumaları kullanılarak debi katsayısı (C_d) – boyutsuz savak yükü (H/P) eğrileri de elde edilmiştir. Savakların performansını efektif savak uzunluğundan (L_{net}) bağımsız olarak hesaplamak için savak katsayıları Denklem (3.14) ile hesaplanarak C_d – H/P eğrileri ile savakların performansı savak yüksekliğinden bağımsız olarak incelenmiştir. Elde edilen grafikler sonucunda:

Piyano tuşu savaklarda (Tip 1 için) aynı savak yükünde (H), farklı modeldeki savakların debi performansı Model 4 > Model 1 > Model 2 > Model 3 şeklinde oluşmuştur (Maksimum debiyi Model 4 geçirmiştir). Bu sonuçlara göre, debi katsayıları da $C_{d3} > C_{d2} > C_{d1} > C_{d4}$ şeklinde sıralanmıştır.

Aynı savak yüksekliğine sahip Model 1, Model 5 ve Model 9 piyano tuşu savaklarda ve $P=20\text{cm}$ 'lik keskin kenarlı savakta ise (Şekil 4.13) daha büyük H/P oranlarında literatüre uygun şekilde grafik sonuçları elde edilmiştir. Burada efektif savak boyunun artması ile ($L_{ef PKW}=178,8\text{ cm}$; $L_{ef keskin kenarlı}=60\text{ cm}$) keskin kenarlı savakta daha büyük C_d katsayısı elde edilmiştir.

5.2 Öneriler

Piyano tuşu savaklar günümüzde gerek ulusal çalışmalarda gerekse uluslararası çalışmalarda güncelliğini ve özgünlüğünü korumaktadır. Farklı geometrik tip ve boyutlarda olması halen bir standardizasyon elde edilemediğini göstermektedir. Bu yüzden PKW modelleri için hem deneysel hem de ilerleyen teknoloji sayesinde bilgisayar ortamında nümerik analizlerin artırılması ile daha fazla sonuç elde edilebilir. PKW yapısı itibariyle birçok parametreden oluşmaktadır. Hepsinin detaylı incelenmesi zor olduğu için ileriki çalışmalarda farklı tipte modellerin tasarlanması ve analiz sonuçlarının yorumlanması ile PKW hidroliği literatürüne katkıda bulunulabilir.

Aynı modeller üzerinde daha fazla debi altında:

- Duvar kalınlıklarının artırılması,
- Parapet duvar eklenmesi,
- Memba ve mansap kısmında bulunan tuşlar için düzlemsel duvar yerine birer burun (üçgensel, dairesel, trapez) yapısının eklenmesi,
- Tuş sayılarının artırılması gibi birçok parametre üzerinden çalışmalar ve karşılaştırmalar yapılarak daha etkili PKW modeli oluşturulabilir.

KAYNAKLAR

- Abdul-Hassan K., Al Shukur G., Al-Khafaji H., 2018, Experimental Study of the Hydraulic Performance of Piano Key Weir, Internatioanal Journal of Energy and Environment, 63-70.
- Aksoy C., 2019, Tübülanslı Açık Kanal Akışlarında Türbülans Dağıtıcı Sistemler ve Kesit Optimizasyonu, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Anderson R. M., 2011, Piano Key Weir Head Discharge Relationships, All Graduate Theses and Dissertations, <https://doi.org/10.26076/ce75-6c42>
- Anderson R. M ve Tullis B., 2011, Influence of Piano Key Weir Geometry on Discharge, Proceed International Conference, CRG Press, Boca Raton.
- Bal H., 2011, Geniş Başlıklı Savak İçeren Açık Kanal Akımının Sayısal Modellenmesi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana.
- Berkün M., 2007, Su Yapıları, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Blancher B., Montarros F., Laugier F., 2011, Hydraulic Comparison Between Piano Key Weir Sand Labyrinth Spillways, Proceed International Conference Labyrinth and Piano Key Weirs Liège B, Boca Raton.
- Borghei M., Jalili M. R., Ghodsian M., 1999, Discharge Coefficient for Sharp-Crested Side Weir in Subcritical Floe, Journal of Hydraulic Engineerinn, 1051-1056.
- Crookston B. M., Crowley L., Pfister M., 2016, Piano Key Weir for Enlargement of the West Fork of Eno River Reservoir.
- Cicero D. C., Becker T. M., Martin E. A., Docherty A. R., Kerns J.G., 2013, The Role of Aberrant Salience and Self-Concept Clarity in Psychotic-Like Experiences, Theory, Research and Treatment, cilt 4, 33-42.
- Doğan Y., 2009, Savaklarda Kret Şeklinin Debi Katsayısına Etkisinin İncelenmesi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ.
- Emiroğlu M. E., Kaya N., Ağaçcıoğlu H., 2010, Discharge Capacity of Labyrinth Side Weir Located on a Straight Channel, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, cilt 136, 37-46.
- Ferziger J. H. ve Peric M., 1999, Computational Methods for Fluid Dynamics, Springer, New York, USA.
- Filinte E. G., 2006, Konveksiyon- Difüzyon Problemlerinin Sonlu Hacim Yöntemi ile Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

