# BARAJ DOLUSAVAK YAPILARINDA AKIŞ KARAKTERİSTİKLERİNİN FİZİKSEL VE SAYISAL ANALİZİ

**SELMAN OĞRAŞ**

**OCAK 2023**

**DİYARBAKIR**

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

# BARAJ DOLUSAVAK YAPILARINDA AKIŞ KARAKTERİSTİKLERİNİN FİZİKSEL VE SAYISAL ANALİZİ

SELMAN OĞRAŞ

DİCLE ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM-ÖĞRETİM VE SINAV YÖNETMELİĞİNİN BİR PARÇASI OLARAK
HİDROLİK ANA BİLİM DALINDA
DOKTORA TEZİ
OLARAK HAZIRLANMIŞTIR

OCAK 2023

DİYARBAKIR

**BARAJ DOLUSAVAK YAPILARINDA AKIŞ KARAKTERİSTİKLERİNİN FİZİKSEL VE SAYISAL ANALİZİ**

**Selman OĞRAŞ** tarafından Dicle Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin bir parçası olarak hazırlanan bu çalışma, aşağıda bilgileri yazılı jüri üyeleri tarafından değerlendirilerek **Hidrolik Ana Bilim Dalı**'nda **Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Neslihan Dalkılıç _____
Müdür, **Fen Bilimleri Enstitüsü**

Prof. Dr. Fevzi ÖNEN _____
Danışman, **İnşaat Mühendisliği Bölümü,**

**Dicle Üniversitesi**

**Sınav Jürisi:**

Prof.Dr. Ömerul Faruk DURSUN **(*)** _____
İnşaat Mühendisliği Bölümü, İnönü Üniversitesi

Prof. Dr. Fevzi ÖNEN **(**)** _____
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Dicle Üniversitesi

Prof.Dr.Tamer BAĞATUR _____
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Dicle Üniversitesi

Doç. Dr. Ömer Faruk CAN _____
Mimarlık Bölümü, Dicle Üniversitesi

Doç. Dr. Ebru ERİŞ _____
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ege Üniversitesi

ONAY

**Savunma Tarihi:** 16 /01 /2023

**(*)** Sınav Jürisi kısmının birinci satırına Jüri Başkanının bilgilerini yazınız.
**(**)** Sınav Jürisi kısmının ikinci satırına Tez Danışmanının bilgilerini yazınız

*Aileme…*

**Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tez çalışmasında yer alan tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu beyan ederim. Ayrıca, bahse konu bu kural ve ilkelerin gerektirdiği üzere, bu çalışmada özgün olmayan tüm bilimsel içerikleri kurallara uygun biçimde alıntılayıp kaynak gösterdiğimi beyan ederim. Beyanımla çelişen herhangi bir delil bulunduğu takdirde tüm sorumluluğu üstleneceğimi kabul ederim.**

**Ad, Soyad: Selman OĞRAŞ**

**İmza**

# TEŞEKKÜR

Öncelikle danışmanım Prof. Dr. Fevzi Önen'e çalışmanın daha fikir aşamasından, örnekleme, deney setlerini oluşturma, analizlerin yorumlanması ve tez taslağındaki düzeltmeler konularına kadar gösterdikleri destek ve sabırdan dolayı teşekkür ederim. Jüri üyelerime de bu tezin daha nitelikli bir hale gelmesi için yaptıkları eleştiri ve önerileri için teşekkür ederim.

Çalışma kapsamında Devlet Su İşleri (DSİ) tarafından hazırlatılan Ilısu Barajı Dolusavak Projelerinden faydalanılmıştır. Bu nedenle teknik personel olarak mensubu olduğum ülkemizin köklü teknik kurumu olan DSİ ailesine minnettarım.

Yazar, Dicle Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne (DÜBAP), bu tez çalışması için sağladıkları finansal destek için (Proje No: DÜBAP-Mühendislik.20.007) için teşekkürü bir borç bilir.

Yaşamım ve eğitimim boyunca yanımda olan sevgili Ailem'e teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR ..... v
İÇİNDEKİLER ..... vi
ŞEKİLLER LİSTESİ ..... viii
TABLOLAR LİSTESİ ..... xix
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ ..... xx
ÖZET ..... xxii
ABSTRACT ..... xxiii
1. GİRİŞ ..... 1
1.1 Barajlar, Dolusavaklar, Enerji ve Enerji Kırıcı Yapıların Türleri ..... 1
1.1.1 Barajlar ..... 1
1.1.1.1 Barajların kısımları ve sınıflandırılması ..... 2
1.1.2 Dolusavaklar ..... 4
1.1.3 Enerji ve enerji kırıcı yapıların türleri ..... 5
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR ..... 13
3. MATERYAL VE METOT ..... 47
3.1 Materyal ..... 47
3.1.1 Ilısu barajı ve HES projesi dolusavak yapısı ..... 47
3.1.2 Ilısu barajı dolusavak enerji kırıcı yapıların tasarımı ..... 51
3.2 Çalışmada Kullanılacak Metot ..... 56
3.2.1 Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ..... 57
3.2.2 Kullanılan HAD yazılımı (Flow3D) ..... 58
3.2.2.1 Geometrik tanımlama (FAVOR Konsepti) ..... 59
3.2.2.2 Serbest yüzey tanımlama (TruVOF Konsepti) ..... 60
3.2.3 Sayısal modelin hazırlanması ..... 61
3.2.3.1 Ilısu barajı dolusavağı 1982 tasarımı HAD analizi ..... 63
3.2.4 Akışkanların Temel Denklemleri ..... 69

3.2.4.1 Süreklilik Denklemi ..... 69
3.2.4.2 Navier Stokes Denklemi ..... 69
3.2.4.3 Türbülans Denklemleri ..... 70
3.2.4.4 Hava Sürükleme İlişkileri(Air Entrainment) ..... 73
4. BULGULAR VE TARTIŞMA ..... 79
4.1 Sayısal Analiz Sonuçları (Ilısu Barajı ve HES 1982 Yılı Modeli İçin) ..... 79
4.1.1 Uygun hesap ağı seçimi ..... 79
4.1.1.1 Uygun hesap ağı-1 ..... 81
4.1.1.2 Uygun hesap ağı-2 ..... 82
4.1.2 Dolusavak eşik yapısı ve boşaltım kanalının incelenmesi ..... 87
4.1.2.1 Basınç, su yüzü ve hız değerleri ..... 87
4.1.3 Sıçratma eşiği incelenmesi ..... 102
4.1.3.1 Varyant I, Varyant II (slotted bucket) basınç ve su yüzü değerleri ..... 102
4.1.3.2 Sıçratma eşiği çevirmeli tip basınç ve su yüzü değerleri ..... 109
4.1.4 Jet profillerinin incelenmesi ..... 112
4.1.4 Ölçek etkisi ..... 127
4.2 Ilısu Barajı Dolusavak 2010 Yılı Tasarımı HAD Analizi ..... 139
4.2.1 Sayısal analiz sonuçları ..... 139
4.2.1.1 Model basınç ve hız ölçüm sonuçları ..... 140
4.2.1.2 Dolusavak boyunca su yüzü profilinin belirlenmesi ..... 152
4.2.1.3 Enerji kırıcı havuz ile ilgi yapılan çalışmalar ..... 154
4.2.1.4 Dolusavak hava sürükleme ilişkileri ..... 157
4.3 Alternatif Çevirmeli Sıçratma Eşiği (Flip Bucket) Tasarımları ..... 158
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER ..... 183
KAYNAKLAR ..... 187
ÖZGEÇMİŞ ..... 192

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1 Beton dolgulu kemer baraj (Deriner Barajı) ..... 3

Şekil 1.2 Dolusavak tipleri ..... 5

Şekil 1.3. a. Yuvarlak sıçratma eşiği (roller bucket), b. Fırlatmalı sıçratma eşiği (ski jump) ..... 11

Şekil 1.4 Flip bucket türleri a. eğimli, b. dil şeklinde. c. eğimli (kısa yan duvarlar dahil)……...11

Şekil 1.5 Dişli sıçratma eşiği(slotted bucket) ..... 12

Şekil 1.6 Karakaya Barajı ..... 12

Şekil 2.1 Wuskwatim dolusavağı debi-anahtar eğrisi ve debi karşılaştırması ..... 16

Şekil 2.2 Farklı türbülans modelleri için su yüzü profili OKH değerleri ..... 20

Şekil 2.3 Duvarın üzerindeki hız için hesaplanmış ve teorik log profillerinin durumu……23

Şekil 2.4 Pürüzlülük katsayısına göre kanaldaki ortalama hızların durumu ..... 23

Şekil 2.5 Çevirmeli sıçratma eşiği üzerindeki teorik ve deneysel basınç dağılımının karşılaştırılması ..... 34

Şekil 2.6 Kavisli akışta basınç ..... 34

Şekil 3.1 a. Ilısu barajı 2010 yılı dolusavak 3D yapısı b. Ilısu barajı 1982 yılı dolusavak 3D yapısı ..... 49

Şekil 3.2 Ilısu barajı dolusavak beton aprondan bir görüntü ..... 49

Şekil 3.3 Ilısu barajı dolusavak boşaltım kanalı ve beton aprondan bir görüntü ..... 50

Şekil 3.4 Ilısu barajı revize uygulama projesi inşaatından görüntüler ..... 50

Şekil 3.5 Fiziksel model çevirmeli sıçratma eşiği orijinal tasarım(flip bucket) Flow3D……...51

Şekil 3.6 Fiziksel model sıçratma eşiği Varyant-I plan görüntüsü ..... 52

Şekil 3.7 Fiziksel model sıçratma eşiği Varyant -I ön görünüş ..... 52

Şekil 3.8 Fiziksel model sıçratma eşiği Varyant-I kesit görünüşü ..... 53

Şekil 3.9 Fiziksel model sıçratma eşiği Varyant-II plan görüntüsü ..... 53
Şekil 3.10 Fiziksel model sıçratma eşiği Varyant-II ön görünüş ..... 54
Şekil 3.11 Fiziksel model sıçratma eşiği Varyant-II kesit görünüşü ..... 54
Şekil 3.12 Kati proje sıçratma eşiği plan görüntüsü ..... 55
Şekil 3.13 Ilısu barajı sıçratma eşiği kati proje ön görünüş ..... 55
Şekil 3.14 Ilısu barajı dolusavak sıçratma eşiği inşaatından görüntüler ..... 56
Şekil 3.15 Flow3D Grid sistemi ve FAVOR konsepti ..... 60
Şekil 3.16 Akışkan yüzeyinin keskin ayrımı ..... 61
Şekil 3.17 Ilısu barajı 1982 yılı dolusavak plan ve profili ..... 64
Şekil 3.18 Ilısu barajı dolusavağı modifiye edilmiş üç boyutlu katı modeli (duvarlar dahil) ..... 65
Şekil 3.19 Dolusavak üzerinde su ve hava tabakasının gelişimi ..... 75
Şekil 3.20 Hava sürükleme ilişkileri ..... 76
Şekil 4.1 Ortalama serbest yüzey profillerinin hücre boyutuna göre bağıl hata varyasyonları ..... 80
Şekil 4.2 FAVORIZED seçeneği ile dolusavak modeli ..... 81
Şekil 4.3 Dolusavak favor ve jet profil görüntüsü (hesap ağı -1, DS-001) ..... 84
Şekil 4.4 Dolusavak favor modeli ve jet profil görüntüsü (hesap ağı -1, DS-002) .... 85
Şekil 4.5 Dolusavak favor modeli ve jet profil görüntüsü (hesap ağı -1, DS-003 ) ... 85
Şekil 4.6 Ilısu barajı dolusavağı ağ blokları (uygun hesap ağı-2) ..... 85
Şekil 4.7 Conformed To Block Volume ağ türü (uygun hesap ağı-2) ..... 86
Şekil 4.8 Dolusavak favor modeli ve jet profil görüntüsü (uygun hesap ağı-2) (DS-004) ……86
Şekil 4.9 Dolusavak favor modeli ve jet profil görüntüsü (uygun hesap ağı-2) (DS-005) ..... 86
Şekil 4.10 Dolusavak favor modeli ve jet profil görüntüsü (uygun hesap ağı-2)(DS-006) ……87

Şekil 4.11. Dolusavak favor modeli ve jet profil görüntüsü (uygun hesap ağı-2)(DS-007) ..... 87

Şekil 4.12 Ölçüm yapılan noktaların görüntüsü-fiziksel model (eşik yapısı) ……91

Şekil 4.13 Yaklaşım kanalı 1982 yılı fiziksel model görüntüsü ..... 91

Şekil 4.14 Ölçüm yapılan noktaların(probe) görüntüsü-katı model (eşik yapısı).....92

Şekil 4.15 Eşik(Ogee) yapısı basınç değerleri eksen-kenar ..... 92

Şekil 4.16 Fiziksel model şut kanalı basınç çizgileri Q17988 ve Q12500 $m^3/s$…...…93

Şekil 4.17 Basınç değerleri boşaltım kanalı eksen (Q17988 $m^3/s$) …….……..….94

Şekil 4.18 Basınç değerleri boşaltım kanalı eksen (Q2500 $m^3/s$) ……..94

Şekil 4.19 Fiziksel model boşaltım kanalı su yüzü profilleri (Q17988 $m^3/s$) .....….95

Şekil 4.20 Fiziksel model boşaltım kanalı su yüzü profilleri Q12500 $m^3/s$ için .....95

Şekil 4.21 Boşaltım kanalı basınç değerleri-eksen (Q12500 $m^3/s$) ……..…..96

Şekil 4.22 Su yüzü değerleri boşaltım kanalı kenar (Q17988 $m^3/s$) ……..96

Şekil 4.23 Su yüzü değerleri boşaltım kanalı eksen (Q17988 $m^3/s$) …….97

Şekil 4.24 Su yüzü değerleri ogee kenar (Q17988 $m^3/s$) ..... .97

Şekil 4.25 Su yüzü değerleri ogee kenar (Q12500 $m^3/s$) ……...98

Şekil 4.26 Su yüzü değerleri boşaltım kanalı eksen (Q12500 $m^3/s$) ……..98

Şekil 4.27 Akıma giren hava değerleri sınıflandırma (Q12500 $m^3/s$) ……99

Şekil 4.28 Dolusavak akıma giren hava değerlerine göre sınıflandırma ve 2D eksen kesiti (Q12500 $m^3/s$) ..... 99

Şekil 4.29 Ölçüm yapılan noktalardaki hava miktarı (%) (Q12500 $m^3/s$) ..... 100

Şekil 4.30 Hız değerleri boşaltım kanalı (Q17988 $m^3/s$) ……..101

Şekil 4.31 Hız değerleri boşaltım kanalı (Q12500 $m^3/s$) ..... 101

Şekil 4.32 Basınç değerleri diş üstü fiziksel model sonuçları varyantlar karşılaştırma……..103

Şekil 4.33 Su yüzü değerleri diş üstü fiziksel model sonuçları varyantlar karşılaştırma……..103

Şekil 4.34 Basınç değerleri diş arası fiziksel model sonuçları varyantlar karşılaştırma..……104

Şekil 4.35 Su yüzü değerleri diş arası fiziksel model sonuçları varyantlar için ..... 104

Şekil 4.36 Basınç değerleri diş üstü Varyant-I sayısal ve fiziksel model sonuçları..105

Şekil 4.37 Su yüzü değerleri diş üstü Varyant-I sayısal ve fiziksel model sonuçları..105

Şekil 4.38 Basınç değerleri diş arası Varyant-I sayısal ve fiziksel model sonuçları...106

Şekil 4.39 Su yüzü değerleri diş arası Varyant-I sayısal ve fiziksel model sonuçları……106

Şekil 4.40 Basınç değerleri diş üstü Varyant-II sayısal ve fiziksel model sonuçları...…….107

Şekil 4.41 Su yüzü değerleri diş üstü Varyant-II sayısal ve fiziksel model sonuçları……107

Şekil 4.42 Basınç değerleri diş arası Varyant-II sayısal ve fiziksel model sonuçları..……..108

Şekil 4.43 Su yüzü değerleri diş arası Varyant-II sayısal ve fiziksel model sonuçları……108

Şekil 4.44 Basınç değerleri eksen flip bucket sayısal ve fiziksel model sonuçları.……...110

Şekil 4.45 Su yüzü değerleri eksen flip bucket sayısal ve fiziksel model sonuçları.……..….110

Şekil 4.46 Basınç değerleri eksen full fiziksel model sonuçları ……...111

Şekil 4.47 Su yüzü değerleri eksen full fiziksel model sonuçları ..... 111

Şekil 4.48 Jet profilleri tüm tasarımlar fiziksel model sonuçları …….....113

Şekil 4.49 Jet profilleri flip bucket fiziksel ve sayısal model sonuçları..... 113

Şekil 4.50 Jet profilleri Varyant-I fiziksel ve sayısal model sonuçları …….114

Şekil 4.51 Jet profilleri Varyant-II fiziksel ve sayısal model sonuçları..... 114

Şekil 4.52 Basınç değerlerine göre mansap kanalı tabanında sınıflandırma alttan görünüş (Q12500m3/s flip bucket) ……...……115

Şekil 4.53 Basınç değerlerine göre mansap kanalı tabanında sınıflandırma alttan görünüş (Q12500$m^3$/s flip bucket with air entrainment)..... 115

Şekil 4.54 Ort.hız değerlerine göre sınıflandırma (Q12500$m^3$/s flip bucket)…..…116

Şekil 4.55 Ort.hız değerlerine göre sınıflandırma (Q12500 $m^3$/s flip bucket with air entrainment) ..... 116

Şekil 4.56 Toplam hidrolik enerji yüksekliğine göre sınıflandırma (Q12500$m^3$/s flip bucket) ……..……....117

Şekil 4.57 Toplam hidrolik enerji yüksekliğine göre sınıflandırma (Q12500$m^3$/s flip bucket with air entrainment) ..... 117

Şekil 4.58 Kayma gerilmesi değerlerine göre sınıflandırma ve eksen kesiti(Q12500$m^3$/s flip bucket) ……....118

Şekil 4.59 Kayma gerilmesi değerlerine göre sınıflandırma ve eksen kesiti (Q12500$m^3$/s flip bucket with air entrainment) ..... 118

Şekil 4.60 Basınç değerlerine göre mansap kanalı tabanında sınıflandırma alttan görünüş (Q12500$m^3$/s Varyant-I)……...……..119

Şekil 4.61 Basınç değerlerine göre mansap kanalı tabanında sınıflandırma alttan görünüş (Q 12500$m^3$/s Varyant-I with air entrainment) ..... 119

Şekil 4.62 Ortalama hız değerlerine göre sınıflandırma ve eksen kesiti(Q12500$m^3$/s Varyant-I) …….120

Şekil 4.63 Ortalama hız değerlerine göre sınıflandırma ve eksen kesiti (Q12500$m^3$/s Varyant-I with air entrainment) ..... 120

Şekil 4.64 Toplam hidrolik enerji yükseklik değerlerine göre sınıflandırma ve eksen kesiti(Q12500$m^3$/s Varyant-I) …….121

Şekil 4.65 Toplam hidrolik enerji yükseklik değerlerine göre sınıflandırma ve eksen kesiti (Q12500$m^3$/s Varyant-I with air entrainment) ..... 121

Şekil 4.66 Kayma gerilmesi değerlerine göre sınıflandırma ve eksen kesiti(Q12500$m^3$/s Varyant-I) ……..122

Şekil 4.67 Kayma gerilmesi değerlerine göre sınıflandırma ve eksen kesiti (Q12500$m^3$/s Varyant-I with air entrainment) ..... 122

Şekil 4.68 Basınç değerlerine göre mansap kanalı tabanında sınıflandırma alttan görünüş (Q12500m$^3$/s Varyant-II) ……..123

Şekil 4.69 Basınç değerlerine göre mansap kanalı tabanında sınıflandırma alttan görünüş (Q12500m$^3$/s Varyant-II with air entrainment)..... .123

Şekil 4.70 Ortalama hız değerlerine göre sınıflandırma ve eksen kesiti(Q12500m$^3$/s Varyant-II) ……....124

Şekil 4.71 Ortalama hız değerlerine göre sınıflandırma ve eksen kesiti (Q12500m$^3$/s Varyant-II with air entrainment)..... 124

Şekil 4.72 Toplam hidrolik enerji yükseklik değerlerine göre sınıflandırma ve eksen kesiti(Q12500m$^3$/s Varyant-II) …….....125

Şekil 4.73 Toplam hidrolik enerji yükseklik değerlerine göre sınıflandırma ve eksen kesiti (Q12500m$^3$/s Varyant-II with air entrainment)..... .125

Şekil 4.74 Kayma gerilmesi değerlerine göre sınıflandırma ve eksen kesiti(Q12500m$^3$/s Varyant-II) ……...126

Şekil 4.75 Kayma gerilmesi değerlerine göre sınıflandırma ve eksen kesiti (Q12500m$^3$/s Varyant-II with air entrainment)..... 126

Şekil 4.76 Su yüzü değerleri eksen fiziksel model sonuçları 30 ve 100 ölçek …….129

Şekil 4.77 Su yüzü değerleri eksen sayısal model sonuçları prototip, 30 ve 100 ölçek……..129

Şekil 4.78 Su yüzü değerleri eksen sayısal ve fiziksel model sonuçları 30 ve 100 ölçek…….……130

Şekil 4.79 Su yüzü değerleri eksen sayısal ve fiziksel model sonuçları 100 ölçek.……130

Şekil 4.80 Su yüzü değerleri eksen sayısal ve fiziksel model sonuçları 100 ve 30 ölçek..……....131

Şekil 4.81 Su yüzü değerleri eksen sayısal ve fiziksel model sonuçları 30 ölçek.……131

Şekil 4.82 Su yüzü değerleri eksen sayısal ve fiziksel model sonuçları prototip ve 30 ölçek ……....132

Şekil 4.83 Su yüzü değerleri eksen sayısal model sonuçları prototip ve 100 ölçek..……....132

Şekil 4.84 Su yüzü değerleri eksen sayısal model sonuçları prototip ve 100 ölçek(ogee)..…….…….133

Şekil 4.85 Su yüzü değerleri eksen sayısal model sonuçları prototip ve 100 ölçek(eşik)…….133

Şekil 4.86 Su yüzü değerleri eksen model sonuçları flip bucket prototip ve 100 ölçek(jet profili) ……134

Şekil 4.87 Su yüzü değerleri eksen model sonuçları Varyant-I prototip ve 100 ölçek(jet profili) ..... 134

Şekil 4.88 Basınç değerleri eksen fiziksel model sonuçları 30 ve 100 ölçek ……..135

Şekil 4.89 Basınç değerleri eksen sayısal model sonuçları prototip, 30 ve 100 ölçek……..135

Şekil 4.90 Basınç değerleri eksen sayısal ve fiziksel model sonuçları 100 ölçek.……136

Şekil 4.91 Basınç değerleri eksen sayısal ve fiziksel model sonuçları 30 ve 100 ölçek.……136

Şekil 4.92 Basınç değerleri eksen sayısal ve fiziksel model sonuçları 30 ve 100 ölçek..……....137

Şekil 4.93 Basınç değerleri eksen sayısal ve fiziksel model sonuçları 30 ölçek..……137

Şekil 4.94 Basınç değerleri eksen sayısal ve fiziksel model sonuçları prototip ve 100 ölçek (flip bucket) …….....138

Şekil 4.95 Hız değerleri eksen sayısal ve fiziksel model sonuçları prototip, 30 ve 100 ölçek ……138

Şekil 4.96 Ilısu barajı dolusavak yapısı plan görünüşü …….....142

Şekil 4.97 Ilısu barajı dolusavak yapısı kesit görünüşü ……..….....142

Şekil 4.98 Ölçüm yapılan noktaların görüntüsü(eksen) ……143

Şekil 4.99 Dolusavak ekseni boyunca oluşan basınç çizgisi ……....145

Şekil 4.100 Basınç değerlerine göre sınıflandırma ve eksen kesiti(with air entrainment bulking on) ……...146

Şekil 4.101 Basınç değerlerine göre sınıflandırma ve eksen kesiti (without air entrainment) ……146

Şekil 4.102 Dolusavak ekseni boyunca hava sürükleme ilişkilerine göre oluşan hız değ. çizgisi ……...147

Şekil 4.103 Dolusavak ortalama hız değerlerine göre sınıflandırma ve eksen kesiti (with air entrainment bulking on) ……....147

Şekil 4.104 Dolusavak ortalama hız değerlerine göre sınıflandırma ve eksen kesiti (without air entrainment) ……..148

Şekil 4.105 Dolusavak froude sayısına göre sınıflandırma ve eksen kesiti (with air entrainment bulking on) ……148

Şekil 4.106 Dolusavak froude sayısına göre sınıflandırma ve eksen kesiti (without air entrainment) …….……...148

Şekil 4.107 Dolusavak ekseni boyunca oluşan toplam hidrolik enerji çizgisi …….149

Şekil 4.108 Dolusavak yapısındaki toplam hidrolik enerji yüksekliği (with air entrainment) …….. ..149

Şekil 4.109 Dolusavak yapısındaki toplam hidrolik enerji yüksekliği (without air entrainment) ……150

Şekil 4.110 Dolusavak yapısındaki türbülans kinetik enerjisi (with air entrainment)……..150

Şekil 4.111 Dolusavak yapısındaki türbülans kinetik enerjisi (without air entrainment)……..150

Şekil 4.112 Dolusavak yapısındaki türbülans kinetik enerjisi dağılımı(with air entrainment)……..151

Şekil 4.113 Dolusavak yapısındaki türbülans kinetik enerjisi dağılımı(without air entrainment) ……151

Şekil 4.114 Dolusavak yapısındaki kayma gerilmesi dağılımı(with air entrainment)……..151

Şekil 4.115 Dolusavak yapısındaki kayma gerilmesi dağılımı(without air entrainment)……..152

Şekil 4.116 Dolusavak eksen boyunca serbest su yüzü profili……153

Şekil 4.117 Dolusavak üzerinde serbest su yüzü değerlerine göre sınıflandırma ve eksen kesiti ……...154

Şekil 4.118 Dolusavak dalma havuzu sonrası su seviye görüntüsü……..154

Şekil 4.119 Enerji kırıcı havuz ortasında oluşan basınç (x ekseni with air entrainment)……..155

Şekil 4.120 Enerji kırıcı havuzun sonunda oluşan basınç (x ekseni with air entrainment)…….....156

Şekil 4.121 Enerji kırıcı havuz üzerinde oluşan basınç (x ekseni without air entrainment) …….....156

Şekil 4.122 Enerji kırıcı havuz üzerinde oluşan basınç (x ekseni without air entrainment)…….....156

Şekil 4.123 Ölçüm yapılan noktalardaki hava miktarı (%)……..157

Şekil 4.124 Dolusavak hava sürüklemesi olayı ve eksen kesiti……..……..158

Şekil 4.125 Dolusavak makroskopik yoğunluk değerlerine göre sınıflandırma ve eksen kesiti …….....158

Şekil 4.126 Alternatif TF1 tasarımı ortalama hız değişimi…….…163

Şekil 4.127 Alternatif TF1 tasarımı kinetik enerji değişimi…….…163

Şekil 4.128 Alternatif TF1 tasarımı basınç değişimi……..…….....163

Şekil 4.129 Alternatif TF2 tasarımı ortalama hız değişimi……..164

Şekil 4.130 Alternatif TF2 tasarımı kinetik enerji değişimi…….....164

Şekil 4.131 Alternatif TF2 tasarımı basınç değişimi…….....164

Şekil 4.132 Alternatif TF3 tasarımı ortalama hız değişimi…….....165

Şekil 4.133 Alternatif TF3 tasarımı kinetik enerji değişimi…….…165

Şekil 4.134 Alternatif TF3 tasarımı basınç değişimi…….....165

Şekil 4.135 Alternatif TF4 tasarımı ortalama hız değişimi……..166

Şekil 4.136 Alternatif TF4 tasarımı kinetik enerji değişimi……..166
Şekil 4.137 Alternatif TF4 tasarımı basınç değişimi…….....166
Şekil 4.138 Alternatif TF5 tasarımı ortalama hız değişimi……...167
Şekil 4.139 Alternatif TF5 tasarımı kinetik enerji değişimi……..167
Şekil 4.140 Alternatif TF5 tasarımı basınç değişimi……..167
Şekil 4.141 Alternatif TF6 tasarımı ortalama hız değişimi……...168
Şekil 4.142 Alternatif TF6 tasarımı kinetik enerji değişimi……..…168
Şekil 4.143 Alternatif TF6 tasarımı basınç değişimi…….…….....168
Şekil 4.144 Alternatif TF7 tasarımı ortalama hız değişimi……..….169
Şekil 4.145 Alternatif TF7 tasarımı kinetik enerji değişimi ……....169
Şekil 4.146 Alternatif TF7 tasarımı basınç değişimi……....169
Şekil 4.147 Alternatif TF8 tasarımı ortalama hız değişimi……..….170
Şekil 4.148 Alternatif TF8 tasarımı kinetik enerji değişimi ……....170
Şekil 4.149 Alternatif TF8 tasarımı basınç değişimi……..…..170
Şekil 4.150 Alternatif TF9 tasarımı ortalama hız değişimi……..….171
Şekil 4.151 Alternatif TF9 tasarımı kinetik enerji değişimi ……....171
Şekil 4.152 Alternatif TF9 tasarımı basınç değişimi……....171
Şekil 4.153 Alternatif TF10 tasarımı ortalama hız değişimi…….172
Şekil 4.154 Alternatif TF10 tasarımı kinetik enerji değişimi……....172
Şekil 4.155 Alternatif TF10 tasarımı basınç değişimi…….....172
Şekil 4.156 Alternatif TF11 tasarımı ortalama hız değişimi…….....173
Şekil 4.157 Alternatif TF11 tasarımı kinetik enerji değişimi …….....173
Şekil 4.158 Alternatif TF11 tasarımı basınç değişimi……..…..173
Şekil 4.159 Alternatif TF12 tasarımı ortalama hız değişimi ……....174
Şekil 4.160 Alternatif TF12 tasarımı kinetik enerji değişimi……...174
Şekil 4.161 Alternatif TF12 tasarımı basınç değişimi……..174
Şekil 4.162 Alternatif TF13 tasarımı ortalama hız değişimi ……175

Şekil 4.163 Alternatif TF13 tasarımı kinetik enerji değişimi……..175
Şekil 4.164 Alternatif TF13 tasarımı basınç değişim……..175
Şekil 4.165 Alternatif TF14 tasarımı ortalama hız değişimi……...176
Şekil 4.166 Alternatif TF14 tasarımı kinetik enerji değişimi……..176
Şekil 4.167 Alternatif TF14 tasarımı basınç değişimi……176
Şekil 4.168 Alternatif TF15 tasarımı ortalama hız değişimi……...177
Şekil 4.169 Alternatif TF15 tasarımı kinetik enerji değişimi……..177
Şekil 4.170 Alternatif TF15 tasarımı basınç değişimi…….177
Şekil 4.171 Alternatif TF16 tasarımı ortalama hız değişimi……...178
Şekil 4.172 Alternatif TF16 tasarımı kinetik enerji değişimi……..178
Şekil 4.173 Alternatif TF16 tasarımı basınç değişimi…….178
Şekil 4.174 R20 değerlerinde β27,5-β50 eşik basınç değişimi …….179
Şekil 4.175 R25 değerlerinde β27,5-β50 eşik basınç değişimi …….….179
Şekil 4.176 R30 değerlerinde β27,5-β50 eşik basınç değişimi …….….178
Şekil 4.177 R35 değerlerinde β27,5-β50 eşik basınç değişimi …….…….178
Şekil 4.178 β27,5 değerlerinde R20-R35 eşik basınç değişimi …….....….178
Şekil 4.179 β35 değerlerinde R20-R35 eşik basınç değişimi…….178
Şekil 4.180 β42,5 değerlerinde R20-R35 eşik basınç değişimi …….178
Şekil 4.181 β50 değerlerinde R20-R35 eşik basınç değişimi…….178

# TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 3.1 Ilısu barajının özellikleri ..... 47

Tablo 3.2 Froude benzerliği için ölçekleme oranları ..... 63

Tablo 4.1 Farklı ağ boyutlarının performans analizi ..... 80

Tablo 4.2 Uygun hesap ağı-1 için yapılan simülasyonların özeti (Varyant-II Q12500 m3/s) ..... 81

Tablo 4.3 Uygun hesap ağı-2 için yapılan simülasyonların özeti (Q12500 $m^3/s$) ..... 83

Tablo 4.4 Boşaltım kanalı hız değerleri fiziksel model &sayısal model karşılaştırma (Q179888 $m^3/s$) ..... 100

Tablo 4.5 Boşaltım kanalı ve sıçratma eşiği hız değerleri karşılaştırma (Q12500 $m^3/s$) ..... 100

Tablo 4.6 Dolusavak 2010 yılı tasarım sayısal analiz sonuçları ..... 143

Tablo 4.7 Dolusavak üzerinde eksendeki problar ..... 143

Tablo 4.8 Alternatif çevirmeli sıçratma eşikleri sayısal analiz sonuçları-1 (Q1250 $m^3/s$) ..... 161

Tablo 4.9 Alternatif çevirmeli sıçratma eşikleri sayısal analiz sonuçları-2 (Q1250 $m^3/s$) ..... 162

# SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

| Simge | Açıklama |
|---|---|
| As | Her Hücredeki Serbest Yüzey Alanı [$m^2$] |
| $C_{air}$ | Hava Konsantrasyon Katsayısı [-] |
| g | Yerçekim İvmesi [$m/s^2$] |
| $h_o$ | Kanal Akış Yüksekliği [m] |
| P | Basınç [Pa] |
| Q | Debi [$m^3/s$] |
| V | Hız [m/s] |
| $\rho$ | Akışkanın Özgül Kütlesi [$kg/m^3$] |
| $\upsilon$ | Kinematik Viskozite [$m^2/s$] |
| $\mu$ | Akışkanın Viskozitesi [kg/m/s] |
| $\mu_T$ | Türbülans Viskozitesi [kg/m/s] |
| $\sigma$ | Sıvı-Gaz Arası Yüzey Gerilimleri [Pa] |
| $\eta$ | Türbülans Kinetik Enerjisi Üretimi [-] |
| lr | Froude Benzerliği Ölçek Oranı [-] |

| Kısaltma | Açıklama |
|---|---|
| CFD | Computational Fluid Dynamics (Hesaplamalı Akışkan Dinamiği) |
| DSİ | Devlet Su İşleri |
| FAVOR | Fractional Area/Volume Obstacle Represantion (Bölünmüş Alan/Hacim Gösterimi) |
| HAD | Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği |
| LES | Large Eddy Simulation (Büyük Çevrinti Simülasyonu) |

| | |
|---|---|
| RANS | Reynolds-averaged-Navier Stokes (Reynolds Ortalamalı Navier Stokes) |
| RNG | Renormalized Group (Yeniden Boyutlandırılan Grup) |
| USACE | United States Army Corps of Engineers (ABD Ordusu Mühendisler Birliği) |
| USBR | United States Bureau of Reclamation (ABD Islah Ofisi) |
| VOF | Volume of Fluid (Akışkan Hacmi Yöntemi) |

# ÖZET

## BARAJ DOLUSAVAK YAPILARINDA AKIŞ KARAKTERİSTİKLERİNİN FİZİKSEL VE SAYISAL ANALİZİ

Oğraş, Selman
Doktora, Hidrolik ABD
Danışman: Prof. Dr. Fevzi ÖNEN
Ocak 2023, 216 sayfa

Su gücü (Hydropower) yapılarında su kaynaklarının gelişimi bakımından son 60 yılda özellikle son 30 yılda büyük ilerleme ve yenilikler ortaya çıkmış, buna paralel dünyada büyük hidroelektrik projeler inşa edilmiştir. Hidroelektrik güç üretilen büyük ve kompleks yapıların karakteristikleri başlıca; baraj tasarım yükü yüksekliği, büyük deşarj, birim genişlikteki deşarj kapasitesi ve karmaşık jeolojik koşullardır. Üretilen güç miktarı onlarca veya yüzlerce gigawatt kadar yüksek olabilen bu derece yüksek güç üreten potansiyel enerjiyi dağıtmak, sönümlemek baraj mühendisliğinin dikkat çeken çalışma alanlarındandır. Dolayısıyla barajların deşarj yapılarının hidrolik karakteristikleri ve ortaya çıkan enerjinin güvenli ve ekonomik olarak dağıtımının sağlanması hususu dikkate alındığında etkin bir proje tasarımı için yapılacak fiziksel modelleme, prototip deneyler ve sayısal modelleme sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Deşarj yapılarının performansını değerlendirmek için kullanılan fiziksel model yöntemi geçmişte ve günümüzde başarılı olmasına rağmen HAD (Hesaplamalı Akışkan Dinamiği) yönteminin de fiziksel modellemeye göre çeşitli avantajlar sunduğu bilindiğinden günümüzde yapılacak hidrolik alanındaki mühendislik tasarımları artık deneysel çalışmalar ile birlikte HAD yazılımının kullanılmasını gerektirmektedir. Bu tür programların birçok hidrolik yapıların projelendirilmesinde kullanılması, planlanmada daha az hata oluşmasını, daha kısa zamanda ve daha ekonomik olarak yapılmasını sağlayacaktır. Bu çalışmada fiziksel model çalışmalarıyla belirlenen Ilısu Barajı dolusavak yapısındaki hidrolik karakteristikler ve enerji kırıcı yapıların etkinliği Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi ile sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmanın sayısal modellemesinde özellikle açık kanal akımı, sediment taşınımı, oyulma gibi problemlerin çözümünde başarılı bir yazılım olan Flow3D kullanılmış olup sayısal hesaplamalardan elde edilen su yüzü, basınç değerleri ve hız profileri, fiziksel model deney ölçümleriyle karşılaştırılarak ilgili sayısal analiz yönteminin performansı değerlendirilmiştir. Fiziksel ve sayısal analizler arasındaki karşılaştırmada, hidrolik karakteristiklere etki eden en güçlü husus hava-su ilişkisi, yanı sıra ölçek konusu da akış üzerinde etkili olan faktörlerdendir. Bu nedenle sayısal analiz programında hava sürükleme (air entrainment) modeli çalıştırılarak hava sürüklenmesinin akış üzerindeki etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca 1982 yılı 1/100 ölçekli fiziksel modelin yanı sıra aynı yıl gerçekleştirilen ve sadece dolusavak boşaltım kanalındaki karakteristikleri konu alan 1/30 ölçekli fiziksel model sonuçları da aynı ölçekli sayısal model ve sair diğer ölçekli sayısal model sonuçlarına eklenerek ölçek etkisi daha detaylı irdelenmiştir. Yine ilgi çalışmamız kapsamında mevcut dolusavak yapısının sonunda enerji kırınımı hususunda etkili yapılardan olan çevirmeli sıçratma eşiğinin farklı deflektör açısı ve yarıçapları dikkate alınarak 15 farklı eşik tasarlanmış olup bu tasarımların da sayısal analizi yapılarak enerji kırınımı açısından performans değerlendirilmesi yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Barajlar, Deşarj Yapıları, Enerji, Flow-3D

# ABSTRACT

## PHYSICAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF FLOW CHARACTERISTICS IN DAM SPILLWAY STRUCTURES

Oğraş, Selman
Ph.D. Thesis, Department of Hydraulic
Supervisor: Prof. Dr. Fevzi ÖNEN
January 2023, 216 pages

In the last 60 years, especially in the last 30 years, great progress and innovations have emerged in the hydroelectric sector in terms of the development of water resources, and in parallel, large hydroelectric projects have been built in the world. Characteristics of large and complex structures that generate hydroelectric power are mainly; high head, large discharge, per unit discharge and complex geological conditions. Dissipating and absorbing such high power generating potential energy, which can be as high as tens or hundreds of gigawatts, is of course one of the most difficult issues of dam engineering. Therefore, considering the hydraulic characteristics of the discharge structures of the dams and the safe and economical distribution of the resulting energy, physical modeling, prototype experiments and numerical modeling results should be evaluated together for an effective project design. Although the physical model method used to evaluate the performance of discharge structures has been successful in the past and today, it is known that the CFD method offers various advantages over physical modeling. Engineering designs in the field of hydraulics to be made today require the use of CFD (Computational Fluid Dynamics) software together with experimental studies. Because the use of such programs in the design of many hydraulic structures will ensure that there are fewer mistakes in planning, and that it will be done in a shorter time and more economically. In this study, the hydraulic characteristics of the discharge structures determined by physical model studies and the efficiency of the energy-absorbing structures were investigated numerically by the CFD method. In the numerical modeling of the study, Flow3D, a successful software, was used to solve problems such as open channel flow, sediment transport, and scour, and water surface pressure values and velocity profiles obtained from numerical calculations were evaluated. In this comparison, the performance of the numerical analysis method was evaluated using physical model test measurements. In the comparison between physical and numerical analysis, the most strong factor affecting the hydraulic characteristics is the air-water relationship, as well as the scale issue is one of the factors affecting the flow. For this reason, the effect of air entrainment on the flow was tried to be determined by running the air entrainment model in the numerical analysis program. In addition to the 1/100 scale physical model of 1982, the results of the 1/30 scale physical model, which was carried out in the same year and only focus on the characteristics of the spillway discharge channel, were added to the results of the same scaled numerical model and other scaled numerical models, and the scale effect was examined in more detail. Again, within the scope of our interest study, 15 different flip buckets have been designed by considering the different deflector angles and Radius, which is one of the effective structures in terms of energy dissipation at the end of the existing spillway structure, and these designs were made and a performance evaluation was made in terms of spillway structure and energy dissipation.

Keywords: Dams, Dissipation Structures, Energy, Flow-3D

# 1.GİRİŞ

Su, hayatın sırlarının en önemlisidir. Tarihteki ilk medeniyetlerin yerleşim bölgeleri hep su kaynaklarının yakınında olmuştur. İhtiyaçlara göre su kaynaklarına sahip değişik topluluklar, bilgi birikimi sağlamışlardır. Bilim tarihinde bilgi bakımından toplulukların dayanışmasına ilk misallerin yine su ile ilgili olduğu dikkate alındığında bilgi ve teknolojik gelişmelere paralel olarak medeniyetlerin de geliştiği söylenebilir. Özellikle modern çağımızda insanın çevre ile olan karşılıklı etkileşiminin çok yönlü olarak artması sonucunda su talebi de orantılı olarak gittikçe artmıştır. Bunun için insanlar daha ilk zamanlarda bile yeryüzü çukurluklarında birikmiş olan durağan veya akarsu halindeki hareketli su kaynaklarına ilave olarak artan talebin karşılanamayacağı kurak zamanlarda, sulak zamanların su fazlasını depolayarak gelecekte kullanmak için değişik yaklaşımlar düşünmüşlerdir. Bunlardan ilk ve basit olanı bir yerleşim alanının yakınında büyük ve derin çukurlukların açılarak yağan yağmur sularının buralarda toplanmasıyla sarnıç denilen yüzeysel su biriktirme hazneleridir. Burada biriktirilen suyun bir taraftan doğrudan diğer taraftan ise yeraltı su kaynaklarını sızma ile besleyerek dolaylı kullanılması söz konusudur. Ayrıca yine son yüzyıllarda akarsu, nehir, ırmak, çay veya dere sularının bent, sedde, bağlama ve barajlar vasıtasıyla önünün kesilerek biriktirilmesiyle de su talebini karşılayabilecek yapılar kullanılmıştır. Bu yapılar günümüzde bile sadece içme suyu amacıyla değil, aynı zamanda tarım ve elektrik enerjisi üretmek için kullanılmaktadır [1].

## 1.1 Barajlar, Dolusavaklar, Enerji ve Enerji Kırıcı Yapıların Türleri

### 1.1.1 Barajlar

Barajlar, su biriktirmek amacıyla hazne oluşturmak üzere bir akarsu vadisini kapatarak akışı engelleyen yapılardır. Su biriktirmenin yanında su seviyesini yükseltme ve geniş su yüzeyi oluşturma gibi iki önemli fonksiyonu daha vardır. Bir başka biriktirme yapısı olan bağlama ise su seviyesini yükseltmek amacıyla akarsuyun iki sahilini birbirine bağlayan yapıdır. Esasında bu iki yapı türünde planlama ve tasarım ilkelerinin pek çoğu aynı olmanın yanında aralarındaki en önemli fark barajın su biriktirmek, bağlamanın ise su seviyesini yükseltmek amacıyla yapılmasıdır. Geçmişte her iki terim yerine *bent* kullanılmıştır. Türkiye'de bazen bent terimi ile eş anlama sahip Arapçadan *kapatan* anlamında sedd kelimesi alınıp *set* şeklinde de söylenmiştir.

Baraj yapılarında akarsu tabanından baraj kretine kadarki düşey mesafe *talvegden yükseklik* olarak tanımlanırken baraj temelinden tepesine kadar olan mesafe ise *temelden yükseklik*, yani yapı yüksekliği olarak tanımlanır. Bir de akarsuyun akarsu tabanından maksimum hazne seviyesine kadar olan baraj eksenindeki düşey mesafe *hidrolik yükseklik* olarak ifade edilmektedir. Baraj tepesi barajın en yüksek seviyesi iken baraj temeli ise yükleri toprağa aktaran barajın en alt kısmıdır. Bu yapıların inşa amaçları şöyle sıralanabilir; sulama, içme ve kullanma suyu temini, hidroelektrik enerji üretmek, endüstriyel suyu sağlama, taşkın kontrolü sağlama, mesire alanlarının temini, balıkçılığın geliştirilmesi ve korunması, akarsuda ulaşım yolu sağlama, akarsu deltalarında tuzluluğun giderilmesi, katı maddenin tutulması ve kontrolü, su kalitesinin iyileştirilmesi, atıkların toplanması ve canlıların korunması gibi amaçları vardır.