- Ghaznawi N. A., 2019, Geniş Tepeli Savak Üzerinden Geçen Akımın Sayısal ve Deneysel Modeli, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Bursa.
- Henderson F. M., 1966, Open Channel Flow, 532.
- Hirt C. W. ve Nichols, B. D., 1981, Volume of Fluid Method for the Dynamics of Free Boundaries, Journal of Computational Physics, 39 (1), 201-225.
- Hoffmann K.A. ve Chiang S. T., 2000, Computational Fluid Dynamics for Engineers Volume, Engineering Education System Publication, Kansas, USA.
- İlkentapar M., 2015, Açık Kanallarda Geniş Başlıklı Savaklar Üzerindeki Akımın Deneysel Ve Sayısal Modellenmesi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- İspir Ö. E, 2018, Labirent Dolusavakların Karakteristik Özelliklerinin Deneysel ve Matematiksel Modelleme Yöntemiyle Araştırılması, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Konya.
- Kabiri-Samani A., Javaheri A., 2012, Discharge Coefficients for Free and Submerged Flow Over Piano Key Weirs. J. Hydraul. Res. 50(1), 114–120.
- Karaeren D., 2014, Comparison of Linear, Labyrinth And Piano Key Weirs To Increase The Discharge Capacity of Existing Spillways For a Given Head, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Kılıç Z., 2020, Piyano Tuşu Yan Savakların Hidrolik Karakteristiklerinin Sayısal ve Deneysel Analizi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Elazığ.
- Kocaer Ö., 2019, Ogee Tipi Dolu Savaklar Üzerindeki Akımların Deneysel ve Nümerik Modellenmesi, Konya Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Konya.
- Laugier F., Vermeulen J., Blancher B., 2017, Overview of Design and Construction of 11 Piano Key Weirs Spillways Developed in France by EDF From 2003 to 2016, Labyrinth and Piano Key Weirs III – PKW.
- Leite Ribeiro M. ve Schleiss A., 2011. A Naming Convention for the Piano Key Weirs Geometrical Parameters. Labyrinth and Piano Key Weirs – PKW 2011: 271–278. CRC press: London.
- Lemperiere F., Vigny J. P., Ouamane A., 2011, General Comments on Labyrinth and Piano Key Weirs: The Past and Present, Proceed International Conference in Labyrinth and Piano Key Weirs Liège B, Boca Raton.
- Leite Ribeiro M., Bieri M., Boillat J. L., Schleiss A. J., Sharma N., 2012, Discharge Capacity of Piano Key Weir, Journal of Hydraulic Engineering, cilt 138, 943-950.

- Leite Ribeiro M., Pfister M., Schleiss A. J., Boillat J. L., 2012, Hydraulic Design of A-Type Piano Key Weirs. *J. Hydraul. Res.* 50(4), 400–408 .
- Lemperiere, F. ve Ouamane A., 2003, The Piano Keys Weir: A New Cost-Effective Solution for Spillways, *Hydropower & Dams*, cilt10, 144–149.
- Machiels O., Erpicum S., Archambeau P., Dewals B. J., Pirotton M., 2011, Piano Key Weir Preliminary Design Method – Application to a New Dam Project, *Proceed International Conference in Labyrinth and Piano Key Weirs Liège B*, CRC Press, Boca Raton.
- Moukalled F., Magani L., Darwish M., 2016, *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics*, Springer International Publishing, Switzerland.
- Noui A., Ouamane A., 2013, Study of Optimization of the Piano Key Weir, In: *Labyrinth and Piano Key Weirs II*, 175–182.
- Ouamane A. ve Lempérière F., 2006, Design of a New Economic Shape of Weir, *Proceedings of the International Symposium on Dams in the Societies of the 21st Century*.
- Pfister M., Capobianco D., Tullis B., Schleiss A. J., 2013, Debris-Blocking Sensitivity of Piano Key Weirs Under Reservoir-Type Approach Flow, *Journal of Hydraulic Engineering*, 1134-1141.
- Pralong J., Erpicum S., Boillat J-L., 2011, A Naming Convention for the Piano Key Weirs Geometrical Parameters, DOI:10.1201/b/121349-40 Corpus ID: 53321774
- Rehbock T. 1929, Discussion of Precise Weir Measurements, *Transmission*, 1143-1162.
- Sangsefidi Y., Hassan T. K., Ghodsian M., Mehraein M., Zarei R., 2021, Hydrodynamics and Free-Flow Characteristics of Piano Key Weirs with Different Plan Shapes.
- Singh D., Kumar M., 2021, Hydraulic Design and Analysis of Piano Key Weirs: A Review, *Arabian Journal for Science and Engineering* <https://doi.org/10.1007/s13369-021-06370-4>
- Tullis J. P.. 1995, Design of Labyrinth Spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Xinlei G., Zhiping L., Tao W., Hui F., Jiazhen L., Qingfu X., 2019, Yongxin Guo Discharge Capacity Evaluation and Hydraulic Design of a Piano Key Weir, *Water Supply*, cilt 19, 871–878.
- Yıldız D. ve Üzücek E., 1993, Labirent Dolu Savakların Projelendirilme Kriterleri, *Devlet Su İşleri Teknik Araştırma*.
- Yıldız M. C., 2019, Farklı Şev Eğimlerine Sahip Geniş Başlıklı Savakların Deneysel ve Sayısal Olarak Modellenmesi, *Konya Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Konya*.

Yıldız A., 2022, Dairesel Labirent Savakların Hidrolik Özellikleri, Deneysel Tasarımı ve Nümerik Modellenmesi, Konya Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Konya.

https://www.uee.uliege.be/cms/c_5026433/en/world-register-of-piano-key-weirs-prototypes



EKLER**EK-1** $P_K=1.00$ 'e ait deney sonuçları

Model 1						Model 2				
Ölçüm	H	Q	C_d	H/P		Ölçüm	H	Q	C_d	H/P
1	0.75	3.88	1.13	0.04		1	1.06	5.53	0.960	0.071
2	1.05	5.7	1.00	0.05		2	1.35	7.08	0.855	0.090
3	1.3	7.4	0.95	0.07		3	1.64	9.03	0.814	0.109
4	1.63	9.32	0.85	0.08		4	1.77	9.8	0.788	0.118
5	1.77	10.08	0.81	0.09		5	1.98	11.08	0.753	0.132
6	2.01	11.7	0.78	0.10		6	2.11	11.72	0.724	0.141
7	2.14	12.33	0.75	0.11		7	2.24	12.47	0.704	0.149
8	2.24	13.12	0.74	0.11		8	2.34	13.05	0.690	0.156
9	2.3	13.72	0.74	0.12		9	2.43	13.72	0.686	0.162
10	2.4	14.35	0.73	0.12		10	2.5	14.28	0.684	0.167
11	2.51	14.93	0.71	0.13		11	2.61	14.87	0.668	0.174
12	2.6	15.54	0.70	0.13		12	2.7	15.43	0.659	0.180
13	2.71	16.1	0.68	0.14		13	2.78	16.02	0.655	0.185
14	2.78	16.8	0.69	0.14		14	2.96	17.15	0.638	0.197
15	2.85	17.15	0.68	0.14		15	3.14	18.25	0.621	0.209
16	2.95	17.69	0.66	0.15		16	3.31	19.36	0.609	0.221
17	3.03	18.29	0.66	0.15		17	3.47	20.42	0.598	0.231
18	3.1	18.88	0.66	0.16		18	3.64	21.51	0.587	0.243
19	3.19	19.4	0.64	0.16		19	3.78	22.59	0.582	0.252
20	3.27	20.00	0.64	0.16		20	3.92	23.66	0.577	0.261
21	3.35	20.53	0.63	0.17		21	4.08	24.7	0.568	0.272
22	3.42	21.08	0.63	0.17		22	4.24	25.73	0.558	0.283
23	3.59	22.15	0.62	0.18		23	4.39	26.8	0.552	0.293
24	3.71	23.28	0.62	0.19		24	4.54	27.81	0.544	0.303
25	3.87	24.35	0.61	0.19		25	4.66	28.88	0.544	0.311
26	4.02	25.45	0.60	0.20		26	4.8	29.91	0.539	0.320
27	4.16	26.53	0.59	0.21		27	4.95	30.92	0.532	0.330
28	4.3	27.58	0.59	0.22		28	5.11	32.01	0.525	0.341
29	4.44	28.65	0.58	0.22		29	5.24	33.04	0.522	0.349
30	4.57	29.75	0.58	0.23		30	5.53	35.12	0.511	0.369
31	4.72	30.7	0.57	0.24		31	5.8	37.17	0.504	0.387
32	5.00	32.83	0.56	0.25		32	6.12	39.24	0.491	0.408
33	5.28	35.00	0.55	0.26		33	6.43	41.34	0.480	0.429
34	5.55	37.03	0.54	0.28		34	6.68	43.4	0.476	0.445
35	5.84	39.07	0.52	0.29		35	6.96	45.42	0.468	0.464
36	6.1	41.23	0.52	0.31						
37	6.35	43.15	0.51	0.32						
38	6.59	45.35	0.51	0.33						
39	6.85	47.25	0.50	0.34						