#### 1.1.1.1 Barajların kısımları ve sınıflandırılması

Bir barajda bulunan başlıca kısımlar; gövde ve temel kısımları, baraj haznesi, dolusavak ve dipsavak yapıları, su çevirme yapısı, su alma yapısı, balık geçidi, elektrik santrali, gemi geçidi, sal geçidi ve diğer tesislerdir. Barajların sınıflandırılması hususunda ise ilgili yapılar çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir;

1-Büyüklüklerine göre büyük baraj ve küçük baraj olmak üzere sınıflandırılır. Uluslararası büyük barajlar komisyonuna göre (ICOLD) temelden yüksekliği 15 m'den daha fazla ise büyük baraj, baraj yüksekliği 10 ile 15 m arasında değişirse ve ayrıca aşağıdaki şartlardan birini sağlarsa böyle bir biriktirme yapısı da büyük bir barajdır.

a-) Tepe uzunluğu 500 m'den uzun ise,

b-) Hazne hacmi 1 milyon $m^3$'ten büyük ise,

c-) Taşkın debisi 2.000 $m^3$'ten büyük ise,

d-) Temel inşaatında özel zorluklar varsa ve projesi alışılmış türde değilse bu tür barajlar da büyük barajlar olarak adlandırılır.

2- Yüksekliklerine göre sınıflandırma: Baraj yüksekliği 100 m'den fazla ise yüksek baraj, 50 ile 100 m arasında ise orta yükseklikte baraj, 50 m'den az ise alçak baraj olarak sınıflandırılır.

3- Yapılış amaçlarına göre sınıflandırma: Sulama barajı ve taşkın koruma barajı gibi,

4- Fonksiyonlarına göre sınıflandırma: Biriktirme barajı, taşkın geciktirme barajı, kabartma barajı gibi,

5- Gövdenin statik projelendirmesine göre sınıflandırma: Ağırlık barajı, Kemer baraj (Şekil 1.1), Kemer ağırlık baraj, Payandalı baraj, Dolgu baraj, Ön germeli baraj olmak üzere,

6- Hidrolik özelliğe göre sınıflandırma: Üzerinden su akan ve akmayan baraj olmak üzere,

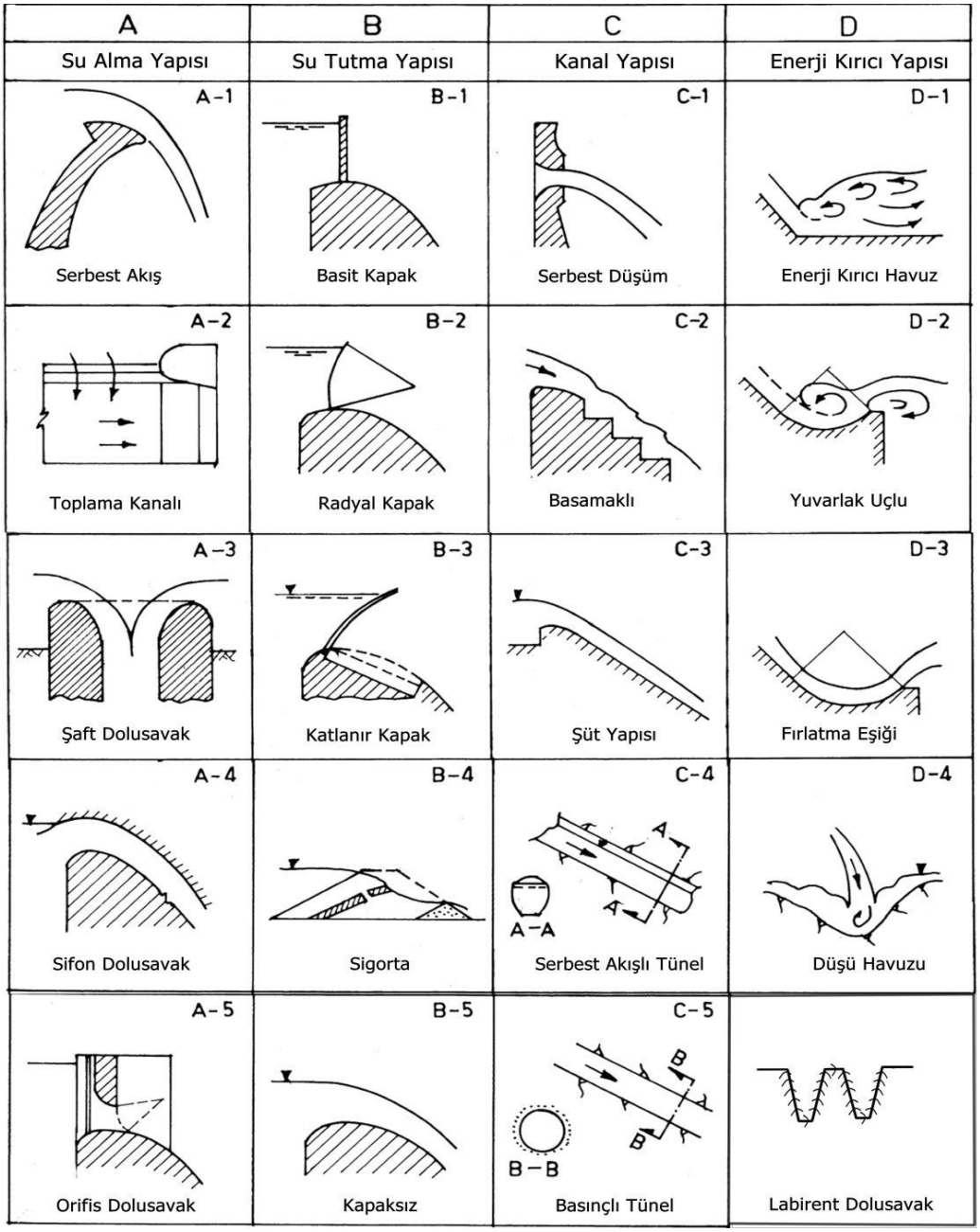
7- Gövde malzemesine göre sınıflandırma: Kagir, Beton, Dolgu baraj, Ahşap baraj, Çelik baraj, Lastik baraj olmak üzere çeşitli sınıflandırılmaya tabi tutulmuştur [2].



Şekil 1.1 Beton dolgulu kemer baraj (Deriner Barajı)

### 1.1.2 Dolusavaklar

Dolusavaklar, bir barajın taşkın sırasındaki güvenliğini sağlayan önemli yapılardandır. Barajı taşmaya karşı korumak için akışı kontrol ederek fazla suyu rezervuardan kuyruk suyuna aktarır. Amerika Birleşik Devletleri İçişleri Bürosu Islah Departmanı'nın (United States Bureau of Reclamation, USBR) tanımına göre, rezervuar alanında tutulamayan fazla suyu (sel suyu) serbest bırakmak için, ayrıca derivasyon barajlarındaki taşkın sularını derivasyon sistemine baypas etmesi için dolusavaklar inşa edilmektedir. Dolusavak membasındaki akış rejimi nehir iken dolusavak yüzündeki akış durumu sel rejimidir. Bu tür yapıların hidrolik karakteristiklerinin belirlenmesi hususu, hızla değişen akış tipi ve akış rejimi nedeniyle zordur. Dolusavak tasarımında, birçok barajın başarısızlığının temel sebebi yanlış tasarım olduğundan deşarj kapasitesinin belirlenmesi dikkatli bir şekilde araştırılmalıdır. Söz konusu deşarj yapıları birkaç farklı türde inşa edilebilirler. Başlıca; Basamaklı, Labirent, Sifon, Yanal, Şaft, Serbest Taşmalı, Tünel, Şut Kanallı ve Ogee dolusavaklardır [3]. Bunlar arasında en yaygın tür, uygun şekilde tasarlanıp uygulandığında, fazla suyu yukarı membadan mansaba verimli ve güvenli bir şekilde iletme yeteneklerinden dolayı ogee eşikli dolusavaklardır. Ogee eşikli dolusavaklar uygun şekilde tasarlanıp inşa edildiğinde, gerek nispi olarak iyi akış ölçüm yetenekleriyle gerekse de akışları verimli ve güvenli bir şekilde deşarj etme yeteneklerinden dolayı bir su tahliye yapısı olarak çok çeşitli durumlarda kullanılmaktadır [4]. Dolusavak üzerindeki akışın teorisi, büyük ölçüde ampirik formüllere, katsayılara ve tasarım çizelgelerine dayanmaktadır. Dolusavak eşikleri üzerinde oluşan basınç ve deşarj katsayıları gibi hidrolik karakteristiklerin tespitinde kullanılacak ampirik formülasyonları elde etmek için birçok araştırma ve model testi USBR ve ABD Ordusu Mühendisler Birliği (United States Army Corps of Engineers, USACE) tarafından yapılmıştır. Uygulamada, basite indirgenmiş akış ve standart geometrilere sahip dolusavaklar için gerekli tasarım kılavuzları adı geçen iki kuruluş tarafından oluşturulmuştur. Dolusavak türleri ve bileşenlerinin fonksiyonları ile ilgili daha detaylı sınıflandırma Şekil 1.2'de gösterilmiştir [5].




Şekil 1.2 Dolusavak tipleri

### 1.1.3 Enerji ve enerji kırıcı yapıların türleri

Su gücü (Hydropower) yapıları ve su kaynaklarının gelişimi bakımından son 60 yılda özellikle son 30 yılda büyük ilerleme ve yenilikler kaydedilmiştir. Bunun sonucunda dünyada büyük hidroelektrik projeler inşa edilmiştir. Hidroelektrik güç üretilen büyük ve kompleks yapıların karakteristikleri başlıca; baraj tasarım yükü yüksekliği (high head), büyük deşarj (large discharge), birim genişlikteki deşarj kapasitesi (per unit discharge) ve karmaşık jeolojik koşullardır. Üretilen onlarca veya yüzlerce gigawatt kadar bu derece yüksek güce sahip potansiyel enerjiyi dağıtmak, sönümlemek baraj

mühendisliğinin zor olan konularındandır. Başka bir deyişle baraj yükseklikleri ve deşarj kapasitesi arttıkça söz konusu deşarj ve enerji kırınımı hususu daha da zorlaşmakla birlikte zorlanan alanlar sadece baraj hidroliği değil aynı zamanda bu durum jeoloji ve çevre üzerinde kısıtlama yaşanmasına neden olmaktadır. Bu tür yapıların tasarım ve inşaat ihtiyaçlarını karşılamak için hidrolik araştırmalar malumumuzdur. Bu araştırmalar; büyük barajların sahip olduğu büyük deşarjlar ve bu deşarjlardan ortaya çıkan enerjinin güvenli ve ekonomik olarak dağıtımının sağlanması, ayrıca projelerdeki pratik gereksinimler, inovasyon ile birlikte teknolojik gelişmeler gibi konuları içermektedir [6].

Akarsular üzerindeki hidrolik yapılar nedeniyle su normal mecrasında akarken akışı engellenir, hızı azalır ve kabararak yüksekliği artar. Artan yükseklik ile birlikte potansiyel enerjisi artan su kütlesi, engeli aşarak mansaptan membaya doğru tekrar akışa geçmektedir. Tabii olarak yüksek hızlı geçiş söz konusudur. Bu tipik bir hidrolik olaydır. Aynen öyle de; inşa edilen özellikle baraj gibi büyük yapılardan dolayı su kontrollü bir şekilde memba kısmında kabaracak, biriken bu kütle deşarj edildiğinde potansiyel enerjinin kinetik enerjiye dönüşmesi nedeniyle muazzam miktarda bir enerji ortaya çıkacaktır. Oluşan bu muazzam enerji ile birlikte yüksek oranda hızların meydana gelmesi, dolayısıyla büyük basınç ve sürtünme gücü ile birlikte akış yatağında, hidrolik yapıda oyulma ve kavitasyona neden olacaktır. İnşa edilen yapıların yıkılmasına kadar gidecek bu sürecin engellenmesi için yapıların üzerinde veya akarsu yatağında bu enerjiyi sönümleyecek enerji kırıcı tesisler inşa edilmektedir. Diğer bir ifade ile yapıların inşa edileceği yerlerin sağlam jeolojik formasyonlara sahip olması ve topografyanın uygun olması hususları hariç, yüksek enerjiye sahip bir deşarj debisinin olumsuzluk oluşturmayacak hızlarda akmasını temin edecek yapılara enerji kırıcı yapılar denmektedir [7].

Şüphesiz enerji kırıcıların projelendirilmesi büyük çalışma ve beceri gerektirir. Enerji kırıcı yapılar, esas olarak proje yerine bağlı oldukları için bu konuda birçok araştırma yapılmış ancak bunların proje standartları henüz tamamlanmamıştır. Bir enerji kırıcının projelendirilmesi topografyanın yanında ana yapı, akım durumu, jeoloji ve ekonomi gibi birçok faktöre bağlıdır. Bu bakımdan böyle bir yapının kesin projesi hazırlanmadan önce model araştırmaları ile birlikte hidrolik çalışmasının incelenmesi

gerekir. Enerji kırınımı için ilgili yapılar suyun çarpma, türbülans oluşturma, dağılma meydana getirme veya su ve hava ile sürtünme sağlama şeklindeki ana ilkeler kullanılarak pek çok değişik tipte yapılabilir. Yapılabilecek yapı türlerini yalnız mühendisin hayal gücü ve yapıcının mali imkânları sınırlar [8]. Enerji kırıcı yapılar bir bağlama veya dolusavaktan deşarj edilen durumlarda, barajın dip savağından savaklanan akımlarda, sulama kanallarında, sifon yapılarında (topografyanın müsait olmamasından kaynaklanan cazibeli akımlarda) ve hareketli bağlamalarda kapak altında çıkan suyun enerjilerini kırmak için inşa edilirler [7]. Özellikle inşa edilen yüksek barajlarda birim genişlik başına deşarj edilen büyük debilerin gücü oldukça büyüktür. Hızları 30-40 m/s ulaşan bu enerjiyi dağıtmak için sadece tek bir yapıyla değil aynı zamanda birbiriyle ortak çalışan birden fazla enerji kırıcı yapı, yani kombine enerji kırıcıların inşa edilmesi gerekebilir. Örneğin Xiluodu(Çin) yüksek kemer barajda maksimum 55.000 $m^3$/s'yi aşan taşkın debi deşarjının enerji kırınımı için kombine yapı tasarlanmıştır. 7 adet yüzey dolusavak (surface spillway), 8 adet orta çıkışlar (middle outlet) baraj gövdesinde, ayrıca barajın hemen mansap topuğunda büyük bir dalma havuzu(plunge pool), her iki sahilde 2 adet dolusavak tüneli(spillway tunnel) olacak şekilde kombine yapı inşa edilmiştir. Yüzey dolusavak ve orta çıkışlardan çıkan akışlar dik olarak birbiriyle çarpışmak suretiyle enerjileri dağılırken sağ ve sol taraftaki dolu savak tünellerinden çıkan akışlar ise yatay olarak çarpışarak enerjileri dağılır. Çarpışan jetler düşüm havuzuna düşerek oluşan türbülans ve hidrolik sıçrama yoluyla enerji kırınımı sağlanmaktadır. Böylece baraj mansabında ve akarsu yatağında meydana gelecek muhtemel oyulmaların önüne geçilmektedir [9]. Anlaşılacağı üzere bu yapılar türbülansın artırılmasında, hızların düzgün bir şekilde dağıtılmasında, su ve hava arasındaki sürtünme oluşumunda, ayrıca mansaptaki akımın dengelenmesinde aktif rol oynamaktadır. Mühendislik yapılarının tasarımında emniyet ve estetiğin yanında ekonominin(maliyet) de önemli etken olduğu göz önüne alınarak büyük barajlarda oluşan muazzam enerjiyi dağıtmak için yukarıda örneği verilen kombine yapılar dikkat çeken tercihler arasındadır. Çünkü bu şekilde yapılacak tasarım sonucunda inşa edilecek düşüm havuz büyüklüğünde azalmaya gidilmekle birlikte, dolusavak tünel sayılarında azalma olabilmekte, bazı durumlarda ihtiyaç olunan mansap su derinliği azalmakta, ayrıca bu durum deşarj yapılarının büyüklüğüne de etki etmektedir. Bu nedenle net olarak anlaşılıyor ki yapılacak fiziksel modelleme,

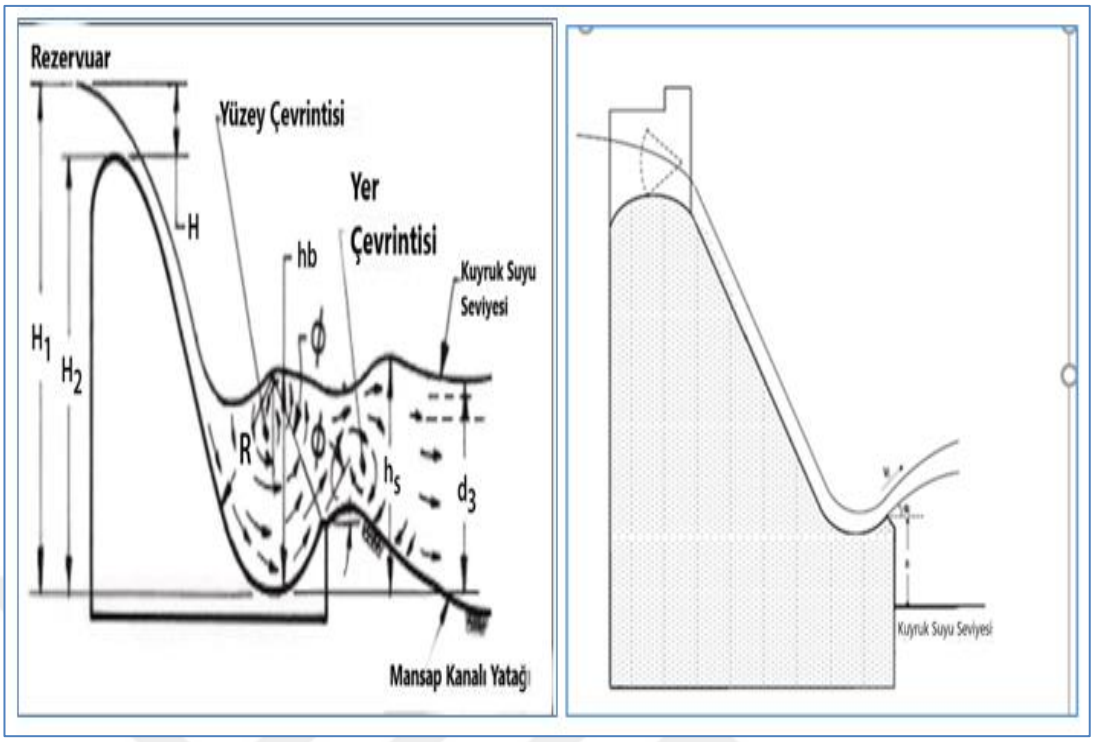
prototip deneyleri ve sayısal modelleme sonuçlarının birlikte değerlendirilmesiyle tasarlanacak proje ideale yakın olacaktır.

Yüksek barajlardaki taşkın deşarjı ve enerji kırınımı için güvenli ve ekonomik çözümler sağlamak amacıyla araştırma ve tasarım enstitüleri çeşitli enerji kırıcılar üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmalar ihtiyaçlar doğrultusunda belirlendiğinden ihtiyaçlar arttıkça proje karakteristikleri de buna göre değişim göstermiş, ayrıca teknoloji de bu doğrultuda gelişmiştir. Sonuç itibariyle teknoloji ve proje tasarımları birbiriyle örtüşen seviyede bulunmaktadır. [6]. Şimdiye kadar büyük taşkın debileri için gerçekleştirilen prototip deneyler sonucunda yeni tip enerji kırıcılar kullanılmak suretiyle birçok büyük proje tasarlanmıştır. Bununla birlikte taşkın deşarjı ve enerji kırınımı için tercih edilen yöntemler farklıdır. USBR tarafından yıllar boyunca yapılan çalışmalar sonucunda tasarlanan ve tip 1, 2, 3, 4 şeklinde sınıflandırılan ve dolusavakların alt kısmında inşa edilen hidrolik sıçramalı bu yapılar dolusavaklar için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yapıların performansı gelen akışın froude sayısı ile yakından ilişkili olup havuzdan çıkan akışın enerji sönümlenme oranı havuzun içinde tasarlanan farklı yapılar sayesinde %60'a kadar çıkabilmektedir. Hidrolik sıçramalı havuz dışında dolusavak yapısının ucunda yuvarlak eşik tasarlanarak kavisli kısımda meydana gelen hidrolik sıçrama ile enerji kırınımı gerçekleştirilebilir (Şekil 1.3 a). Bu yapılardaki kırınım, dolusavaktan gelen akışın froude sayısına ve kuyruk suyu derinliğine bağlıdır. Bir diğer yapı türü sıçratma eşikleridir. Bu yapılar sayesinde akımın havalandırılarak yapıdan uzak bir noktaya fırlatılması ve hava direnci etkisiyle jetin enerjisinin dağılması sağlanır. İlgili jetler barajdan çok uzakta nehir yatağına çarparak enerji kırınımı gerçekleştirilir. Sıçratma eşikleri serbest jet fırlatmalı enerji kırıcı (ski-jump bucket), çevirmeli sıçratma eşikli enerji kırıcı(flip bucket) olarak sınıflandırılır [10]. Mason'a [10] göre serbest jet fırlatmalı eşik yapısı (ski jump bucket) barajın hemen mansabındaki akarsuyun üstüne kurulduğundan oluşan jetler baraj yapısını etkileyebilirken çevirmeli sıçratma eşiğinde (flip bucket) ise ilgili yapının dolusavak şut kanalının ucuna yani barajdan daha uzak mesafeye inşa edilmesinden dolayı jetlerin daha uzağa fırlamasıyla avantajlı bir durum elde edilmektedir. Serbest fırlatma yapısının ana amacı, barajda oyulma açısından sıkıntı oluşturmayacak şekilde akıntı yönünde mümkün olduğunca büyük bir mesafede jet çarpmasını sağlamak iken çevirmeli sıçratma eşiğinde, enerji dağılımı genellikle

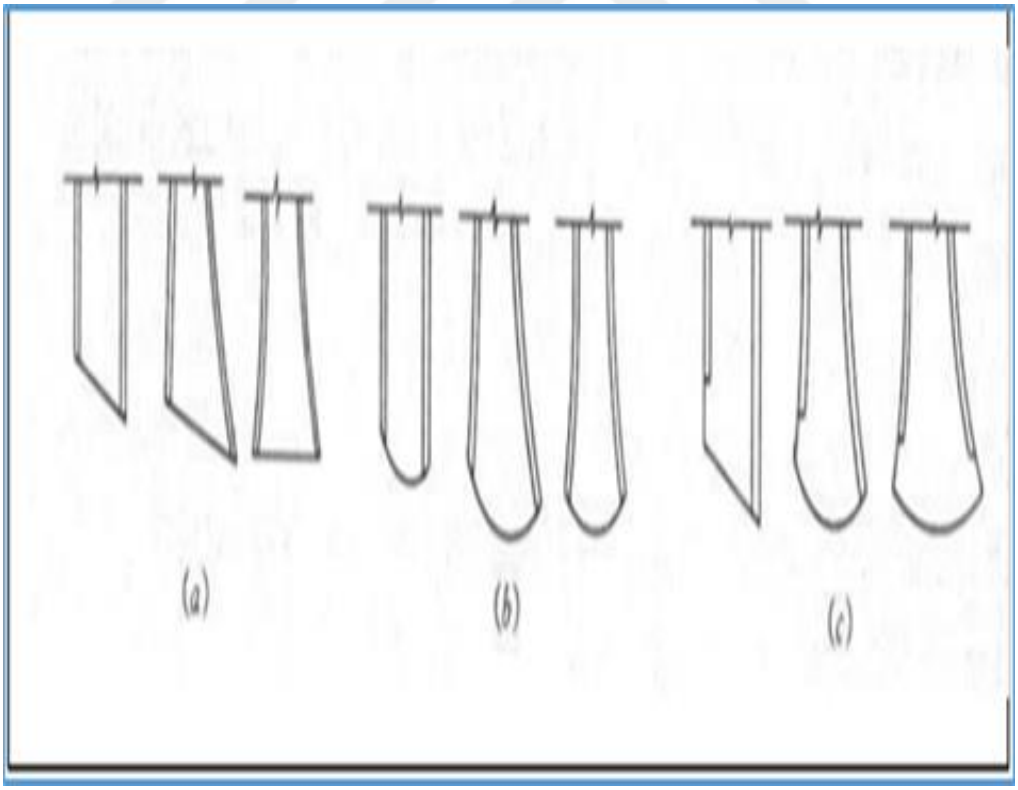
dalma havuzu (plunge pool) ve hava sürüklenmesi ile oluşturulur [11]. Steiner ve ark. [12] gibi birçok araştırmacı çevirmeli sıçratma eşiğini (flip bucket), fırlatmalı eşik (ski jump) (Şekil 1.3 b) yapısı ile aynı kategoriye koymaktadır. Onlara göre zaten sıçratma eşiği (ski jump), kendisi tek başına bir enerji kırıcı olarak kabul edilmeyip enerji dağıtım sisteminin ayrılmaz bir parçası olmanın yanı sıra amacının yüksek hızlı akışı (jet) santral, dolusavak ve baraj yapısından daha uzak bir konuma fırlatmaktır. Bu yapıların halihazırda, çok çeşitli sapma açıları, fırlatma açıları, göreceli eğrilik yarıçapları, dişli yapılar gibi özel elemanlar içeren çeşitli geometrilere sahip (Şekil 1.4) binlerce tasarımı aktif olarak çalışmakta ancak, bunlar için sınırlı standart ve sadece birkaç tasarım yönergesi mevcuttur [13]. Sıçratma eşikleri(flip bucket, ski jump) 1930'ların ortalarında Fransa'da gerçekleştirilen Dordogne hidrolik projelerinde ve 1954'te Maitre ve Obolenski tarafından jet akışları üzerinde yapılan deneylerde başarılı bir hidrolik tasarım olarak önerilmiştir [14]. Daha sonra 1945 yılında bu yapıların farklı varyantları olarak dişli sıçratma eşiği (Slotted bucket, Şekil 1.5) adı verilen değiştirilmiş versiyonu Güney Dakota'da bulunan Angostura barajında kurulmuştur. Bu yapı aynı zamanda New Mexico'daki Brantley barajı için de inşa edilmiştir. Ülkemizde ise Karakaya (Şekil 1.6), Keban barajları olmak üzere farklı barajlarda da başarılı olarak inşa edilmiştir. Bu yapılar, belirli bir proje için özel olarak tasarlanırlar ve tasarımları ölçekli modeller kullanılarak geliştirilir [3]. Bu nedenle yukarıda da ifade edildiği üzere tasarım kılavuzları şu anda tamamlanmamıştır. Serbest Jet yörüngeleri de yine tercih edilebilen enerji kırıcı yöntemlerden biridir. Baraj kretinin üstünden deşarj olan serbest akış, aşağıya doğru hava direncine ve hava sürüklenmesine maruz kalır. Hava sürüklenmesi nedeniyle su jeti kuyruk suyuna dalmadan önce önemli miktarda enerjisi sönümlenir. Nehir yatağına dalma ile birlikte daha fazla enerji kaybı elde edilir. Bu serbest jet akışı, kemer barajlarda kret üstünde, ayrıca dip savakların çıkışlarında oluşmaktadır. Bu yapılar dizayn edilirken baraj tipi, barajla bağlantılı yapıların yerleşimi, ilgili yapılardaki hidrolik durum, çevre, jeoloji, giriş ve çıkış debi miktarları, baraj yüksekliği, ekonomik değerlendirme gibi faktörler göz önüne alınmaktadır. Tasarlanan bu yapılar genel olarak enerji kırınımı için yeterli görülerek çok sayıda yapıda kullanılmışsa da daha evvel de temas edildiği üzere gelişen dünya nüfusu ile birlikte doğan enerji ihtiyacını karşılamak için devasa yapılar ve ortaya çıkan büyük miktardaki enerjiyi sönümlemek için farklı tip enerji kırıcı yapılar tasarlanma yoluna gidilmiştir. Sıçratma eşikleri ile ilgili olarak, eşiğin gerek

açısı gerekse de şekli değiştirilerek çok sayıda farklı türleri inşa edilmiş olmakla birlikte bu yapılar prototip deney sonuçları da göz önüne alınarak büyük barajlarda başarıyla uygulanmıştır. Bunların dışında büyük barajlar için sıçratma eşikleriyle birlikte kombine olarak inşa edilen jet etkileşimli havuzlar, dalma havuzları (plunge pool), taban kaplamalı düşü havuz (stilling basin) gibi yöntemler yerel durumlar da göz önüne alınarak kullanılmaktadır. Enerji kırıcı yapı türlerinden bir diğeri de iç enerji kırıcı yapılar olan tünellerde inşa edilen yapılardır. Alandaki topografik ve jeolojik şartlar uygun ise hem projenin daha düzenli olması hem de maliyetin azalması için derivasyon tünellerinin içinde örneğin orifis kapaklar, yüzük şeklindeki engeller (tumbling) tasarlanmak suretiyle büyük miktarda enerji kırınımı gerçekleştirilebilir. Tabii olarak bu yöntemdeki en büyük sıkıntı kavitasyon, sediment ve dolayısıyla erozyon hususudur. Çözümü ise gerekli basıncı ayarlamak, orifis plakalarda gerekli optimizasyonu yapmak, anti erozyon malzeme kullanmaktır [6].

Akarsuların veya açık kanal akımlarının yapılarla olan etkileşimlerinde akım profili, akım karakteristikleri ve akım alanı gibi hususlarda değişiklikler ortaya çıkmaktadır. Tabii olarak bu tür etkileşimlerde sadece akım etkilenmeyecek olup aynı zamanda yatak malzeme topolojisi de değişmektedir. Çevre ve canlılar üzerinde ortaya çıkan bu değişikliklerin zarara dönüşmemesi için akım sahalarında inşa edilecek yapıların geometrik ve hidrolik karakteristiklerinin bilinmesi gerekmektedir. Örneğin ulaşımda kullanılan köprülerde statik ve dinamik açılardan hata bulunmamasına karşın yıkılmaları bu gerçeği gözler önüne sermektedir. Yapıya etki eden akımın yapı üzerindeki etkilerinin göz ardı edilmesi veya doğru analiz edilmemesi ortaya çıkan bu manzarayı kaçınılmaz kılıyor [15]. Dolayısıyla Baraj mühendisliğinin araştırma konularından olan barajlardaki deşarj yapılarında ortaya çıkan enerjinin güvenli ve ekonomik olarak dağıtımının sağlanması hususu dikkate alındığında etkin bir proje tasarımı için yapılacak fiziksel modelleme, prototip deneyleri ve sayısal modelleme sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi gerektiği düşünülmektedir. Bu çalışmada; Flow3D kullanılarak 1/100, 1/30 ve 1/1(prototip) ölçeklerinde çeşitli akış senaryoları simüle edilerek elde edilen sonuçlar, Devlet Su İşleri (DSİ) TAKK laboratuvarında 1/100 ve 1/30 ölçeklerinde inşa edilen Ilısu Baraj dolusavağının fiziksel model testlerinden elde edilen verilerle karşılaştırılmış ve böylece HAD yönteminin etkinliği ortaya konulmuştur.



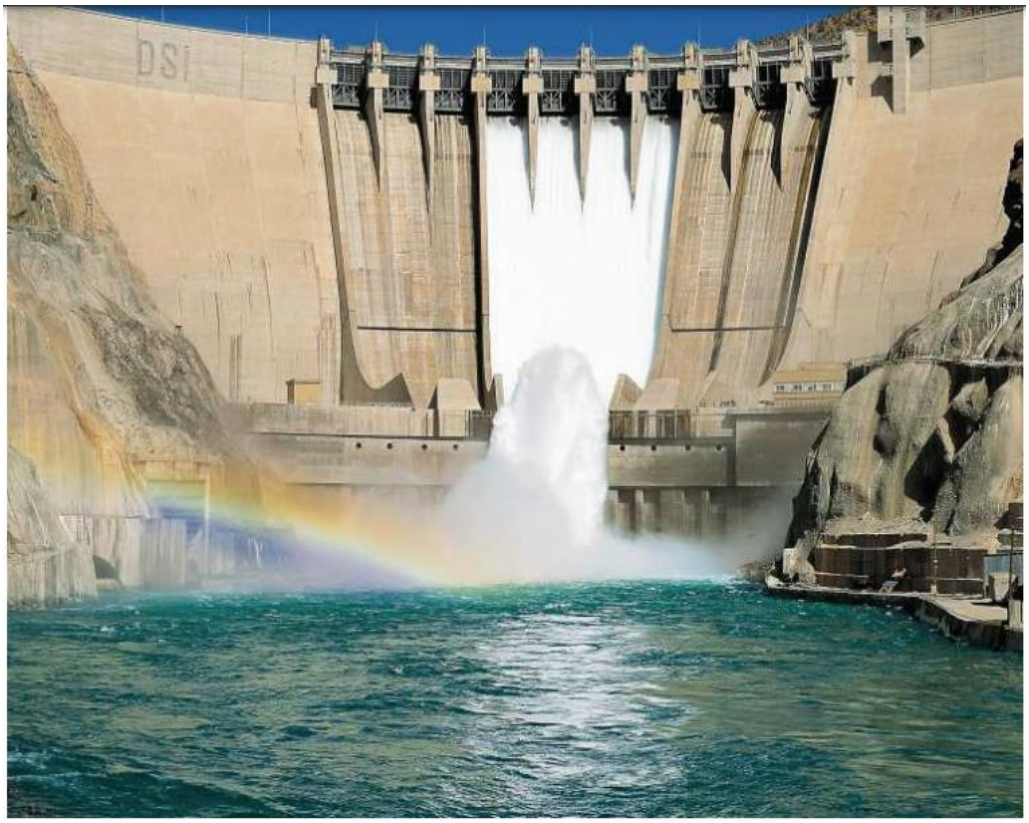

Şekil 1.3. a. Yuvarlak sıçratma eşiği (Roller Bucket), b. Fırlatmalı sıçratma eşiği (Ski Jump)




Şekil 1.4 Flip bucket türleri a. eğimli, b. dil şeklinde. c. Eğimli (kısa yan duvarlar dahil)



Şekil 1.5 Dişli sıçratma eşiği (slotted bucket)



Şekil 1.6 Karakaya Barajı

## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Barajların deşarj yapılarındaki akış karakteristiklerinin analizi başlıklı çalışmamız, barajların dolusavak yapılarındaki taşkın deşarj debisini güvenli bir şekilde mansaba aktarmak için ihtiyaç olunan tasarımlarla ilgilidir. Tasarlanan devasa boyutlardaki yapının üzerinde akan akışın hidrolik karakteristiklerinin tespiti hususu, özellikle de deşarj debisi yüksek oldukça daha da önem kazanmaktadır. Bu tür yapılardaki akış karakteristiklerinin tespiti basit hidrolik formüllerle açıklanamayacak kadar karmaşıktır. İlgili sorunların çözümü yıllardır fiziksel modeller yoluyla belirlenebilmektedir. Ancak tanzim edilen fiziksel modeller zaman/kaynak mefhumu da göz önüne alındığında sınırlı varyasyonlara cevap vermektedir. Bu nedenle günümüzde yapılan hidrolik alanındaki mühendislik tasarımları artık deneysel çalışmalar ile birlikte HAD yazılımının kullanılmasını gerektirmektedir. Nitekim bu doğrultuda çok sayıda çalışmalar yapılmış ve yapılmaktadır. Dolusavak modellemelerinin HAD uygulanmasına ilişkin mevcut literatürün çoğu Flow3D kullanılarak yapılan çalışmalardan oluşmaktadır. Bununla birlikte dolusavak hidroliğini modellemek için CFX ve Fluent gibi farklı yazılım paketlerini kullanan çalışmaların da mevcut olduğu bilinmektedir. Flow3D'nin üç boyutlu akış modellemesinde dikkat çeken güçlü yanlarından biri programın sonlu farklar çözüm şeması Hirt ve Nichols [16] tarafından geliştirilen ve modelde akışın yalnızca su kısmını içermesine izin vererek çevredeki hava hareketi ihmal edildiğinden simülasyon sürelerinde önemli azalmalara neden olan Akışkan Hacmi (Volume of Fluid, VOF) yöntemidir. Bu tür programlama, diğer HAD programlarının gerektirdiği çok ince ağlar kullanılmadan su ve hava arasında keskin bir ara yüz oluşturulmasına izin verir. Flow3D ayrıca engelleri tanımlamak içi FAVOR (FractionalArea/Volume Obstacle Representation) yöntemini [17] kullanır. Bu yöntem, diğer birçok HAD programı tarafından kullanılan deforme olmuş ağ yapılarından çok daha kolay oluşturulabilen tamamen yapılandırılmış hesaplama ağlarının kullanmasını sağlar.

Aköz ve ark. [18], dolusavak mansabında bulunan enerji kırıcı yapının üzerindeki akımın fiziksel ve sayısal analizini gerçekleştirmişlerdir. Sayısal analiz programı ANSYS'in kullanıldığı çalışmada türbülans kapatma modeli olarak RSM çalıştırılmıştır. Çalışma sonucuna göre gerek kret üstünde gerekse de kretin memba ve mansabında elde edilen hız grafiklerinin birbiriyle uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Yine elde edilen su yüzü profillerinde hidrolik sıçramanın gerçekleştiği bölgede kabul edilebilir farklar oluşmakla birlikte diğer bölgelerde gayet birbiriyle uyumlu olduğu ifade edilmiştir.

Aydın ve ark.[19], boşaltım kanallarındaki enerji kırıcı yapıların etkinliğini sayısal olarak incelemişlerdir. Peterka(1984)'nın deneysel çalışmalarından uyarlanan model, klasik şut kanalı ve bu kanal üzerine yerleştirilen enerji kırıcı bloklardan oluşmaktadır. Flow-3D'nin kullanıldığı çalışmada türbülans modeli olarak RNG modeli, sınır koşulları olarak giriş hızı ve çıkış koşulu da serbest çıkış tercih edilmiştir. 1.250.000 adet hücreden oluşan model sonuçlarına göre enerji kırıcı blokların şut kanalında sönümlediği enerji miktarının klasik kanala göre %80 oranında olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçların dolusavak kretinin üstünde ve kanal çıkışında tespit edilen noktalardaki akış yüksekliği ve hız verilerinden yola çıkılarak elde edildiği belirtilmiştir.

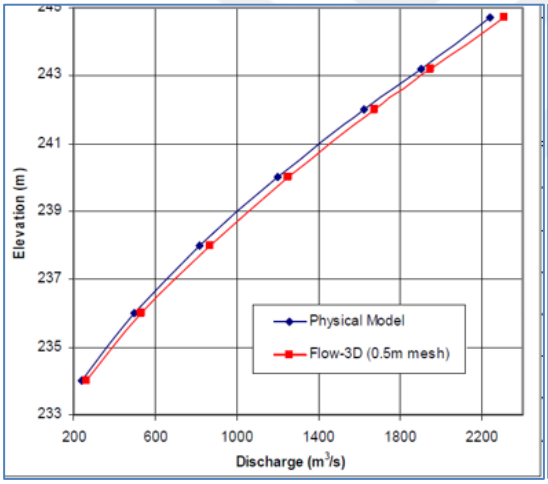
Baba Ali ve ark. [20], Nazloo Barajı'nın dolusavak tasarımında inşa edilen enerji kırıcı havuzun etkinliğini fiziksel ve sayısal olarak modelleme yoluna gitmişlerdir. USBR Tip-II enerji kırıcı havuzun yan duvarlarında $5^o$ /$7{,}5^o$/$10^o$ ve $12{,}5^o$ açılarla havuzun mansabına doğru daraltmak suretiyle oluşacak hidrolik sıçramanın da katkısıyla meydana gelen enerji sönümlenmesi oranını farklı debiler için araştırmışlardır. Flow3D programı ile analizi yapılan modelde türbülans modeli olarak RNG k-ε ve Standart k-ε modelleri ayrı ayrı çalışılmış ayrıca hesap ağı tasarımı için tek bloklu yaklaşık 1.000.000 adet 0,1 m boyutlarında hücre kullanılmıştır. Meydana gelecek enerji sönümlenmesine havanın etkisini tespit etmek için air entrainment modeli kullanılmıştır. Laboratuvar ve sayısal yöntemler ile elde edilen su yüzü profilleri, basınç değerleri, debi, sürüklenen hava miktarı, sönümlenen kinetik enerji miktarları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre hız ve basınçlarda RNG türbülans modelinin standart k-ε modeline göre daha başarılı olduğu, su yüzü profillerinde ise her iki türbülans modelinin benzer sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Ayrıca hidrolik sıçramanın başladığı noktada çok fazla miktarda sisteme hava girişinin olduğu, mansaba doğru gidildikçe bu miktarın azaldığı, laboratuvar çalışmaları ve sayısal çalışmaları kıyaslandığı birçok faktörde de RNG modelinin birçok açıdan çok net ve daha yakın sonuçlar verdiği ifade edilmiştir. Son husus olarak enerji sönümlenme

miktarı konusunda duvarlarda yapılan daraltmalarla birlikte hidrolik sıçrama ve dolayısıyla enerji kırınımını artırmışsa da bu durum açının artması ile doğru orantılı olarak gerçekleşmemiş, ancak debinin artmasıyla enerji sönümleme miktarının sürekli olarak arttığı tespit edilmiştir.

Büyüktaş ve ark. [21], DSİ 13. Bölge Müdürlüğü tarafından baraj ve bağlama projelendirmesi sırasında kullanılan hesaplama kriterlerine göre tasarlanan bir bağlamaya ait giriş su debisi, hızı, akış yükseklikleri, çıkış debisi vb. su akış karakteristiklerini kullanarak gerçek boyutlarda ANSYS yazılımında modellemişlerdir. ANSYS-Fluent paket programında yapılan analizler sonucunda elde ettikleri enerji kırıcı yapıların etkinliği, akışların meydana getireceği basınçlar, hız dağılımları, su akış modeli, düşü havuzu boyunca su derinliğindeki değişimler vb. hesaplanan değerlerle karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda, DSİ'nin kullandığı program ile elde edilen başlangıç su hızı 8,5 m/s, su derinliği 0,46 m, enerji kırıcı yapıdan sonra ise sırasıyla 4,8 m/s, 0,57 m olarak ölçülmüş iken aynı şekilde simülasyon sonucunda elde edilen başlangıç su hızı 8,5 m/s ve enerji kırıcı yapıdan sonra bu değerin 4,4 m/s'e düştüğü tespit edilmiştir. Simülasyon sonucu elde edilen akış değerlerinin hesaplanan değerlerle yüksek oranda (%92) benzerliklere sahip olması nedeniyle baraj ve bağlama gibi mühendislik yapılarının planlanmasında HAD yönteminin araştırmacılar tarafından kullanılabileceği sonucuna varmışlardır. Ayrıca bu çalışmada kıyasa tabi tutulan bir diğer hususla ilgili olarak; bağlama yapısının devamında USBR Tip-III düşü havuzu seçilerek bu havuzda bağlama gövde sonunda bir sıra düşü yapısı ile havuzun ortasında bir sıra enerji kırıcı blok ve havuz sonunda eşik tasarlanmıştır. Tasarlanan bu yapının da analizi Pro-DSİ programı ile yapılmış olup elde edilen değerler analiz simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. DSİ'nin dolusavak programı hesaplarında elde edilen veriler ile simülasyon verilerinin birbirlerine çok yakın olduğu tespit edilmiştir.