EK-2 $P_K=1.00$ 'e ait deney sonuçları

Model 3						Model 4				
Ölçüm	H	Q	C_d	H/P		Ölçüm	H	Q	C_d	H/P
1	1.2	4.81	0.89	0.08		1	0.9	4.81	0.87	0.06
2	1.58	6.75	0.83	0.11		2	1.18	6.66	0.80	0.08
3	2.04	8.79	0.74	0.14		3	1.5	8.73	0.74	0.10
4	2.18	9.52	0.72	0.15		4	1.6	9.44	0.72	0.11
5	2.46	10.96	0.69	0.16		5	1.81	11.03	0.70	0.12
6	2.6	11.78	0.69	0.17		6	1.94	11.7	0.67	0.13
7	2.7	12.45	0.68	0.18		7	2.05	12.44	0.66	0.14
8	2.81	13.04	0.68	0.19		8	2.16	13.06	0.64	0.14
9	2.9	13.67	0.68	0.19		9	2.22	13.7	0.64	0.15
10	3.01	14.26	0.67	0.20		10	2.31	14.26	0.63	0.15
11	3.22	15.46	0.65	0.21		11	2.41	14.89	0.62	0.16
12	3.32	16.02	0.65	0.22		12	2.57	16.05	0.60	0.17
13	3.5	17.18	0.64	0.23		13	2.73	17.22	0.59	0.18
14	3.67	18.27	0.63	0.24		14	2.89	18.32	0.58	0.19
15	3.84	19.38	0.63	0.26		15	3.05	19.42	0.56	0.20
16	4.01	20.45	0.62	0.27		16	3.18	20.51	0.56	0.21
17	4.21	21.55	0.61	0.28		17	3.33	21.58	0.55	0.22
18	4.37	22.62	0.60	0.29		18	3.48	22.65	0.54	0.23
19	4.54	23.66	0.60	0.30		19	3.66	23.7	0.52	0.24
20	4.71	24.7	0.59	0.31		20	3.8	24.79	0.52	0.25
21	4.86	25.76	0.59	0.32		21	3.94	25.86	0.51	0.26
22	5.02	26.81	0.58	0.33		22	4.11	26.91	0.50	0.27
23	5.16	27.9	0.58	0.34		23	4.39	29	0.49	0.29
24	5.3	28.88	0.58	0.35		24	4.68	31.11	0.48	0.31
25	5.47	29.95	0.57	0.36		25	4.99	33.18	0.46	0.33
26	5.64	30.98	0.56	0.38		26	5.26	35.25	0.45	0.35
27	5.76	32.11	0.57	0.38		27	5.54	37.26	0.44	0.37
28	5.94	33.1	0.56	0.40		28	5.85	39.43	0.43	0.39
29	6.23	35.25	0.55	0.42		29	6.12	41.5	0.42	0.41
30	6.44	37.2	0.56	0.43		30	6.43	43.54	0.41	0.43
31	6.7	39.43	0.55	0.45		31	6.71	45.52	0.41	0.45
32	6.95	41.34	0.55	0.46						
33	7.23	43.48	0.55	0.48						
34	7.5	45.52	0.54	0.50						