Chanel ve Doering [22], daha önce fiziksel model çalışmaları yapılmış olan 3 farklı hidroelektrik santrali dolusavaklarının farklı su yükü ve dolusavak yükseklikleri göz önüne alınarak P/Hd (P:dolusavak yüksekliği, Hd:dolusavak tasarım su yüksekliği) oranının değişiminin Flow3D programıyla sayısal analizini gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde birbirinden farklı elektrik üretim kapasitelerine sahip olan tesislerin

dolusavaklarının debi-anahtar eğrisi, dolusavak üzerindeki su yüzü profili, hız ve basınç karakteristiklerini tespit etmeye çalışmışlardır. İlk tesis olan Wuskwatim HES tesisinin 1/36 ölçekli geometrisi çizilmiş, ayrıca sayısal model için RNG türbülans modeli seçilmiştir. Kaba ağ için 1 m olarak analiz edildikten sonra akımın kararlı hale gelmesi beklenmiş sonrasında 0,5 m'ye rafine edilerek hesap yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre debi değerleri ağ ölçüleri inceldikçe aradaki farkın azaldığı belirtilerek fiziksel model verilerine göre %5 fazla olduğu tespit edilmiştir. Debi anahtar eğrisi bu şekilde elde edildikten sonra basınç ve su yüzü profilleri için ağ boyutu 0,25 m'ye düşürülmüş ve sadece tasarım yüksekliği için hesap yapılmıştır. Elde edilen sonuçların literatür taramalarına göre uygun olduğu ifade edilmiştir. Debi anahtar eğrisinin 0,25 m göre yapılmamasının nedeninin ise aradaki farkın kaynak ve zamana kıyasla yeterli olmadığı belirtilmiştir (Şekil 2.1).




| *$H_d$ | Water Elev. (m) | Phys. Model ($m^3/s$) | 1 m mesh | | 0.5 m mesh | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | CFD | Diff. (%) | CFD | Diff. (%) |
| 0.28 | 234.0 | 240 | 264 | 10.0 | 262 | 9.0 |
| 0.43 | 236.0 | 495 | 530 | 7.0 | 529 | 6.9 |
| 0.59 | 238.0 | 815 | 870 | 6.7 | 867 | 6.4 |
| 0.75 | 240.0 | 1200 | 1260 | 5.0 | 1250 | 4.2 |
| 0.91 | 242.0 | 1625 | 1692 | 4.1 | 1673 | 2.9 |
| 1.00 | 243.2 | 1900 | 1979 | 4.1 | 1946 | 2.4 |
| 1.12 | 244.7 | 2240 | 2325 | 3.8 | 2307 | 3.0 |

Şekil 2.1 Wuskwatim dolusavağı debi-anahtar eğrisi ve debi karşılaştırması [22]

Aynı çalışma kapsamındaki Limestone tesisinin analiz sonuçları da paylaşılmıştır. Ancak ilgili tesisin fiziksel model geometrisinde enerji kırıcı yapı olarak sıçratma eşiği bulunurken uygulanarak yapımı tamamlanan tesiste enerji kırıcı yapı olarak beton kaplamalı durgun havuz bulunduğu belirtilmiştir. Sayısal analiz için çizilen geometrik tasarımdaki bu farklılık debi, basınç ve su yüzü profillerine etki etmeyeceğinden analiz yapılmaya devam edilmiştir. Bir önceki çalışmada kullanılan türbülans ve ağ yapısının bu çalışmada kullanıldığı belirtilerek elde edilen sonuçlarda enerji kırıcı yapının olduğu konumdaki iki nokra dışında mükemmel uyum sağlandığı belirtilmiştir. Yine aynı çalışmada son tesis olan Canowapa HES tesisinin 1992 yılında fiziksel modelinin

gerçekleştirildiği, sayısal analizinde ise elde edilen sonuçlar incelendiğinde fiziksel modelin altında değerler elde edildiği belirtilmiştir. Yani genelde fiziksel modelden daha fazla tahmin edilen değerler bu kez tahminlerin altında çıkmıştır. Ancak özellikle P/Hd değerinin 0,4'ten daha fazla olan tasarımlarda değerler negatif tarafta da olsa %5'in altında olmasının literatür taramalarına göre uygun olduğu (Savage and Johnson 2001) belirtilmiştir. Sonuç olarak dolusavak ve üzerindeki yükün oranı olan P/Hd oranı göz önüne alınarak yapılan analizlerde elde edilen sonuçlara göre sayısal analiz ve fiziksel model sonuçlarını birbirlerine uyumlu olduğu tespit edilmiş olmakla birlikte P/Hd oranı arttıkça sayısal analizde elde edilen sonuçların fiziksel analiz sonuçlarına göre azaldığı tespit edilmiştir.

Daneshfaraz ve ark. [23], çalışmalarında USBR standartlarına sahip ogee dolusavağında ve hemen mansabında meydana gelen enerji kırıcının etkinliğini farklı varyantlar için araştırmışlardır. Çalışmalarında hem fiziksel model hem de sayısal model ele alınarak sonuçların karşılaştırılması yoluna gidilmiştir. Flow3D programının kullanıldığı çalışmada türbülans modeli olarak RNG türbülans modeli seçilmiş ve analiz için beş farklı hücre boyutu kullanılmıştır. Varyant olarak; ogee profilinin üstünde blokların eklenmesi şeklinde, ayrıca dolusavak ucunda $32^{o}$ ve $52^{o}$'lik üzere sıçratma eşiği kullanılarak oluşan jet uzunluğu ve enerji kırınımı tespit edilmeye çalışılmıştır. Yapılan analizlere göre en fazla enerji kırınımı $52^{o}$ sıçratma eşiğinde elde edilmiştir. Çünkü fırlatma açısının artmasıyla akış yukarıya doğru daha fazla yükselerek daha iyi havalanmıştır. Ayrıca debi miktarı arttıkça enerji kırınımının azaldığı tespit edilmiş buna neden olarak da akış derinliğinin artmasıyla akımda oluşan direncinin azalması gösterilmiştir. Ogee dolusavağında enerji yayılım miktarını ve jet uzunluğunu araştırmak için iki analitik formülasyon türetilmiştir. Ogee tabanında blokların kullanılması durumunda enerji kırınımının akış henüz dolusavak mansabına varmadan gerçekleştiğinden jet uzunluğunun %58 oranında azaldığı, enerji kırınımının ise %15,4 arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca $32^{o}$'lik sıçratma eşiğinde maksimum jet uzunluğuna ulaştığı, bununla birlikte froude sayısının artması ile bu uzunluğun arttığı belirtilmiştir. Sonuç olarak önerilen prosedür ile deneysel ve sayısal verilerin karşılaştırılmasında tahminlerde maksimum olarak yaklaşık %7 oranında hataların elde edilmesiyle yüksek oranda uyum sağlandığı tespit edilmiştir.

Dursun ve Öztürk [24], Özellikle son otuz yıldır gelişen baraj inşa tekniklerinin (silindirle sıkıştırılmış beton baraj metodu gibi), basamaklı dolusavakların popülaritesini artırdığını, bu tip dolusavaklarda klasik dolusavaklara göre %70-80 oranlarında daha fazla enerji sönümlenmesinin mümkün olduğunu, basamaklı dolusavakların geometrik yapısı ve taban eğimleri gibi özelliklerinin enerji sönümleme üzerinde olan oransal etkisinin birçok bilim adamı tarafından hem deneysel hem sayısal olarak çalışıldığını belirterek kendilerinin de farklı boşaltım kanalı taban eğimleri için enerji sönümlenme oranlarını sayısal yöntemle belirleyerek benzer konuda daha önce fiziksel modelleri yapılan çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılmasını amaçlamışlardır. Bu çalışmada ayrıca Chanson (1994) tarafından yapılan bilimsel çalışmalar sonucu elde edilen teorik formüllerle de bu mevcut yapının enerji sönümleme oranları bulunmuş böylece söz konusu 3 farklı çalışma sonuçlarını karşılaştırma imkanı bulmuşlardır. Akım koşulları olarak iki fazlı su yüzü ve k-ε türbülans modeli dikkate alınarak yazılımın akışkan hacim modeli olan VOF modeli ile sayısal analizi yapılmıştır. Çözüm yöntemi olarak üç boyutlu ayrılmış (3D segregated) ve zamana bağlı olarak değişen (Unsteady) akım modeli kullanılmıştır. Çalışma sonucunda debi değeri arttıkça sayısal analizdeki enerji sönümleme oranının azaldığı tespit edilmiştir. Bu duruma neden olarak da modele su girişindeki hız değerlerinin düşük olması nedeniyle çözüm hassasiyetinin azalması gösterilmiştir. Bu hassasiyeti artırmak için modele ait sonlu eleman yapısının iyi seçilmesi ve gerektiğinde sonlu eleman sayısının artırılmasını gerektiği öneri olarak sunulmuştur. Tabii olarak $30^o$ için enerji sönümleme fazla iken $51^o$ ve $60^o$ arasında ise çok fark olmadığı tespit edilmiştir. Elde edilen sayısal sonuçlar ile teorik sonuçlarının birbirine yakın olduğu, deneysel sonuçlar ile de aradaki farkın %5-9 arasında olduğu tespit edilmiştir.

Eddy [25], çalışmasında Salamonde Barajı'nın dolusavak yapısının hidrolik karakteristiklerini Flow3D programı yardımıyla belirlemeye çalışmıştır. Air entrainment modeli bir seçenek olarak kullanılmış böylece ilgili model kullanılmadan elde edilen sonuçlar üzerinde hava sürüklenmesi etkisini tespit etmiştir. Türbülans modeli olarak RNG k-ε kullanılmış, simülasyon 150 s boyunca çalıştırılmıştır. Aynı projede Silva (2013)'nın 70 s boyunca çözümleyip elde ettiği sonuçlarla kıyaslamanın yanı sıra mevcut dolusavak tasarımının dışında boşaltım kanalını ikiye ayırmak için

duvar eklemek suretiyle yeni tasarımların da sayısal analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre air entrainment modelinin deşarj debisini %2 seviyesinde fazla hesapladığı, yüzeysel gerilimin hava sürüklenmesi üzerinde kalıcı etkisinin olduğu, rejimin hızla değiştiği bölgelerde kabaran su baloncuklarının basınç gradyanları üzerinde etkili olduğu, Silva'nın 70 s'lik model çözümlemesinin kararlı akış için yeterli olmadığından sonuçlarda farklılıkların oluştuğu, boşaltım kanalı sonuna doğru hava sürüklenmesi etkisiyle akış alanı miktarında artış olduğu, yani hava-su karışımlı akış seviyesinde artış meydana geldiği, boşaltım kanalında elde edilen derinlikli ortalama hızlarda beklenenin çok dışında çok hatanın görüldüğü, bu hataların muhtemel ağ bloklarının dizaynından kaynaklandığı, savak yapısının çıkış noktasında oluşan kabaracakların etkisiyle hızlarda azalmanın meydana geldiği, ancak hava sürüklemesi etkisiyle kayma gerilmesinin azalması ve hızın artması teorisine zıt olduğundan dikkat çekici olduğu, meydana gelen basınçlar konusunda Silva'nın sonuçları ile mevcut sonuçlar arasında sadece %2,7 farkın elde edildiği, orijinal tasarımda kanal sonlarına doğru oluşan hava sürüklenmesi miktarının alternatif yapıdan daha fazla olduğu, elde edilen jet profilleri mesafesinin fiziksel model jet mesafesinden yaklaşık %40 daha düşük olduğu, fiziksel modelin ölçekli olmasından dolayı uzun jet mesafesine sahip olduğu, hava sürüklemesinin jet mesafesi üzerinde pek de etkisinin olmadığı, alternatif tasarımların jet profillerinin orijinal yapının jet profillerinden daha iyi yayıldığından oluşacak muhtemel mansap oyulmalarında daha etkili olduğuna da dikkat çekilmiş ve ifade edilmiştir.

Gümüş ve ark. [26], açık kanallarda düşey kayar kapak mansabında oluşan batmış hidrolik sıçramanın geometrik ve kinematik özelliklerinin tespiti için deneysel ve sayısal analizleri gerçekleştirmişlerdir. Sayısal analizde türbülans modeli olarak Standard k-ε, Renormalization-group k-ε ve Realizable k-ε türbülans kapatma modellerini kullanmışlardır. Ağ tasarımının sonuçlarla yakınsamasının tespiti için Grid Convergence İndex (GCİ) yönteminin kullanıldığı çalışmada elde edilen deney ve sayısal sonuçlar göz önüne alındığında tüm kanalda RNG türbülans modelinin fiziksel model deneylerine kıyasla rölatif olarak ± 1 hata vermesi, ilgili modelin gayet başarılı olduğu kanaatine vardırmıştır. Türbülans modellerinin başarı sırasının ise RNG, RKE ve SKE olarak belirlemişlerdir. Bununla birlikte sayısal analiz sonuçları

ile deneysel sonuç verilerinin gerek hız profilleri gerekse de su yüzü profillerinin gayet uyumlu olduğu tespit edilmiştir (Şekil 2.2).

| Türbülans modeli | Tüm çözüm bölgesinde ($x$=0 – 2.4 m) | | Batmış sıçrama bölgesinde ($x$=0.8 m – 1.5 m) | |
|---|---|---|---|---|
| | Durum 1 | Durum 2 | Durum 1 | Durum 2 |
| SKE | $0.0000937^{(3)}$ | $0.0000992^{(3)}$ | $0.000188^{(3)}$ | $0.00001421^{(3)}$ |
| RNG | $0.0000489^{(1)}$ | $0.0000839^{(1)}$ | $0.0000155^{(1)}$ | $0.00001043^{(1)}$ |
| RKE | $0.0000626^{(2)}$ | $0.0000855^{(2)}$ | $0.0000325^{(2)}$ | $0.00001045^{(2)}$ |

Şekil 2.2 Farklı türbülans modelleri için su yüzü profili OKH değerleri [26]

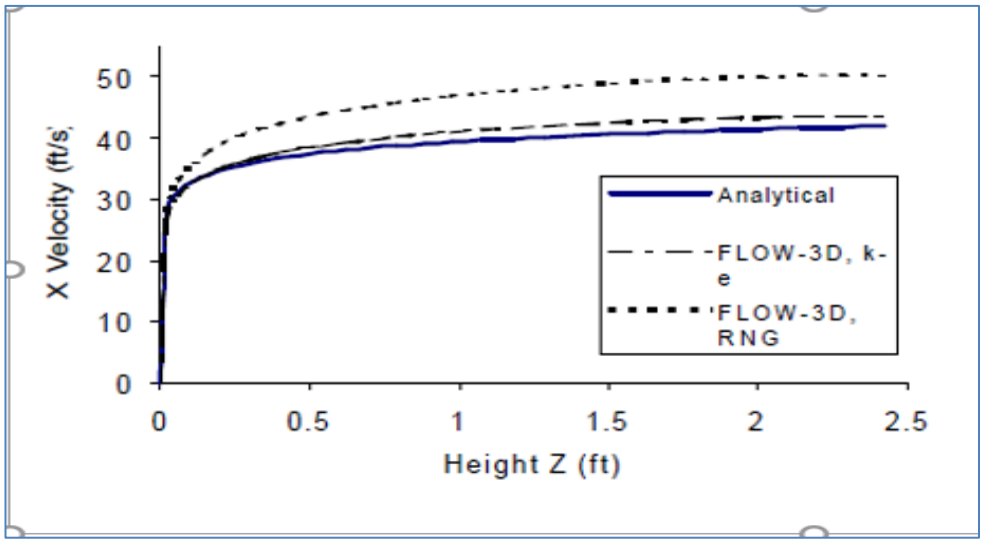
Gümüş ve ark. [15], "Değişken En Kesitli Açık Kanal Akımının Deneysel ve Sayısal Modellemesi" adlı çalışmalarında değişen en kesitlere sahip trapez bir açık kanal tasarlamak suretiyle içinden geçen akımın yapı ile etkileşimini deneysel ve sayısal yöntemle tespiti yoluna gitmişlerdir. Sayısal analizde Standart k-ε (SKE), Renormalization Group k- ε (RNG), Realizeble k- ε (RKE), Standart k-ω (SKW), Kayma gerilmesi taşınımı (ShearStress Transport-SST), Reynolds gerilme modeli (Reynolds Stress Model-RSM) ve Bağımsız Girdap Benzetimi (Detached-Eddy Simulation-DES) ve Büyük Girdap Benzetimi (Large Eddy Simulation-LES) türbülans modellerini kullanarak akım yapı etkileşiminde hangi modelin daha başarılı olduğunu tespit etmeye çalışmışlardır. Ayrıca sayısal çözümlerin uygun ağ ile ayrıklaşma duyarlılıklarını belirlemek amacıyla GCİ metodunu kullanarak deneysel yöntemlerde elde edilen hız profillerini sayısal hız profilleri ile kıyaslamada performans kriteri olarak ortalama karesel hata (OKH) ve ortalama mutlak göreceli hata(OMGH) parametrelerini kullanmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre tüm kanal boyunca OKH değerlerinde en başarılı model DES modeli, ikinci sırada RNG modeli olmuştur. Nihai sıralama şu şekildedir; DES, RNG, SKE, RKE, LES, SKW, RSM ve SST. Ayrıca özellikle girdap etkilerini modellemede diğer modellere göre RNG'nin iyi performans gösterdiği belirtilmiştir. Aynı çalışmada OMGH'ye göre tüm kanal boyunca sıralama şu şekildedir; DES, RNG, SKE, LES, RKE, RSM, SKW ve SST. Elde edilen sonuçlardan sayısal hesaplama yöntemlerinin bu tür akım problemlerinin çözümünde başarılı bir şekilde kullanılabileceğinin görüldüğü ifade edilmiştir.

Ho ve ark. [27], Avustralya genelinde çeşitli dolusavak uygulamalarını modellemek için kullandıkları Flow3D programıyla elde ettikleri sonuçlara göre tasarım seviyelerine eşit ve üzerindeki su yüksekliklerinde debi miktarının genellikle fiziksel model verilerinden %5 daha yüksek olduğunu, ayrıca sayısal modellerin fiziksel model debi deşarjlarını %3 oranında fazla tahmin ettiğine dair genel bir sonuca ulaşmışlardır. Aynı hususta Gessler'in (2005) yaptığı çalışmada su yüzeyi profillerinin fiziksel model karşılaştırmalarına göre CFD'nin deşarjları %3'e kadar eksik tahmin ettiğini belirtmişlerdir. Sonuç itibariyle CFD ve fiziksel model sonuçları arasındaki %5'lik bir farkın, fiziksel modelin doğruluğu için iyi bir sonuç olduğunu belirtmekle birlikte CFD'nin dolusavakları modelleme yeteneği konusunda daha fazla güven sağlayacağını vurgulamışlardır.

Heller ve ark. [28], çalışmalarında fırlatmalı akışlarda oluşan jet profillerinin tespiti, fırlatma ile birlikte ortaya çıkan enerjinin kırınımı, eşikteki muhtemel akış boğulması, ayrıca eşikte ve kuyruk suyu kanalında jetlerin oluşturduğu basınç dağılımları, froude sayısı, ho/R ve deflektör açıları dikkate alınarak belirlenmeye çalışılmıştır. Tanzim edilen deney düzeneği her ne kadar sıçratma eşiğine uygun olmasa da, yani tamamen yatay kanal olsa da sıkıntı olmayacağı, bu durumun parametrelerin sistematik olarak çeşitlendirilmesinde kolaylık sağladığı, yanı sıra bu düzeneğin barajların dip savak yapısının aynısı olduğu, sonuç itibarıyla yapılan çalışmaların sıçratma eşiği yapılarının hidrolik karakteristiklerin doğruluğuna halel getirmeyeceği ifade edilmiştir. Eşikte meydana gelen maksimum basınç değerinin, β açısına ve froude sayısına bağlı olduğu, froude sayısı ile karesel ilişki olduğundan bağlılığın daha fazla olduğu, ayrıca eşikteki maksimum basıncın ho /R değeri arttıkça, yani yarıçap azaldıkça azalacağı belirtilmiş, ayrıca bu sonuçların yaklaşım kanalının düz olduğu çalışmaya ait olduğu, bununla birlikte bu değerlerin küçük açılı yaklaşım kanalları için de geçerli olduğu ifade edilmiştir. Yine sonuçlara göre hidrolik mühendisliğinde β deflektör açısının $15^o$ büyük olması gerektiği, böylece yaklaşım kanalı eğiminin pek bir öneminin kalmayacağı belirtilmiştir. Yapılan analizler sonucunda maksimum basıncın konum grafiği verilmiştir. Elde edilen grafikte korelasyon değeri oldukça düşüktür. Buna sebep olarak çok fazla datanın işin içinde olması gösterilmiştir. Jet yörüngeleri ile ilgili olarak; oluşan jet profillerinin x=4'e kadar nizami olduğu, daha sonra yayıldığı, buna neden olarak hava sürüklenmesi (air entrainment) ve çalışma kapsamında elde

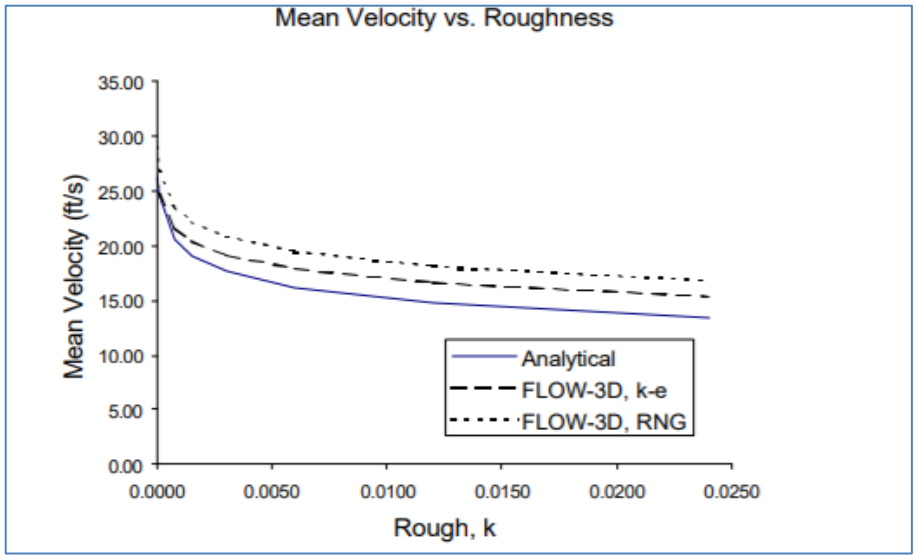
edilen Zx yörünge denkleminin neden olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca yapılan deneylerde hızın 5 m/s olması nedeniyle türbülanstan dolayı jet yörüngelerinde üst ve alt jet yörüngelerindeki okumalarda yanılmaların gerçekleştiği belirtilmiştir. Oluşan genel yaklaşımı şöyledir; yarıçap küçük ise β=10 ve 15 değerleri için fırlatma ve deflektör açılarının birbirine neredeyse eşit olduğu, bu nedenle her iki açının dikkate alınmadığı, ancak bununla birlikte $h_o$ akış derinliği arttıkça β ve α arasındaki açının artacağı, istisna olarak ise froude sayısının 4'ten küçük olması durumları ki viskoz etkisi ve yüzey gerilmelerinden dolayı açılar arasında beklenen bir durumun gerçekleşmeyeceği belirtilmiştir. Jetlerin oluşmasında fırlatma açısının önemli olduğu, ayrıca bu çalışmalarda alt ve üst fırlatma açılarının formüllerinden oluşan jet yörüngelerinin parabolik olması, elde edilen formüllerin doğru olduğuna kanıt olduğu yorumu yapılmıştır. Prototip modellerde jetler yükselirken Zj formülünü takip ettiği, düşüşe geçtiklerinde gerek hava gerekse de rüzgarın etkisi ile yörüngelerin farklılaşabileceği, ilgili hava miktarının tespiti için yüksek ölçekte modeller gerekeceğinden bu çalışmada mümkün olmadığı ifade edilmiştir. Edinilen enerji kırınımı formüllerinden de anlaşılmıştır ki ho/R 'nin küçük değerlerinde yani yarıçapın artmasıyla enerji kırınımı artacaktır. Ho değerinin artması ile enerji kırınımı azalacaktır. β'nın ve eşik yüksekliğinin artmasıyla enerji kırınımı artacaktır. İlgili hususun formüllerden rahatlıkla görülebileceği belirtilmiştir.

Souders Hirt ve [29], "Modeling Roughness Effects in Open Channel Flows" adlı çalışmalarında; pürüzlülük katsayısının akışa etkisini CFD yöntemiyle belirlemeye çalışmışlardır. Elde ettikleri sonuçları Ven Te Chow'un teorik yollarla elde ettiği sonuçlarla kıyaslama yoluna gitmişlerdir. Yapılan dikdörtgen açık kanaldaki akış analizinde pürüzlü duvar sınır koşulu ile birlikte akışın yüzeyinde serbest kayma rijit yüzey olarak belirlenmiş ve simülasyonu yaklaşık 300 saniye çalıştırarak sonuçlar elde etmişlerdir. Öncelikle pürüzsüz kanal için modelin sonuçları ile teorik sonuçlar grafik olarak aşağıda verilmiştir (Şekil 2.3). Hız ve yüksekliğe göre elde edilen grafik incelendiğinde k- ε türbülans modeli ile teorik sonuçların oldukça uyumlu olduğu ancak RNG modeli ile yakınlık sağlanamadığı belirtilmiştir. Flow3D her iki model için aynı sınır koşullarını kullanmasına rağmen ortaya çıkan farklılığın çözümü için programın 8.1 versiyonunda RNG modelinin türbülans sınır viskozite değerlerinde iyileştirmeye gidilmiştir.




Şekil 2.3 Duvarın üzerindeki hız için hesaplanmış ve teorik log profillerinin durumu [29]

Söz konusu çalışma pürüzlü kanal için de modellenmiş olup sayısal ve teorik sonuçlar Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Elde edilen ortalama hız ve pürüzlülük değerlerinin grafiği göz önüne alındığında RNG model ile 4 ft/s, k- ε modelle 2 ft/s başlangıç hız farkları teorik modele kıyasla ortaya çıkmıştır. Bunun dışında sonuçların birbirine gayet uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır. Başlangıç hızlarındaki farklılığın sebebinin ise Ven Te Chow'un ilgili formülde $A_{rough}$ katsayısını 6,25 olarak dikkate almasından kaynaklandığı ifade edilmiştir. Çünkü bu değerlerin Keulgan'ın araştırmalarında 3,23 ile 16,92 aralığında olabileceği hususu da dikkate alındığında sonuçların datalar ile uyum sınırları içerisinde olduğu belirtilmiştir.




Şekil 2.4 Pürüzlülük katsayısına göre kanaldaki ortalama hızların durumu [29]

Hirt [30], “Modeling Turbulent Entrainment of Air at a Free Surface” adlı çalışmasında durgun su havuzuna yerçekimi altında düşen jet profili incelenmiştir. Havuza girişteki noktada jet hızı yaklaşık olarak 1.0 m/s'dir. Jet hızı ile ilgili olarak, Ervine’nin (1980) kendisine ait deneysel çalışmada serbest düşen jet profiline hava girişinin gerçekleşmesi için jetlerin belli kritik bir hıza (0,8 m/s) sahip olması gerektiğini belirttiği, Chanson’nun (2004) ise kendi çalışmasında kritik jet hızının yaklaşık olarak 1,58 m/s olması gerektiğini belirttiği, ancak Hirt kendi çalışması kapsamındaki deneylerde pertürbasyon olarak düşünülebilecek bir cepteki türbülans miktarının sürüklenen hava miktarı üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğunu, yani hava sürüklenmesi için mutlak bir "kritik hız" olmadığına, jet hızında jetin doğasında bulunan türbülans seviyesine bağlı bir üst sınır olduğuna kanaat getirdiğini belirtmiştir. Çalışmalarda yine türbülans modeli kullanmaksızın yapılan testlerde hava girişinin olmadığı, hava sürükleme modelinin pasif olarak seçilmesi durumunda ise fiziksel olarak kesişme noktasında meydana gelen büyük hız kesmeleri nedeniyle havuza giren jette bir miktar sıvı türbülansının beklendiği, buna istinaden küçük de olsa hava sürüklenmesinin oluştuğu, oluşan bu sürüklenmenin de aralıklı ve jet ile etkileşen havuz yüzeyinin çalkalanmasından mütevellit olduğu ifade edilmiş, sürüklenen hava miktarının da % 0,01 gibi küçük değerlerde kaldığı belirtilmiştir. Mevzunun daha net anlaşılması için su jetine ek olarak bir miktar başlangıç türbülans enerjisi verildiğinde, örneğin jet başlangıçta %2 türbülansa sahip olsun, sürüklenmenin akıbetini görmek amaçlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre simülasyon yaklaşık ortalama %8 hava hacmi göstermiştir. Sonuç itibariyle türbülans düzeyi küçük dahi olsa hava sürüklenmesi üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahiptir. Bu husus farklı deneylerin jet profillerinde oluşan kritik hızların neden farklı olduğuna açıklık getirdiğinin ortaya konulması açısından önemli olduğu belirtilmiştir. Havuz- jet - türbülans ilişkileri ile ilgili farklı bir sayısal çalışma daha yapılmıştır. Ervine (1981) tarafından dikdörtgen, dikey şaft için elde edilen deneysel veriler ile kıyas amacıyla aynı çalışma sayısal olarak da simüle edilmiştir. Ortalama hızı 1,56 m/s olan şaftın(Mil) alt ucu açık ve 1,0 m basınç yüksekliği ile suya daldırılmıştır. Akış, yerçekimi altında şafttan duvar jeti olarak düşerken yaklaşık olarak 0,08 m genişlik ve 4,5 m/s'lik bir dikey hız, ayrıca kabaca 5,7'lik bir Froude sayısına sahip olmuştur. Simülasyonda hava sürüklenmesinin neden olduğu kaldırma kuvvetinin havuzdaki akış üzerinde bir miktar etkisinin olabileceği düşünüldüğünden değişken yoğunluk modeli kullanılmıştır. Ayrıca aynı

simülasyon pasif seçenek kullanılarak gerçekleştirilmişse de sonuçlarda çok az farklılığın ortaya çıktığı, bu duruma neden olarak da jet hızının büyüklüğünden kaynaklı oluşan kaldırma kuvvetlerinin, atalet kuvvetleri ile en azından modellenen bölgede rekabet edememesi olarak gösterilmiştir. Ervine'nin (1981) havanın ve suyun hacimsel oranı (Qa/Qw) için türettiği formülde elde edilen değerin 0,081, sayısal model sonucunun ise 0,070 olduğu dikkate alındığında hesaplanan değerlerin hem pasif hem de değişken yoğunluk modelleri için verilerle iyi bir uyum içinde olduğu belirtilmiştir. Dalma jetinin önceki örneğinde olduğu gibi gelen akıştaki türbülans miktarının sürüklenen hava miktarı üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğu, ayrıca 1,56 m/s'lik giriş hızına bağlı olarak giriş türbülans seviyesinin %1,5 olduğu belirtilmiştir. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen farklı giriş türbülans seviyesine sahip simülasyon sonuçlarına göre artan türbülans miktarına göre hava girişinin arttığı da göz önüne alındığında, hava sürüklenme miktarını doğru bir şekilde tahmin etmek için akışın girişindeki türbülans miktarı hakkında iyi bir fikre sahip olunması gerektiği ifade edilmiştir. *Şaft-akış tasarımının amacı, onu(akışı) şafttan çıkarmak için çok fazla hava sürüklemekse, o zaman girişte bir akış bozukluğu oluşturmak bu amaca ulaşmada önemli ölçüde yardımcı olacaktır.* denilmiştir. Hirt tarafından gerçekleştirilen üçüncü çalışmada %10 eğime sahip kapalı kanaldaki akışın durumu çalışılmıştır. Kapalı kanalın girişinde 0,05 m yüksekliğinde akış koşulu verilirken alt ucu 0,0612 m hidrostatik basınç yüksekliği ile suya daldırılmıştır. Kalinske ve Robertson tarafından 1941 yılında yapılmış fiziksel model deneylerinde modelde girişten yaklaşık 0,5 m akış aşağısında bir hidrolik sıçramanın geliştiği görülmüştür. Aynı model sayısal olarak da simüle edilmiştir. Giriş şartı olarak su seviyesi belirlenmiş, türbülanssız giriş koşulu ile birlikte Variable Density Flow ve Drift Flux With Air Escape modeli kullanılmıştır. Model 8 saniye boyunca çalıştırılmış ve neredeyse modelin tümünde kararlı durum elde edilmiştir. Fiziksel çalışmada elde edilen ve akışın Froude sayısına (Fr) karşılık hava-su hacimsel akış hızı oranlarını temsil eden formüle göre sayısal çalışmadaki hava-su oranı(froude sayısı=3) 0,055 çıkmıştır. Model çalışmalarına (0,0174) kıyasla fazla çıkmasının neden olarak; sayısal modelin sadece kanalın iki boyutlu orta bölümünü dikkate alması gösterilmiştir. Her durumda, sürüklenen ve akış yönünde taşınan hava miktarının hem deneyde hem de sayısal simülasyonda nispeten küçük olduğu, buna karşılık, sıçramanın önündeki devir daim bölgesindeki hava miktarının çok daha fazla olduğu belirtilmiştir. Yine Hirt tarafından gerçekleştirilen

son çalışma bir dizi eğim ve akış hızına sahip dolusavak boşaltım kanallarında oluşan hava sürükleme miktarının tespiti için Wood tarafından 1991 yılında rapor edilen deneysel çalışmayı içermektedir. Deneyde modellenen dolusavak sonundaki dağılımın, dolusavak yüzeyi boyunca mesafe ile önemli ölçüde değişmeyen bir "denge" durumuna ulaştığı varsayılmıştır. Mümkün olan en gerçekçi modele sahip olmak için simülasyonda sürüklenme ve hava kaçışlı değişken yoğunluklu sürüklenme modeli(Variable Density Entrainment Model With Drift And Gas Escape) kullanılmıştır. Deneylerde, su akışının serbest yüzeyi, havanın 0,9 hacim fraksiyonu alındığından bu durumla uyum için simülasyonda iki fazlı sürüklenme-akış modelinde minimum izin verilen su oranı 0,1 olarak atandığı belirtilmiştir. Tanzim edilen sayısal model sonuçlarında türbülans enerjisinin serbest yüzeye ulaşana kadar havanın sürüklenmediği, yüzeydeki dalgalanma yakından incelendiğinde sürüklenen hava nedeniyle kabarmanın meydana geldiği, akışın alt kısmına yakın bir yerdeki koşulların kanal boyunca mesafe ile fazla değişmediği, bunun da bir "dengeye" ulaşıldığına dair deneysel gözlemi desteklediği, yanı sıra kanalın son kısımlarında yapılan genişletmenin hava sürüklenmesine olan etkisinin tespiti için yapılan tasarım sonucunda hava sürüklenme miktarında çok büyük değişikliklerin olmadığı, sadece fiziksel nedenlerden dolayı küçük de olsa bir miktar ek hava sürüklenmesinin tespit edildiği belirtilmiştir. Elde edilen sonuçlar grafik olarak da verilmiştir. Buna göre kanalın başında fiziksel model hava sürüklenme değerleri daha az, kanalın sonunda artan hız ve türbülans kinetik enerjisi nedeniyle daha fazla çıkmıştır. Bu noktada sayısal programlarda her ne kadar air entrainment modeli çalıştırılmışsa da bu modeller akış içine sürüklenen havanın niceliğini fiziksel modeller kadar tespit edemediklerinden ilgili değerlerin fiziksel model değerlerinden farklı olması beklenen durum olmuştur. Yapılan dört farklı çalışma sonucunda önerilen $C_{air}$ amprik katsayısının 0.5 değeri için iyi sonuçlar elde edildiği, önerilen değerde değişiklik yapılması için güçlü kanıtların olması gerektiği, tüm simülasyonlardaki en hassas yönün bir su havuzuna çarpan akıştaki türbülans seviyesi olduğu, ilgili hassasiyetin, sürüklenmenin bir hidrolik sıçrama ile ilişkili olduğu durumlarda ortaya çıkmayacağı, çünkü bu durumlarda sıçramanın kararsızlığının genellikle ilk türbülansı gölgelediği, ayrıca yine bu tür hassasiyetin sürüklenmenin dolusavak boşaltım kanalı yapılarında olduğu gibi pürüzlü bir yüzey üzerindeki akış tarafından oluşturulan türbülanstan kaynaklanan dolusavak gibi durumlarda da oluşmayacağı belirtilmiştir. Hirt'in yaptığı

4 farklı deneyde en dikkat çekici husus, jetlerin havuza düştüğü andaki türbülanstan dolayı oluşan hava sürüklenmesi hususudur. Çünkü ciddi bir hava sürüklenmesi söz konusudur. Aynı durum hidrolik sıçrama deneyinde dolusavak boşaltım kanalındaki deneylerde gözlemlenmemiştir. Anlaşılıyor ki hava sürüklenmesi hususu jet profillerinde ve jetlerin dalma havuzuna girdiği andaki tasarımlarda oldukça etkili ve dikkat çekicidir.

Jizhang ve ark, [6], Xiangjiaba(Çin) barajının mansabında 1000 metrelik mesafede yer alan kimyasal tesisler ve yerleşim alanlarından dolayı muazzam büyüklükteki debi deşarjı (yüzey dolusavaklar ve orta çıkışlar için birim genişlikteki debi miktarı sırasıyla 300 $m^3$/s-m ve 331 $m^3$/s-m, ayrıca taban kaplamalı havuzdaki maksimum hız yaklaşık olarak 40 m/s'dir.) nedeniyle oluşan atomizasyonun etkinliğini azaltma adına enerji dağıtıcı yapılar çevirme uçlu enerji kırıcı (flip bucket) iken taban kaplamalı durgun havuza (stilling basin) dönüştürüldüğünü, söz konusu atomizasyonu önlemek için yukarıda belirtilen mühendislik yöntemlerinin yanı sıra sayısal simülasyon tahminlerinin de yaygın olarak yürütüldüğünü belirtmişlerdir. Matematiksel modelleme yoluyla sayısal modelleme için kalibrasyon ve doğrulama parametreleri olarak çok sayıda prototip gözlem bilgisinin kullanılarak tahmin yapılabildiği, şimdiye kadar etkileyici bir ilerlemenin kaydedildiği ifade edilmiştir. Sayısal analizlerin taşkın deşarj yapılarının farklı kombinasyon tasarımlarında çok efektif rol oynadığı, sayısal tahminin Çin'deki yüksek barajların operasyonel yönetimi ve atomizasyonunda koruyucu önlemlerin tasarlanması için etkili bir yöntem haline geldiği belirtilmiştir.

Jourablou ve ark. [31], çalışmalarında Juon ve ark. [14] fiziksel model tasarımlarını göz önüne alarak aynı modeli Fluent programı ile sayısal olarak çalışmışlardır. Çevirmeli sıçratma eşiğinde farklı koşullardaki akışın oluşturduğu su yüzü ve basınç değerlerini sayısal sonuçlarla kıyaslamışlardır. İki fazlı akışın kullanıldığı çalışmada analiz sonuçları ile fiziksel model sonuçlarının neredeyse aynı olması dikkat çekmiştir.

Juon ve ark. [14], Fırlatmalı akışların hidrolik karakteristiklerinin tespiti hakkında çalışmışlardır. Yapılan bu çalışmada, hava sürüklemesi (air entrainment) hususuna ölçek etkisinden dolayı değinilmemiştir. Hem normal çevirmeli sıçratma eşiği (flip bucket) hem de deflektörlü sıçratma eşiği tasarlanarak belli açı, yükseklik, yarıçap ve

froude sayılarına göre oluşan jet profilleri tespit edilerek hidrolik karakteristikler elde edilmiştir. Yanı sıra eşik yapısında meydana gelebilecek akış boğulması olayına değinilmiştir. Kendilerinin yaptığı literatür taramalarında; Balloffet'in(1961) eşik yapısındaki eş merkezli akış çizgilerini kullanarak oluşan maksimum basınç yükünün ho/R'nin küçük değerleri için hesaplanan değerden %4 daha büyük olduğunu tespit ettiğini, Lenau ve Cassidy'nin(1969); çevirmeli sıçratma eşiğindeki akışa viskoz etkilerinin çok da etkimediğini, daha çok yer çekimi kuvvetinin etkili olduğunu belirttikleri, eşik yapısındaki basınç yükünün statik ve dinamik basıncın toplamı olduğunu, ancak dinamik yükün yanında statik yükün etkisinin az olduğu, bu nedenle ho/R'nin statik basınç yükü olarak dikkate alınabileceğinin ifade edildiği, eşik yapısında oluşan maksimum basıncın ho/R ve froude sayısına bağlı olduğunu belirttikleri ifade edilmiştir. Ayrıca Mason'un (1993) çalışmasında, kendisinin belirlediği kriterlerin şu şekilde olduğu; en küçük eşik yarıçapının yaklaşım kanalı akış yüksekliğinin 3 veya 5 katı olması gerektiği, hava payının hava-su karışımındaki kabarcık seviyesine göre belirlenmesi gerektiği, mansap yapısının dudak açısı $20^o$, fırlatma açısının $35^o$ olması gerektiği ifade edilmiştir. Juon ve ark. deneylerini yaparken farklı yüksekliklerdeki akışların belli froude sayılarında oluşturdukları jet profillerini incelemişlerdir. Buna göre özellikle 5'ten küçük su yüksekliklerde jetin bozulduğu, 5'ten büyük yükseklikler için tek bir eğrilik şeklinde nizami jet profillerinin elde edildiği, 5'ten küçük yüksekliklerde jetin bozulmasının sebebinin ise ölçek etkisi, ayrıca viskoz ve yüzey gerilimlerinden kaynakladığını belirtmişlerdir. Aslında bu hususun Schwalt (1994) and Reinauer (1995)'in da malumları olduğunu, dolayısıyla kendilerini yapacakları devami çalışmalarında akış yüksekliğinin 5'ten büyük olacağını belirtmişlerdir. Yarıçap değeri R=20 ve 25 için ayrı ayrı yapılan analizlerde eşikteki basınç değerinde gözle görülür bir fark oluşmadığı, ilgili basıncın daha ziyade froude sayısı ile ilişkili olduğu ifade edilmiştir. Maksimum basıncın β ve froude sayısına bağlı olduğu, froude sayısı karesel etki ettiğinden bağlılığın daha ön planda olduğu, yine elde edilen denklemlerde ho/R'nin artmasıyla maksimum basıncın azaldığı tespit edilmiştir. 2000 yılı deney sonuçlarında; eşiğin yarıçapının akış üzerinde az etkili olduğu, sıçratma açısı α'nın deflektör açısı olan β'dan oldukça farklı olduğu, akışın yapıyı terk ettiği noktadan itibaren oluşan jet'e hava girişinin başladığı ve ilerledikçe bu havanın da jetin merkezine doğru ilerleyerek jetin tümünde etkili olduğu, ayrıca deflektör kullanılması durumunda oluşan spreyin yapıya zarar

verebileceği, bu nedenle ilgili hususa dikkat edilmesi gerektiği ifade edilmiştir. Çevirmeli sıçratma eşiği(flip bucket)'ın dezavantajları olarak; froude sayısının aniden değişmesiyle akışın boğulması ve hidrolik sıçrama hususları gibi durumların yapıya zarar verebileceği, eşikte meydana gelecek basıncın froude sayısı ile ilişkili olduğu ifade edilmiştir. Aynı froude sayılarındaki herhangi iki akışın yükseklikleri aynı ancak yarıçapları farklı ise büyük yarıçaplı eşik akışı daha yukarıya fırlatacaktır. Yarıçapları aynı fakat yükseklikler farklı ise froude sayısının 5'ten küçük olması durumunda ho akış yüksekliğinin artmasıyla akış daha az fırlayacak, froude sayısının 5'ten büyük değerleri için ho akış yüksekliğinin artmasıyla akış daha yükseğe fırlayacaktır. Açıklanan hususlardan anlaşılıyor ki küçük froude sayılarında viskoz kuvvetleri ve yüzey gerilimlerinin de etkisiyle fırlatma mesafesi azalırken daha büyük froude sayılarında ilgili kuvvetlerin etkisi de azalmaktadır. Bu nedenle burada dikkat edilmesi gereken husus tamamıyla froude sayısıdır. Son olarak kendilerinin (1998) eşik yapısında meydana gelen basınç miktarını gösteren formülün ho/R'nin küçük değerleri için etkili olduğu ifade edilmiştir. Bu husus da göz önüne alındığında ho/R ve froude sayısının büyük değerlerinde eşikte oluşan hidrolik durumun oldukça karmaşık olmasıyla belirlenen formüllerinin dışına çıkılabileceği beklenen bir durumdur. Çünkü eğik yapıda oluşan hidrolik durum temel denklemlerle basitleştirilemeyecek kadar karmaşıktır.

Kaplan [32], Ilısu Barajı ve HES tesislerinin Dolusavak havalandırıcılarının performansını sayısal olarak incelemiştir. Elde ettiği sonuçları 1982 yılında yapılan fiziksel model sonuçları ile kıyaslamıştır. Kaplan ayrıca, 2010 yılında revize edilen ve bu haliyle inşası yapılan revize havalandırıcıların performansını yine aynı program ile sayısal olarak incelenmiştir.1982 yılı tasarımının karşılaştırılmasında HAD yazılım sonuçlarında hava giriş konsantrasyonunun literatür çalışmalarına göre sınır değer olan %5 in altında kaldığı, ayrıca dolusavak kanal genişliği boyunca kenar bacalara yakın kısımlarda hava karışımının iyi olduğu ancak kanal orta kısımlarında hava karışımının azaldığı ve yetersiz kaldığı tespit edilmiştir. 2010 yılı revize tasarımının sayısal çözümlenmesinde ise hava konsantrasyonunun %8-23 arasında ve dolusavak kanallarının tüm genişlik boyunca hava karışımının yeterli olduğu, üniform bir karışımın elde edildiği, bu durumun nedeninin ise oluk altında inşa edilen hava galerisinin özellikle kanal orta kısımlardaki boyutlarının daha büyük olarak

tasarlanmasının oldukça etkili olduğu ifade edilmiştir. Sonuç olarak 1982 yılı fiziksel model deneyleri ve sayısal deney sonuçlarında özellikle kavitasyon indeksleri birbirine çok yakın çıksa da hava konsantrasyon yüzdesinin düşük çıkmasının yapılan revize havalandırıcı projelerinin oldukça yerinde bir karar olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca revize tasarım değerlerinin kavitasyon açısından oldukça iyi çıkması dolusavak yüzeyi boyunca kavitasyonu önleme amaçlı kullanılan silika betonunun miktarı hususunda oldukça güvenlikçi bir tarafta kalındığı vurgulanmıştır.