EK-3 $P_K=1.25$ 'e ait deney sonuçları

Model 5						Model 6				
Ölçüm	H	Q	C_d	H/P		Ölçüm	H	Q	C_d	H/P
1	0.84	3.83	0.94	0.04		1	0.92	4.74	1.02	0.06
2	0.93	4.43	0.94	0.05		2	1.22	6.63	0.93	0.08
3	1.23	6.53	0.91	0.06		3	1.58	8.77	0.84	0.11
4	1.62	8.75	0.80	0.08		4	1.69	9.52	0.82	0.11
5	1.73	9.51	0.79	0.09		5	1.92	11	0.78	0.13
6	2.03	11.27	0.74	0.10		6	2.05	11.72	0.76	0.14
7	2.14	11.94	0.72	0.11		7	2.18	12.41	0.73	0.15
8	2.25	12.72	0.71	0.11		8	2.25	13.01	0.73	0.15
9	2.34	13.35	0.71	0.12		9	2.36	13.67	0.71	0.16
10	2.43	14.01	0.70	0.12		10	2.44	14.26	0.71	0.16
11	2.51	14.61	0.70	0.13		11	2.52	14.88	0.70	0.17
12	2.6	15.24	0.69	0.13		12	2.7	16.02	0.68	0.18
13	2.78	16.4	0.67	0.14		13	2.87	17.18	0.67	0.19
14	2.93	17.59	0.66	0.15		14	3.05	18.28	0.65	0.20
15	3.09	18.76	0.65	0.15		15	3.19	19.4	0.64	0.21
16	3.23	19.85	0.65	0.16		16	3.36	20.49	0.63	0.22
17	3.39	20.99	0.64	0.17		17	3.51	21.55	0.62	0.23
18	3.54	22.09	0.63	0.18		18	3.66	22.64	0.61	0.24
19	3.69	23.18	0.62	0.18		19	3.77	23.66	0.61	0.25
20	3.82	24.3	0.62	0.19		20	3.91	24.72	0.61	0.26
21	3.94	25.35	0.61	0.20		21	4.02	25.82	0.61	0.27
22	4.08	26.44	0.61	0.20		22	4.21	26.83	0.59	0.28
23	4.29	28	0.60	0.21		23	4.37	27.91	0.58	0.29
24	4.48	29.66	0.59	0.22		24	4.48	28.95	0.58	0.30
25	4.72	31.79	0.59	0.24		25	4.78	31.01	0.56	0.32
26	4.97	33.87	0.58	0.25		26	5.09	33.14	0.55	0.34
27	5.23	35.94	0.57	0.26		27	5.33	35.22	0.54	0.36
28	5.48	38.01	0.56	0.27		28	5.6	37.29	0.53	0.37
29	5.77	40.15	0.55	0.29		29	5.91	39.34	0.52	0.39
30	5.99	42.23	0.55	0.30		30	6.14	41.44	0.52	0.41
31	6.21	44.29	0.54	0.31		31	6.42	43.45	0.51	0.43
32	6.3	45.3	0.54	0.32		32	6.53	44.63	0.51	0.44