Kim ve Park [33], pürüzlülük katsayısı ve ölçek oranının dolusavakların (ogee eşikli) hidrolik karakteristiklerine olan etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. Flow3D programının kullanıldığı çalışmada prototip modelin dışında 1/50, 1/100 ve 1/ 200 ölçekli modeller ve ayrıca 3 farklı pürüzlülük değeri kullanılmış elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Edinilen sonuçlarda deşarj edilen debiler dikkate alındığında; ogee üzerinde 9,6 m su yüksekliği ve pürüzlülük 0,5 mm'ye sahip prototip modeldeki ki hız yüksekliğinin 0,4 m olduğu, ve 12,5 m su yüksekliği, 3 mm pürüzlülük değerinde ise hız yüksekliğinin 0,8 m olduğu, ayrıca 1/100 ölçekli model değerlerinde 0,5 mm için hız yüksekliğinin 0,004 m ve 3 mm pürüzlülük için de 0,08 m olarak elde edilmiştir. Pürüzlülük katsayısı arttıkça debi değerlerinin az da olsa azaldığı, bu azalma etkisinin maksimum olarak sadece %0.4'luk oranda etki ettiği, teorik olarak kullanılan $Q=CLH^{3/2}$ formülüne kıyasla ise %2 daha fazla tahmin ettiği ifade edilmiştir. Pürüzlülük yüksekliği 0.5 mm ve 3 farklı ölçek kullanılarak elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde ise debi değerinin yine ölçek oranı arttıkça az da olsa azaldığı, 1/200 olan en büyük ölçeğe göre farkın %0,6 olduğu belirtilmiştir. Yani ölçek oranının artması ve geometrinin küçülmesi ile debi değeri de kısmi de olsa azalmaktadır. Su yüzü profillerinin incelenmesi ve değerlendirilmesinde ise başta pürüzlülük katsayısı ve ölçek değerleri olmak üzere ayrıca USACE'nin büyük barajların dolusavak alanında yaptığı deney sonuçları da karşılaştırmaya eklenmiştir. Buna göre; pürüzlülük ve ölçekli model değerlerinin deney sonuçları ile uyumlu olduğu ifade edilmekle birlikte aralarında neredeyse bir farkın görülmediği, dolayısıyla su yüzü için beton pürüzlülük değerinin kullanılmasının yeterli olacağı, ayrıca ilgili hususun sadece 200'den küçük ölçekli modellerde geçerli olduğu ifade edilmiştir. Yani dolusavak eşiği(ayaklar veya abutment yapıları olmaksızın) üzerinde gerek pürüzlülük gerekse de model ölçek değerinin 200'den küçük olmak üzere sonuçlara çok etki etmediği

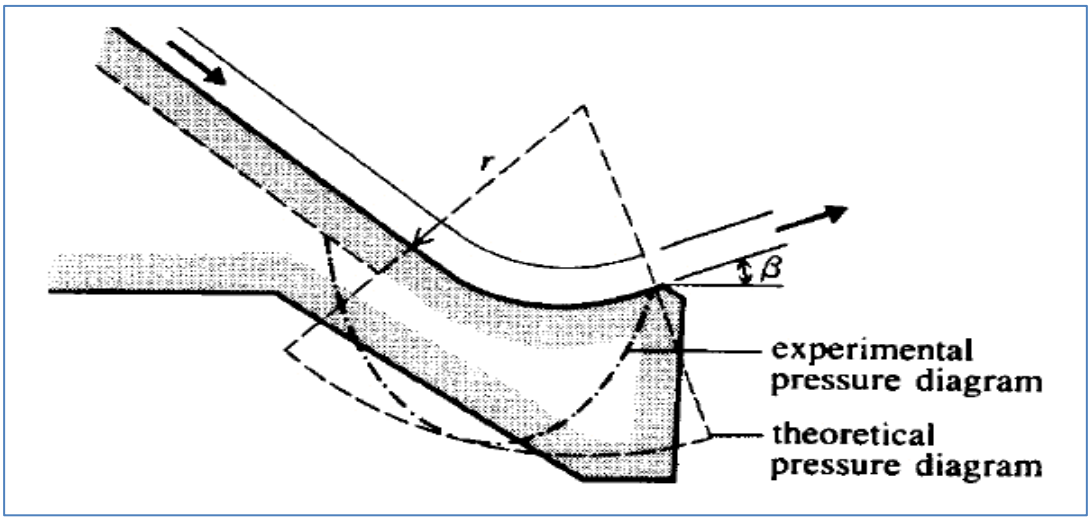
görülmüştür. Eşik üzerindeki basınçlar hususunda; tasarım yüksekliğinin altındaki yüklerde basınç değerlerinin arttığı, bu değerin üstündeki yüklerde ise azaldığı, bunun yanı sıra sayısal sonuçlar ile teorik ve deneysel sonuçların hemen hemen aynı olduğu ve model ölçek değişimi ile elde edilen basınç değerlerinde ise oluşan farklılığın oldukça küçük değerlerle sınırlı olduğu belirtilmiştir. Aynı hususta dolusavakların tasarım yüksekliğinin dışındaki yüksekliklerde çalıştırılması gerektiği de ayrıca ifade edilmiştir. Eşik üzerinde boyuna kesitlerde oluşan hızlar hususunda; akış hızının ilk noktadan itibaren oldukça arttığı, akabinde akışın logaritmik dağılıma evrildiği belirtilmiştir. Maksimum hızın meydana geldiği eşik altındaki noktada pürüzsüz olarak yapılan analizde pürüzlüye göre hızın oldukça fazla olduğu, ancak ilgili noktanın yukarısında pürüzlü kanalın hız değerinin pürüzsüz kanala göre fazla olduğu tespit edilmiştir. Aynı durum prototip ve ölçekli modellerde de görülmüştür. Referans olarak seçilen herhangi bir noktanın altında modelin hızı ölçekli modelden fazla iken bu noktanın üstünde durum tersidir. Oluşan bu olayın pürüzlülük ve ölçeklenmede ilgili değerlerin etkisinin geometri ile birlikte azalması, ancak bunun yanında kullanılan suyun ölçeklenmemesinin neden olduğu ifade edilmiştir. Sonuç olarak ölçek uzunluk oranı arttıkça ve geometri büyüdükçe referans olarak seçilen noktanın yukarısında viskozitenin oldukça arttığı, bu durumun hem pürüzlülük hem de ölçek olayında aynı olduğu belirtilmiş ayrıca memba yüksekliği azaldıkça hızın logaritmik dağılıma ulaşması daha kısa sürede oluştuğu belirtilmiştir. Eşik üzerinde boyuna kesitte oluşan basınç dağılımı hususunda yapılan deneylerde pürüzlülük ve ölçek etkisinin basınç dağılımı üzerinde çok etki etmediğinin tespit edildiği belirtilmiştir. Basınç değerleri farklı pürüzlülük ve ölçek değerlerinde farklı olabilse de dağılım olarak aynı grafik elde edilmektedir. Ogee membasında küçük yüklerde basınç fazla iken büyük yüklerde ogee üzerinde basınç negatif olarak çıkmaktadır. Ogee mansabında ilerledikçe basınç atmosfer basıncına eşit olmaktadır. Yani ogee mansabında tüm yüksekliklerde basınç atmosfer basıncına eşittir. Yine aynı çalışmada tespit edilmiştir ki düşük yüksekliklerde hız nasıl kısa sürede logaritmik dağılma dönüşüyorsa basınç da aynı şekilde çok kısa sürede atmosfer basıncına eşit oluyor. Eşik üzerinde enine kesitte oluşan hız dağılımı hususunda ise pürüzlülüğün artmasıyla hız değerinde az da olsa düşüş yaşandığı, memba su yükü arttığında hızda meydana gelen düşüş oranında artış olduğu, düşük yüklerde bu oranın düştüğü, bunun nedeninin ise yüksekliğin artmasının akışa etkiyen pürüzlülüğünün etkisinin artması olarak ifade

edilmiştir. Ölçekli modelin hızı, prototip modelden daha düşük olarak elde edilmiş, aynı durumun pürüzlülük için de geçerli olduğu belirtilmiştir. Genel olarak pürüzlülük ve ölçeğin hız ile ilişkilendirilmesinde şu sonuca ulaşıyoruz. Her iki etkenin gerek hız ve gerekse de basınç dağılımları üzerinde pek bir etkisi yokken boyuna kesitlerde artan su yükü ile birlikte gerek ölçek gerekse de pürüzlülüğün hız ve basıncı etkilediği görülmüştür. Ayrıca yükseklik arttıkça maksimum hızın oluştuğu konumun daha fazla uzakta olduğu da tespit edilmiştir. Son olarak pürüzlülük değerlerinin seçiminde materyallerin daha önce tahmin edilen değerlerinin kullanılmasının yeterli olacağı, bu değerlerin değişiminin bu çalışmanın sonuçlarına büyük bir etkisinin olmadığı, ilgili durumun 200 den küçük model ölçekleri için de geçerli olduğu belirtilmiştir.

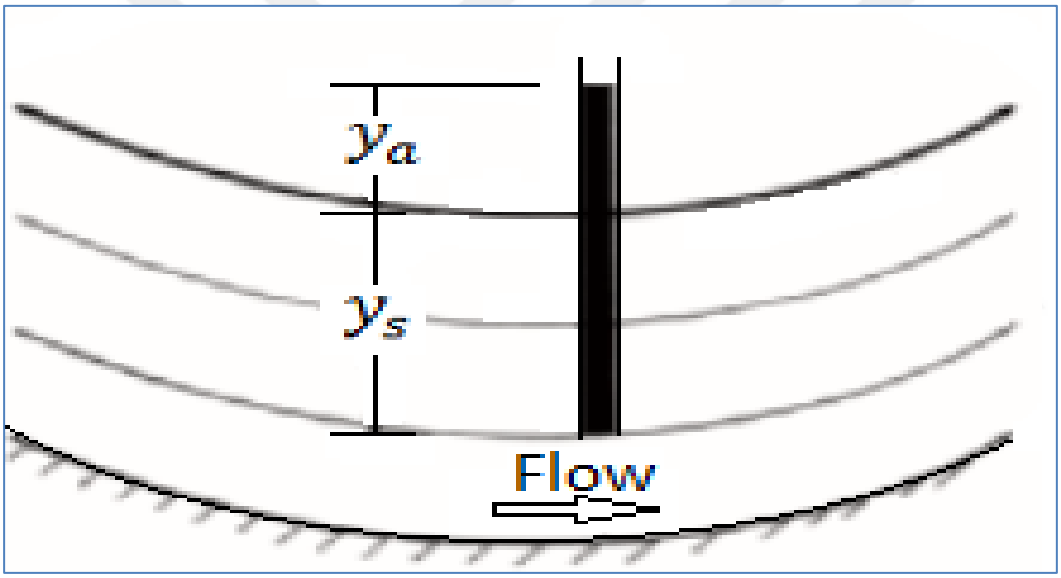
Khani ve ark. [34], dolusavak eşik mansabındaki sıçratma eşiği (flip bucket) üzerinde oluşan basınç ve hız gibi hidrolik karakteristikleri belirlemişlerdir. Bunun için S. Eklund'ın [35] çalışmasındaki teorik ve deneysel yöntemler sonucu ortaya çıkan basınç diyagramını (Şekil 2.5) dikkate alarak aynı grafiğe yapılacak sayısal analiz sonuçlarını ekleyerek ilgili teorik ve deneysel değerlere nümerik sonuçları da eklemek istemişlerdir. Bu çalışma için Cylde barajı'nın dolusavağı kullanılmıştır. Söz konusu yapı sırasıyla savak eşiği, durgun havuz (stilling basin) ve yapı sonundaki sıçratma eşiği(flip bucket) olmak üzere sıra dışı bir yapıdan müteşekkildir. Flow3D ve türbülans modeli olarak da RNG modelin kullanıldığı çalışmada tasarım debisi olan Qd ve belirli katları olan 0,25Qd, 0,50Qd, 0,75Qd, 1,25Qd, 1,50Qd değerleri kullanılarak analiz yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre 0,25Qd değeri için hidrolik sıçramanın havuz girişinde meydana gelerek gerekli enerji kırınımının bu şekilde gerçekleştiği, diğer debilerde ise debi miktarı arttıkça basınç değerinin arttığı ve bu artışın özellikle sıçratma eşiğinin orta kısmında meydana geldiği, akışın eşiği terk ettiği noktada ise basınçların aynı doğrultuda azaldığı, hatta bazı debilerde akışın eşiği terk ettiği uç noktada negatif basınç değerlerinin elde edilmesiyle kavitasyon riskinin meydana getirme ihtimalinin olduğu belirtilmiştir. Sayısal analiz sonuçları teorik sonuçlarla da kıyaslama yoluna gidilmiştir. Şöyle ki;

*Şekilde eğrisel akışlardaki basıncı tespit için kesiti ΔA koluna dikey olarak etkiyen kuvvetlerin dikkate alınması gerekmektedir. Oluşan kuvvetler; sütundaki akış kütlesi* $\rho y_s \Delta A$*, merkezkaç ivmesi* $\frac{V^2}{r}$ ,

*merkezkaç kuvveti* $\rho y_s \Delta A \frac{V^2}{r}$ *temsil eder. Momentum merkezkaç kuvvetini basınç yüksekliklerine dönüştürmek için kolon kesitine bölünürse akışkan kolonunda oluşa akışkan ağırlığı olan* $y_a = \frac{1}{g} y_s \frac{V^2}{r}$ *elde edilecektir. Akışkan kolonunda oluşan akışkan ağırlığı ile merkezkaç kuvvetinin ağırlığı meydana gelecek toplam basıncı verecektir.* $h = y_s(1 + \frac{1}{g} y_s \frac{V^2}{r})$ *, Buradaki ilk terim statik koşullardan, ikinci terim ise dinamik koşullardan kaynaklanan merkezkaç kuvvetinin etkisinin basınç yükünü temsil etmektedir. Sıçratma eşiklerinde anahtar kelimeler; yaklaşım hızı, derinliği, eğrilik yarıçapı ve fırlatma açısı olarak verilebilir. İki boyutlu basınç yükünün çevrinti olmaması koşuluyla hesaplanabilir. Ancak üç boyutlu basınç yükü hesaplanırken düzgün olmayan bir yayılım elde edilmektedir. Bu nedenle bu tür akışların basınç yükü için deneysel yöntemler yapılmakta ve başarılı olmaktadır. Deneysel ve teorik yöntemlerle hesaplanan sıçratma eşiğindeki üç boyutlu basınç diyagramı şekilde verilmektedir(Chaudhry,[36]; Şekil 2.6).* Yukarıda açıklanan hususlar dikkate alınarak yapılan sayısal analiz sonuçları ile kullanılan teorik formüller ile elde edilen veriler incelendiğinde; teorik yöntemle elde edilen basınçların sıçratma eşiği ortasından 1.5 m geride maksimum hale geldiği, sonraki noktalarda ise dalgalanma olması gerekirken yatay bir seyir elde edildiği, aslında bu durumun şekilde verilen grafik ile uyumlu olduğu ifade edilmiştir. İlgili grafik incelendiğinde deneysel sonuçlara göre basınç değerlerinin sayısal analizde olduğu gibi sıçratma eşiğinin ortasına yakın bölgede maksimum olduğu, eşik sonunda bu değerlerin sıfıra yaklaştığı görünmektedir. Sayısal ve teorik sonuçlar kıyaslanmasında aradaki farkın değişik debilerde % 24 ile % 41 arasında değiştiği, en yakın değerin tasarım debisi olan Qd değerinde elde edildiği ifade edilmiştir. Sonuç itibariyle mevcut grafik ile yapılan sayısal analizler çalışması kıyaslandığında deneysel verilere yakın, teorik verilere uzak değerler elde edildiğinden Flow3D programının dolusavak gibi devasa alkışların hidrolik karakteristiklerini belirlemede başarılı olduğu belirtilmiştir.




Şekil 2.5 Çevirmeli sıçratma eşiği üzerindeki teorik ve deneysel basınç dağılımının karşılaştırılması




Şekil 2.6 Kavisli akışta basınç [36]

Laura ve Alfonsi [37], çalışmalarında sıçratma eşiklerinin etkinliklerini sayısal olarak incelenmişlerdir. Open Foam C++ programının kullanıldığı çalışmada Heller'in 2005 yılındaki [28] fiziksel model çalışmalarında tasarladıkları yapı kullanılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. 29 adet tasarımın olduğu çalışmada türbülans modeli olarak k-w modeli tercih edilmiş ve toplam 1.750.000 adet hücre kullanılmıştır. Analiz sonuçlarında eşik içerisinde oluşan maksimum basınçların büyük deflektör açılarında elde edildiği, özellikle $40^o$ de elde edilen sonuçların fiziksel model sonuçlarına oldukça yakın olduğu, farklı açılara sahip tasarım sonuçlarında eşiğin girişi ve eşinin çıkışında nispeten dağınık görüntü elde edilmişse de basıncın maksimum olduğu kısımlarda

birbirleriyle uyumlu oldukları, söz konusu bu durumun Juon ve ark [14] çalışmalarında elde edilmediği, buna neden olarak 2000 yılı çalışmasında gerek froude sayısı gerekse de deflektör açıları vb parametrelerde çok fazla varyasyonlarının kullanılmaması gösterilmiştir. Ayrıca mühendislik tasarımı açısında uygun görülmeyen deflektör açıları olan $10^o$ ve $15^o$ değerleri için profillerin uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Yine Heller'in [28] jet profillerinin alt ve üst fırlatma açıları ile ilgili olarak tespit ettikleri hususların bu çalışma için de geçerli olduğu, yanı sıra bu çalışma kapsamında elde edilen neredeyse tüm sonuçların fiziksel model sonuçları ile uyum içinde olduğu ifade edilmiştir. Bu çalışmada ayrıca jet uzunluğu üzerinde de durulmuştur. Oyulma hususundan dolayı R=0,10 m ve β=10, 20, 30, 40 gibi dört farklı değerlerinde froude sayısı ve jet uzunluğu arasındaki tespit edilmeye çalışılmıştır. Her bir deflektör açısında elde edilen jet mesafesinin froude sayısı ile aralarındaki ilişki formülize edilmiştir. Elde edilen formüllerde korelasyon sayısı oldukça yüksek çıksa da standart hatanın deflektör açılarında sırasıyla 0,46; 0,95; 0,92 ve β=40 için de 0,24 olarak elde edildiği belirtilmiştir. 10,20,30 değerlerindeki deflektör açılarında elde edilen mesafenin oldukça az, $40^o$ ise ilk üç değerin yaklaşık 4 katı mesafe elde edilmiştir. Son olarak kullanılan sayının analiz yönteminde özellikle akış görüntülerinin elde edilmesinin yapılan çalışmaya oldukça pozitif bir etki yaptığı, farklı datalarda oluşan vaziyetin görüntüler sayesinde yorumlama konusuna farklı bakış açısı kazandırdığını ifade etmiştir.

Öztürk ve Aydın [38], havalandırıcıların davranış veriminin belirlenmesinde önemli rol oynayan boşluk jet uzunluklarının froude sayısı ile değişimini üç boyutlu sayısal analiz yöntemiyle incelemişlerdir. Bu çalışmada ayrıca havalandırıcı gibi hidrolik yapıların tasarımı için deneysel çalışmaların tercih edildiğini, ancak fiziksel modellemelerde ihtiyaç olunan yüksek debi, yüksek hız, model ölçek büyüklüğü gibi ölçek etkilerinin deneysel çalışmaların sağlıklı bir şekilde yürütülmesine engel teşkil ettiğini, bu gibi yapıların tasarımında önemli bir parametre olan jet uzunluğunun tespiti için literatürde birçok deneysel ve teorik çalışmanın yapıldığını, ancak birçoğunun birbiriyle uyuşmadığını, bu duruma neden olarak ise çoğu zaman göz ardı edilen ölçek etkisi ve boşluk alt basınçlarının jet yörüngesine olan etkisi olduğunu belirtmişlerdir. Yaptıkları sayısal çalışmada yöntem olarak; havalandırıcıların hem serbest yüzeyli hem de hava-su karışımının önemli olduğu çok fazlı akım sınıfına girdiğinden

ASM(Algebraic Slip Mixture) modeli tercih edilmiştir. Bu model hava su karışımı için uygun olmayan VOF modeli ile kıyaslandığında net bir ara yüzey vermemekle birlikte sonuç itibariyle seçilen modele bağlı olarak sonuçlarının da birbiriyle uyumu hususunda farklılıklara neden olacağı belirtilmiştir. Bu çalışmada sayısal çözümlerde seçilen sonlu eleman ağının etkisini incelemek için literatürde önerilen ve kabul gören GCİ (GridConvergence Index)metodu kullanılmıştır. Model geometrisi için Demiröz (1986) tarafından inşa edilen ve deneysel çalışmaya tabi tutulan 1/25 ölçekli havalandırıcı prototipi kullanılmıştır. Yapılan sayısal analiz sonuçları ile prototip sonuçlarının karşılaştırılmasının yanında Kırkpınar ve Gögüş'ün (2002) 231 adet deney yapmak suretiyle ölçek etkilerini de dikkate alarak önerdikleri ampirik denklem ile de kıyaslama yoluna gidilmiştir. Buna göre; CFD analizleri ile ampirik denklem arasında uyumun olduğu, ayrıca ölçek etkileri göz önüne alınmaksızın yapılan prototip deney sonuçlarının düşük froude sayılarında uyumlu olduğu ancak özellikle yüksek froude sayılarında farklılıkların olduğu tespit edilmiştir. Özetle farklılıklara neden olarak; ölçek etkisinin küçük tutulması, ki bu hususta Pinto (1988) gibi birçok araştırmacı, modeller üzerinde ölçek etkisinden kurtulmak için ölçeğin en az 1/10 veya 1/15 gibi veya büyük seçilmesi gerektiğini ifade etmişlerdir. İkinci husus; izlenen yöntem ve son husus olarak, sayısal analizde seçilen modelin etkisinin sonuçların kısmi de olsa birbirinden farklı olmasına neden olduğunu belirtmişlerdir.

Savage ve Johnson [39], Flow3D programını kullanarak standart ogee dolusavakların simülasyonlarını gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçları fiziksel model, USBR ve USACE verileriyle karşılaştırdıklarında Flow3D'nin 0,7*Hd' den büyük su yükseklikleri için debi değerlerinin fiziksel model sonuçlarına göre biraz fazla tahmin ettiğini, USACE ve USBR standartlarının ise fiziksel model debi deşarjlarını sırasıyla yaklaşık %1.5 ve %5 oranında düşük tahmin ettiğini tespit etmişlerdir.

Singh ve ark. [40], Rattle Hidroelektrik Santralinin dolusavağının sayısal ve deneysel analizini yapmışlardır. 850 MW enerji üretim kapasitesine sahip olan barajın dolusavağı, 5 adet radyal kapaklı ve bir adet serbest akışlı dolusavak şut kanallarından oluşmaktadır. Bu çalışmada özellikle fiziksel model çalışmalarında çalışılmayan ancak zamanla serbest akışlı dolusavak kanalı ve hemen yanındaki radyal kapaklı şut kanalından deşarj olacak debinin oluşturacağı su jetinin barajın sol sahil duvarında

meydana getireceği düşünülen tahribatın önüne geçmek için birtakım sayısal deneyler yapmak ihtiyacı duymuşlardır. 1/55 ölçekli fiziksel modelin aynısı 3D olarak çizilmiş olup Flow3D'ye aktarılmıştır. Türbülans modeli olarak RNG seçilmiş, 2 m ağlarla kaba çözüm elde edildikten sonra 1 m'ye düşürülerek kararlı durum için 500 saniye çalıştırılmıştır. Elde edilen sayısal sonuçlara göre oluşan jetlerin sol sahile vurduğu görüldüğünden söz konusu jetlerin yönünü değiştirmek için serbest akışlı dolusavak duvarı ile hemen yanındaki şut kanalının duvar genişlikleri artırılmış, aynı zamanda serbest dolusavağın şut kanalındaki sıçratma eşiği $18^{o}$ derece sağa doğru kaldırılarak yeni bir tasarım yapılmıştır. Nihai haliyle çalıştırılan simülasyon sonuçlarına göre jet profillerinin sol sahil duvarından uzaklaştığı tespit edilmiştir. Sayısal ve fiziksel model değerlerinin kıyası hususunda ise gerek debi deşarj miktarının gerekse de su yüzü profillerinin ayrıca da su jeti profillerinin sıçrama uzaklıklarının birbirine çok yakın değerler olduğu belirtilmiştir.

Steiner ve ark. [12], Ski Jump denince genel anlamda eğri sıçratma eşiğinin (flip bucket) akla geldiğini, çünkü tasarımların çoğunun bu şekilde olduğunu, ancak üçgen(triangular) fırlatma eşiğinin de eğri sıçratma eşiği gibi etkin bir tasarım olarak kullanılıp kullanılamayacağı hususunun tespitini yapmak amacı gütmüşlerdir. Yapılan deneyler sonucunda her iki yapıda özellikle jet deflection yani eşiği terk eden jetlerin sıçrama açılarında çok fark olmadığı, ancak bu durumun hidrolik açıdan benzer oldukları anlamına gelmediği, aksine arada ciddi farkların olduğu belirtilmiştir. Üçgen ve eğri yapı arasında fırlatma açıları arasında çok fark olmadığı, ancak üçgen yapının fırlatma açısının her zaman fazla olduğu belirtilmiştir. Fırlatma ile ilgili olarak, eşik yüksekliğinin küçük olması durumunda üçgen yapının daha mantıklı olduğu, nedenin ise eğri eşik yapısında oluşacak çevrimin de etkisiyle fırlatma açısının daha da azalacak olması gösterilmiştir. Daha ziyade jet yörüngelerine etki eden hususların üçgen yapı için deflektör açısı $\lambda$ ve eşik yüksekliği w, eğri yapı için yine deflektör açısı $\beta$ ve eğri yarıçapı R olduğu ifade edilmiştir. Netice itibariyle gerek eğri gerekse de üçgen eşik yapıları için ilgili açılar arasındaki farkın dezavantajının veya avantajının olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Hidrolik açıdan farklılık ise; üçgen yapıda oluşan basınç değerlerinin eğri yapıdan daha fazla olduğu, çünkü üçgen yapıdaki akış eşikte herhangi bir çevrintiye maruz kalmadan yapıyı terk ederken eğri yapıda ise oluşan çevrintiler nedeniyle türbülansın etkisiyle bir miktar basınç azalmasının söz konusu

olduğu, ancak oluşan toplam dinamik basınç kuvvetlerinde tam tersi bir durumun meydana geldiği, ilgili durumun da eğri yapıdaki eşik yolunun yayılım, çevrinti ve türbülans için uygun olduğu, üçgen yapıda ise böyle bir duruma yol açacak güzergahın olmamasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Jet mansabında oluşan çevrinti akış yükseklikleri, enerji sönümlenme oranları, akış boğulması gibi hususlar her iki yapı için araştırılmıştır. Özellikle her iki yapıda geometrik tasarımlarda büyük farklar olmaksızın elde edilen sonuç verilerinde çok fark olmadığı, bu nedenle üçgen eşik yapısının da fırlatma yapısı (ski jump) hidroliğinde standart yapı olarak kullanılabileceği ifade edilmiştir. Avantajları olarak kolay inşa edilmeleri ve üç boyutlu tasarım olarak eğri sıçratma eşiği(flip bucket)'ın tasarımına sahip olması olarak gösterilebileceği belirtilmiştir. Yine jet mansabında oluşan şok dalga yüksekliği ile ilgili olarak, üçgen yapının eğri yapıya nispeten daha fazla dalga yüksekliğine sahip olduğu, bu durumun bu tür yapılarda jet mansabında kuyruk suyunda batma olayı yaşanmayacağını göstermesi açısından önemli olduğu ifade edilmiştir. Önemli bir husus olarak eşik başlangıcında yani deflection point'te basınç çok yüksek olduğundan muhtemel kavitasyonun ihmal edilebilecek kadar küçük olacağı belirtilmiştir. Elde edilen sonuçlar toparlanacak olursa; eşikte oluşacak maksimum dinamik basıncın yaklaşım akış derinliği ve froude sayısına bağlı olduğu, ayrıca gama(λ) deflektör açısından da az da olsa etkilendiği, ancak akış derinliğinden ziyade froude sayısı ile olan ilişkisinin daha kuvvetli olduğu, ilgili hususlara elde edilen formüllerden de ulaşılabileceği belirtilmiştir. Jet profillerin yörüngelerinin parabolik olarak elde edilmesi, elde edilen alt ve üst fırlatma açı formüllerinin doğruya yakın hesaplandığını göstermesi açısından önemli olduğu belirtilmiştir. Şok dalga yükseklikleri ve çevrinti akış derinliği daha çok froude sayısına bağlıyken az da olsa deflektör açısı ile de ilişkili olduğu, sönümlenen enerji miktarı ile ilgili olarak ise bu hususun deflektör açısı gama(λ) ve kuyruk su ile fırlatma noktası arasındaki eşik yüksekliğine bağlı olduğu, ancak bu noktada dikkati çeken hususun enerji sönümlemesi ile ilgili elde edinilen formüllerin froude sayısından bağımsız olarak elde edilmesi olduğu belirtilmiştir. Üçgen yapıda olduğu gibi eğri fırlatma yapılarında da enerji kırınımı, eşik yüksekliği, deflektör açısı β ve yarıçapın artmasıyla artacaktır. Akış boğulması her iki yapı için de aynıdır. Son olarak bu çalışmadaki üçgen eşik yapısı ile kısa süre önce çalışılan eğri yapı arasında elde edilen sonuçlara göre küçük farklılıklar vardır. Bariz fark, eşik

boyunca elde edilen basınç dağılımlarında görülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre üçgen eşik yapısı da standart fırlatma yapıları olarak tasarlanabileceği belirtilmiştir.
Tian ve ark. [41], çalışmalarında çevirmeli sıçratma eşiklerinin (flip bucket) enerji kırımında oldukça etkili olduklarını, ancak büyük deşarj debilerinde oluşabilecek oyulmalar ve eşik içerisindeki muhtemel akış boğulmaları gibi olumsuz hususların önüne geçmek adına dişli çevirmeli sıçratma eşiklerinin etkili olup olmadıkları hususunda çalışma yapmışlardır. Bu tür yapılarda enerji kırınımı için jet yörüngelerinin yayılımı ve uzunluğunun oldukça etkili olduğunu, ancak yörüngeyi etkileyen hava sürüklenmesi, hava direnci, eşik içerisinde oluşan karmaşık hidrolik durum, ayrıca eşik şekillerinin son zamanlarda oldukça düzensiz ve karmaşık tasarımlardan oluşması gibi durumların yörüngelerin düzenli şekilde elde edilmesini zorlaştırdığını ifade etmekle birlikte kendilerinin tasarımında etkili enerji sönümlenmesi için diş yapılarının eşiği terk eden akışı nizami olarak birbirinden ayırdığını, jetin genişlemesine olanak sağladığını belirtmişlerdir. İlgili konuda Heller ve ark. [28], Steiner ve ark. [12] gibi araştırmacıların hava sürüklemesi hususu göz önüne alınmaksızın, yaklaşım hızı, deflektör açısı, eşik yarıçap ve yüksekliklerini kullanarak jet profillerini elde etmede çeşitli formülleri geliştirdiklerini, kendilerinin ise jet yörüngelerinde ihtiyaç olunan eşik çıkış hızı ve eşik içerisinde sönümlenen enerji katsayısını enerji denklemlerini ve fiziksel model yardımıyla da elde etmek suretiyle daha gerçekçi profillerin elde etme amacında olduklarını belirterek yaptıkları çalışma sonucunda elde edilen jet uzaklıklarının önceki çalışmalarda edinilen sonuçlardan çok farklı ve daha gerçekçi olduğunu belirtmişlerdir.

Usta [42], çalışmasında Laleli Barajı dolusavak fiziksel model sonuçlarını sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırmıştır. Flow3D programının kullanıldığı çalışmada türbülans modeli olarak RNG model tercih edilmiştir. 1/25 ölçekli olarak yapılan fiziksel model, aynı zamanda 1/1 olarak da çözümlenmiş olup ölçek etkisi de tespit edilmiş, ayrıca fiziksel modelde ortaya çıkan kavitasyon hususu için de air entrainment modeli çalıştırılmıştır. Hücre boyutlarının küçültülmesi ile elde edilen sonuçların fiziksel model sonuçlarına yakın olduğu tespit edilmiştir. Air entrainment modeli kullanılarak elde edilen basınç değerlerinin ilgili model kullanılmadan elde edilen değerlerin neredeyse aynı olduğu ifade edilmekle beraber bu hususun 1/1 ölçek yani prototipte de geçerli olduğu tespit edilmiştir. Malum olduğu üzere ölçek etkisinden

dolayı su içine giren hava miktarını nicel olarak tespit etmek oldukça zordur. Bu konuda şimdiye kadar herhangi bir yöntem de tespit edilememiştir. Bu nedenle sayısal analiz ile yapılan air entrainment modelinde ancak nitel olarak su içine girebilen hava miktarını tespit etmek mümkündür. Açıklanan bu husus da dikkate alınarak bu çalışma ile ilgili elde edilen sonuçlara göre; hücre boyutlarının sonuçlara etkisinin oldukça önemli olduğu, air entrainment modelinin basınç değerleri üzerindeki etkisinin ihmal edilebilecek düzeyde olduğu, basınç değerlerinin ölçekli ve prototip modellerde neredeyse aynı olduğu dolayısıyla ölçek hususunun basınç değerleri için etkisiz olduğu, ayrıca kavitasyon indeksinin belirlenmesinde derinliğe bağlı ortalama hız yerine kesitteki ortalama hızların kullanılmasının daha etkili olacağı tespit edilmiştir. Son olarak, prototipte elde edilen hava sürükleme miktarının ölçekli modele göre oldukça fazla olduğu, ancak doğrulama için eldeki çalışmanın muhtevasında prototip fiziksel sonuçlarının olmamasından dolayı karşılaştırma yapılamadığı ifade edilmiştir.

Valero ve Rafael [43], çalışmalarında dolusavak üzerindeki serbest akışı, Flow3D programı yardımıyla hava sürükleme (airentrinment) ve sürükleme akış (drift flux) modellerini kullanarak elde ettikleri hava konsantrasyon katsayısını(Cair), daha önceki prototip çalışmaları yapılan sonuçlarla kıyaslama yoluna gitmişlerdir. RNG türbülans modeli ile 2D ve 2-10 cm boyutlarında değişen hücreler kullanarak tasarladıkları hesap ağıyla simülasyonları gerçekleştirmişlerdir. Dolusavak başlangıç noktasına X mesafedeki hava konsantrasyon değerinin kalibrasyonu için yaklaşık olarak 205 adet simülasyon gerçekleştirmişlerdir. Hava konsantrasyon katsayısı 0-1 arasında, yüzey gerilim değerleri de 0-5 N/m arasında seçilerek gerekli simülasyonlar yapılmıştır. Hücre boyutu olarak 4 cm, 6 cm, 8 cm kullanılmıştır. 8 cm hücrelerde yapılan analizlerde gerek Cair, gerekse başlangıç noktası için tespitler yapılmaya çalışılmışsa da elde edilen grafiklerde her iki değeri üretmek için gerçek bir çözümün olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Yine analiz sonuçlarına göre kalibrasyon verileri ile ilgili olarak farklı boyutlardaki hücrelerde yüzey gerilim değerinin azalması ile kalibrasyon değerlerinin(Cair) azaldığı, Cair değerlerinin her hücre için geçerli olacak şekilde türbülans kinetik enerjisinin artmasıyla arttığı, azalması ile azaldığı, bu nedenle kinetik enerji değişmemesi durumunda ilgili değerde değişimin beklenmeyeceği, ayrıca yüzey gerilim kalibrasyonu parametresinin sabit olarak göz önüne alınmasıyla elde edilen hava konsantrasyon değerlerinin hücre boyutunun artması ile oldukça azaldığı tespit

edilmiş, buna neden olarak hava sürükleme katsayısının hücre boyutu hassasiyetinin gösterilebileceği ifade edilmiştir. Hücre boyutu hususunda 4 cm için elde edilen yüzey gerilim değerlerinin başlangıç noktasındaki hatayı en aza indirerek doğru hava konsantrasyon değerlerinin elde edildiği belirtilmiştir. Elde edilen optimum veriler Chanson'un teorik çalışmalarıyla kıyaslanmış ve oldukça uyumlu bulunmuştur. Ancak akışın yüzeyinde ve tabana yakın yerlerde kısmi sapmalar oluştuğu ifade edilmiştir. Bu çalışma kapsamında dolusavak eğimini $30^o$ ile $48^o$ arasında değiştirmek suretiyle aynı debide ve hücre boyutu olarak da optimum sonuçların alındığı 4 cm kullanılarak yeni simülasyonlar yapılmıştır. Simulasyon sonuçlarına göre denge konsantrasyon değerlerinin incelenen literatür değerleriyle uyuştuğu, ilgili değerlerin eğimin azalması ile azaldığı belirlenmiştir. Sonuçların teorik sonuçlarla olan farkının %20'nin altında ve ortalama % 9.32 oranında uyumlu olduğu, ayrıca elde edilen verilerin önemli boyut bağımlılığını gösterdiği, genel olarak hava konsantrasyon profillerinde makul bir durumun oluştuğu, türbülans modelindeki iki parametre için elde edilen değerlerin gerçekçi dolusavak simülasyonlarında da kullanılabileceği belirtilmiştir. Son olarak, laboratuvar sonuçlarının hava sürükleme (air entrainment) modeli için ölçek etkisinden dolayı çok uygun olmadığını, ancak mühendisliğin pratiğine olumlu katkı sağlayabileceği belirtilmiştir.

Valentin ve ark. [44], 2000, 2004 ve 2007 yıllarındaki yapılan çalışmalarda elde edilen veriler göz önüne alınarak, sıçratma eşiğindeki maksimum basınç, eşikteki akış boğulması, fırlatma açıları ve fırlatma uzaklıkları gibi sonuçların literatürde mevcut olan diğer deney sonuçları ile kıyaslamasının yapıldığı, yanı sıra literatürdeki hidrolik model sonuçları ile prototip gözlem sonuçlarının kıyaslanmasının da yapılarak model ile prototip arasındaki ilişkiye değinildiği belirtilmiştir. Fırlatmalı akışların jet profillerinde oluşan türbülans ve yayılmalardan dolayı ölçümlerde üst yörüngelerde 0,5 cm, alt yörüngelerde ise 1 cm hata paylarının olduğuna dikkat çekerek oluşan maksimum basınçta esas parametrenin froude sayısı olduğunu belirtmişlerdir. Büyük ho/R ve küçük β deflektör açısı ile meydana gelecek akışın dinamik basıncının ihmal edilecek kadar küçüldüğü, bu hususta Gumensky (1953), Heller ve ark. [28] ve Khatsuria [3] gibi araştırmacılarının çalışmalarının mevcut olduğu, jet fırlatma mesafesi ile ilgili olarak yapılan bu çalışmada froude sayısının artmasıyla mesafenin de arttığı gözlemlenmiştir. Fırlatmalı akışların prototip çalışmalarında yapılan

tasarımlarda jet mesafesinin öneminden dolayı muhtemel oyulma hususu da göz önüne alınarak froude sayısının 4'ten küçük olmamasına dikkat edildiği, zaten ilgili değerlerde viskoz ile yüzey gerilmeleri de devreye girdiğinden uygulama projelerinde 4'ten büyük froude sayılarına ulaşılması çabasının olduğu belirtilmiştir. Fırlatma açısı ile ilgili olarak elde edilen formüllerde ho/R'nin artmasıyla ilgili açıların azaldığı, bu durumunun ho/R değerinin 0,5'e kadar devam ettiği, bu değerde fırlatma açılarının da minimum olduğu belirtilerek elde edilen fırlatma açısı formüllerinin (w/ho)/(Fr^3)<0,022 değerleri için geçerli olduğu belirtilmiştir. Yine bu formüllerde froude sayısıyla doğrudan bir ilişkinin olmadığı, daha ziyade ho/R, dolayısıyla eşik yüksekliği w, ayrıca hız ile ilişkilerin söz konusu olduğu belirtilmiştir. Çalışmalarda elde edilen verilerin literatür çalışmalarında mevcut olan çalışmalarla kıyaslama hususunda şu bilgiler verilmiştir; Quadri ve ark. (1977) çalışmalarında iki farklı yüksekliğe sahip dolusavaklarda elde ettikleri fırlatma açılarının kendi çalışmalarında edinilen açılarla uyumlu olduğu, ancak yüksek β deflektör açısı ve düşük ho/R değerlerinde ayrışmaların olduğu, bunun nedeninin de ilgili aralıklarda (w/ho)/Fr^3 değerinin 0,022'den büyük- burada froude sayısının 4' ten küçük değerlerde olduğunu belirtmekte fayda vardır- olmasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Bu durum tasarım yapıldığında tüm parametrelerin dikkatli ve dengeli seçilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Ayrışmalara neden olarak yine kendi çalışmalarında fırlatma açılarının belli bir yolla formülize edildiği, ancak Quadri'nin çalışmalarında fırlatma açılarıyla ilgili herhangi bir metottan bahsedilmediği, kendi çalışmalarında froude sayısı 3 ile 10 arasında iken diğer çalışmada ilgili sayının hangi aralıkta olduğu ile ilgili herhangi bir bilginin verilmediği ifade edilmiştir. Ayrıca elde edilen sonuçlarda dolusavak boşaltım kanalının eğimine değinilmediği göz önüne alındığında kanal eğiminin fırlatma açıları üzerindeki etkisinin küçük olduğu sonucuna ulaşılabileceği belirtilerek ilgili sonuçların yatay kanallar için de kabul edilebileceği ifade edilmiştir. Heller( 2005) kendi çalışmasında yatay yerine yüksek olmaması şartıyla λ eğimine sahip kanal tasarlanması durumunda bile ilgili (β +λ) eğiminde elde edilecek sonuçların birbirine çok yakın olduğunu da ayrıca belirtmiştir. Dolayısıyla fırlatma açıları üzerinde kanal eğimin pek bir etkisinin olmadığı, bu hususun akış boğulması olayında da geçerli olduğu belirtilmiştir. Bu çalışma kapsamında değinilen konulardan biri de hidrolik modelde elde edilen jet uzaklıklarının prototipte oluşan uzaklıklardan farklı olduğu ile ilgilidir. Örnek olarak Tayvan'da Shihmen Barajının prototip jet uzaklığının hidrolik

model uzaklığının %70'i kadar, ancak Hindistan'daki Dehar barajında da tersi bir durumun olduğu, tüm bu hususların nedenleri olarak;

-)Hava etkisi; Prototipte akışa etkiyen hava nedeniyle akış ile dolusavak tabanı arasındaki sürtünmenin azalmasıyla hızın artmasının neden olarak gösterilebileceği,
-)Boşaltım kanalı sınırındaki sürtünme; prototip ve hidrolik modeller arasındaki Reynolds sayılarının farkından dolayı yük kaybı benzeşmesinin oluşmadığı,
-) Jetlere hava etkisi; jet hızının 13 m/s'yi aşması durumunda prototip modelde ekstra hava direncinin söz konusu olacağından ilgili farklılıkların oluşmasının beklenebileceği ifade edilmiştir. Sonuç olarak fırlatma açılarıyla ilgili Quadri ve ark. (1977) çalışmalarıyla uyumun olduğu tespit edilmiş olup mevcut sonuçların deflektör açısının dikkate alınmasını gerektiren maksimum basınç yüksekliği haricinde eğimli dolusavaklarda çok fazla değişiklik yapılmaması koşuluyla kabul edilebileceği belirtilmiştir.

Varol [45], Alibey Barajı'nın dolusavak hesapları, düşüm havuzu ve enerji kırıcı blok boyutları dikkate alınarak enerji kırıcı blok boyutları değiştirilmeden farklı geometrilere sahip modeller hazırlayarak analizlerini yapmış ve birbirleriyle kıyaslamıştır. 2,10 m blok yükseklik ve genişliğine sahip farklı geometrilerdeki 11 adet enerji kırıcı bloklar ile bir adet enerji kırıcı bloksuz modelden oluşan toplam 12 adet model tasarlamıştır. Tasarlanan modeller, öncelikle üç boyutlu çizim programı olan Gambit programında hazırlanmış ve CFD yazılımı olan Fluent programına gerekli veriler girilip analizler yapılmıştır. Analizlerde; hız değişimleri, enerji sönümleme oranları ve bloklara etki eden dinamik kuvvetler incelenmiştir. Tasarlanan modeller arasında akımın enerjisini en fazla kırabilen model böylece tespit edilmeye çalışılmıştır. Sonuç olarak, tasarlanan modeller içerisinde enerjiyi en fazla kırabilen modelin, üçgen geometriye sahip olan modelin olduğu ve elde edilen verilerin oldukça memnun edici olduğu sonucuna varmıştır.

Yavuz [46], Laleli barajı dolusavağının enerji kırıcı yapısı olan çevirmeli sıçratma eşiği mansabındaki akışın düştüğü noktada oluşan dinamik basınçların tespiti, ayrıca oluşan su jetini etkileyen hava sürüklenmesinin tespitinin yanı sıra kuyruk suyu derinliğinde oluşan seviye artışlarının ilgili sonuçlara olan etkisini fiziksel model

yoluyla tespit etmeye çalışmıştır. Buna göre sıçratma eşiğini terk eden akışta oluşan enerji kırınımının tespiti için Kawakami (1973) tarafından ortaya konulan formülasyon sonuçları ile fiziksel model sonuçlarının karşılaştırılmasının yeterli olacağı, bu şekilde yapılan hesaplara göre 6 (altı) farklı debide oluşan maksimum enerji sönümlenmesinin en yüksek debide %84 oranında elde edildiği belirtilmiştir, Farklı debilere göre oluşan dinamik basınçlarla ilgili olarak; 0,25 ve 0,70 m arasında değişen kuyruk suyu yüksekliklerinde oluşan basınç miktarı ile olan kıyaslamada derinlikteki artışın basınca pek etkimediği, en küçük iki adet debide oluşan dinamik basıncının diğer debilerden oldukça yüksek olduğu, buna neden olarak ise jetteki havalanmanın, ayrıca aynı hususta Reynolds ve Weber sayıları da dikkate alındığında Pfister ve Chanson (2012)' a göre ölçek etkisinin de olabileceği, yine düşük debideki akışın mansap kanalına daha dik açıyla düşmesinin de bahsi geçen duruma neden olabileceği belirtilmiştir. Aynı çalışmada jet profillerinin gerek genişliği gerekse de düştüğü noktadaki boyuna yayılımının ölçüldüğü belirtilerek oluşan şekillerin elips'e yakın olmasından dolayı kütle korunumu kanununa göre jetin düştüğü noktadaki hava miktarının tespit edildiği, elde edilen hava miktarı sonuçlarının tüm debilerde oldukça yüksek oranda olduğu, Kawakami'nin jet mesafesi formülasyonuna kıyasla oluşan jet mesafeleri arasında iyi bir uyumun oluştuğu, yapılan çalışmada dinamik basınçlara daha çok jet fırlatma açısı ve su jetine olan hava sürüklenmesinin etki ettiği, enerji sönümlenmesinde kuyruk suyu derinliğinden ziyade jetin mesafesi ve fırlatma açısının etkili olduğu belirtilmiştir. Azalan debilerdeki dinamik basıncın fazla olabileceği göz önüne alınarak tasarımlarda ilgili hususa dikkat çekici çekilmesi gerektiği, ayrıca tespit edilen hususların 30 derecelik fırlatma açısına sahip çevirmeli sıçratma eşiği için geçerli olduğu belirtilmiştir.

Yavuz [47], 2014 yılında yaptıkları fiziksel model deneylerinde elde ettikleri jet mesafesi ile Kawakami (1973) ve Khatsuria [3] ampirik denklemlerinde elde edilecek jet mesafesi ve ayrıca sayısal simülasyon sonucu edinilen jet mesafesinin kıyaslanarak oluşan debi-enerji sönümlenme yüksekliği denklemini elde etmiştir. 2014 yılı çalışmalarında ampirik ve deneysel verilerin birbiriyle olan uyumunun dikkat çekici olduğu belirtilen bu çalışmada Flow3D sayısal analiz programında türbülans modeli olarak k-epsilon türbülans modeli kullanılmıştır. Hava direncinin neden olduğu enerji kırınımının tespiti için sayısal sonuçların ilgili diğer sonuçları eklenerek 10.000 $m^3/s$

kadar debi deşarjlarında oluşan sönümlenme grafiği elde edilmiştir. Söz konusu grafikte 4000 $m^3/s$ seviyesine kadar olan sonuçlarda sayısal ve deneysel verilerin aynı olduğu, bu noktadan sonra beklendiği gibi, sayısal analiz programlarındaki hava sürüklenmesi hususundan dolayı sayısal analizdeki enerji yüksekliğinin deneysel verilerdeki enerji yüksekliğinden fazla olduğu ve aradaki farkın 10.000 $m^3/s$ kadar arttığı, bu değerden sonra sabit olduğu tespit edilmiştir. Maksimum debide hava direncinden kaynaklı enerji sönümlenmesi farkının %15 olduğu tespit edilmiştir.

Zhenwei ve ark. [48], laboratuvarda tasarladıkları dolusavağın hidrolik karakteristiklerinin tespiti için deney yapmışlardır. Ayrıca aynı yapının sayısal analizi için de Fluent yazılımını kullanarak elde ettikleri sonuçları kıyaslama yoluna gitmişlerdir. İki kapaklı ve tek boşaltım kanalı olarak tasarlanan dolusavak yapısının boşaltım kanalı da iki farklı eğime ve belli mesafede daralan yapıya sahiptir. Söz konusu çalışmada dolusavak eşiğindeki orta ayağın akışa etkisini tespit etmek için fiziksel modeli ayrıca tek açıklık olarak da inşa etmişlerdir. Fiziksel model ve sayısal model analiz sonuçlarına göre tek açıklık olarak tasarlanan yapıda elde edilen sonuçların iki kapaklı olarak tasarlanan yapıya oranla çok daha iyi olduğu ifade edilmiştir. Bunun sebebinin ise orta ayağın akışa olan deflektör etkisinden kaynaklandığı ifade edilmekle birlikte tüm analiz sonuçlarında ise fiziksel model sonuçları arasında %6'lık bir fark elde edildiği, bu farkın oldukça iyi bir oran olduğunu belirtmişlerdir. Dolusavaktaki hidrolik karakteristiklerin birbiriyle uyumlu olduğu, sadece boşaltım kanalında daralan bölgede basınç değerlerinin fiziksel modele göre aradaki farkın büyük olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışma ayrıca dolusavağın tümünde Fluent yazılımının kullanılması bakımından önemlidir. Çünkü literatür çalışmaların çoğunda dolusavakların hidrolik karakteristiklerinin tespiti için Flow3D yazılımının kullanıldığı bilinmektedir.

# 3. MATERYAL VE METOT

## 3.1 Materyal

Ilısu barajı, Türkiye'nin güney doğusunda Dicle Nehri üzerinde yer almaktadır. Bu baraj, Önyüzü Beton Kaplı Kaya Dolgu barajlar içerisinde gövde uzunluğu ve yüzey alanı bakımından dünyada en büyük, Gövde dolgu hacmi bakımından Atatürk Barajından sonra Türkiye'nin 2. büyük, Kurulu güç bakımından Atatürk, Karakaya ve Keban Barajlarından sonra 4. büyük, Dicle Nehri üzerinde yapılmış ve yapılacak olan en büyük Baraj ve HES'tir. Tamamlanan barajımızda sadece elektrik enerjisi üretiminden ekonomiye yılda 412 Milyon $ fayda sağlaması planlanmaktadır.

### 3.1.1 Ilısu barajı ve hes projesi dolusavak yapısı

Uygulanarak yapımı tamamlanan Ilısu barajının toplam dolusavak genişliği 124 m olup altı adet radyal kapak ile kontrol edilmektedir. Dolusavak boşaltım kanalının eğimi 1/8,25 'tir. Ilısu barajı dolusavağı dişli çevirmeli kova tipi deflektör ve dalma havuzu ile sona ermektedir. Dolusavak tepesi ile sıçratma yapısının mansap ucu arasındaki kot farkı 70 m (510-440)'dir.

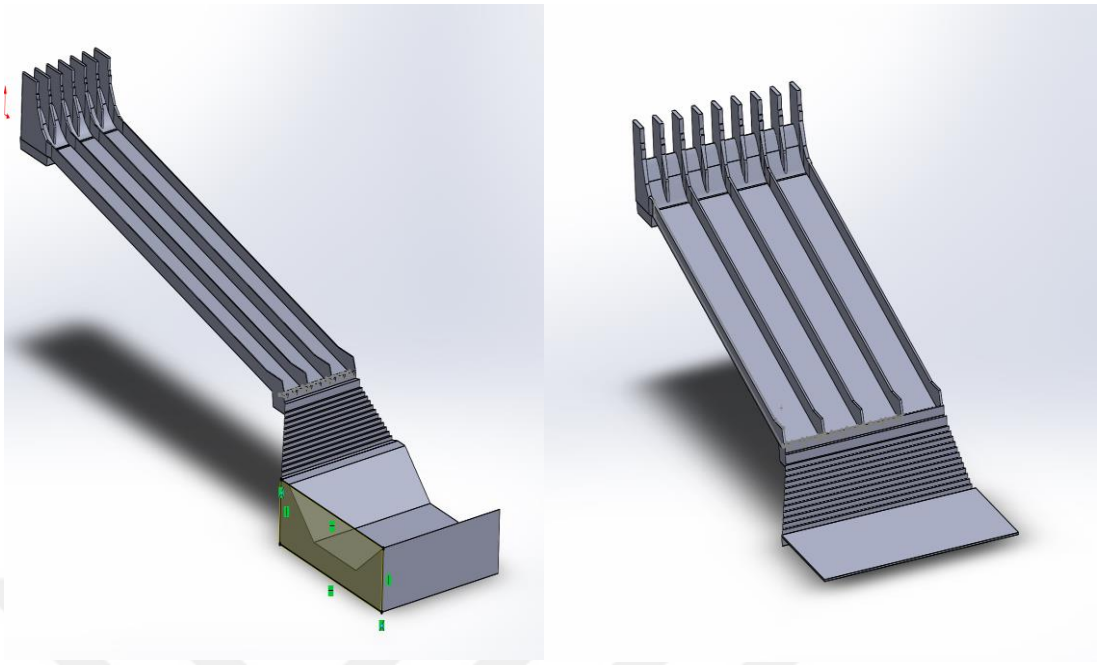
Tablo 3.1 Ilısu barajının özellikleri [49]

| | | |
|---|---|---|
| **Hidroloji** | Drenaj Alanı | 35 517 $km^2$ |
| | Ortalama Debi (Doğal) | 490 $m^3/s$ |
| **Rezervuar** | Maksimum Su Seviyesi | 527.86 m (2010 yılı)<br>527.05 m (1982 yılı) |
| | Maksimum Su Seviyesi Rezervuar Alanı | 313 $km^2$ |
| | Normal Su Seviyesinde Toplam Rezervuar Alanı | 10 410*$10^6$ $m^3$ |
| **Baraj Ana Gövdesi** | Tipi | Önyüzü Betonla Kaplı Kaya Dolgu Baraj (ÖBKD) |
| | Talveg Kotu | 400.00 m |
| | Gövde Dolgu Hacmi | 23.7*$10^6$ $m^3$ |
| | Kret Genişliği | 9.02 m |
| | Kret Uzunluğu | 2 327 m |
| | Kret Kotu | 530 m |
| **Memba Batardosu** | Tipi | Kil Çekirdekli Kaya Dolgu |
| **Mansap Batardosu** | Tipi | Kil Çekirdekli Kaya Dolgu |

Tablo 3.1 Ilısu barajının özellikleri (Devam)

| | | |
|---|---|---|
| **Derivasyon Tünelleri** | Tipi | Dairesel, Beton Kaplamalı |
| | Tünel Sayısı | 3 |
| **Dip Savak** | Tipi | Tünel |
| | Derivasyon Kapasitesi | 3 600 $m^3/s$ |
| **Beton Baraj** | Beton Barajı Temelden Yüksekliği | 51.50 m |
| **Dolusavak** | Radyal Kapaklı, Sıçratma Eşikli | 17 988 $m^3/s$ ( 1982 yılı)<br>14799 $m^3/s$ (2010 yılı) |
| **Enerji Su Alma Yapıları ve Cebri Borular** | Tünel Sayısı | 3 |
| **Kuyruk suyu Kanalı** | Uzunluğu | 1080.00 m |
| | Taban Genişliği | 90.00 m |

Ilısu Barajı dolusavağı 2010 yılı revize uygulama projeleri MMF(muhtemel maksimum feyezan) taşkın debisine göre boyutlandırılmış olup 6 ana kısımdan oluşmaktadır. Bunlar; Eşik Yapısı-Şut Kanalı-Sıçratma Eşiği-Apron-Enerji Kırıcı Havuz-Boşaltım kanalıdır (Şekil 3.1 a). Söz konusu barajın dolusavağı 6 adet radyal kapak tarafından kontrol edilmektedir. Barajın kapak sayısı fiziksel modelde 8 adet 16x16 m iken DSİ Barajlar ve Hidroelektrik Santralleri Daire Başkanlığı ve ECS müşavirlik tarafından hazırlanan Revize Dolusavak Hidrolik Raporunda 6 adet 15x16 m olarak değiştirilmiştir. 2010 yılı revize dolusavak hidrolik raporuna göre baraj yerinin en büyük taşkın piki 20357 $m^3/s$ dir. Dolusavak kapasitesinin tayini için MMF kullanılarak taşkın ötelemesi yapılmış ve bu öteleme esnasında suyun rezervuarda ne kadar yükseldiği tespit edilerek hava payı bulunmuştur. Maksimum kapak açıklığında dolusavak 14799 $m^3/s$ debi atabilmektedir. Dolusavağın bu debiyi attığı andaki rezervuar su seviyesi ise 527,86 m'dir [49]. Ilısu Barajı dolusavağı 1982 yılı fiziksel model raporuna göre tasarlanan yapıda ise enerji kırıcı havuz yoktur. 1980 yılında tasarlanan projede 8 adet radyal kapak mevcut iken maksimum taşkın debisi ise 17988 $m^3/s$ olarak ölçülmüştür. Dolusavağın bu debiyi attığı andaki rezervuar su seviyesi ise 527,05 m'dir. İlgili modelde ihtiyaç olunan enerji sönümlenmesini temin için sıçratma eşiği 3 farklı şekilde tasarlanmış elde edilen sonuçlar detaylı olarak incelenmiştir. Ayrıca uygulanarak yapımı tamamlanmış revize modelde kapak sayısı dışında her bir boşaltım (şut) kanalları 2 m daha geniş olarak inşa edilmiştir. 1982 model yapısı ve 2012 uygulama projesi inşaat aşamasından kesitler şekilde gösterilmektedir ([50],Şekil 3.1b-3.4).



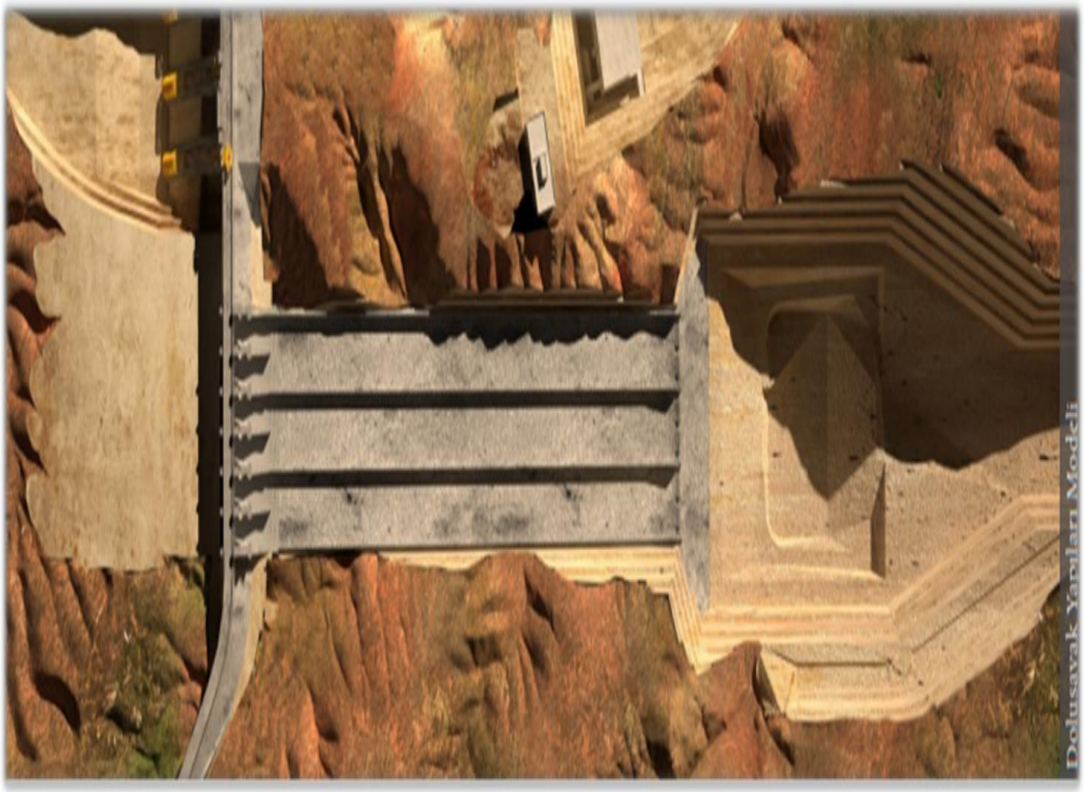
Şekil 3.1 a. Ilısu barajı 2010 yılı dolusavak 3D yapısı b. Ilısu barajı 1982 yılı dolusavak 3D yapısı




Şekil 3.2 Ilısu barajı dolusavak beton aprondan bir görüntü




Şekil 3.3 Ilısu barajı dolusavak boşaltım kanalı ve beton aprondan bir görüntü

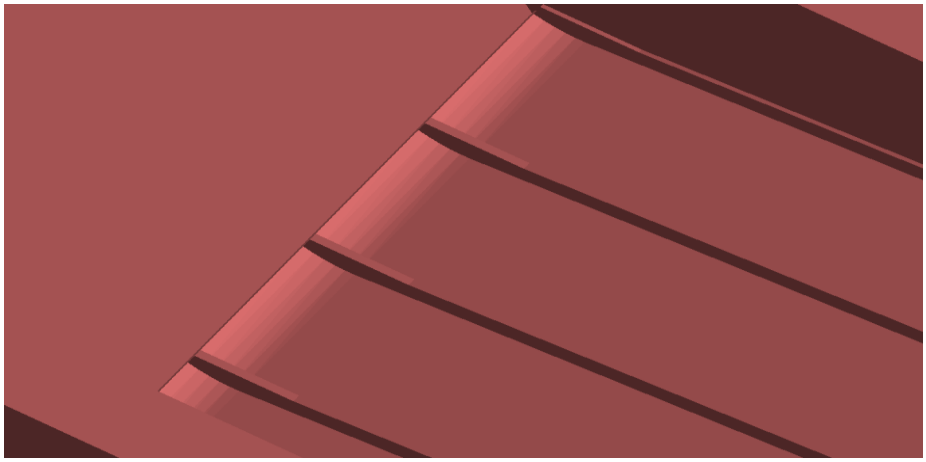



Şekil 3.4 Ilısu barajı revize uygulama projesi inşaatından görüntüler

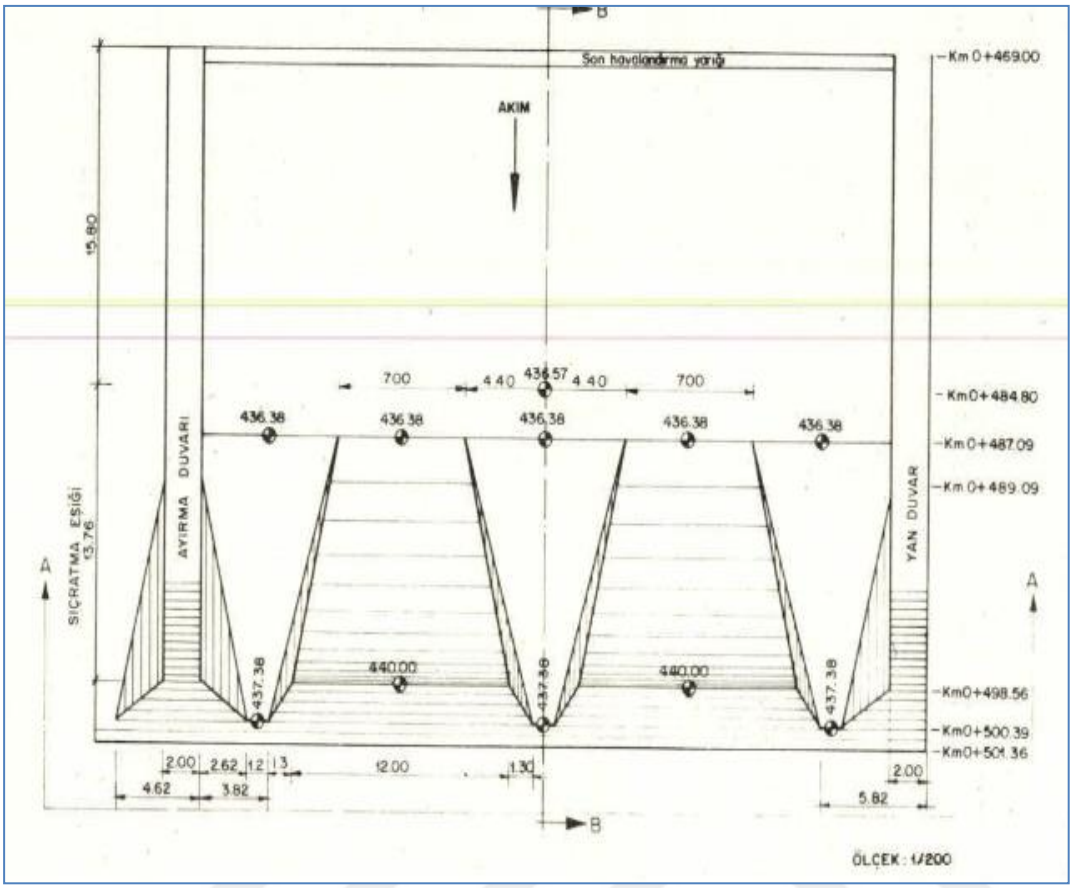
### 3.1.2 Ilısu barajı dolusavak enerji kırıcı yapıların tasarımı

Ilısu Barajı ve HES Projesinde dolusavak yapısında meydana gelen enerjinin sönümlenmesi için ilk olarak şut kanalının sonunda çevirmeli sıçratma eşiği (flip bucket) tasarlanmıştır (Şekil 3.5). Daha sonra proje firmasının tavsiye ettiği dişli sıçratma eşiği (Varyant I) modele uygulanmıştır. Bu eşikte diş üst genişliği 12 m, dişin yan şev açısı 1/2,15 olarak alınmıştır. Ayrıca dişler arası yarıkların yatay ile yaptıkları açı olan Beta sıçratma açısı 3,55$^{o}$ olarak seçilmiştir (Şekil 3.6-3.8). Sıçratma eşiği ve dişli sıçratma eşiği Varyant-I için yapılan modelleme sonuçları dikkate alındığında; dişin üst genişliğinin eşik yapısına nazaran büyük olduğu ve buna karşın yarık genişliklerinin napın havalanması için yeterli olmadığı görüldüğünden bu durumu düzeltmek için yapılan çalışmalar sonunda plan kesit ve görünüşleri şekilde verilen dişli sıçratma eşiği Varyant-II alternatif olarak tasarlanmış ve elde edilen sonuçlara göre de en uygun varyant olarak belirlenmiştir. Bu eşikte diş üst genişliği 10,97 m, diş yan şevleri 1/2, dişler arası mesafe 1,46 m ve ayırma duvarına bitişik şevler Varyant-I'de olduğu gibi 1/1 yapılmıştır. Beta sıçratma acısı 2,78$^{o}$ olarak seçilmiştir (Şekil 3.9-3.11), [51].

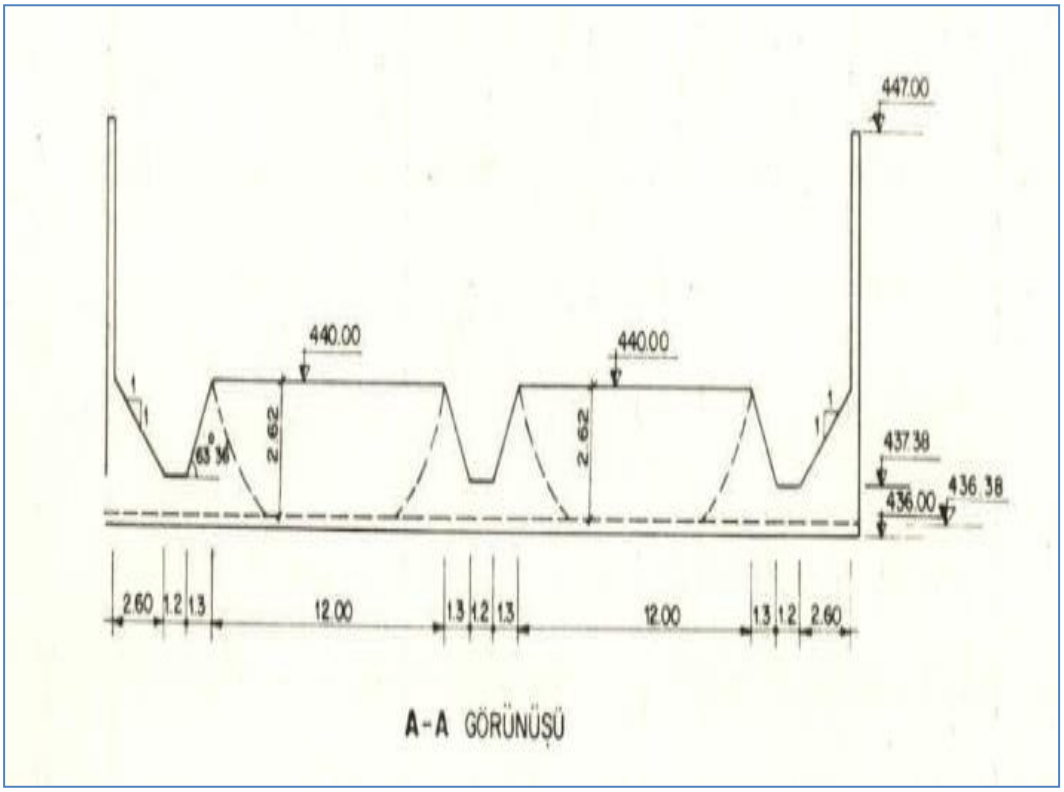
2012'de Ilısu Mühendislik ve Müşavirlik Konsorsiyumu (ECS) tarafından yapılan revize tasarımda dolusavak eşik yapısı sonunda enerji kırıcı yapı için fiziksel model çalışmaları sonucu uygun görülen Varyant-II tasarımına yakın ölçülerde diş yapısı dizayn edilmiş olup son revize tasarım olan Güncel Revize Kati Proje (GRKP)'lerden bir kesit Şekil 3.12 de gösterilmektedir. Buna göre diş üst genişliği 10,46 m ve diş alt aralığı 1,50 m, beta sıçratma sıçratma açısı 2,57$^{o}$ seçilmiştir. Kati projeler dikkate alınarak inşa edilen dişli yapı Şekil 3.13 ve Şekil 3.14' te gösterilmektedir [49].



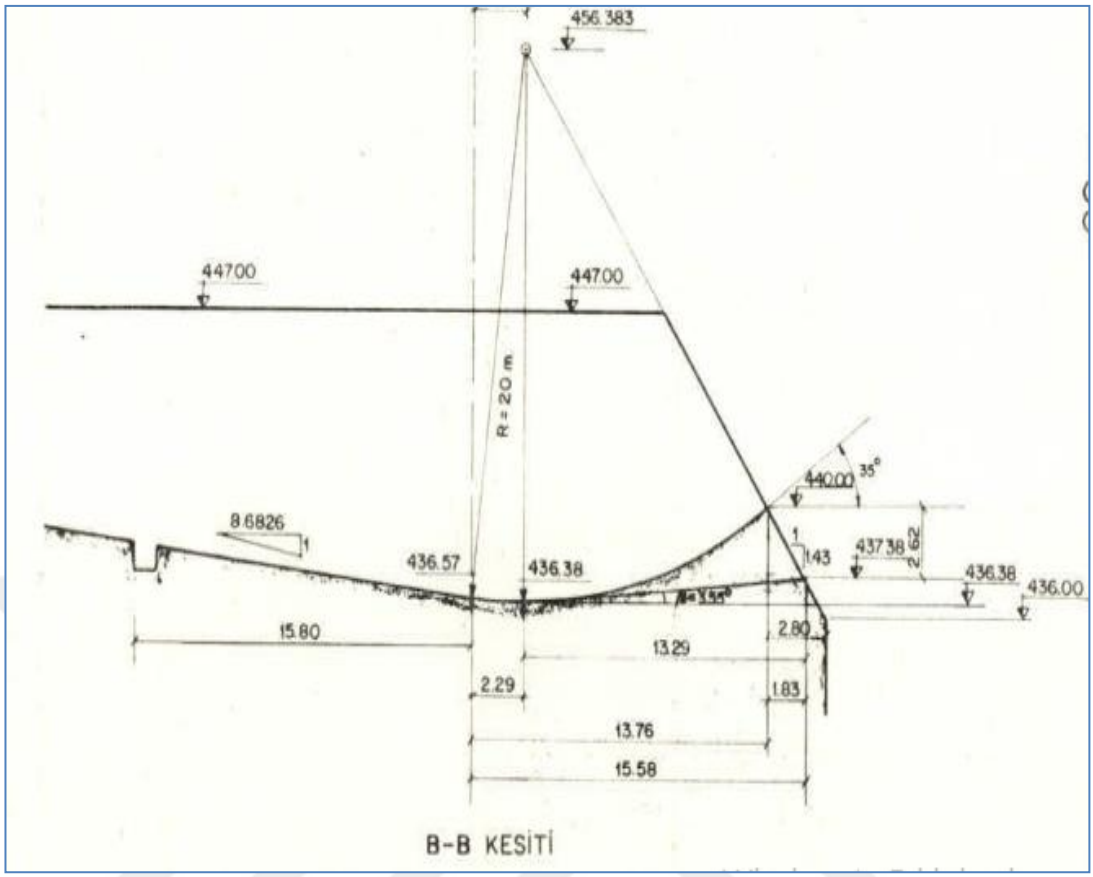
Şekil 3.5 Fiziksel model çevirmeli sıçratma eşiği orijinal tasarım (flip bucket) Flow3D



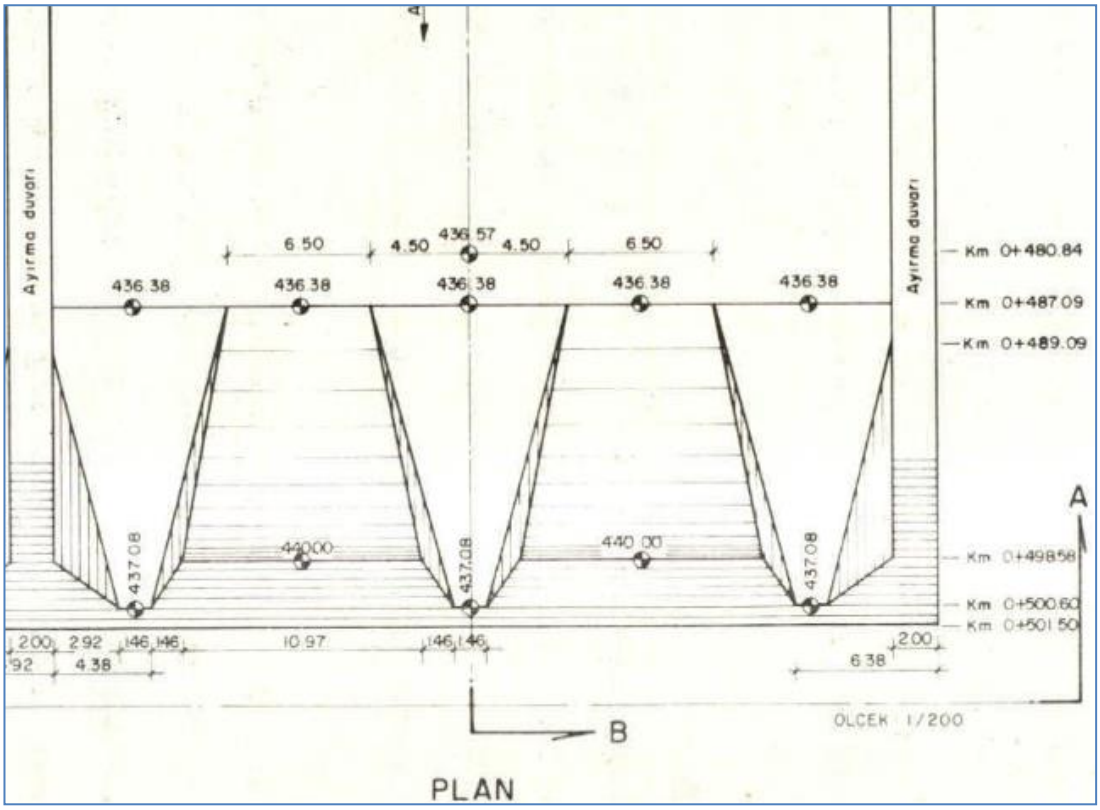

Şekil 3.6 Fiziksel model sıçratma eşiği Varyant-I plan görüntüsü



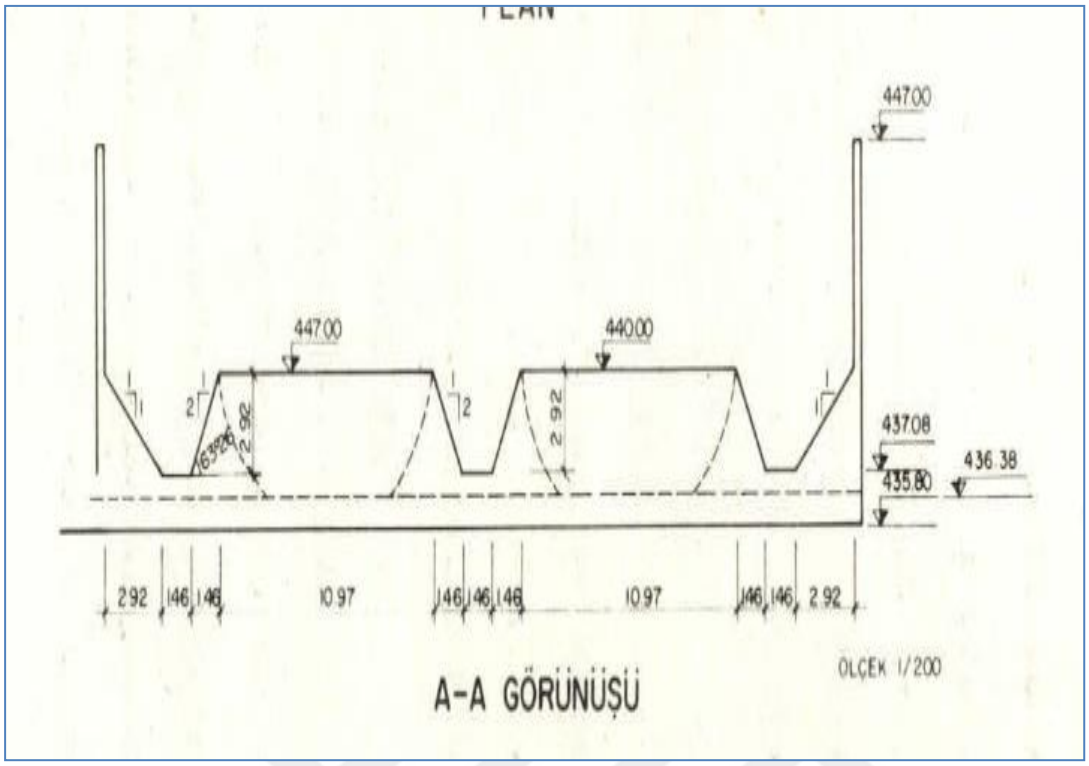

Şekil 3.7 Fiziksel model sıçratma eşiği Varyant -I ön görünüş



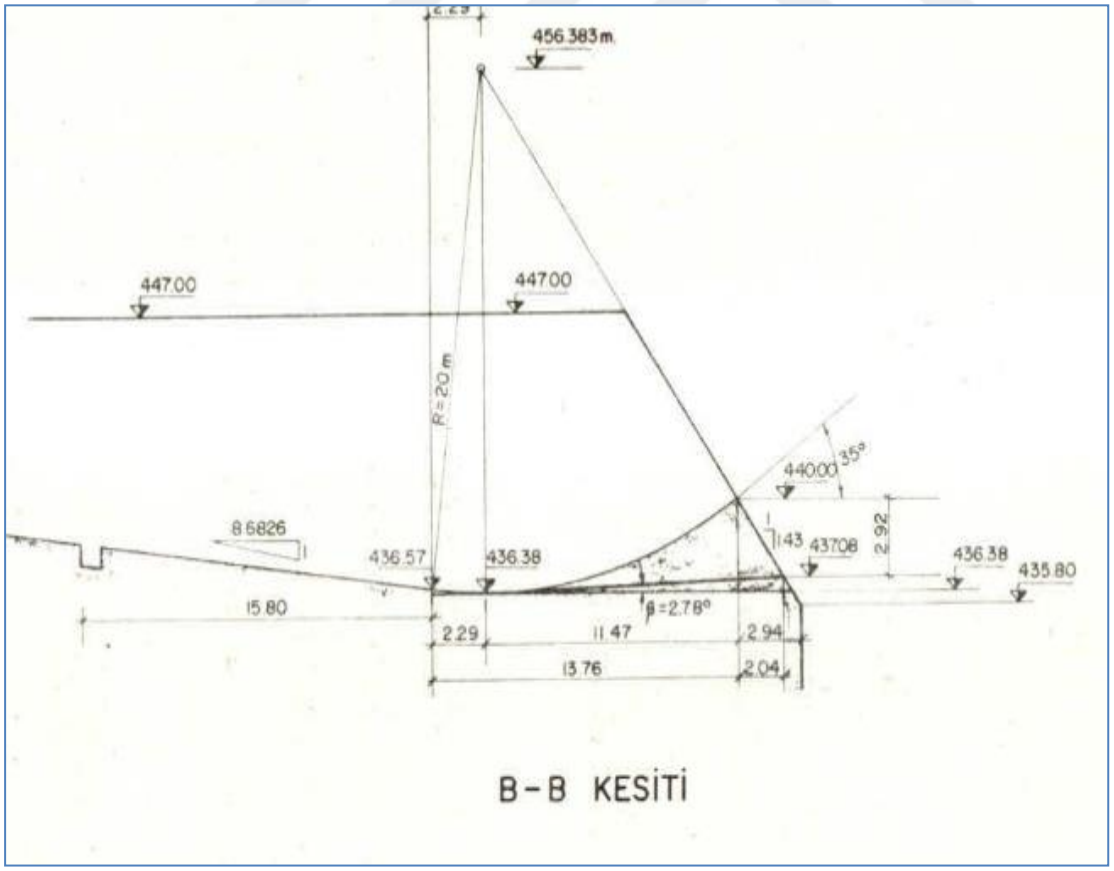

Şekil 3.8 Fiziksel model sıçratma eşiği Varyant-I kesit görünüşü



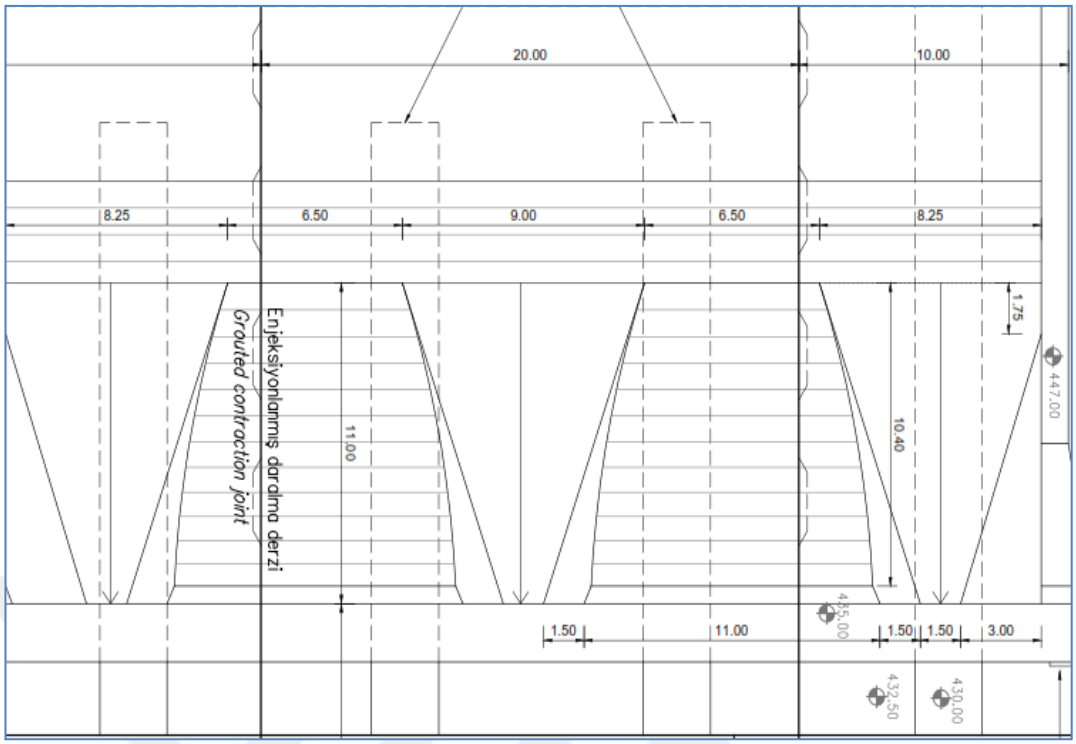

Şekil 3.9 Fiziksel model sıçratma eşiği Varyant-II plan görüntüsü



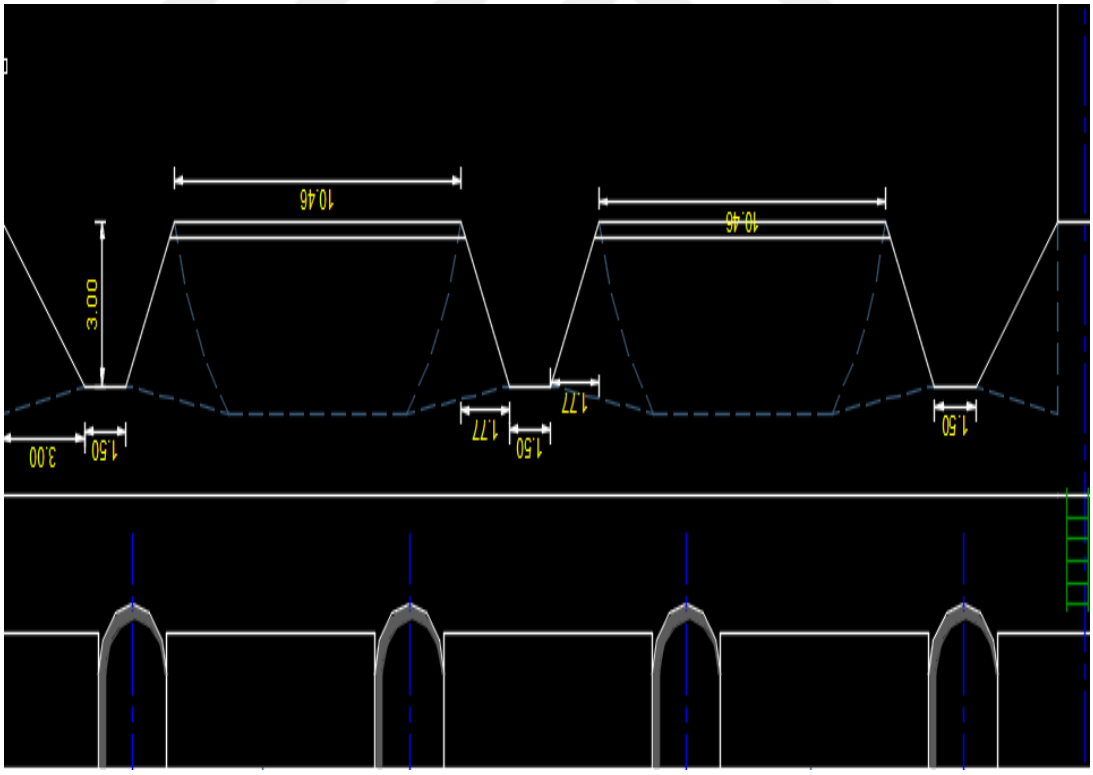

Şekil 3.10 Fiziksel model sıçratma eşiği Varyant-II ön görünüş




Şekil 3.11 Fiziksel model sıçratma eşiği Varyant-II kesit görünüşü




Şekil 3.12 Kati proje sıçratma eşiği plan görüntüsü [49]




Şekil 3.13 Ilısu barajı sıçratma eşiği kati proje ön görünüş



Şekil 3.14 Ilısu barajı dolusavak sıçratma eşiği inşaatından görüntüler [49]

### 3.2 Çalışmada Kullanılacak Metod

Son 30 yıldır sayısal modelleme teknikleri, hesaplama gücünün de artmasıyla artık birçok uygulama için hızla gelişmektedir. Bu gelişme, sayısal modellemenin birçok mühendislik alanında standart bir tasarım aracı olarak yaygın şekilde kullanılmasına yol açmıştır. Sayısal modelleme uygulamalarının çok fazla alana yayılmış olmasına karşın tüm sayısal modellerin dayandığı temel ilkeler tüm modeller için aynıdır. Problemler, belirli bir durumun altında yatan olayın fiziğini tanımlayan bir dizi kısmi diferansiyel denklemle başlar. Daha sonra, kısmi diferansiyel denklemleri temsil eden bir dizi cebirsel denklemi formüle etmek için sonlu eleman analizi veya sonlu hacim yöntemi gibi bir tür sayısal yöntem kullanılır. Bu cebirsel denklemlere yaklaşık bir çözüm, bir yinelemeli veya matris çözümünün bir formu aracılığıyla elde edilir. Bu çözüm genellikle hesaplama açısından çok yoğundur, bu da modern hesaplama gücünün kullanımını sayısal modellerin kullanımı için çok önemli kılar. Geçmişten bugüne dolusavaklar üzerindeki suyun akışı, yapıların küçültülmüş versiyonları üzerinde fiziksel model deneyleri yapılarak araştırılmaktadır. Bu çalışmalarda model akış bilgilerini tam ölçekli prototip değerlere dönüştürmek için

ölçekleme oranları kullanılmaktadır. Dolusavak performansını değerlendirmedeki bu yöntem geçmişte ve günümüzde başarılı olmasına rağmen HAD yönteminin de fiziksel modellemeye göre çeşitli avantajlar sunduğu bilinmektedir. Günümüzde yapılacak hidrolik alanındaki mühendislik tasarımları artık deneysel çalışmalar ile birlikte HAD yazılımının kullanılmasını gerektirmektedir. Çünkü bu tür programların birçok hidrolik yapıların projelendirilmesinde kullanılması, planlanmada daha az hata oluşmasını, daha kısa zamanda ve daha ekonomik olarak yapılmasını sağlayacaktır. Genel olarak HAD, her türlü akışkan ve akışın değişik koşullardaki analizini yapmaya yarayan bir yöntemdir. Bu yöntemde temel olarak üç ana denklem (süreklilik, momentum ve enerji denklemleri) esas alınır ve bu denklemler sayısal çözülerek akış içindeki basınç, hız ve sıcaklık dağılımları ve bu parametrelere bağlı olarak birçok veriye ulaşılır [22].