EK-4 $P_K=1.25$ 'e ait deney sonuçları

Model 7						Model 8				
Ölçüm	H	Q	C_d	H/P		Ölçüm	H	Q	C_d	H/P
1	1.19	4.93	0.93	0.08		1	0.85	5.26	1.04	0.06
2	1.54	6.75	0.86	0.10		2	1.14	6.93	0.88	0.08
3	1.89	8.9	0.84	0.13		3	1.46	9.05	0.79	0.10
4	2.03	9.68	0.82	0.14		4	1.54	9.77	0.79	0.10
5	2.42	11	0.71	0.16		5	1.75	11.09	0.74	0.12
6	2.59	11.73	0.69	0.17		6	1.83	11.78	0.74	0.12
7	2.66	12.41	0.70	0.18		7	1.94	12.55	0.72	0.13
8	2.81	13.04	0.68	0.19		8	2.01	13.16	0.71	0.13
9	2.88	13.67	0.68	0.19		9	2.1	13.8	0.70	0.14
10	2.97	14.28	0.68	0.20		10	2.26	15.02	0.68	0.15
11	3.05	14.9	0.68	0.20		11	2.43	16.15	0.66	0.16
12	3.14	15.48	0.68	0.21		12	2.58	17.27	0.64	0.17
13	3.22	16.05	0.68	0.21		13	2.75	18.38	0.62	0.18
14	3.37	17.18	0.68	0.22		14	2.87	19.47	0.62	0.19
15	3.56	18.3	0.66	0.24		15	3.03	20.55	0.60	0.20
16	3.7	19.42	0.67	0.25		16	3.18	21.64	0.59	0.21
17	3.88	20.48	0.65	0.26		17	3.34	22.71	0.58	0.22
18	4.06	21.56	0.64	0.27		18	3.47	23.76	0.57	0.23
19	4.23	22.64	0.63	0.28		19	3.61	24.85	0.56	0.24
20	4.37	23.72	0.63	0.29		20	3.74	25.86	0.55	0.25
21	4.55	24.76	0.62	0.30		21	3.9	26.92	0.54	0.26
22	4.67	25.8	0.62	0.31		22	4.05	27.99	0.53	0.27
23	4.84	26.89	0.62	0.32		23	4.18	29.05	0.53	0.28
24	4.98	27.93	0.61	0.33		24	4.34	30.03	0.51	0.29
25	5.11	28.97	0.61	0.34		25	4.56	32.14	0.51	0.30
26	5.29	30	0.60	0.35		26	4.87	34.25	0.49	0.32
27	5.39	31.04	0.61	0.36		27	5.1	36.32	0.49	0.34
28	5.54	32.11	0.60	0.37		28	5.38	38.36	0.48	0.36
29	5.85	34.19	0.59	0.39		29	5.69	40.4	0.46	0.38
30	6.04	36.32	0.60	0.40		30	5.97	42.53	0.45	0.40
31	6.35	38.39	0.59	0.42		31	6.21	44.54	0.45	0.41
32	6.57	40.44	0.59	0.44		32	6.4	45.55	0.44	0.43
33	6.81	42.5	0.58	0.45						
34	7.09	44.58	0.58	0.47						
35	7.23	45.62	0.57	0.48						

EK-5 $P_K=1.50$ 'ye ait deney sonuçları

Model 9						Model 10				
Ölçüm	H	Q	C_d	H/P		Ölçüm	H	Q	C_d	H/P
1	0.48	2.45	1.40	0.02		1	0.79	4.21	1.14	0.05
2	0.71	3.86	1.22	0.04		2	1.18	6.35	0.94	0.08
3	0.8	4.34	1.15	0.04		3	1.47	8.48	0.90	0.10
4	1.26	7.16	0.96	0.06		4	1.6	9.25	0.87	0.11
5	1.53	9.08	0.91	0.08		5	1.86	10.96	0.82	0.12
6	1.64	9.83	0.89	0.08		6	1.98	11.69	0.79	0.13
7	1.84	11.22	0.85	0.09		7	2.08	12.42	0.78	0.14
8	1.92	11.94	0.85	0.10		8	2.2	13	0.75	0.15
9	2.08	12.69	0.80	0.10		9	2.29	13.66	0.75	0.15
10	2.2	13.32	0.77	0.11		10	2.46	14.83	0.73	0.16
11	2.3	13.98	0.76	0.12		11	2.63	15.99	0.71	0.18
12	2.47	15.21	0.74	0.12		12	2.79	17.12	0.70	0.19
13	2.63	16.4	0.73	0.13		13	2.94	18.25	0.69	0.20
14	2.79	17.56	0.71	0.14		14	3.11	19.36	0.67	0.21
15	2.94	18.69	0.70	0.15		15	3.25	20.48	0.66	0.22
16	3.09	19.85	0.69	0.15		16	3.39	21.55	0.65	0.23
17	3.23	20.95	0.68	0.16		17	3.55	22.65	0.64	0.24
18	3.37	22.05	0.68	0.17		18	3.67	23.69	0.64	0.24
19	3.5	23.16	0.67	0.18		19	3.81	24.72	0.63	0.25
20	3.64	24.25	0.66	0.18		20	3.96	25.84	0.62	0.26
21	3.79	25.32	0.65	0.19		21	4.09	26.87	0.62	0.27
22	3.9	26.41	0.65	0.20		22	4.34	29	0.61	0.29
23	4.15	28.52	0.64	0.21		23	4.64	31.07	0.59	0.31
24	4.39	30.66	0.63	0.22		24	4.95	33.18	0.57	0.33
25	4.62	32.77	0.63	0.23		25	5.18	35.25	0.57	0.35
26	4.87	34.84	0.61	0.24		26	5.44	37.29	0.56	0.36
27	5.11	36.98	0.61	0.26		27	5.71	39.4	0.55	0.38
28	5.33	39.05	0.60	0.27		28	5.95	41.44	0.54	0.40
29	5.59	41.2	0.59	0.28		29	6.25	43.61	0.53	0.42
30	5.83	43.27	0.58	0.29		30	6.51	45.6	0.52	0.43
31	6.09	45.3	0.54	0.31						

EK-6 $P_K=1.50$ 'ye ait deney sonuçları

Model 11						Model 12				
Ölçüm	H	Q	C_d	H/P		Ölçüm	H	Q	C_d	H/P
1	1.08	4.02	0.87	0.07		1	0.69	4.24	1.14	0.05
2	1.54	6.16	0.79	0.10		2	0.95	6.26	1.05	0.06
3	1.91	8.32	0.77	0.13		3	1.31	8.45	0.87	0.09
4	2.05	9.08	0.75	0.14		4	1.42	9.22	0.84	0.09
5	2.36	10.9	0.73	0.16		5	1.67	10.94	0.78	0.11
6	2.64	11.66	0.66	0.18		6	1.76	11.66	0.77	0.12
7	2.76	12.35	0.66	0.18		7	1.85	12.41	0.76	0.12
8	2.87	12.94	0.65	0.19		8	1.94	12.99	0.74	0.13
9	2.96	13.6	0.65	0.20		9	2.02	13.7	0.74	0.13
10	3.09	14.73	0.66	0.21		10	2.1	14.23	0.72	0.14
11	3.25	15.93	0.66	0.22		11	2.18	14.86	0.71	0.15
12	3.43	17.09	0.66	0.23		12	2.34	16.02	0.69	0.16
13	3.61	18.2	0.65	0.24		13	2.49	17.13	0.67	0.17
14	3.77	19.29	0.64	0.25		14	2.64	18.28	0.66	0.18
15	3.94	20.39	0.64	0.26		15	2.8	19.39	0.64	0.19
16	4.09	21.49	0.63	0.27		16	2.95	20.45	0.62	0.20
17	4.29	22.6	0.62	0.29		17	3.09	21.56	0.61	0.21
18	4.4	23.64	0.62	0.29		18	3.23	22.65	0.60	0.22
19	4.52	24.66	0.63	0.30		19	3.34	23.72	0.60	0.22
20	4.69	25.76	0.62	0.31		20	3.48	24.76	0.59	0.23
21	4.98	27.85	0.61	0.33		21	3.63	25.84	0.58	0.24
22	5.28	29.94	0.60	0.35		22	3.74	26.86	0.57	0.25
23	5.57	32.04	0.59	0.37		23	4.01	28.97	0.56	0.27
24	5.82	34.15	0.59	0.39		24	4.26	31.07	0.55	0.28
25	6.05	36.23	0.59	0.40		25	4.51	33.18	0.54	0.30
26	6.3	38.31	0.59	0.42		26	4.79	35.26	0.52	0.32
27	6.57	40.38	0.59	0.44		27	5.07	37.35	0.51	0.34
28	6.81	42.41	0.58	0.45		28	5.33	39.41	0.50	0.36
29	7.09	44.53	0.58	0.47		29	5.59	41.45	0.49	0.37
30	7.22	45.64	0.57	0.48		30	5.84	43.6	0.48	0.39
						31	6.09	45.52	0.47	0.41