### 3.2.1 Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD)

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, mühendisler tarafından ihtiyaç olunan hidrolik tasarımlar, artan ihtiyaçlar da göz önüne alınarak gelecekte tasarlanacak üretim tesisleri için planlama çalışmaları, inşa edilecek yapıların bakımı, tedarik verimliliği ve baraj güvenliği ile ilgili karmaşık sorunları modellemek, analiz etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu modeller mühendislik anlayışına çok geniş ölçekte bir alan sunarken su hidroliğinin ötesinde birçok alanda akışkanları modelleme seçenekleri sunarlar. Tarihsel süreç dikkate alındığında fiziksel model çalışmaları ve elde edilen ampirik bilgiler kullanılarak çeşitli akış verileri elde edilmiştir. Fiziksel modellerin kullanımı zaman ve maliyet açısından dezavantajlı olabilir ve bu nedenle bu tür analizler, dolusavağın planlandığı gibi çalışacağını garanti etmek adına genellikle yalnızca tasarım aşamasının sonuna doğru yapılır. Akımın kararlı hale gelme sürecini yöneten HAD modeller üstün modelleme yetenekleriyle beraber analizlerle ilgili ek tasarım ve ek çözüm elde etme konusunda zaman, maliyet ve motivasyon bakımından daha uygundur. Ayrıca eldeki mevcut araçlar, imkanlar ve uygulamalarla tamamlayıcı bir seçenek olup sıvının davranışına dair deneysel belirsizliklere karşı geniş bir yelpazede çözüm ve akışkanın varsayımsal seçenekleri altında nasıl davranacağını dair fikir verir. Daha etkili ve üstün modelleme yeteneği modern workstation ve güçlü hesaplama araçları ile yapılabilen HAD modeller 100 yıllık deney verilerini kullanarak geliştirmişlerdir (USACE, USBR, FERC, HYDRAULİCS LAB… vb). Laboratuvar dataları ile arazi etüt datalarının sistematik olarak karşılaştırılabilecek bir sürecin

olması gerektiği hususu bu alanda yapılan uzun zaman çalışmalarının vermiş olduğu tecrübenin bir sonucudur. Bu nedenle tetkik ve tasdik (verification-validation) stratejisinin geliştirilmesi yollarına başvurulmuştur. Gerek fiziksel gerekse de sayısal modellemelerde hidrolik karakteristiklerin elde edilmesi hususlarının farklı yönlere sahip olduğu da göz önüne alınırsa mutlak veya göreceli olarak geniş akış parametrelerinin elde edilmesi için tahkik ve tasdik yöntemi tercih edilmelidir. HAD karşılaştırılmaları sadece fiziksel deneylerle değil aynı zamanda yapılan başka sayısal analizler, farklı yazılımlı sayısal analizler, arazi dataları gibi farklı datalar ve elbette ki teorik sonuçlarla kıyaslama yoluna da gidilebilir. Bu yazılımlarla problemlerin çözümü ön işlemci, analiz ve son işlemci olmak üzere üç aşamadan oluşmaktadır. İlk önce kullanıcı, akışkanın hidrolik parametrelerini programa tanıtır. Daha sonra hidrolik model oluşturulur ve çözüm ağı (mesh) belirlenir. Analizde mümkün mertebe doğru sonuca ulaşma adına çözüm ağı boyutları oldukça önemlidir. Bu boyutlar küçüldükçe elde edilen sonuçların gerçeğe uygunluk oranı o denli artacaktır, ancak buna bağlı olarak çözüm süresi de uzayacaktır. Elde edilen sonuçların, çözüm ağı ile yakınsaması yani hücre boyutları küçültülse bile sonuçlarda değişikliğin oluşmayacağı ağ tasarımına ulaşmak elzemdir. Bu nedenle optimum bir ağ yapısı elde etmek sayısal modellemenin en önemli aşamalarından biridir. Suyun kinetik enerjisi ve bu enerjinin kırınımı hususları göz önüne alındığında sayısal analizde kullanılacak anahtar kelimeler şu şekilde olabilir; toplam enerji yüksekliği, ki bu husus giriş ve çıkış su yükseklikleri olarak tarif edilebilir, akım-yapı etkileşiminde kullanılacak türbülans modeli ve analizdeki en kritik husus olan ağ çözünürlüğüdür [52].

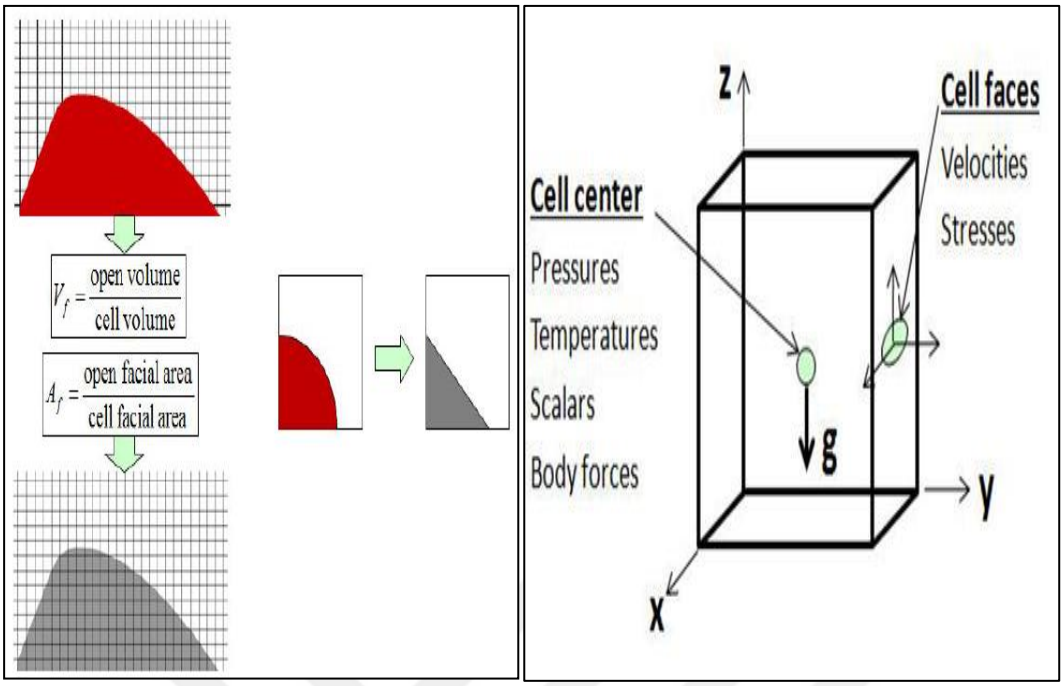
### 3.2.2 Kullanılan HAD yazılımı (Flow3D)

Akışkanların dinamik hareketinin hesabını sayısal olarak çözümleyen Flow3D, kullanım alanı olarak geniş bir yelpaze sunmaktadır. Bu programda, akışkanın üç boyutlu hareketini birçok fiziksel probleme göre inceleyebilmek adına özel sayısal teknikler geliştirilmiştir [52]. Flow3D yazılımı özellikle serbest yüzeyli akım problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Akışkan denklemlerini süreklilik denklemleri ile birlikte analiz edebilmek için Navier-Stokes denklemlerini her üç boyutta da çözebilmektedir. Hesaplamalar, kartezyen ve silindirik koordinat sistemi için dikdörtgen geometriye sahip ve üniform çözüm ağları (mesh) ile yapılmaktadır. Kontrol hacmi olarak tabir edilen bu hücrelerin her birinin merkezinde

akışkana ait viskozite, yoğunluk, basınç gibi büyüklükler yer almaktadır. Hücre yüzeyinde sadece koordinatlara bağlı hız değerleri hesaba katılmaktadır [53], (Şekil 3.15). Flow3D, türbülans kapanış probleminin çözümü için bir çok yaklaşımı içermektedir. Bunlar; Standart k-ε, Standart k-w, Prandtl karışma boyu, türbülans enerjisi, RNG (Renormalized Group) ve LES (Large-Eddy Simulation) gibi farklı yöntemlerdir. Ayrıca çözümün gerçekleştirildiği uç bölgelerde farklı sınır koşulları tanımlanabilmektedir. Yazılımın en önemli algoritmaları olarak sayılabilecek geometri tanımlanmasında kullandığı FAVOR (FractionalArea/Volume Obstacle Representation) konsepti ve serbest yüzey tanımlanmasında kullandığı TruVOF (Modified Volume of Fluid) konsepti aşağıda açıklanmıştır.

#### 3.2.2.1 Geometrik tanımlama (FAVOR Konsepti)

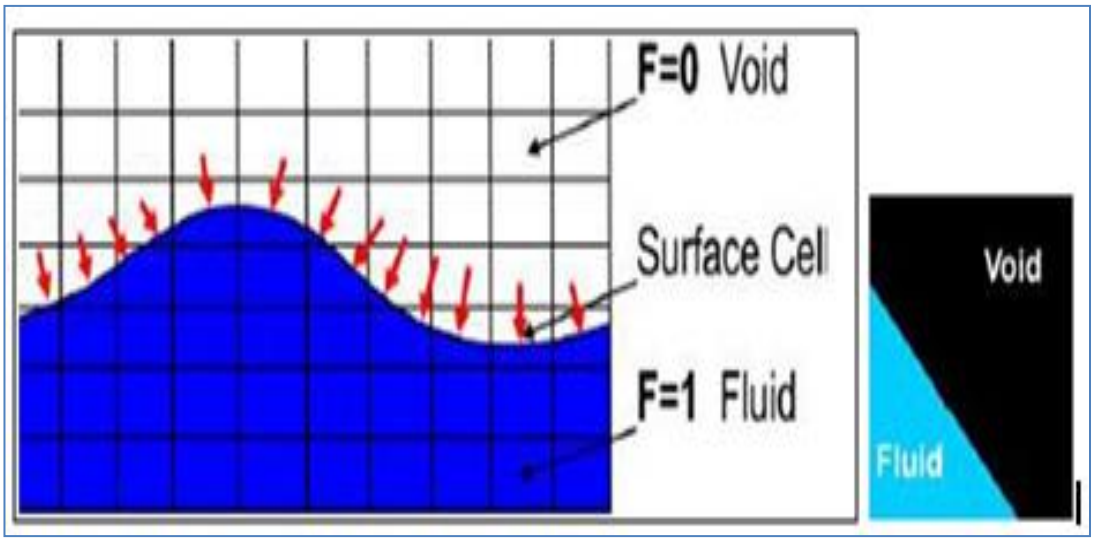
Problem geometrisi, çözüm ağı üzerinde bir kısım hücrelerin katı cisim olarak kapatılmasıyla elde edilmektedir. Flow3D tarafından geliştirilen FAVOR (FractionalArea/Volume ObstacleRepresentation) adı verilen bu yöntemde kontrol hacmi içerisinde bulunan bir katının kontrol hacminin ne kadarını kapladığı (volume fraction) ve bu katının kontrol hacminin her bir yüzeyinde ne kadar alanı kapattığı hesaplanarak bu iki değer oranlanır. Bu yöntem aslında katıyı tanımlamak için kullanılan bir boşluk tekniğidir. Üç boyutlu bir serbest yüzey probleminin Flow3D yazılımı ile çözümünde, çözüm ağı içerisindeki herhangi bir hücrede beş farklı durumdan biri söz konusu olabilir. Bunlar; hücre tamamen katı, kısmen katı veya sıvı, tamamen sıvı, kısmen sıvı ile dolu ve tamamen boş olması durumlarıdır. Kontrol hacmi tamamen katı ile dolu ise bu değer 0 (sıfır), tamamen boş ise 1(bir) değerini alır. Eğer bir hücre kısmen katı ile dolu ise bu değer hücrede kapladığı hacim yüzdesine bağlı olarak 0 ile 1 arasında bir değer alır. Bu durum aslında her bir hücredeki yüzeylerin akıma açık olduğu alanları dolayısıyla bu hücrede ne kadar akışkan bulunduğunu ifade etmektedir. FAVOR konsepti Şekil 3.15'de gösterilmiştir. Bu tekniğin en önemli avantajı, yani Flow3D'nin diğer programlardan üstünlüğü tasarlanan ağ sisteminin alan geometrisinden bağımsız olmasıdır ki sayısal modelin geometrisine uygun bir ağ sistemine ihtiyaç duyulmadan model basit bir şekilde temsil edilir. Bu nedenle modelin geometrisini eklemek veya değiştirmek gibi geometrik varyasyonlar oluşturulan ağı etkilemeyecektir.



Şekil 3.15 Flow3D Grid sistemi ve FAVOR konsepti

### 3.2.2.2 Serbest yüzey tanımlama (TruVOF Konsepti)

Su-hava arakesitine sahip serbest yüzeylerin belirlenmesi için ise yazılımda modifiye edilmiş akışkan hacmi (TruVOF) yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem serbest yüzlü akımların su yüzü profillerinde meydana gelen değişimi zamana göre belirleyen metottur [F=F(x,y,z,t)]. Akış alanındaki su ve havanın paylaştığı bilinmeyenler ve parametreler, hacim fraksiyonunun ağırlıklı ortalamasından elde edilebilir. TruVOF yönteminde, FAVOR yöntemine benzer biçimde hücrelerin boş, tamamen veya kısmen akışkan ile dolu olduğu belirlenir. Serbest yüzeyin izlenmesi üç kısımdan oluşur. Öncelikle serbest yüzeyin yeri bulunur. Daha sonra bu yüzey, su ve hava arasında keskin bir arakesit olarak belirlenir. Son olarak bu arakesite sınır şartları uygulanır. Arakesit üzerinde sıfır kayma gerilmesi ve sabit basınç sınır koşulları uygulanmaktadır. Akışkan ve akışkan olmayan yüzeyler arasındaki keskin ayrımın örneği Şekil 3.16'da gösterilmiştir. Flow3D'de serbest yüzey, dolusavak üzerindeki akımda olduğu gibi eğime sahip ise bir hücredeki yüzeyin yerini ve eğimini belirlemek için kendisini çevreleyen hücreleri dikkate alan bir algoritma kullanılmaktadır.



Şekil 3.16 Akışkan yüzeyinin keskin ayrımı

### 3.2.3 Sayısal modelin hazırlanması

Flow3D, önerilen dolusavak tasarımlarının hidrolik performansını doğrulamak ve baraj güvenlik gereksinimlerini karşılama hususları için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tez kapsamında Ilısu baraj dolusavağının 1/100 ve 1/30 ölçekli (1982 yılı) ve prototip ölçekli(1/1 ölçek) model (2012 yılı) olarak sayısal model simülasyonları tamamlanmıştır. Hidrolik parametreler simülasyonlardan elde edilmiş ve sonuçları deneysel çalışma ile karşılaştırılmıştır. Birkaç farklı senaryo uygulanarak en optimum ve doğru çözümler bulunmaya çalışılmıştır.

Daha önce belirtildiği üzere 2012 yılında uygulanan Ilısu Barajı dolusavağında 1982 yılı tasarımından farklı olarak enerji kırıcı havuz bulunmaktadır. Enerji kırıcı havuz modelin tamamı için yapılacak bir analizin çözümünü tabii olarak zorlaştırmaktadır. Çünkü muazzam büyüklükteki enerji kırıcı havuzdan dolayı dolusavağı terk eden akışın oluşturduğu dalgaların havuzda sönümlenmesi ve sonrasında deşarj suyunun mansaba geçmesi hususları göz önüne alındığında sistemin kararlı duruma gelmesi zaman ve kaynak açısından daha kapsamlıdır. Bu nedenle ilk olarak projenin 1982 yılı 1/100 [51], 1/30 [54] ve prototip ölçekli modelleri sayısal olarak çözümlenmiştir. Modelde oluşan basınç, hız, su yüzü profilleri ve dolusavak deşarj kapasitesi gibi hidrolik karakteristikler, ayrıca enerji kırıcı yapı olarak tasarlanan çevirmeli ve dişli sıçratma eğrisi bu çalışma kapsamında tespit edilmiştir. Daha sonra 2010 yılında revize edilen ve 2012 yılında uygulanarak yapımı tamamlanan dolusavağın 1/1 ölçek prototip

modelinin sayısal analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmaları kısaca özetleyecek olursak ;

* Dolusavak deşarj kapasitesi tam kapak açıklığı için elde edilmiştir.

* Ötelemeli maksimum taşkın debisi olan 14799 $m^3/s$ (2010 yılı için) ve ötelemesiz 17988 $m^3/s$ (1982 yılı) için tam kapak açıklığında dolusavak ogee profili üzerinde oluşan basınç yükseklikleri ölçülmüştür. Dolusavak üzerindeki basınçlar genel olarak pozitiftir. Ancak bazı noktalarda negatif değerler de ölçülmüştür. Elde edilen negatif değerlerin yapı stabilitesini olumsuz etkileyecek değerler olmadığı tespit edilmiştir. Bilindiği üzere dolusavakların yüzeyi boyunca basınç dağılımları incelendiğinde, dolusavak tepesinin yakınında negatif basınçların olduğu görülebilir, ancak bu bölgedeki düşük hızlar nedeniyle önemli bir sorun oluşturmayacaktır. Negatif basınç, yüksek hızlı kesitlerde kavitasyon bakımından önem taşır. Düşük basınç değerleri ve yüksek hızlar, tipik olarak dolusavağın oluğu, yani boşaltım kanalı boyunca meydana gelir ve böylece kavitasyon riski artar.

* Fiziksel modelde de çalışılan 17988 $m^3/s$ ve 12500 $m^3/s$ için dolusavak şut kanallarındaki akımın durumu, su yüzü profilleri, basınç değerleri ve aynı kanalda dört farklı noktada akış hızları tespit edilmiştir.

* Fiziksel modelde çalışılan sıçratma eşiğinde 12500 $m^3/s$ debide basınç ve hız değerleri tespit edilmiştir.

* Fiziksel modelde çalışılan sıçratma eşiği ile ilgili olarak orijinal tasarım çevirmeli sıçratma eşiği (flip bucket) yanında farklı dişler tasarlanmak suretiyle oluşacak enerji kırınımının maksimum olması istenmiştir. Bunun için iki farklı varyant olan Varyant-I ve Varyant-II dişli sıçratma eşikleri sonrasında oluşan su jeti profilleri elde edilip grafiğe işlenmiştir. Farklı varyantlı eşiklerde oluşan basınç ve hız değerleri eksende ve diş üstünde 12500 $m^3/s$'lik debi için tespit edilmiştir. Sıçratma eşiğinde eşik tiplerinde elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış böylece en uygun varyant tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar ile deneysel sonuçlar karşılaştırılarak bir doğrulama yapılmış ve mevcut farklı ölçeklerdeki model çalışmalarıyla ölçek etkileri araştırılmıştır.

* Ilısu Barajı ve HES Projesinin dolusavak ve havalandırıcılarının ilk model deneyleri 1982 yılında yapılmış fakat 2010 yılında tasarımları değiştirilmiştir. Buna göre kapak

sayısında azalamaya gidilmiş, havalandırıcıların tasarımı değiştirilmiş, boşaltım kanalı genişlikleri 2 m artırılmış, dolayısıyla kanal genişliklerine bağlı olarak enerji kırıcı boyutlarında da revizeye gidilmiştir. Yapılan revizeler akabinde yüksek maliyet ve zaman nedeniyle yeni model deneyleri yapılmamıştır. Bu çalışma ile model deneyleri yapılamayan revize tasarımın sayısal analizleri yapılarak bir yönden bu eksiklik de kapatılmış olacaktır. Çalışmamızın bu yönü orijinallik konusunda ön plana çıkmaktadır.

### 3.2.3.1 Ilısu barajı dolusavağı 1982 tasarımı HAD analizi

Bu kısımda sayısal simülasyonlar değerlendirilerek simülasyonların sonuçları birbirleriyle ve fiziksel model sonuçlarıyla karşılaştırılır. Hidrolik modelde, benzerlik Froude benzerlik yasası ile sağlanmıştır. Fiziksel testlerde 1/100 ve 1/30 model ölçeği seçilmiştir. Tablo 3.2 Froude benzerliği için Lr=100 ve Lr=30 için ölçekleme oranlarını özetlemektedir. Çalışma kapsamında, serbest yüzey modellenirken tek akışkan ve sıkıştırılamaz akışkan modu kullanılmıştır. İşlem öncesi aşaması şu şekildedir; geometrik tasarım, hesap ağının tasarımı, sınır koşullarının tanımlanması kısımlarından oluşmaktadır.

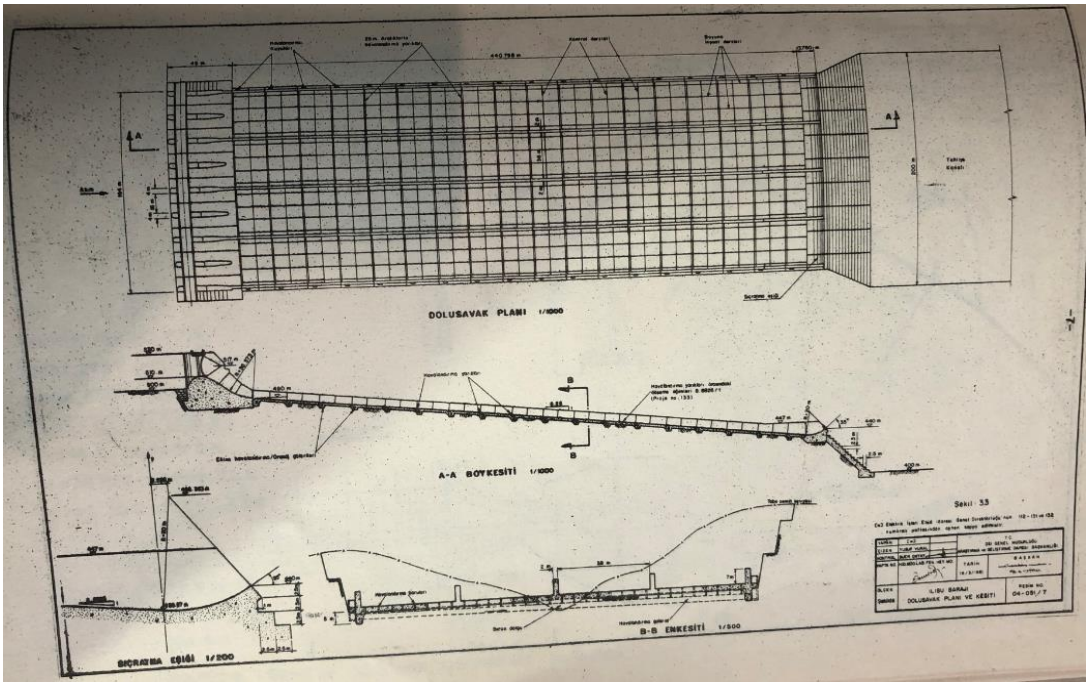
Tablo 3.2 Froude benzerliği için ölçekleme oranları

| Parametre | Birim | Ölçek(Froude benzerliğine göre) | Ölçek Oranı Değerleri | |
|---|---|---|---|---|
| | | | $L_r$=100 | $L_r$=30 |
| Uzunluk | m | $L_r$ | 100 | 30 |
| Alan | $m^2$ | $L_r^2$ | 10000 | 900 |
| Hız | m/s | $L_r^{0.5}$ | 10 | 5.48 |
| Debi | $m^3/s$ | $L_r^{2.5}$ | 100000 | 4929,50 |
| Basınç | Pa | $L_r$ | 100 | 30 |

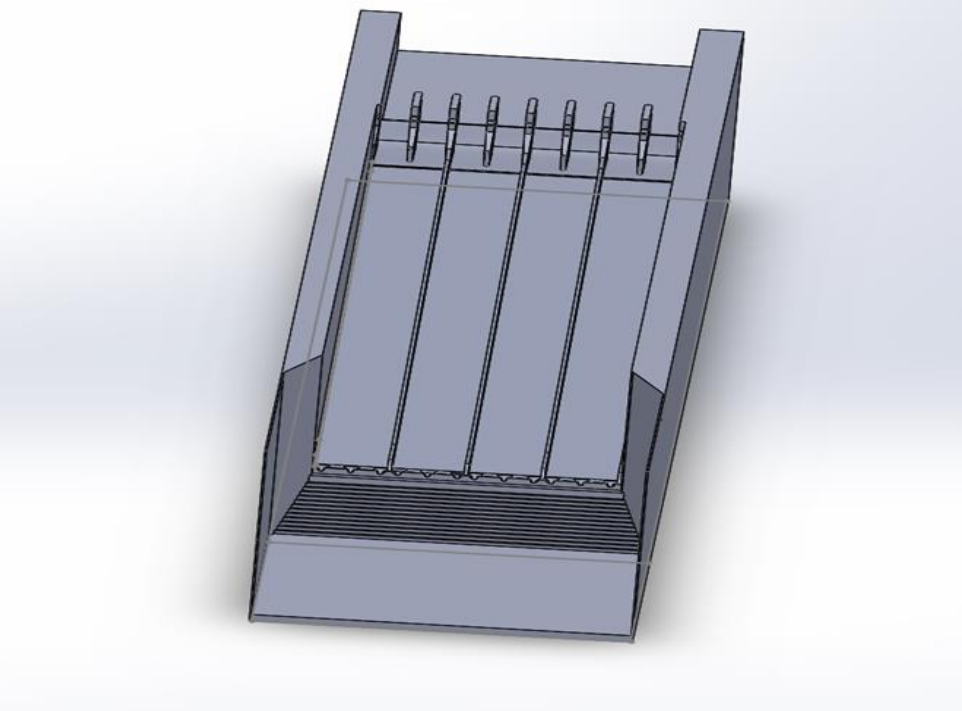
*Geometrik tasarım*

Ilısu Barajı dolusavak yapısının plan ve profili şekil 3.17'de gösterilmiştir. Üç boyutlu katı geometrisi ise Solidworks modelleme aracı kullanılarak hazırlanmıştır. Dolusavak yapısının üç boyutlu katı geometrisi (hidrolik kesiti) yukarıda şekil 3.1b'de gösterilmiştir. Ilısu Barajı revize uygulama projesi dolusavağı olası maksimum feyezan debisine göre boyutlandırılmıştır. 164 m genişliğindeki eşik yapısı yedi orta

ayak ile sekiz göze ayrılmış olup radyal kapaklar tarafından kontrol edilir. Flow3D, geometrik modelin tanımlanması için önceki bölümlerde detaylı olarak açıklanan FAVOR konseptini kullanmaktadır. Dolayısıyla katı cismin konfigürasyonu hesap hücreleriyle birlikte düşünülürse daha optimum çözümler elde edilir. Bu çalışmada, katı geometri tanımlanırken mümkün olduğunca çözümü hızlandıracak değişiklikler yapılmıştır. Dolusavak yapısının arazi topografyasından dolayı eğimli bir yapıya sahip olduğu göz önüne alındığında dolusavak geometrisinde hiçbir modifikasyon yapılmadan şekil 3.1'deki gibi Flow3D'ye tanımlanırsa, hesap ağında eğimli yapıdan dolayı boş hücreler kalacak ve çözüm süresi uzayacaktır. Ancak hidrolik kesit sabit tutulmak kaydıyla dolusavak yapısı şekildeki gibi (Şekil 3.18) modifiye edilirse hesap ağındaki boş hücreler tamamen katı ile dolu olacağından hesaba katılmayacak olup çözüm hızlanacaktır. Bahsedilen durum göz önüne alınarak Ilısu Barajı dolusavağı üç boyutlu katı geometrisi hazırlanmıştır. Bu çalışma kapsamında herhangi bir stabilite hesabı yapılmayacağından duvarlar orjinal tasarımdan bağımsız olarak modele eklenmiştir. Duvarlar dahil yeni tasarım şekil 3.18'de sunulmuştur. Oluşturulan üç boyutlu katı geometri (.stl) dosya formatıyla Solidworks ortamından dışa aktarılmış ve Flow3D'den okutularak geometrik tanımlamanın ilk aşaması tamamlanmıştır.




Şekil 3.17 Ilısu barajı 1982 yılı dolusavak plan ve profili



Şekil 3.18 Ilısu barajı dolusavağı modifiye edilmiş üç boyutlu katı modeli (duvarlar dahil**)**

*Hesap ağının oluşturulması*

Bir HAD sayısal modelinde hesap ağı, akış alanının hız ve basınç gibi sayısal değerlerin hesaplandığı hücreler olarak adlandırılan nispeten küçük bölgelere bölünmesidir. Sayısal sonuçların ağ bağımsızlığı, doğru bir simülasyonun ana konularından bir tanesidir. Bu nedenle sayısal bir çalışmaya başlamadan ve değerlendirmeden önce ağ iyileştirme işleminin tamamlanması gerekir. Uygun ağ tasarlama konusu analizin kalitesini ispat etmede en önemli öğelerdendir. Ancak tabii olarak bu durum analizin hızlı çözümü, model performansı, dosya boyutu ve kesinlik gibi hususlarda orantısızlık gösterebilir. Hücrelerin en boy oranı ve konumu hesaplama araçları üzerinde güçlü bir etkiye sahip olmakla birlikte uzaysal çözünürlüğü tanımlar. Yapılan literatür taramalarında uygun ağ tasarımı hususunda oldukça çaba gösterilmesi gerektiği tespit edilmiş nitekim bu durum yaptığımız çalışma için de geçerli olmuştur. Hesap ağ blokları arasında (Linked mesh, nested mesh vb.) hücre boyutlarının oranları bir tam sayı ve katları olmalıdır. Aksi halde iterasyon yapılırken çok sayıda hata olacaktır. Ayrıca hücre ağı sayısının fazla olması durumunda yine sorunların oluşabileceği hususu da dikkate alınarak sadece önemli görülen kısımlara atanmalıdır. Bununla beraber mümkün mertebe ağ düzlemlerini aynı hizaya gelecek şekilde ve hücre ağları sürekli bitişik bir etki alanı oluşturarak hatta eğer çoklu ağ

yöntemi kullanılırsa iki komşu düzlem arasında düzlemlerin çakıştığı yerde ekstra ağ düzlemi atılmalıdır. Çünkü simülasyonlar yapılırken değişecek ağ boyutlarında düzlemlerde kayma ve bozulmanın önüne bu şekilde geçilmiş olacaktır.

Uygun hücre ağı konusu sayısal analizde kullanıcıdan kaynaklanan yaygın bir hata kaynağıdır. Çünkü muhtemeldir ki deneme yanılma yöntemine başvurulmadan ağ çözünürlüğü hususu yani hücre boyutu hususunda sağlıklı sonuçlar elde edilmesi oldukça zor olacaktır. Başlangıçta çoğu zaman fiziksel sezgilere de dayanarak hücre boyutları kaba ve düzensiz seçilir. Ardından daha ince bir hücre elde edilene kadar ortaya çıkan simülasyon sonuçları karşılaştırılır. Söz konusu farklılıklar makul sayılacak kadar küçük sonuçlar elde edilene kadar devam eder. Tabii olarak burada ince bir hücre ağına ulaşma hususunun daha fazla ön plana çıktığını söylemekte fayda vardır. Debi tespiti için kaba ağ çözünürlüğü yeterliyken basınç için yüksek çözünürlük gerekmektedir. Aynı durum türbülans ve enerji kırıcı etkinliği için de geçerlidir. Sonuç itibarıyla hücre ağı konusunda açıklananlardan çıkarılabilecek en önemli husus, sonuçların hücre boyutuna göre nasıl değiştiğidir. Çözümün sağlamlığı konusunda bu bilgiyi kullanmak yaygın bir uygulama olmakla birlikte bu tür çözümler yapılırken malumdur ki marjinal olarak ilişkili bir değişken kullanılarak bir tahmin yürütme söz konusudur. Dolayısıyla sayısal çözümlemelerde çözümün ağ kalitesinden bağımsız hale gelmesi hususunda gerekli doğrulamanın analitik ve deney sonuçlarıyla karşılaştırılarak yapılması gerektiği sonucuna ulaşmaktayız. Yani eldeki laboratuvar dataları veya farklı datalar ile kıyaslama dışında başka bir husus bulunmamaktadır.

Ağ tasarımı yapılırken modelin büyük olması durumunda tek bloklu tasarım hücre sayısının çok fazla olmasına neden olacaktır. Bu durumda simülasyon çözünürlüğünü yalnızca ilgilenilen alanda artırmak ve ilgilenilmeyen bölgeleri hariç tutmak adına çoklu ağ bloğu yöntemi kullanmak etkili çözümlerdendir. Kullanılacak çoklu ağlar tamamen birbiri içerisine geçen (Nested) blok olabileceği gibi ortak sınıra sahip (Linked) blok da olabilir. Bunların dışında yine ortak alanlara sahip kısmen birbiri üzerine geçmiş (Partially Overlapped) ağ bloğu yine tercih edilebilecek ağ blok türlerindendir. Çoklu ağ bloğunun tercih edilmesi hususu yaygındır. Özellikle hücre sayısının azaltılmasıyla çözüm süresini makul düzeye çekmek ve çözülmek istenen küçük alanlarda daha yüksek çözünürlüklü simülasyonlar için bu yöntem tercih

edilmektedir. Flow3D, modelin tümünde kullanılan ağ bloğu türünü "Non-Conforming Mesh" şeklinde adlandırılırken özellikle ilgilenilen kısım için ise "Conformed Mesh" olarak adlandırmaktadır. İlgilenilen kısmı intibak ettirmek veya uydurmak anlamına gelen "Conformed Mesh" bloğu katı cisme uygulanacağı gibi açık alana da uygulanabilmektedir. İki ağ bloğunun aynı alanı kapladığı bölgede biri kaba çözünürlükteki "Non-Conforming" iken diğeri yüksek çözünürlükte bir açık veya katı hacme uygulanabilir. Yüksek çözünürlüklü blok eğer açık alana uygulanırsa "Conformed To Open Volume" olarak adlandırılırken katı cisme uygulanması durumunda "Conformed To Block Volume olarak adlandırılır. Örneğin ısı transferi modellerinde açık alana "Conformed" uygulanırken serbest yüzeyli akışlarda değişen geometrik yapıların akışı ne kadar etkilediği hususlarında ise katı cismin daha keskin algılanması ve daha etkili çözünürlük için katı cisme "Conformed" uygulanmaktadır. Bahsi geçen "Conformed" bloklar gözenekli, sedimentli, çözünme, yüzen cisimlerin modellenmesi gibi durumlarda kullanılmaz [52].

*Başlangıç ve sınır koşulları*

Başlangıç ve sınır koşulları, oluşturulan simülasyonların oldukça kritik kısmını temsil etmektedir. Çünkü tanımlanan malzeme özellikleri ile kullanılacak ana denklemlerin çözümünü tanımlarlar. Bir analiz için t=0'daki çözümleri (koşulları) ile standart değişkenleri (hız, basınç., vb.) ve fiziksel değişkenleri (sıcaklık, türbülans kinetik enerjisi vb.) bilmeliyiz. Flow3D programı default olarak t = 0 seçer, ancak kullanıcı istediği koşulu da başlangıç olarak verebilir. Bu koşullar matematiksel olarak çözüm için sürekli bir ihtiyaçtır. Başlangıç koşullarının önceden tespit edilmesi, analizlerin çözüm süreci ve sonucu için zorunlu olmanın yanında ilgili koşullar çözüm süresini kısaltacak, yanı sıra sonuçların doğruluğunu artıracaktır. İyi ve etkili bir başlangıç koşullarımız yoksa oluşacak pozisyonu etkili ve tatmin edici bir şekilde açıklamak mümkün olmayacaktır. Çünkü simülasyonlarda oluşan farklılıkları, geçişleri bu koşullar dikkate alınarak açıklanabilir. Örneğin fabrikalarda soğutma suyu olarak kullanılan ardından nehir yatağına aktarılan atık suyunun yatağa geçişinden sonraki difüzyonu için başlangıç koşullarının bilinmesi oldukça etkilidir. Ancak bazı durumlar vardır ki başlangıç koşulları sonuçları etkilemeyecek olup sonuca ulaşılan süreyi yani kararlı hale gelme süresini etkilemektedir. Bu çalışmamızdaki başlangıç koşullarının durumu da böyledir. İhtiyaç olunan her bir değişkenin denklemler tarafından çözümü

için başlangıç koşulları ne kadar gerekli ise çözüm alanının bittiği kısımlarda da bir sınırın olması kaçınılmazdır. Bu nedenle karmaşık bir denklemin başlangıç ve sınır koşullarını doğru belirlemek zor olabilir. Sayısal çözümlemeler standart akış denklemlerine ek olarak türbülans aktarım denklemleriyle çözülmektedir. Dolayısıyla sıvı-boşluk ve katı-sıvı arasındaki etkileşimlerin tanımlanması için ayrıca sınır koşulları tanımlanmalıdır. Karar kılınan sınır koşulunun fiziksel olarak da temsil edilmesi gerekmektedir. Temsiliyetten kasıt koşulun suyun hareketine ters bir durum oluşturmamasıdır. Örneğin dolusavak akış giriş koşulu olarak 10 m/s hız değerinin belirlenmesi rezervuar göz önüne alındığında aykırı olacaktır. Ayrıca sınırlara yakın yerlerdeki çözümlerin de tahmini çözümler olduğu göz önüne alındığında sınırları ilgilenilen alandan uzakta tanımlamak gerekmektedir. Flow3D'de sıvı ile hava arasındaki hacim VOF metodu ile belirlendiğinden su-hava arasında sıfır kayma gerilmesi ve sabit basınç söz konusudur. Bu koşullar otomatik olarak seçilmekle birlikte bu değerler bazı modeller için elbette değiştirebilir. Örneğin su ile hava arasında Rüzgar (Wind) modülü için bir kayma gerilmesi tanımlanabilir. Aynı şekilde katı ile sıvı arasında da bazı koşullar söz konusudur. Katı cismin varlığı ve her bileşenin sıvı-boşluk ile, ayrıca her bir katı bileşenin diğer katı bileşenlerle olan etkileşimini tanımlamak için de sınır koşulları belirlenmesi gerektiğini yukarıda açıklamıştık. Bu açıklamalardan da anlaşılabileceği gibi tüm bu hususlar karmaşık bir olaydır. Söz konusu bu tür durumlara karşı kabul edilen ve uygulanan işlem şu şekildedir; bileşenler arasında ve yüzeylerde kaymama koşulu uygulanırken diğer tüm denklemlerde ara yüzeylerde sıfır gradyan koşulu varsayılır. Bileşenlerin yüzeylerinde kaymama koşulu için Flow3D bir duvar işlevi kullanır (Wall Function).

Flow3D üç boyutlu çözüm alanını tanımlarken, kartezyen koordinatlarda ortogonal altı yüzeyli hesap hücreleri kullanır. Sonuç olarak, her bir hesap hücresi bloğunda altı farklı sınır koşulu vardır. Sayısal modelleme çalışmamızda rezervuar durumunu ve mansap koşullarını simüle edebilmek için girişte ve çıkışta basınç sınır koşulu tanımlanmıştır. Bunun nedeni ise şöyle ifade edilebilir; örneğin hidrolik sıçramanın oluştuğu konum, membadaki nehir rejiminin su yüzü profili ile mansaptaki sel rejimi akımının su yüzü profillerinden hesaplamalara başlanılarak, ayrıca her iki taraftaki özgül kuvvetlerin momentum teorisine dayandırılmasıyla tespit edilmektedir [55]. Yani hidrolik sıçrama, mansap kuyruk suyu yüksekliği ile giriş froude sayısına,

bununla beraber memba su girişi yüksekliğine bağlıdır. Açıklanan bu husus da dikkate alınarak maksimum hesap yüküne denk gelen 2010 yılı için 527,86 m, 1982 yılı için 527,05 m rezervuar seviyesi giriş koşulu seçilmiştir (Xmin). Bu sınır koşulunda rezervuar bulunduğundan dolayı sonsuz rezervuar varsayımı yapıldığından başlangıç olarak sıfır hız ve sıfır hidrostatik basınç, yani "stagnation pressure" söz konusudur. Çıkış koşulu ise santral tam kapasite çalışırken oluşacak kuyruk suyu kotu olan 2010 yılı için 423,5 m, 1982 yılı için 422 m'dir (Xmax). Çözüm bölgesinin üst sınırında ise sınır şartı olarak yine basınç koşulu kullanılmıştır. Bu sınır koşulunun yerçekiminden dolayı herhangi bir etkisi olmadığı için serbest yüzeyde atmosfer basıncının da etkisiyle enerji kırıcı bölgesinde suyun serbest hareket etmesi sağlanacaktır (Zmax). Serbest yüzey, akışkan hacmi (VOF) yaklaşımı ile belirlendiğinden su-hava arakesitinde sıfır kayma gerilmesi ve sabit atmosfer basıncı etkili olmaktadır. Dolayısıyla simetri koşulu uygulanmak suretiyle cidar yüzeylerinde yatay ve düşey doğrultudaki hız bileşenleri sıfır olmaktadır(Ymax, Ymin, Zmin).

### 3.2.4 Akışkanların temel denklemleri

#### 3.2.4.1 Süreklilik denklemi

Üç boyutlu ve sıkışmaz akışkanlar için kullanılan süreklilik denklemi,

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

şeklindedir. Burada *u*; *x* yönündeki hız bileşeni, *v*; *y* yönündeki hız bileşeni ve *w*; *z* yönündeki hız bileşenidir. Türbülanslı akışkanlarda $u = \bar{u}+u'$yerine yazılarak;

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\bar{u}+u'\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\bar{v}+v'\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\bar{w}+w'\right)=0 \tag{3.2}$$

Burada $\bar{u}$, $\bar{v}$ $\bar{w}$; x, y, ve z yönündeki zaman ortalamalı hızları olarak, u', $v$', $w$' ise türbülans çalkantı hızlarıdır. Buradan zaman ortalamalı süreklilik denklemi ise;

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

şeklindedir [56].

#### 3.2.4.2 Navier stokes denklemi

Sıkışamaz akışkan akımının hareketini tanımlayan akışkanlar mekaniğinin temel denklemleridir. Üç boyutlu bir akış için Navier-Stokes denklemleri şöyle yazılabilir;

*x* yönünde;

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

*y* yönünde;

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

*z* yönünde;

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

Bu denklemlerin vektörel formdaki gösterimi şu şekildedir;

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V}\, grad\vec{V} = -\frac{1}{\rho}\, grad\, p + \vec{f} + v\nabla^2\vec{V} \quad (3.7)$$

*x, y* ve *z* kartezyen koordinatlarına göre ilgili Navier Stokes denklemlerinin açılımları verilmiştir. Burada $\rho$, akışkanın özgül kütlesi, *p*, basınç ve $\upsilon$, kinematik viskozitedir. Bu denklemlerdeki *X, Y* ve *Z* ilgili eksendeki kütlesel ivmeyi göstermektedir. Düşey eksenine (*z* ekseni) yerçekimi ivmesi etki ettiğinden *Z*=9.81 olarak alınırken diğer eksenlerde düşey yük olmadığından bu değerlerin denkleme etkisi yoktur.

### 3.2.4.3 Türbülans denklemleri

Açık bir kanaldaki akışı sayısal olarak modellediğimizde oluşacak akış kaybının nereden gelebileceği hususları akla gelecektir. Bir kanaldaki akış profilinin hesabı, bileşenlerin sınırlara bitişik olan kısımlarında viskoz bir kesme gerilimi yoluyla oluşan pürüzlülükten etkilenir. Akışın geri kalanı için, eğer akış türbülanslı değilse su için çok küçük viskoz kuvvetler duvar kesme gerilmelerine karşı kendilerini ayarlayabilirler. Ancak akışın türbülanslı olması durumunda ilgili simülasyonlarda türbülans modeli kullanılmalıdır. Bununla birlikte türbülans modellerinde ortaya çıkabilecek sorunların önüne geçmek için Flow3D programında basit duvar fonksiyonu sınır koşulu kabul edilerek çözüm yapılmaktadır [29].

Türbülans konusuyla ilgili olarak literatürde standart k- ε, RNG ve LES gibi farklı türbülans modelleri ile yapılan simülasyonlarda söz konusu dolusavak akışı ile ilgili verilerde yalnızca minimal farklılıkların oluştuğu ifade edilmektedir [22]. Ayrıca yine

HAD analizleri için k- ε türbülans modelinin yaygın kullanıldığı bilinmektedir [57]. Standard k- ε türbülans modeli, modelin kinetik enerjisi kt ve onun yayılımını gösteren εt den müteşekkildir. Bu model birçok akış tipi için makuldür. εt için taşıma denklemlerine ihtiyaç vardır. Bir başka türbülans modeli RNG k-ε modelidir. Girdaplı akışlar için Yakhot ve Orszag tarafından geliştirilmiştir [58]. Genel olarak RNG modeli, standart k-ε modelinden daha geniş uygulanabilirliğe sahiptir. Özellikle RNG modelinin düşük yoğunluklu türbülanslı akışları ve güçlü kesme bölgelerine sahip akışları daha doğru tanımladığı bilinmektedir [52]. Bu model Navier-Stokes denklemlerinden titiz bir istatistiksel teknik teorisi (yeniden normalleştirilme grubu teorisi olarak adlandırılır) kullanılarak üretilmiştir. Standart k-ε benzemekle birlikte bazı avantajlara sahiptir. Bu avantajları şu şekilde sıralayabiliriz;

-) RNG modelinin Epsilon denkleminde hızlı deforme olan akışlar için doğruluğu önemli ölçüde artıran ek bir terim vardır.