EK-7 P=15cm ve P=20cm'lik keskin kenarlı savaklara ait deney sonuçları

P=15cm						P=20cm				
Ölçüm	H	Q	C _d	H/P		Ölçüm	H	Q	C _d	H/P
1	1.42	2.7	0.90	0.09		1	1.45	2.23	0.72	0.07
2	2.36	5.04	0.78	0.16		2	1.79	3.17	0.75	0.09
3	2.96	6.94	0.77	0.20		3	1.87	3.46	0.76	0.09
4	3.35	7.93	0.73	0.22		4	2.79	5.84	0.71	0.14
5	3.86	9.68	0.72	0.26		5	3.33	7.6	0.71	0.17
6	4.06	10.46	0.72	0.27		6	3.55	8.39	0.71	0.18
7	4.4	11.78	0.72	0.29		7	4.01	10.12	0.71	0.20
8	4.75	13.13	0.72	0.32		8	4.23	10.93	0.71	0.21
9	5.02	14.36	0.72	0.33		9	4.51	12.19	0.72	0.23
10	5.26	15.55	0.73	0.35		10	4.7	12.85	0.71	0.24
11	5.5	16.71	0.73	0.37		11	4.89	13.48	0.70	0.24
12	5.76	17.84	0.73	0.38		12	5.16	14.8	0.71	0.26
13	5.96	18.98	0.74	0.40		13	5.4	15.99	0.72	0.27
14	6.13	20.07	0.75	0.41		14	5.63	17.18	0.73	0.28
15	6.33	21.21	0.75	0.42		15	5.92	18.32	0.72	0.30
16	6.52	22.27	0.75	0.43		16	6.12	19.48	0.73	0.31
17	6.79	23.34	0.74	0.45		17	6.27	20.59	0.74	0.31
18	6.89	24.41	0.76	0.46		18	6.49	21.71	0.74	0.32
19	7.04	25.46	0.77	0.47		19	6.68	22.81	0.75	0.33
20	7.19	26.55	0.78	0.48		20	6.86	23.9	0.75	0.34
21	7.48	28.68	0.79	0.50		21	7	24.98	0.76	0.35
22	7.91	30.79	0.78	0.53		22	7.11	26.04	0.78	0.36
23	8.29	32.89	0.78	0.55		23	7.49	28.24	0.78	0.37
24	8.65	34.98	0.78	0.58		24	7.78	30.38	0.79	0.39
25	9.01	37.04	0.77	0.60		25	8.12	32.52	0.79	0.41
26	9.38	39.15	0.77	0.63		26	8.46	34.65	0.79	0.42
27	9.6	40.22	0.76	0.64		27	8.84	36.73	0.79	0.44
						28	9.23	38.86	0.78	0.46

EK-8 ANSYS-Fluent’te elde edilen analiz sonuçları

Q	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	P=15 cm
5	2.01	2.06	2.39	1.72	3.51
10	2.91	2.93	3.31	2.71	3.76
15	3.76	3.84	4.15	3.59	4.58
20	4.75	4.83	5.77	4.56	5.24
25	5.46	5.47	6.56	5.35	6.25
30	6.22	6.36	7.19	6.11	7.08
35	6.71	7.26	7.59	6.59	8.04
40	7.78	8.12	8.35	7.61	8.93
45	8.4	8.52	8.62	7.76	9.81
Q	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8	P=20 cm
5	2.03	2.20	2.28	1.56	3.55
10	2.92	3.07	3.13	2.16	4.19
15	3.54	3.97	4.28	3.05	5.04
20	4.19	4.69	4.94	3.52	5.97
25	4.98	5.31	5.86	4.47	6.98
30	5.88	6.10	6.71	5.27	7.60
35	6.95	6.69	7.02	5.82	8.51
40	7.81	8.03	8.05	6.49	9.14
45	8.14	8.24	8.33	7.39	9.92
Q	Model 9	Model 10	Model 11	Model 12	
5	1.81	1.88	2.94	1.75	
10	2.49	2.57	3.77	2.41	
15	3.22	3.41	4.48	2.87	
20	4.95	4.10	4.92	3.82	
25	4.56	4.74	5.51	4.33	
30	5.01	5.28	6.31	4.80	
35	5.67	5.85	6.94	5.41	
40	6.18	6.24	7.73	6.04	
45	6.68	6.77	8.05	6.50	