-) Oluşan girdapların türbülans modeli üzerindeki etkisi ile ilgili olarak, dönen akışlar için doğruluğu arttıran husus RNG modeline dahil edilmiştir.

-) RNG modeli Prandtl sayıları için analitik formülü kullanırken standart k-ε modelinde kullanıcı tarafından belirlenen sabit sayılar kullanılır.

-) Standart k-ε modeli yüksek sayılarını dikkate alırken RNG modeli düşük Reynolds sayılarını da hesaba katarak etkin viskozite için analitik olarak türetilmiş diferansiyel formüle sahiptir. Bu arada bu özelliğinin etkin kullanımı için duvara yakın bölge uygun şekilde ele alınıp işlenmelidir [59]. RNG modeli farklı ölçeklerde bir modelin üretilmesi için bir çerçeve oluştururken ampirik sabitlere daha az güvenir. Sabitleri kullanma yerine bu değerleri açıkça türetme yolunu seçer. Genel olarak bu model daha geniş uygulanabilirliğe sahiptir.

RNG modeli için iletim denklemleri k ve $\varepsilon$ için sırasıyla şöyledir;

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\sigma_k \mu_e \frac{\partial k}{\partial x_i}\right) + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M \tag{3.8}$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\sigma_\varepsilon \mu_e \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k}(G_k + C_{3\varepsilon}G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R \tag{3.9}$$

Burada;

$G_k$; Ortalama hız gradyenlerinden dolayı üretilen türbülans kinetik enerjisi,

$G_b$; Kaldırma kuvvetinden dolayı üretilen türbülans kinetik enerjisi,

$Y_M$; Sıkıştırılabilir türbülansta dalgalı genişleme dağılımı,

$\sigma_k$ , $\sigma_\varepsilon$ ; k ve $\varepsilon$ için ters effektif prandtl sayılarıdır.

Efektif viskozite modellemesi için diferansiyel denklem şöyledir;

$$d\left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon\mu}}\right)=1.72\frac{\mu_{eff}/\mu}{\sqrt{\mu_{eff}/\mu^{3}-1-C_{\nu}}}\, d\left(\mu_{eff}/\mu\right) \quad (3.10)$$

Söz konusu adi diferansiyel denklem, düşük Re sayıları ile duvar etrafındaki akışların daha iyi hale gelmesini temin etmektedir. Bu denklemde $C_{\nu}$ =100 olarak belirtilmektedir. Yüksek Re sayılarında ise ilgili denklem şu şekilde yazılabilir;

$$\mu_t = \rho\, C_{\mu}\, \frac{k^2}{\varepsilon}\ , \quad (3.11)$$

burada $C_{\mu}$ =0,0845, $\mu_{\varepsilon} = \mu + \mu_t$ dir.

Ayrıca $C_{\mu}$ değerinin standart k-ε modelinde deneysel yöntemle elde edilen 0.09 değerine oldukça yakın olduğu görülmektedir.

*Girdap modifikasyonu*

RNG modeli, türbülanslı viskoziteyi rotasyon ve girdap etkisini de hesaba katmak suretiyle modifiye etmektedir. Bu modifikasyon sonucunda;

$$\mu_t=\mu_{t0}\mathrm{f}(\sigma_s\,, \Omega, \frac{k}{\varepsilon}), \quad (3.12)$$

Burada;

$\mu_{t0}$; girdap modifikasyonu olmayan türbülans viskozitesi,

Ω; karakteristik girdap sayısı,

$\sigma_s$ ; Girdap sabitidir.

Düşük girdaplı akışlar için $\sigma_s$ değeri 0,05 seçilmektedir. Bu durumda modifikasyon olmaz. Güçlü girdaplı akışlar(strong swirling) için $\sigma_s$ değeri yüksek seçilebilir.

*Ters efektif prandtl sayıları için analitik türetme*

$\sigma_k\,, \sigma_{\varepsilon}$ için RNG, teorideki aşağıdaki formülün analitik olarak türetilmesini kullanarak hesaplar;

$$\left|\frac{\alpha-1.3929}{\alpha_0-1.3929}\right|^{0.6321} \qquad \left|\frac{\alpha+2.3929}{\alpha_0+2.3929}\right|^{0.3679}=\frac{\mu}{\mu_e} \quad (3.13)$$

Burada; $\alpha_0$=1 dir. Yüksek Re sayılarında $\frac{\mu}{\mu_e}$ <<1 , $\sigma_k = \sigma_{\varepsilon} \cong$1.393 olmaktadır.

*Epsilon Denklemindeki R İlave Terim*

RNG k-ε ile standart k-ε arasındaki asıl fark, ε denklemine eklenen R terimidir. Bu terim;

$R = \frac{C_\mu \rho \, \eta^3 (1-\frac{\eta}{\eta_0}) \varepsilon^2}{1+\beta \eta^3 k}$ ifadesiyle hesaplanır. (3.14)

Burada; *η, türbülans kinetik enerjisinin üretimi olup;*

$\eta = \sqrt{\frac{G_k}{\rho C_\mu \varepsilon}}$ *olarak* yazılabilir.

Düşük gerilme oranı olan $\eta < \eta_0$ bölgelerinde R terimi epsilon denklemine pozitif katkı yaparak $C_{2\varepsilon}$ 'nin değerini standart k-epsilon türbülans modelindeki igili değerden daha büyük yapmaktadır. Yüksek gerilme olan bölgelerde ise negatif etki yaparak ilgili katsayıyı bu kez küçültmektedir. Böylece dissipasyon oranı artarken türbülans viskozitesi ve k değeri azaltmaktadır. Bu durum akıştan daha az enerji çekilmesine yol açmaktadır [59]. Bu modelde kullanılan sabitler;

$C_{1\varepsilon} = 1.42$ , $C_{2\varepsilon} = 1.68$ , $\eta_0 = 4.38$ , $\beta = 0.012$

Sonuç olarak yaptığımız çalışmada tüm simülasyonlar için renormalizasyon grubu (RNG) k- ε türbülans modelinin kullanılmasına karar verilmiştir. İlgili karar, Flow3D kullanıcı kılavuzundaki RNG türbülans modelinin yazılımda mevcut olan en doğru ve sağlam model olduğuna dair yorumların yanı sıra literatür taramalarında ilgili modelin daha etkin ve gerçeğe yakın sonuçlara sahip olmasına dayandırılarak verilmiştir.

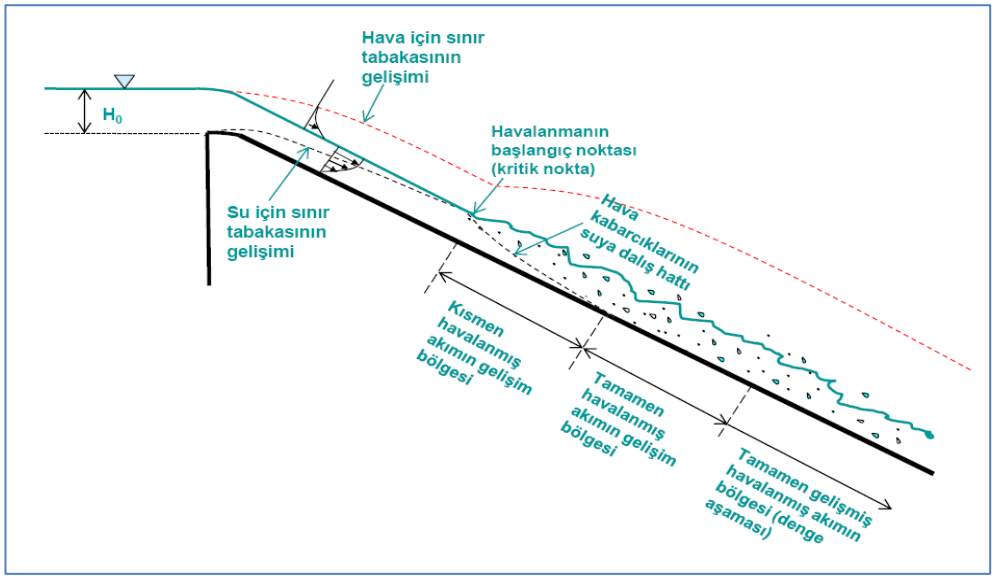
### 3.2.4.4 Hava sürükleme ilişkileri (air entrainment)

Bir sıvı yüzeyindeki hava sürüklenmesi, türbülans girdaplarının havayı zapt edip sıvının gövdesine doğru taşıyabilecek serbest bir yüzeyin üzerinde küçük sıvı elementlerin yükselmesi fikrine dayanır. Hava sürüklenmesi, tipik olarak, hidroelektrik santrallerinin dolusavaklarında yapılarının tabanındaki kavitasyon hasarı olasılığını azaltmak için tasarlanmanın yanı sıra atık su tesislerinde mikroorganizmaların sürdürülmesi için ihtiyaç duyulan suyun arıtımında ve sağlıklı bir balık popülasyonunun sürdürülmesi için nehirlerde ve akarsularda da önemlidir [60]. Hidrolik yapılardaki hava-su ilişkileri, başlıca su açısından, hava açısından, enerji ve oksijen çözünümü gibi hususlardan dolayı ön plandadır. İlgili hususları detaylandıracak olursak şöyle ifade edebiliriz; Akışa girecek havanın oluşturduğu

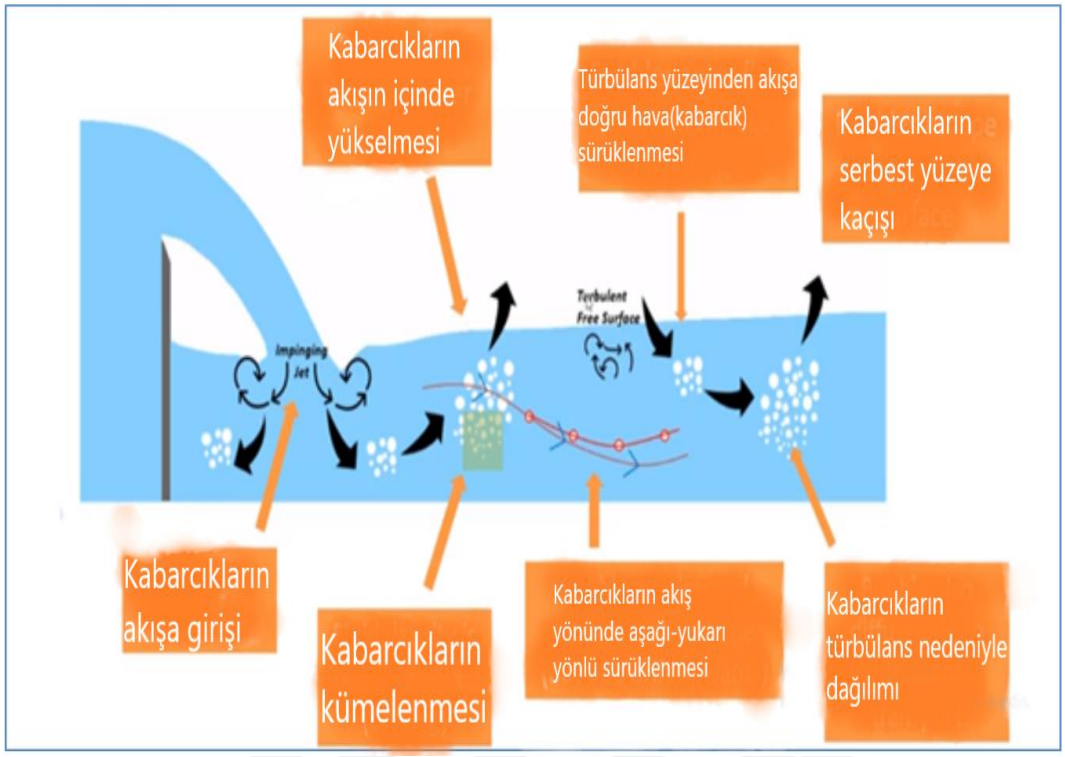
kabarcıkların gerek akış içindeki gerekse de serbest yüzeydeki konumu, akışa etkiyen kuvvetler ve yüzey gerilimleri dikkate alınarak hidrolik yapılarda tasarlanan modifikasyonlar, ayrıca bu yapıların çevre ile olan ilişkilerinde de yapılacak modifikasyonlardan dolayı dikkate alınmaktadır. Atmosfer altı basınç durumunda oluşacak kavitasyonu önleme bakımından ihtiyaç olunan hava miktarının tespitinde, hava birikmesi için ihtiyaç olunan hava ceplerinin tasarımında, ayrıca tasarlanan jet dalma havuzlarında derinliğe bağlı olarak çözülecek oksijen miktarının tespitinde, yine bu yapılarda oluşacak atomizasyonda hava-su ilişkileri kullanılmaktadır. Son olarak jetlerin yayılmasında veya dalma havuzuna çarpması akabinde oluşacak enerji kırınımının ve jetlerin havuza düştüğü konumun tespitinde hava-su ilişkileri yine oldukça önemli yere sahiptir.

Serbest yüzeyli akışlarda sıvıdaki türbülans, akışın yüzeyinden içeri doğru hava sürüklenmesi için yeterli olabilir. Tabii olarak bu kabiliyet türbülans yoğunluğu, yerçekimi ve yüzey gerilimlerinin yüzeyi stabilize edici kuvvetlerin üstesinden gelmek için yeterli olup olmadığı hususuna bağlıdır [30]. Daha geniş bir ifadeyle hava ve suyu ayrı fazlar olarak ele aldığımızda özellikle büyük dolusavaklarda türbülans sınır tabakasının büyümesiyle kritik bir noktanın bulunabileceği serbest yüzeye ulaşılması akabinde önemli miktarda havanın serbest yüzeye tutunmasıyla oluşan kabarcıklar akışla çevrilmeye başlar (Şekil 3.19). Oluşan hava-su karışımı, su akışından farklı mikroskobik özelliklere sahip sıkıştırılabilir bir karışım haline gelir. Çok fazlı akışlardaki bu türbülanslı akış ve kabarcıklar pürüzlü bir yüzey üzerinde su hareketine zıt olan taşıyıcı fazda bir sürükleme kuvveti üreterek türbülanslı kinetik enerji kaybını artırabilir. Ayrıca bu hava kabarcıkları, hidrolik yapılarda kavitasyonu önlemede ve enerji kırıcıların etkinliği konuları dikkate alınarak hidrolik yapılarda ana tasarım değişkenlerinden biri olmuştur. Ancak elde edilen hava miktarını hesaplayacak mevcut bir analitik çözüm ve yaygın genel kaide maalesef yoktur [43]. Hava konsantrasyonu, kabarcık özellikleri ve hız dağılımları gibi değişkenleri elde etmek için kapsamlı deneyler yapılmışsa da fiziksel modellerdeki ölçek etkisinden dolayı prototiplerde gözlemlenen hava su akışını tespit etmenin oldukça zor olduğu da bilinen bir gerçektir. Hava sürükleme ilişkilerinde HAD yazılımları ve fiziksel modellerin bir arada kullanılması günümüzde yaygın olarak tercih edilen yöntemdir. Serbest bir sıvı yüzeyinde sürüklenen havanın miktarını ve dağılımını tahmin edebilmenin önemi,

Flow-3D'de benzersiz bir modelin geliştirilmesine yol açmıştır. Bu modelin iki seçeneği vardır. Modelin ilki, sürüklenen havanın hacim oranı nispeten düşük olduğunda, hava hacim oranını kaydetmek ve taşımak için pasif bir skaler değişken kullanır. Bu model, akışın karakteristikleri ve dinamiklerini değiştirmediği için pasiftir. İkinci hava sürüklenme modeli seçeneği ise, değişken yoğunluklu bir formülasyona dayanmaktadır. Bu model, havanın eklenmesiyle sıvı hacminin "kabarmasını" ve sürüklenen hava ile ilişkili kaldırma kuvveti etkilerini içerir. Ek olarak, değişken yoğunluklu (variable density) formülasyon kullanılırken havanın su içinde nispi bir sürüklenmesini, suyun yüzeyine çıkması durumunda havanın olası kaçışını ve adiabatik olarak temsil edilen hapsolmuş kabarcık bölgelerine havanın çıkarılmasını veya eklenmesini içerebilir. Her iki seçenekte de aynı temel sürüklenme süreci olan yerçekimi ve yüzey geriliminin dengeleyici kuvvetleri ile yüzey türbülansının kararsızlaştırıcı etkileri arasındaki rekabete dayanır. Bu modeller ayrıca jet akışlarının suya çarpma anındaki hava sürüklemesini de tahmin etmektedir. Şekil 3.20'de suya çarpan jet akışından sonra su içinde oluşan hava-su hareketi özetlenmiştir. Flow3D programı bünyesinde bulunan Air Entrainment Model, Dispersed Multiphase Model, Drift Flux Model ve Variable Density Consideration Model gibi modellerin kullanılmasıyla çoklu faz akışında meydana gelen hava su ilişkileri çözülmeye çalışılmaktadır.




Şekil 3.19 Dolusavak üzerinde su ve hava tabakasının gelişimi [54]




Şekil 3.20 Hava sürükleme ilişkileri

Flow3D' de air entrainment modeli, analizi gerçekleştirilecek olan modellerin çözüm kalitesini artırmaktadır. Bu modeldeki ağ hassasiyeti basınç değerlerinde olduğu gibi yüksektir. Bu nedenle ilgili aşamaya geçmeden önce serbest yüzeyli akışın simülasyonlarının gerçekleştirilmesi, daha sonra elde edilen veriler ve edinilen tecrübelerle birlikte bu çözüm son adım olarak gerçekleştirilmelidir. Bu çalışmada da açıklanan hususa riayet edilmiş, öncelikle ilgili model çalıştırılmadan çözüm yapılmış akabinde çalıştırılarak hava-su ilişkileri detaylı olarak incelenmiştir. Böylece dolusavak boşaltım kanalında, sıçratma eşiğini terk eden akışın oluşturduğu jet profillerinde, enerji kırıcı havuzda hava-su ilişkileri çözümlenmiş olup oluşan enerji kırınımı hususu da bu açıdan değerlendirilmiştir.

Hidrolik bir olayda oluşan türbülans girdapların karakteristik boyutu $L_t$ ile verilir;

$$L_T = C_\mu \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{K\text{^}(3/2)}{\varepsilon} \qquad (3.15)$$

Cμ=0.085 (RNG k-ε türbülans modeli için), Türbülans modeli ilgili dağılım katsayıları her hücre için tüm aşamalarda hesaplanmaktadır. Lt değeri seçilen türbülans modeline oldukça bağlıdır. k-ε değerleri de aynı şekilde hava sürükleme modeline bağlıdır. Bu nedenle, her iki model, yani türbülans ve hava sürükleme modelleri dolaylı olarak

birleştirilmiştir. HİRT'e (2003), [30] göre enerji yoğunluğuna bağlı olarak oluşan türbülanslı akıştaki Lt girdap boyu, yerçekimi ve yüzey gerilimleri dikkate alınarak yorumlanabilir. Buna göre Lt değerine yükseltilmiş bir akış elemanı ile ilişkili enerji yoğunluğu;

$$Pd = \rho g_n L_t + K\sigma/L_t \qquad 3.16$$

Burada; σ, sıvı-gaz arasında oluşan yüzey gerilimleri,

*Lt*, serbest yüzey üzerinde yükselen girdap boyu,

*ρ*, makroskobik akış yoğunluğu,

$g_n$, yer çekimi etkisi,

*Pd*, yüzey stabilize edici kuvvet,

*K*, kalibrasyon parametresidir.

Birim hacimdeki türbülans kinetik enerji ise $P_t$ ile gösterilir. $P_t=\rho Q$'dir. Hava sürüklemenin meydana gelme koşulu, birim hacme düşen kinetik enerjinin daha büyük olması gerekir. Yani türbülanstan kaynaklanan bozulmalar ve dağılmalar, yüzeyi stabilize edici kuvvetlerin üstesinden gelebilecek kadar büyük ($P_d>P_t$) olmalıdır. Bu durumda birim zamanda sürüklenen hava hacmi; $\delta V = C_{air}\, As\sqrt{(2(P_t - P_d)/\rho}$ olur.

Burada, $C_{air}$, başka bir kalibrasyon parametresidir. As, her hücredeki serbest yüzey alanıdır. Oluşan hava hacmi δV, karışımın makroskopik yoğunluğunu etkileyen ve akışın kabarmasını sağlayan durumlarda hesaba katılır. $C_{air}$ değerinin 0 ile1 arasında olması beklenir. Çünkü yükselen hacmin sadece bir kısmı hava tarafından işgal edilir. İyi bir ilk tahmin 0,5 olmasıdır [30].

# 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

## 4.1 Sayısal Analiz Sonuçları (Ilısu Barajı ve HES 1982 Yılı Modeli İçin)

Ilısu Barajı Dolusavak 1982 Yılı Tasarımı HAD Analizi adlı başlıkta anlatılan aşamalardan sonra üç boyutlu simülasyonlar zamana bağlı çözülerek tamamlanmıştır. Öncelikle uygun hesap ağı seçimi yapılarak çözüm için en optimum hesap hücre boyutu ve konfigürasyonu belirlenmiştir. Daha sonra belirlenen hesap ağı kullanılarak model üzerinde detaylı incelemeler yapılmıştır. Ilısu Barajı dolusavağının yarısı hesap ağına dahil edilmiştir. Y ekseni simetri alındığından yapının tamamı analize dahil olmuştur. Debi sonuçları yapının tamamına göre verilmiştir. Model ekseni, enine olarak y= 0 koordinatına oturtulmuştur. Boyuna km'ler ise dolusavak yaklaşım kanalı başlangıç noktası (x= 0) baz alınmıştır. Yükseklik bilgileri ise z eksenindedir.

### 4.1.1 Uygun hesap ağı seçimi

Uygun hesap ağının tespiti için eldeki laboratuvar dataları en önemli veri olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle 1982 yılı modelinin sayısal analiz sonuçları ile fiziksel model sonuçları kıyaslanarak uygun hesap ağına ulaşılmıştır. Bunun için öncelikle kaba bir hesap ağıyla çözümler alınmıştır. Daha sonra hesap hücreleri küçültülerek alınan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuçların hesap hücrelerinin boyutlarına bağlı olmaktan çıktığı ve çözüm süresi olarak da en optimum sonucu veren hesap ağı aranmıştır. Bunlara ek olarak FAVORIZED seçeneği kullanılarak katı geometri, her bir hesap ağı için kontrol edilmiştir. Bu çalışmamızda dikkat çeken başka bir husus daha tespit edilmiştir. Şöyle ki; simülasyonlar yapılırken Flow3D'de uygulanan metotlardan biri de kaba mesh boyutlarında sistemin kararlı duruma gelmesinin beklenmesidir. Daha sonra mesh boyutları küçültülerek belli süreler için restart butonu ile aynı simülasyon bir süre daha devam ettirilip daha kısa sürede analizler sonuçlandırılmaktadır. Aslında bu uygulama dolusavağın eşik yapısından(ogee) boşaltım kanalı sonuna kadar uygulanabilir bir durumdur. Çünkü bu kısımda deşarj debisi taban(zemin) ile etkileşim halindedir. Ancak bu metot suyun yayılarak oluşturduğu jet profillerinde başarılı olamamaktadır. Sistem kararlı hale geldikten sonra devam ettirilen simülasyonlarda oluşan jet profilleri ile birbirinden bağımsız olarak yapılan analizlerde oluşan jet profilleri kıyaslandığında bağımsız yapılan çözümlemelerde elde edilen jet profillerindeki jet yayılımı, jet yüksekliği, jet uzunluğu, alt nap genişliklerinin daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle tüm

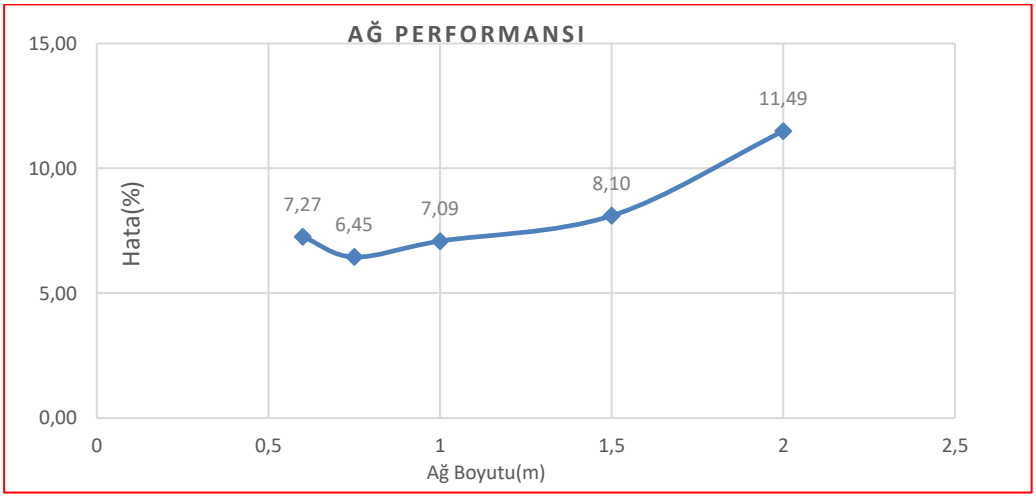
simülasyonlar tek tek yani birbirinden bağımsız olarak çözülmüştür. Bu tercih çok fazla zaman alsa da yapılması gereken çözümlemenin bu olması gerektiği kanaati hasıl olmuştur.

Fiziksel model ve sayısal model sonuçlarının birbirlerine olan yakınsama oranları dikkate alınarak uygun ağ elde edilebilir. Bu konuda elde edilen debi ve jet profillerinin yanı sıra ağ boyutlarına bağlı olarak aşağıdaki tabloda görüleceği üzere ogee üzerinde performans kriteri olarak 5 adet farklı ağ boyutları için 9 farklı noktada hesaplanan OKH ve OMGH değerleri verilmiştir. Tabloda görüleceği üzere (Tablo 4.1) küçülen hücre boyutlarına bağlı olarak hata oranı T5 testi hariç gittikçe azalmış, buna paralel hücre sayısı ve çözüm süresi de oldukça uzamıştır (Şekil 4.1).

Tablo 4.1 Farklı ağ boyutlarının performans analizi

| Test No | Hücre Boyutu Ogee ve Boşaltım Kanalı için (non-corfommed mesh) | Hücre Boyutu Sıçratma eşiği için (Conformmed to block volume mesh) | Toplam Hücre Sayısı | OKH | OMGH |
|---|---|---|---|---|---|
| T1 | 2 | 1 | 2000000 | 0,79 | 11,49 |
| T2 | 1,5 | 0,75 | 5000000 | 0,54 | 8,10 |
| **T3** | **1** | **0,5** | **18000000** | **0,52** | **7,09** |
| T4 | 0,75 | 0,375 | 38000000 | 0,48 | 6,45 |
| T5 | 0,6 | - | 48000000 | 0,47 | 7,27 |

*Ortalama mutlak göreceli yüzde hatası; OMGH; Ortalama karesel hata: OKH*

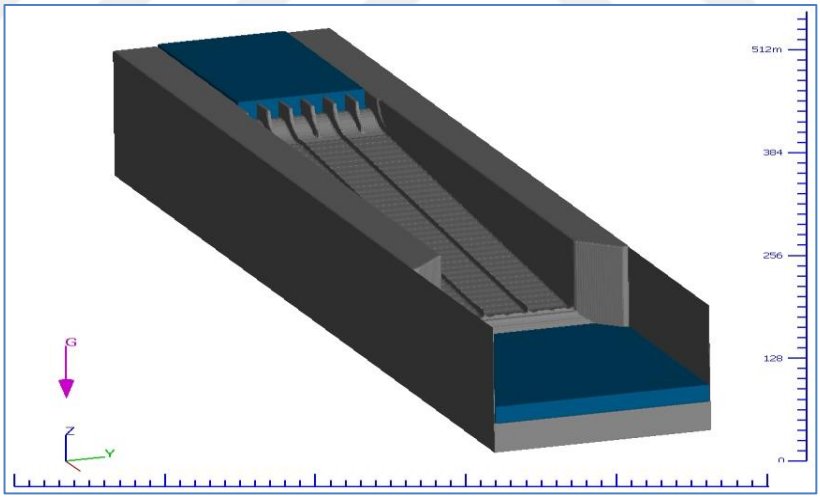



Şekil 4.1 Ortalama serbest yüzey profillerinin hücre boyutuna göre bağıl hata varyasyonları

Tabloda elde edilen analiz sonuçları uygun sonuçlar olarak karşımıza çıkmıştır. İlgili sonuçların yanı sıra sistemde tek veya iki adet ağ bloğunun kullanılması hususunun netleştirilmesi için bir kısım devam analizleri gerçekleştirilmiştir. Buna göre;

#### 4.1.1.1 Uygun hesap ağı-1

İlk olarak Uygun hesap ağı-1 için modelin tümünde tek bloklu non-conforming mesh kullanılmıştır. Bu aşama air entrainment model kullanılmadan ve prototip ölçekte (1/1 ölçek) gerçekleştirilmiştir. DS-001 adlı ve 1,5 m'lik hücre boyutuna sahip simülasyon hızlı ve kaba bir şekilde çözümlenmiştir. Bu çözümün akabinde hücre boyutları 0.75 m (DS-002) ve 0.60 m'ye (DS-003) küçültülerek zaman/kaynak açısından iki kapaklı ve tek kanallı olarak çözümlenmiştir. Elde edilen sonuçlar tablo 4.2 de verilmiştir. t=0 anında FAVORIZED seçeneği kullanılarak elde edilen geometri Şekil 4.2. de verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere t=0 anında rezervuar su seviyesi dolusavak tasarım yüküne denk gelen Xmin ve mansap su seviyesi ise santral tam kapasite çalışırken oluşacak kuyruk suyu kotu olan Xmax simülasyonun başlangıç koşuludur.




Şekil 4.2 FAVORIZED seçeneği ile dolusavak modeli

Tablo 4.2 Uygun hesap ağı-1 için yapılan simülasyonların özeti (Varyant-II Q12500 $m^3/s$)

| Simulasyon No | Hesap Hücresi Boyutları (m) | $H_0$ (m) | Q($m^3/s$) | Jet Uzunluğu (m) |
|---|---|---|---|---|
| DS-001 | 1,5 | 13,50 | 12840 | 150 |
| DS-002 | 0,75 | 13,50 | 12800 | 147 |
| DS-003 | 0,60 | 13,50 | 12830 | 145 |

Uygun hesap ağı-1 analizlerinde 12500 $m^3$/s'lik deşarj kapasitesi ve sıçratma eşiği olarak da Varyant-II dikkate alınmıştır. Analizlerde debi miktarı 12500 $m^3$/s ile kıyaslandığında %2,5-3 arasında değişen oranlarda farklılık tespit edilmiştir. Debi miktarı ile ilgili bu farklılık daha önce de belirtildiği gibi literatür çalışmalarına göre kabul edilebilir bir orandır. Uygun ağ tasarımı-1'de üç farklı simülasyon gerçekleştirilmiştir. DS-001 nolu simülasyon 1,5 m hücre boyutuna sahip olup sıçratma eşiği için nispeten kaba olan boyut nedeniyle eşik geometrisi fotoğraflarda da görüleceği üzere net algılamadığından yapılan analizde jet profillerinin yeterli oranda yükselmeyerek 150 m mansaba ulaştığı, DS-002 nolu simülasyonda sıçratma eşiği geometrisi biraz daha iyi algılanmış buna paralel oluşan jet profili ilk simülasyona göre yükselmiş ve daha kısa mesafe olan 147 m mansaba düşmüştür. Devamında gerçekleştirilen DS-003 nolu simülasyon oldukça küçük olan 0,6 m ağ boyutuyla sıçratma eşiği net olarak algılanmış, bu nedenle oluşan jet profilleri daha yükseğe fırlayarak iyi performans sergilemiş ve akabinde 145 m mansaba ulaşmıştır. Bu hususta Favor görüntüleri şekillerde verilmiştir (Şekil 4.3-4.5). Fiziksel model sonuçlarına göre jetin fırlatma mesafesinin 137 m olduğu da göz önüne alındığında elde edilen sonuçlar uygundur. Sayısal modelde air entrainment modeli kullanılmadığından muhtemel oluşacak hava direnci etkisiyle jet profillerinin daha kısa mesafeye düşmesi bu aşamada beklenmemektedir. Yanı sıra fiziksel modelin de 1/100 ölçek olması da jet mesafelerinde oldukça kritik durumdur. DS-003 nolu simülasyonu ile istenilen sonuçlar elde edilmişse de devamında yapılacak çalışmalar için yaklaşık 50 milyon hücre kullanılacağından bu ölçekteki ağlarla istenilen analizleri yapmak zaman/kaynak mefhumu dikkate alındığında mümkün görünmemektedir. Bu nedenle ikinci bir ağ tasarımı gerçekleştirilmiştir.

#### 4.1.1.2 Uygun hesap ağı-2

Uygun hesap ağı-2 seçimi işleminde bu kez modelin tamamında geçerli olan "non-conformed blok"a ek olarak enerji kırıcı yapının memba ve mansabını da kapsayacak şekilde ikinci bir ağ bloku olan "conform to blocked volume" tanımlanmıştır. Söz konusu ağ tiplerinin özelliklerine önceki başlıklarda değinmiştik. "Conform to blocked volume" olarak tanımlanan bu blok sayesinde özellikle geometrinin değiştiği boşaltım kanalı sonundaki söz konusu enerji kırıcı yapının daha net algılanması beklenmiştir. Optimum çözüm süresini yakalamak için Uygun hesap ağı-2 hesap hücreleri

oluşturulurken Ilısu Barajı dolusavağı tek kanal olarak çözümlenmiştir. Sayısal modeli üzerinde oluşturulan hesap ağının görünüşü Şekil 4.6 'da gösterilmektedir. Ağ blokları tanımlandıktan sonra kaba ağ olarak non-conformed için 2 m, conformed to blok volume için 1 m ile çözüm yapılmıştır(DS-004). Daha sonra sırasıyla 1,5/0,75 (DS-005), 1/0,5(DS-006) ve 0,75/0,375 m'lik (DS-007) ağ boyutları ile toplam 4 adet simülasyon daha yapılmıştır. Yapılan simülasyonlarda elde edilen katı model ve jet profil görüntüleri Şekil 4.8-4.11'de gösterilmektedir.

Tablo 4.3 Uygun hesap ağı-2 için yapılan simülasyonların özeti (Q12500 $m^3/s$)

| Simulasyon No | Hesap Hücresi Boyutları | $H_0$ (m) | Q($m^3/s$) | Jet Yüsekliği | Jet Uzunluğu |
|---|---|---|---|---|---|
| DS-004 | 2/1 | 13,5 | 13100 | - | - |
| DS-005 | 1,5/0,75 | 13,5 | 12880 | 13,5 | 157 |
| **DS-006** | **1/0,5** | **13,5** | **12900** | **14** | **145** |
| DS-007 | 0,75/0,375 | 13,5 | 12800 | 14,5 | 143 |

İkinci tasarımdaki ilk simülasyon olan DS-004 nolu simülasyonda yapılan analizde kaba olan hücre boyutlarından dolayı jet profillerinin düzgün oluşmadığı, devamındaki 1,5/0,75 m ağ boyutlarına sahip DS-005 nolu analizde jet profilinin 157 m mansaba ulaştığı, DS-006 nolu analizde küçülen ağ boyutlarıyla birlikte eşik geometrisindeki diş yarıkları net algılanmış, buna mukabil oluşan jet profili DS-003 nolu analiz sonuçlarına benzer şekilde daha iyi yükselerek 145 m mansaba düşmüştür. Yani 50 milyon hücre kullanılarak gerçekleştirilen DS-003 nolu analiz sonuçlarına 18 milyon hücre ile gerek jet yüksekliği gerekse de jet uzaklığı bakımından benzer sonuçlar elde edilmiştir. Daha sonra DS-007 simülasyonu gerçekleştirilmiş yaklaşık 38 milyon hücre ile yapılan bu simülasyonda elde edilen jet profili DS-006 nolu jet profilinden yaklaşık yarım metre daha fazla yükselmiş, dolayısıyla daha iyi havalanma suretiyle 143 m mansaba düşmüştür.

Şut kanalları sonundaki sıçratma eşiklerinin şu hususları sağlaması beklenmektedir.

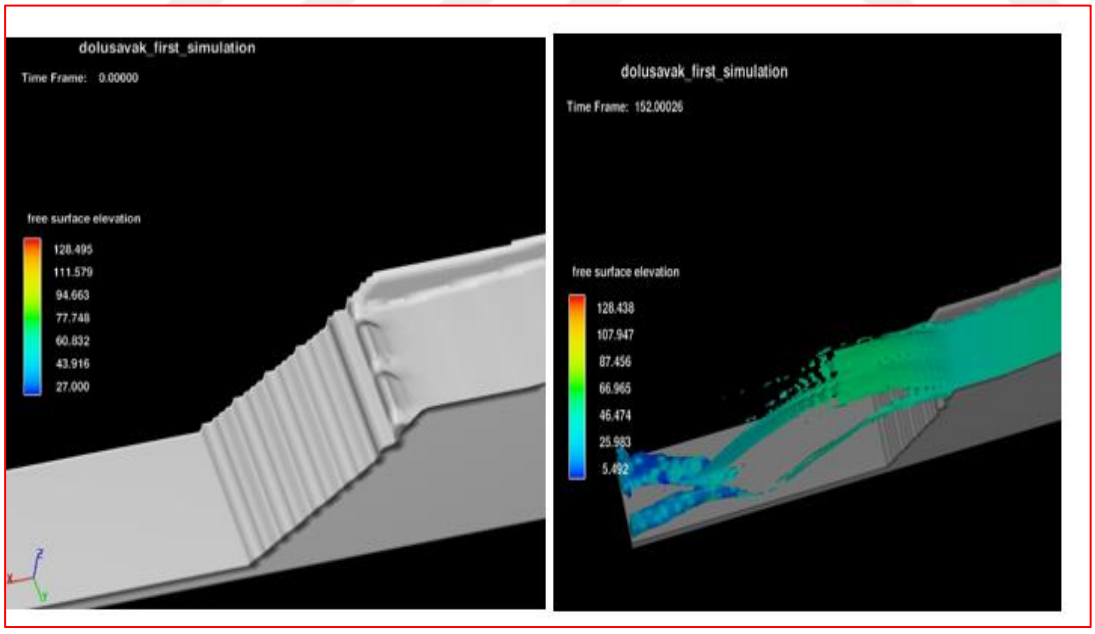
-Sıçrayan debi mümkün mertebe ileriye fırlatılmalıdır.

-Sıçrayan su jetinin mansapta olabildiğince az oyulma için yayılması gerekmektedir.

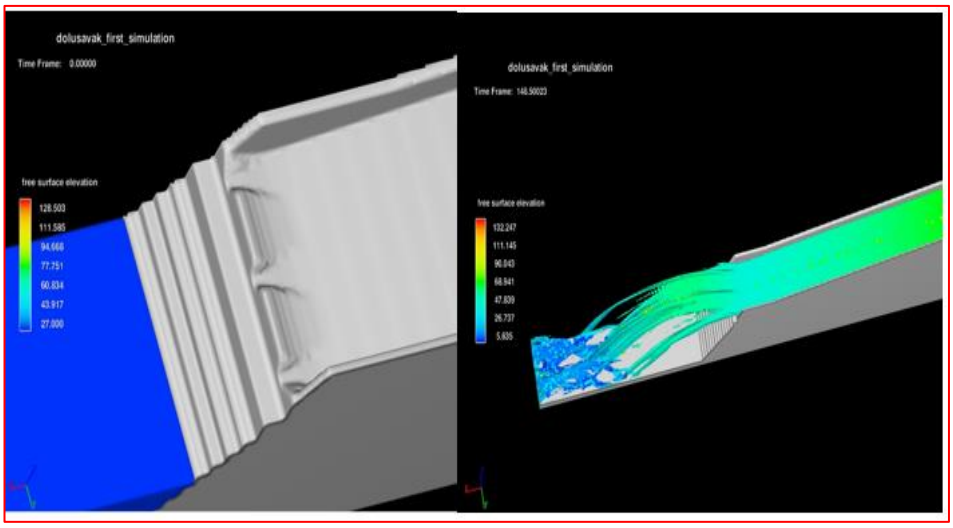
Açıklanan iki hususu sağlayan ağ tablo verileri ve jet profil görüntülerine göre DS-003, DS-006 ve DS-007 nolu ağlardır. Katı geometrinin değişen kısımlarındaki

değişikliği daha büyük boyutlardaki hücrelerle dahi daha iyi algılayan "conformmed to block volume" ağ türünün, özellikle 1/100 ölçekli fiziksel model sonuçları ile kıyas yapılacağından ölçek nedeniyle küçülecek boyutlar da dikkate alınarak kullanılması gerektiği anlaşılmıştır. Bu nedenle DS-003 ağ tasarımı elenmiştir. Kalan iki tasarımda da hücre sayılarına bağlı olarak zaman/kaynak bakımından yapının tamamında (Ogee eşiği, deşarj kanalı, enerji kırıcı yapı ve enerji kırıcı havuz) yapılacak incelemeler için ihtiyaç olunan ve seçilen hesap ağı konfigürasyonunun Uygun hesap ağı-2, DS-006 nolu ağ konfigürasyonunun olması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

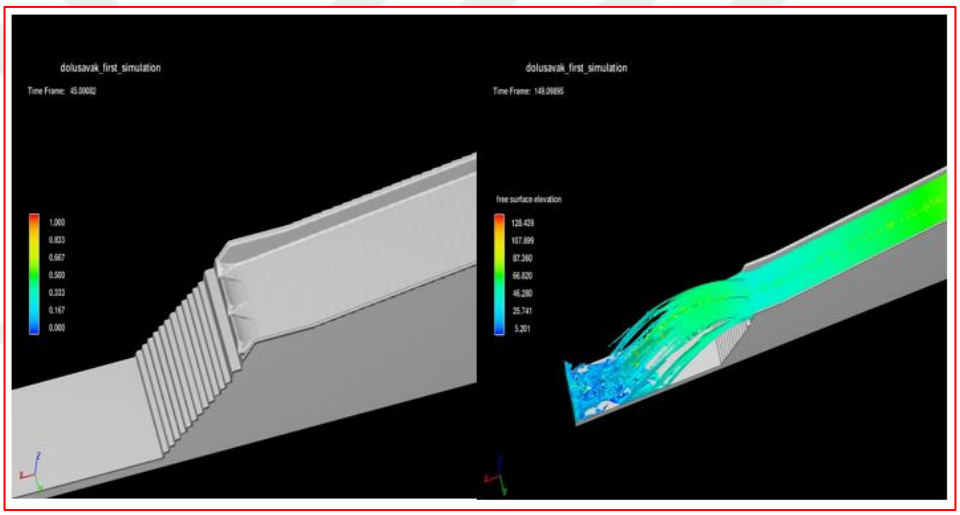
Uygun hesap ağı konfigürasyonunun kullanılmasıyla dolusavak eşik yapısı, deşarj kanalı ve deşarj kanalı sonundaki enerji kırıcı yapının basınç, su yüzü profili ve hız karakteristikleri, maksimum hesap yüküne (Q17988 $m^3/s$) denk gelen 527,05 m ve Q12500 $m^3/s$ yüküne denk gelen 523,5 m rezervuar su seviyesi için incelenmiştir. Ayrıca 1982 yılında mevcut fiziksel model çalışmalarının dışında dolusavak boşaltım kalındaki akışın hidrolik karakteristikleri için ayrıca gerçekleştirilen 1/30 ölçekli fiziksel model çalışmaları sonuçları da Q17988 $m^3/s$ için incelenmiştir.



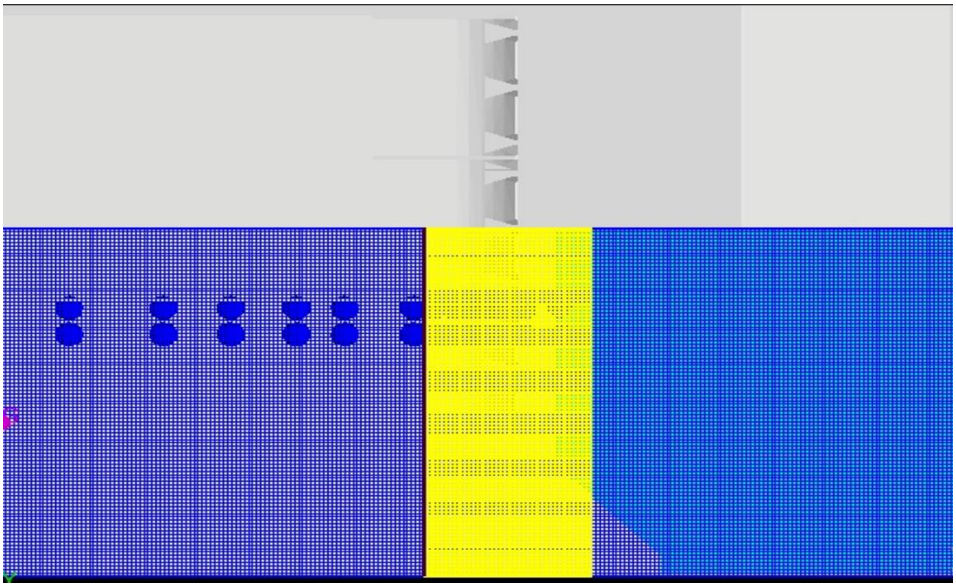

Şekil 4.3 Dolusavak favor ve jet profil görüntüsü (hesap ağı -1, DS-001)

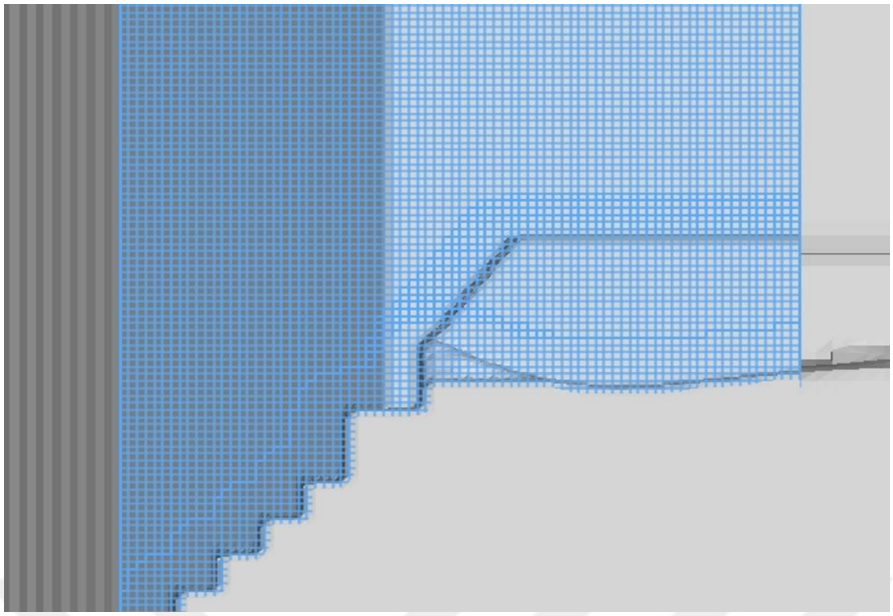


Şekil 4.4 Dolusavak favor modeli ve jet profil görüntüsü (hesap ağı -1, DS-002)

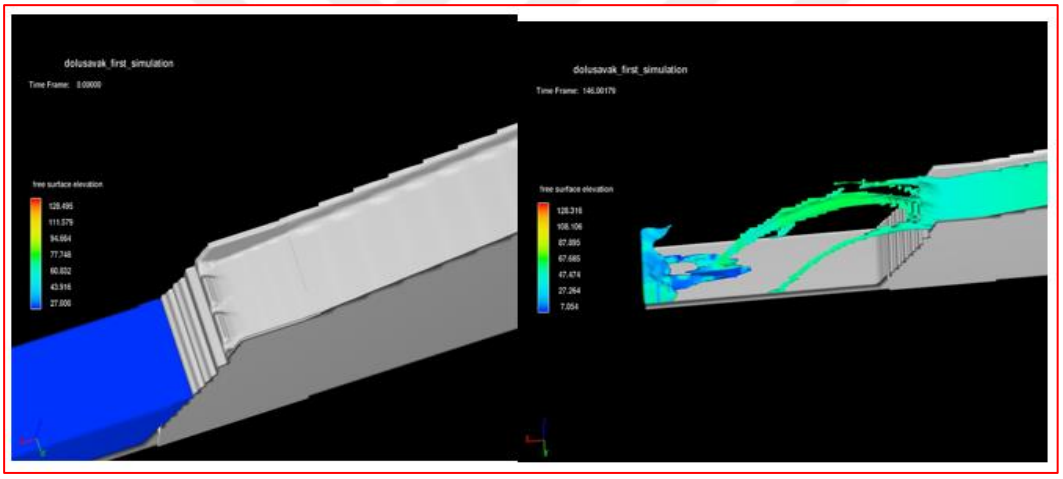


Şekil 4.5 Dolusavak favor modeli ve jet profil görüntüsü (hesap ağı -1, DS-003 )

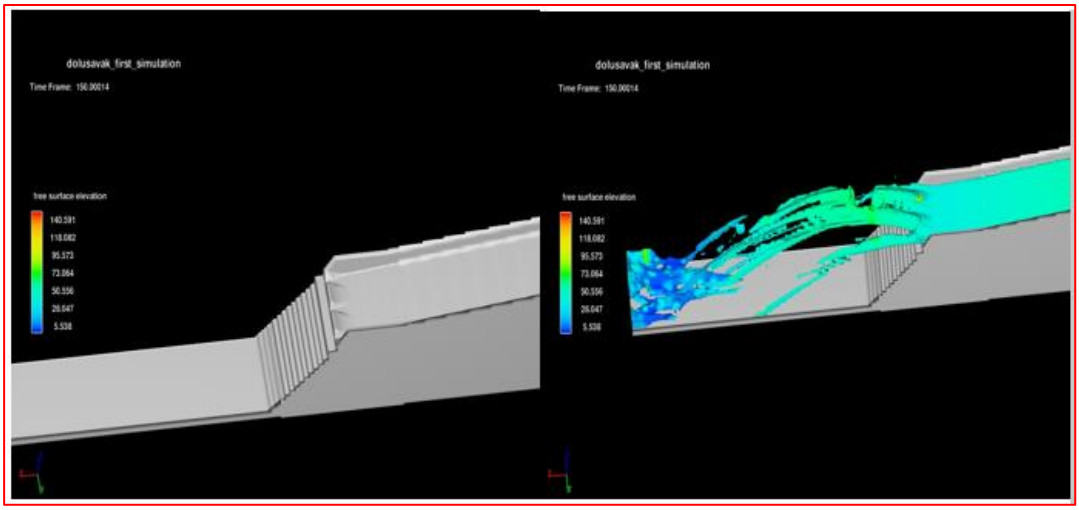

Şekil 4.6 Ilısu barajı dolusavağı ağ blokları (uygun hesap ağı-2)



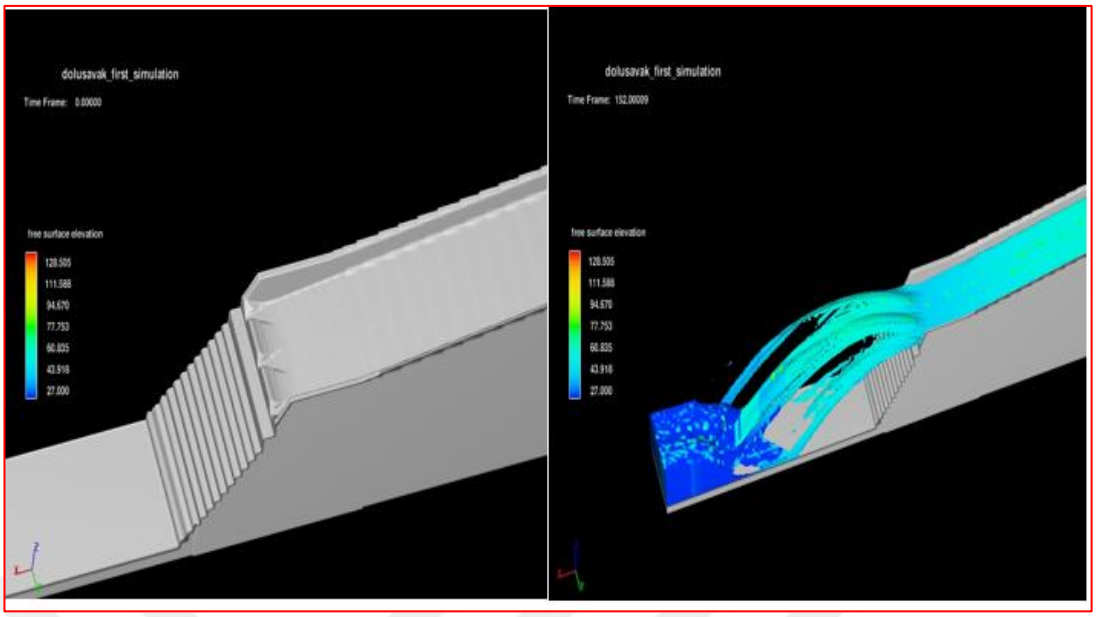
Şekil 4.7 Conformed To Block Volume ağ türü (uygun hesap ağı-2)



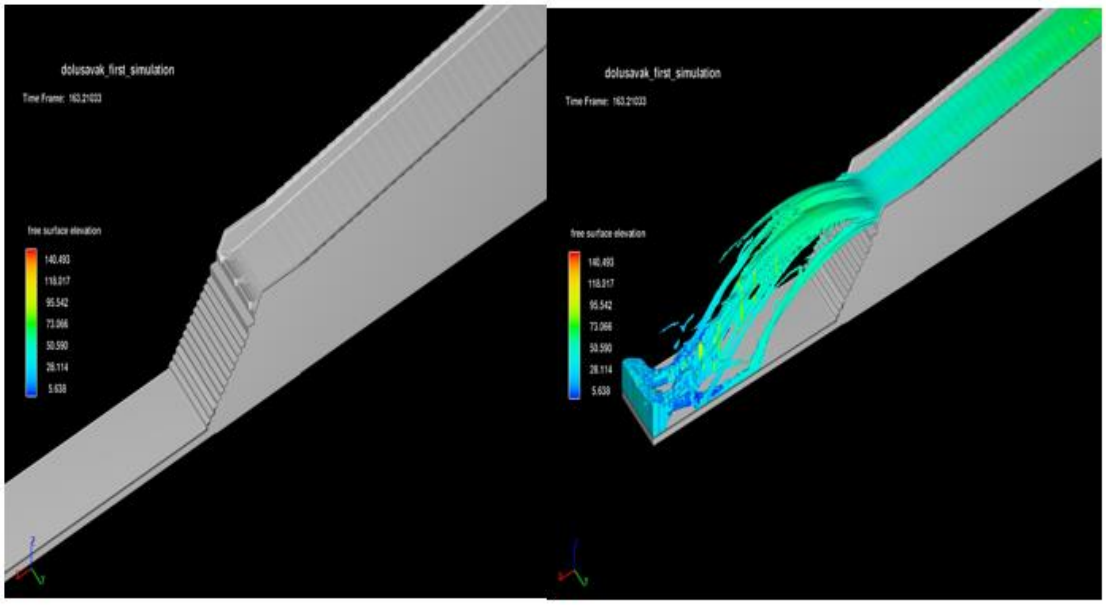

Şekil 4.8 Dolusavak favor modeli ve jet profil görüntüsü (uygun hesap ağı-2)(DS-004)




Şekil 4.9 Dolusavak favor modeli ve jet profil görüntüsü (uygun hesap ağı-2)(DS-005)




Şekil 4.10 Dolusavak favor modeli ve jet profil görüntüsü (uygun hesap ağı-2)(DS-006)




Şekil 4.11. Dolusavak favor modeli ve jet profil görüntüsü (uygun hesap ağı-2)(DS-007)

### 4.1.2 Dolusavak eşik yapısı ve boşaltım kanalının incelenmesi

#### 4.1.2.1 Basınç, su yüzü ve hız değerleri

Fiziksel Model çalışmalarında eşik üzerindeki basınç değerleri için sadece maksimum hesap yükü (Q17988 $m^3/s$) dikkate alınarak detaylı incelemeler yapılmıştır. Şekil 4.12'de görüleceği üzere soldan 1 ve 2. kanallar ile 4. kanalda ölçümler yapılmıştır. Fiziksel model sonuçlarına göre soldan 1. kanal ve 2. kanalda yaklaşım kanalının akış üzerinde etkisinin olduğu, özellikle bunun 1. kanalda daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Detaylı bir şekilde raporda da konu edilen yaklaşım kanalının sol

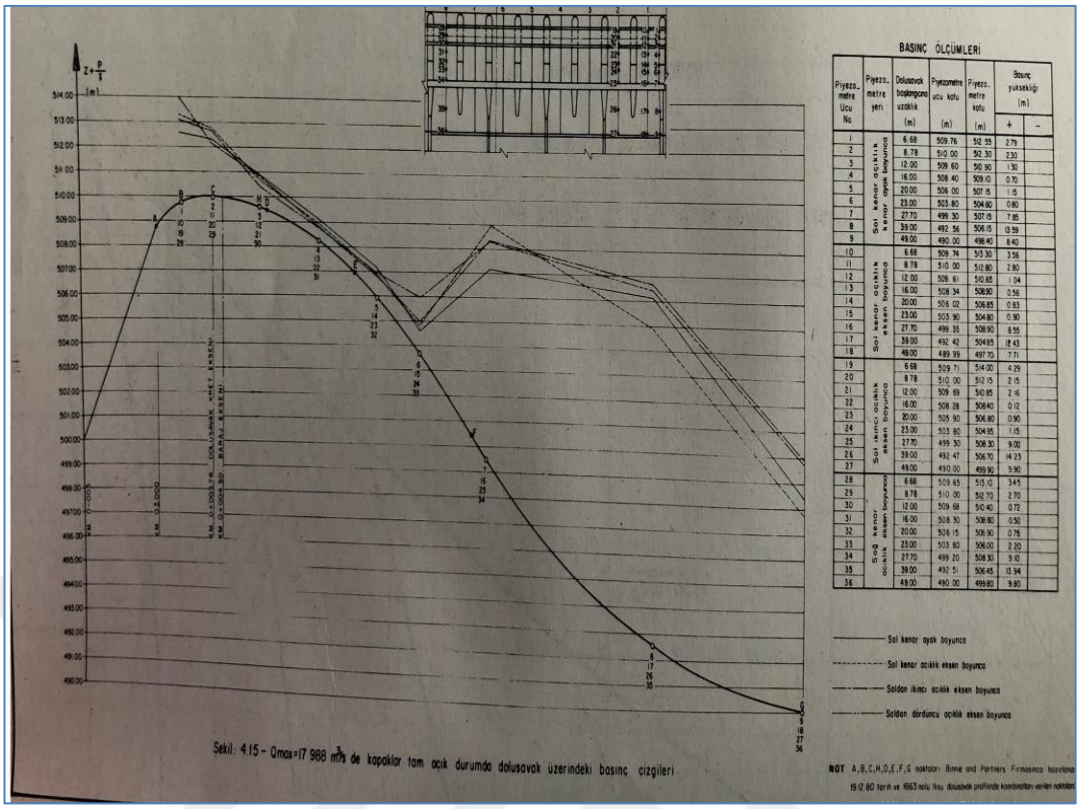
tarafındaki jeolojik yapıdan kaynaklı akışa olan muhtemel etkisi de göz önüne alınarak bu etkinin minimum seviyede olduğu 4. kanaldaki veriler dikkate alınmış ve sonuçlarla karşılaştırılma yoluna gidilmiştir. Bilindiği gibi Flow3D de çizilen yaklaşım tamamıyla düz bir kanaldır. Bu nedenle akım çizgilerinin oldukça düzgün olduğu 4. kanaldaki sonuçlar dikkate alınmıştır (Şekil 4.13). Ayrıca şu hususu da belirtmekte fayda vardır. Basınç değerleri gerek ogee eşik yapısı gerekse de sıçratma eşiği gibi kavisli yüzeylerde çok küçük mesafelerde değişkenlik göstermektedir. Fiziksel modelde ölçüm yapılan noktalar ile sayısal analizdeki katı model üzerinde dikkate alınan noktalar aynı olmayacaktır. Yani fiziksel modele kıyasla sayısal modelde detaylı koordinat belirlenmemiştir. Bununla birlikte basınç değerlerinin kullanılan ağa bağlı hassasiyetinin yüksek olduğu da göz önüne alınarak çalışmamızda mümkün mertebe aynı noktaya yakın noktalar dikkate alınarak sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 4.14). Yapılan analiz sonuçlarına göre eşik yapısındaki basınç değerleri ile ilgili olarak, fiziksel model deneyleri ile sayısal analiz verileri eşik yapısı için kıyaslandığında; yapının eğimli-kavisli kısmında az da olsa farklı sonuçlar elde edilmişse de genel itibariyle sayısal analiz değerlerinin fiziksel model basınç değerleriyle oldukça uyumlu olduğu görülmektedir (Şekil 4.15). Yine fiziksel model çalışmalarında dolusavak şut(boşaltım) kanalındaki basınç değerlerinin tespiti sadece Q17988 $m^3/s$ ve Q12500 $m^3/s$ için yapılmıştır (Şekil 4.16). Tespit edilen basınç çizgileri şekilde verilmektedir. Basınç değerleriyle ilgili olarak fiziksel model deneyleri ile sayısal analiz verileri boşaltım kanalı için kıyaslandığında, sonuçların özellikle kanalın başlangıç ve orta kısımlarında hemen hemen aynı olduğu, kanalın sonuna doğru fiziksel model sonuçlarıyla nizami bir miktar farkın oluştuğu tespit edilmiştir (Şekil 4.17-18).

Fiziksel model çalışmalarında dolusavaktaki su yüzü profilleri de sadece Q17988 $m^3/s$ ve Q12500 $m^3/s$ için yapılmış olup elde edilen veriler ışığında dolusavak şut kanalının iyi çalıştığı tespit edilmiştir. Tespit edilen su yüzü çizgileri şekilde (Şekil 4.19-20) verilmektedir. Fiziksel model deneyleri ile sayısal analiz verilerinin su yüzü profilleri ogee eşik yapısı üzerinde sağ ve sol olmak üzere her iki sahilde, boşaltım kanalında ise sahiller ve eksende belirlenmiştir. Buna göre yapılan değerlendirmelerde; 12500 $m^3/s$ debi için su yüzü profilleri ile ilgili olarak dolusavağın hemen başlangıcında(ogee) meydana gelen su yüzü profilleri incelendiğinde kavisin olduğu

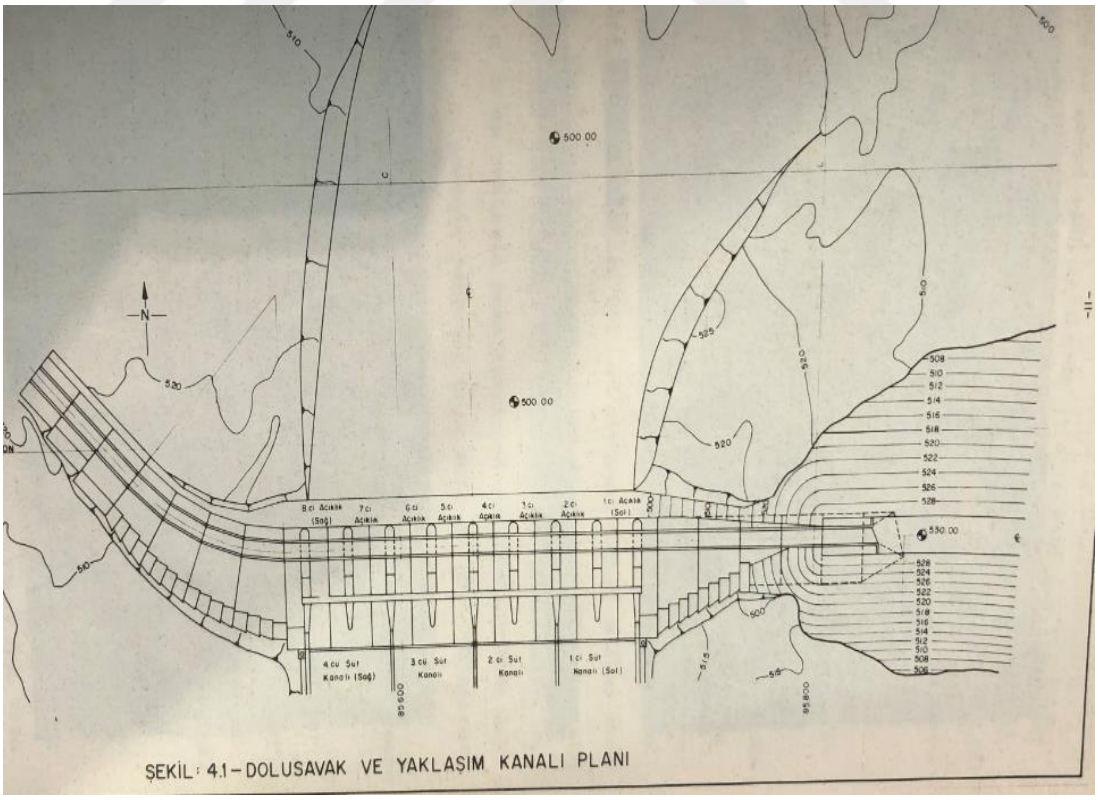
kısım dışında uygun bir su yüzü profili elde edilmiştir. Aynı durum boşaltım kanalı için de geçerlidir. Ancak boşaltım kanalı sonunda basınç değerlerinde olduğu gibi nizami bir farklılık ortaya çıkmıştır. Basınç değerlerinin tersine fiziksel modeldeki su yüzü profilleri sayısal modelden daha fazla çıkması da beklenen bir durumdur. Kanalın sonunda ortaya çıkan farklılığa neden olarak, artan hızla beraber türbülans kinetik enerjisinin su içerisinden serbest yüzeye çıkmasıyla gerçek durumda yani model deneylerde oluşan hava sürüklenmesi hususudur. Akış içerisine sürüklenen hava girişi ile beraber su seviyesi yükselecektir. Ancak sayısal modelde air entrainment modeli çalıştırılmadığından bu durum tespit edilememiş su yüzü profilleri fiziksel model deneylerindeki değerlerin altında kalmıştır. Hava sürüklemesi hususu ile ilgili olarak, bilindiği üzere ogee üzerinden dökülen akış, boşaltım kanalından geçerken viskoz ve türbülanslı süreçlerin akış üzerindeki etkisi genellikle çok azdır. Akış kanal sonuna doğru hareket ederken artan hızın da etkisiyle enerji dengesinde az da olsa değişimler başlayacaktır. Sıçratma eşiğini terk ettikten sonra ve özellikle de mansap kanalındaki kuyruk suyu veya dalma havuzu ile temas ettiğinde güçlü momentum değişimleri meydana gelecektir. Devamında mansap kanalına giren akış parçacıkları, önceki kısımlara kıyasla daha düşük bir hidrolik enerjiyle yapıyı terk eder. Açıklanan hususun daha iyi anlaşılması adına Ilısu Barajı dolusavağının sayısal çözümlemeleri Q12500 $m^3/s$ için air entrainment modeli değişken yoğunluklu formülasyon (variable density flow) ile birlikte kullanılarak ve kullanılmaksızın yapılmış olup sonuçlar değerlendirilmiştir. Buna göre; air entrainment modelinde ogee üzerinde hava sürüklenmesi tespit edilememiş ve su yüzü değerleri air entrainment modeli kullanılmadan yapılan analizlerle aynı çıkmıştır (Şekil 4.21-4.26). Boşaltım kanalında ise ogeeden hemen sonra kanal başlangıcında orta ayaklardan kaynaklı nispeten güçlü bir hava sürüklenmesi başlangıcı tespit edilmiş olup bu sürüklenme kanalın orta kısımlarında %7, sonlarına doğru ise %12 seviyelerinde olmuştur (Şekil 4.27-29). Sürüklenme sonucunda kanalın tümünde geçerli olacak şekilde su yüzü değerlerinde fiziksel model değerlerinden daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Su yüzü değerlerindeki bu değişiklik basınç değerlerine yansımamış ve kanalın hemen her noktasında elde edilen basınç değerleri ilgili model kullanılmadan oluşan çizgiyi takip etmiştir. Bu durum akışın hidrolik karakteristiklerine ters düşmektedir. Kanal sonuna doğru artan hava sürüklenmesi ile birlikte akışın basıncında azalma beklenmektedir. Ancak değişen akış koşullarının etkisi air entrainment modelinde görülmemiştir.

Nitekim bu durum önceki araştırmacıların dolusavak boşaltım kanallarındaki karakteristikler üzerinde sayısal analiz programlarının hava sürüklenmesi modelinin etkisini nicel olarak değil nitel olarak tespit ettiğini belirtmelerindeki sebep tam olarak bu şekilde ortaya çıkmaktadır. Çünkü daha önce belirtildiği üzere sayısal analizde akış karakterisriklerine etki edecek hava sürüklenmesinin gerçekleşmesi için daha güçlü türbülans seviyelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Sıçratma eşiği sonrasında oluşan jet profillerinde ve kuyruk suyu kanalında sürükleme modelinin kullanılmasıyla jet profil mesafeleri ortalama %12 oranda kısalmış, kuyruk suyu kanalı tabanındaki basınçlarda da %60'a varan oranda düşüşler meydana gelmiştir. Oluşan bu vaziyet, ilgili air entrainment modelinin akış karakteristikleri üzerindeki etkisinin ortaya çıkması için sürüklenen hava hacim miktarının etkili olduğu sonucunu ortaya çıkarmaktadır.

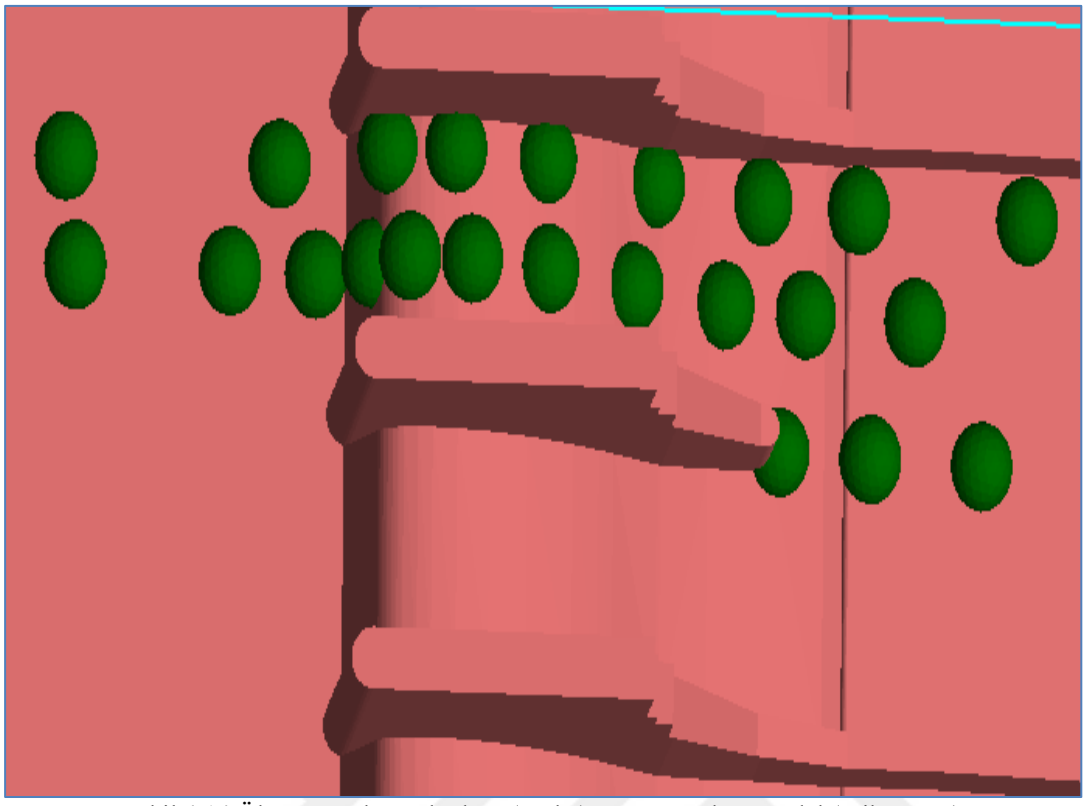
Fiziksel Model çalışmalarında Q12500 $m^3/s$ debi için şut kanalının 0+81.5 / 0+256.5 / 0+456,5 /0+496(eşik sonu) km'lerinde ölçülen hızlar ile sayısal analiz sonucu elde edilen hızlar ile ilgili olarak; boşaltım kanalının orta kısımlarına kadar hız değerlerinin uyumlu olduğu kanal sonuna doğru fiziksel modele kıyasla sayısal analiz modelinde hız değerlerinde daha fazla artış elde edildiği, air entrainment modeli kullanılmasıyla kanal sonundaki hız farkının azaldığı tespit edilmiştir. Oluşan bu durumun da hava sürüklemesi etkisiyle kayma gerilmesinin azalması ve hızın artması teorisine zıt olduğu görülmüştür. Sıçratma eşiği sonunda gerek flip bucket gerekse de varyantlarda eşik içerisindeki çevrinti etkisiyle hız değerlerinde düşüş görülmüş bu durum sayısal analiz sonuçları için de geçerli olmuştur. Varyantlarda diş üstündeki hız değerleri diş yarıklarındaki değerlere göre daha fazla düşüş göstermiştir (Tablo 4.4-4.5, Şekil 4.30-4.31).



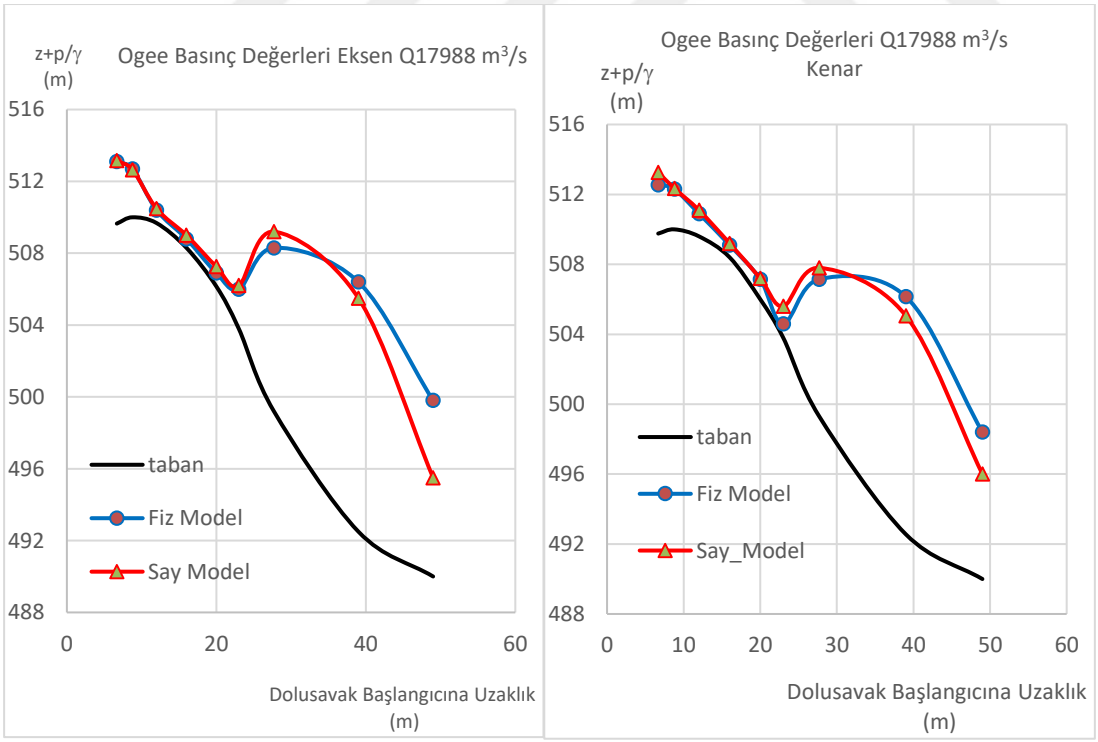

Şekil 4.12 Ölçüm yapılan noktaların görüntüsü-fiziksel model (eşik yapısı)



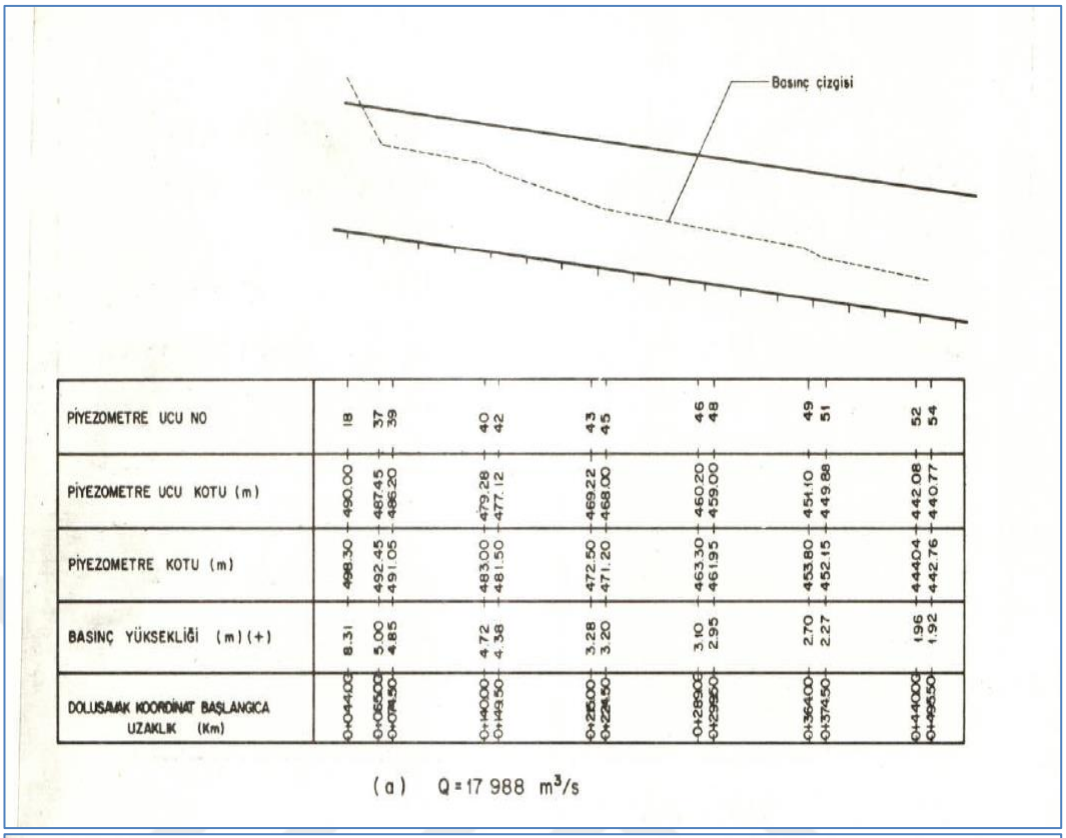

Şekil 4.13 Yaklaşım kanalı 1982 yılı fiziksel model görüntüsü



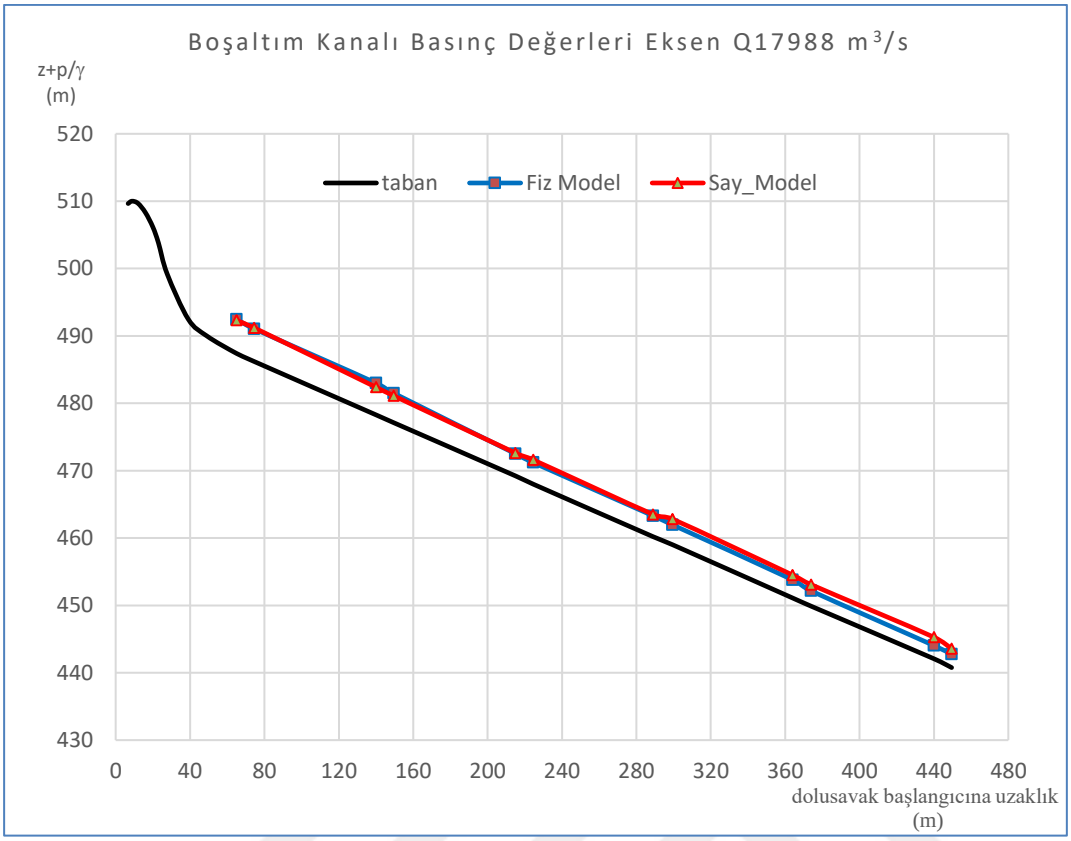
Şekil 4.14 Ölçüm yapılan noktaların(probe) görüntüsü-katı model (eşik yapısı)



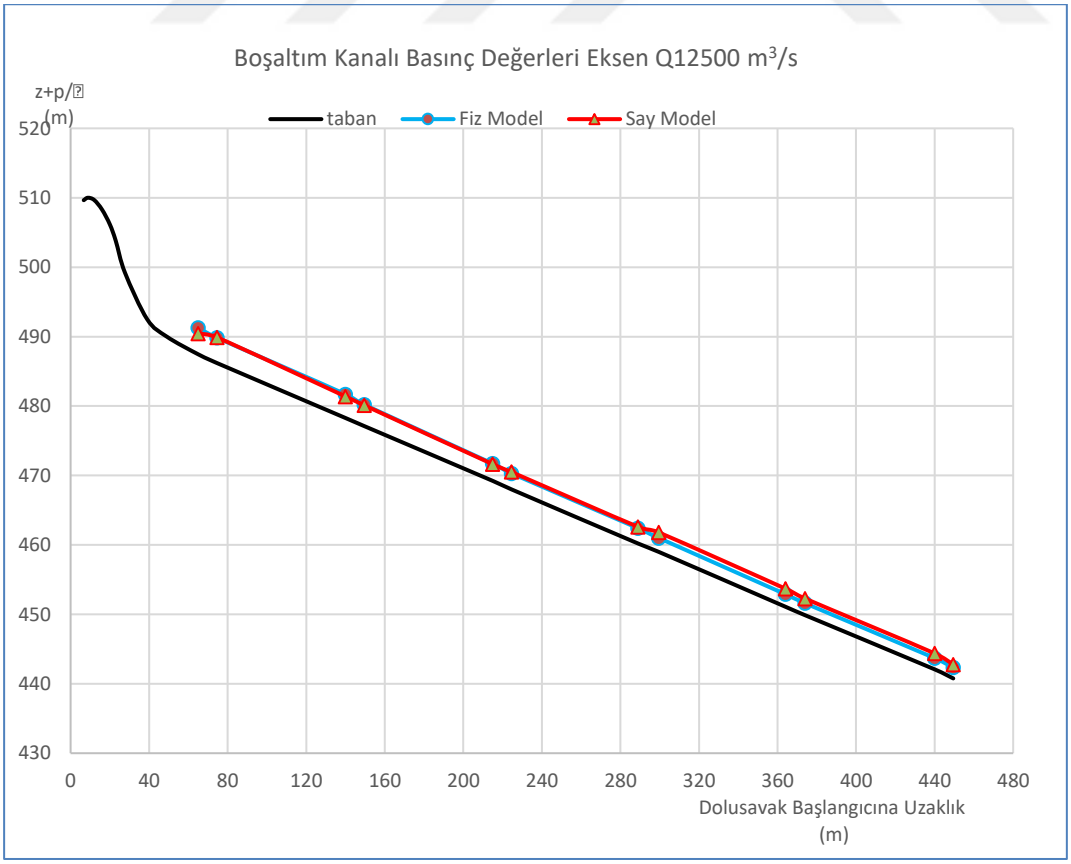

Şekil 4.15 Eşik(Ogee) yapısı basınç değerleri eksen-kenar



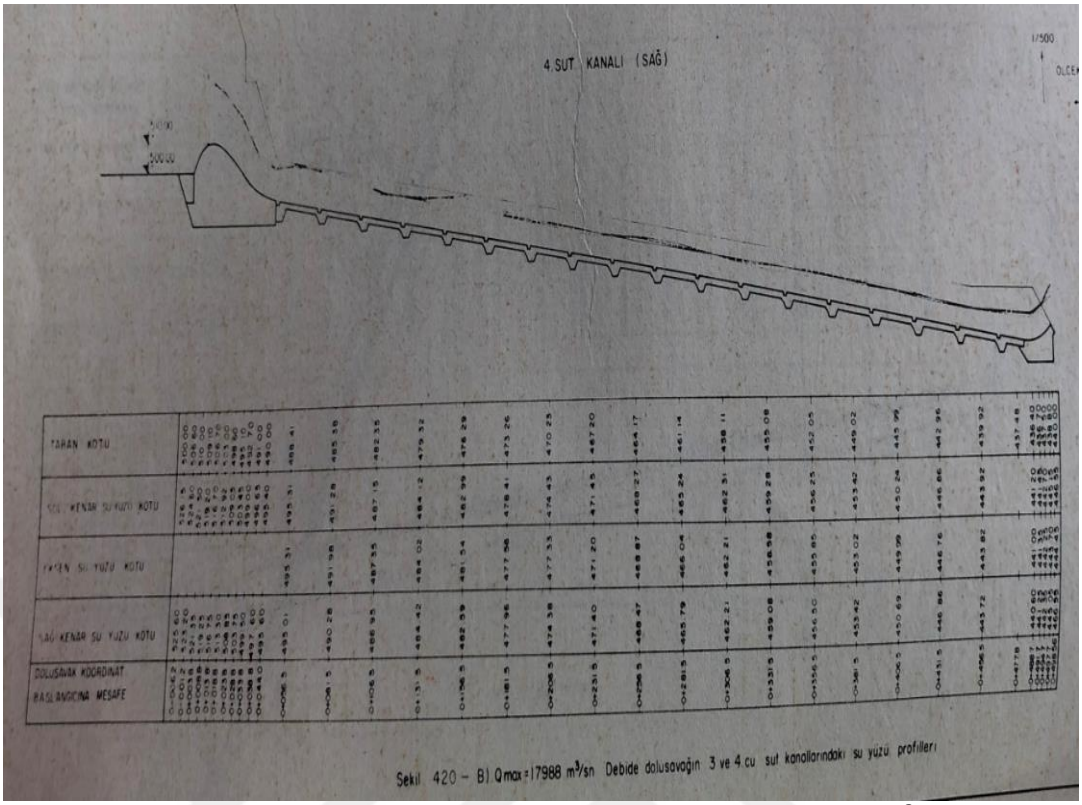

Şekil 4.16 Fiziksel model şut kanalı basınç çizgileri Q17988 ve Q12500 $m^3/s$



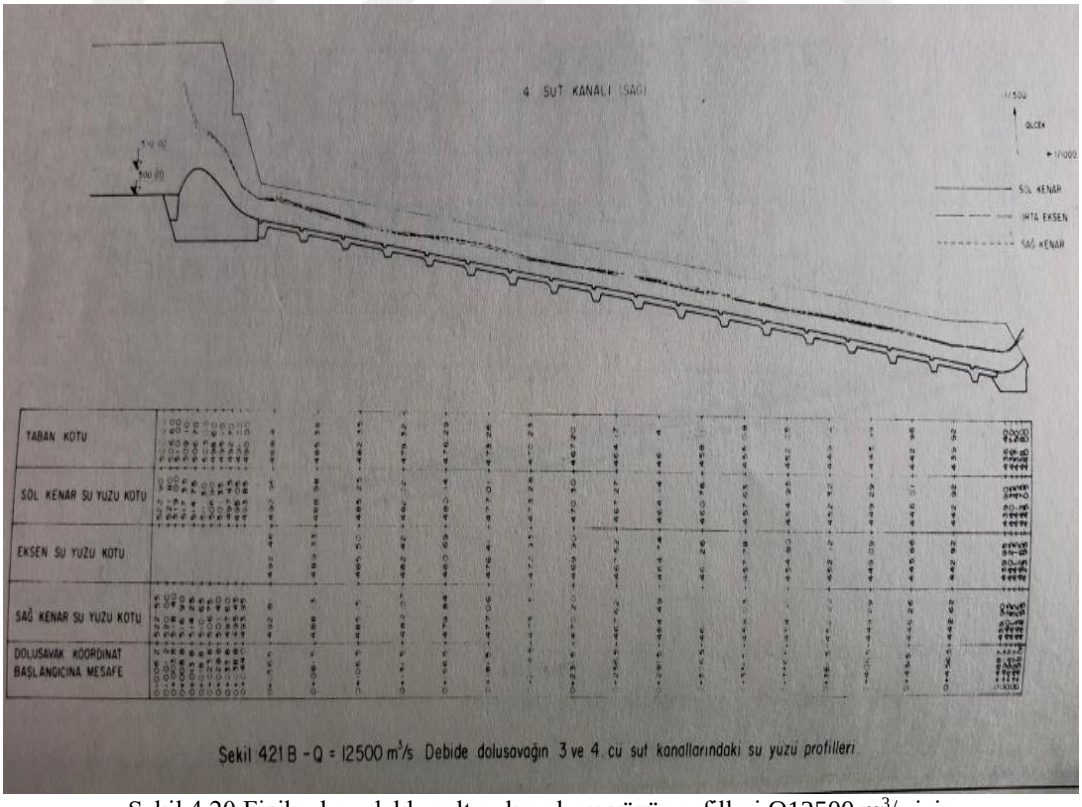

Şekil 4.17 Basınç değerleri boşaltım kanalı eksen (Q17988 $m^3/s$)



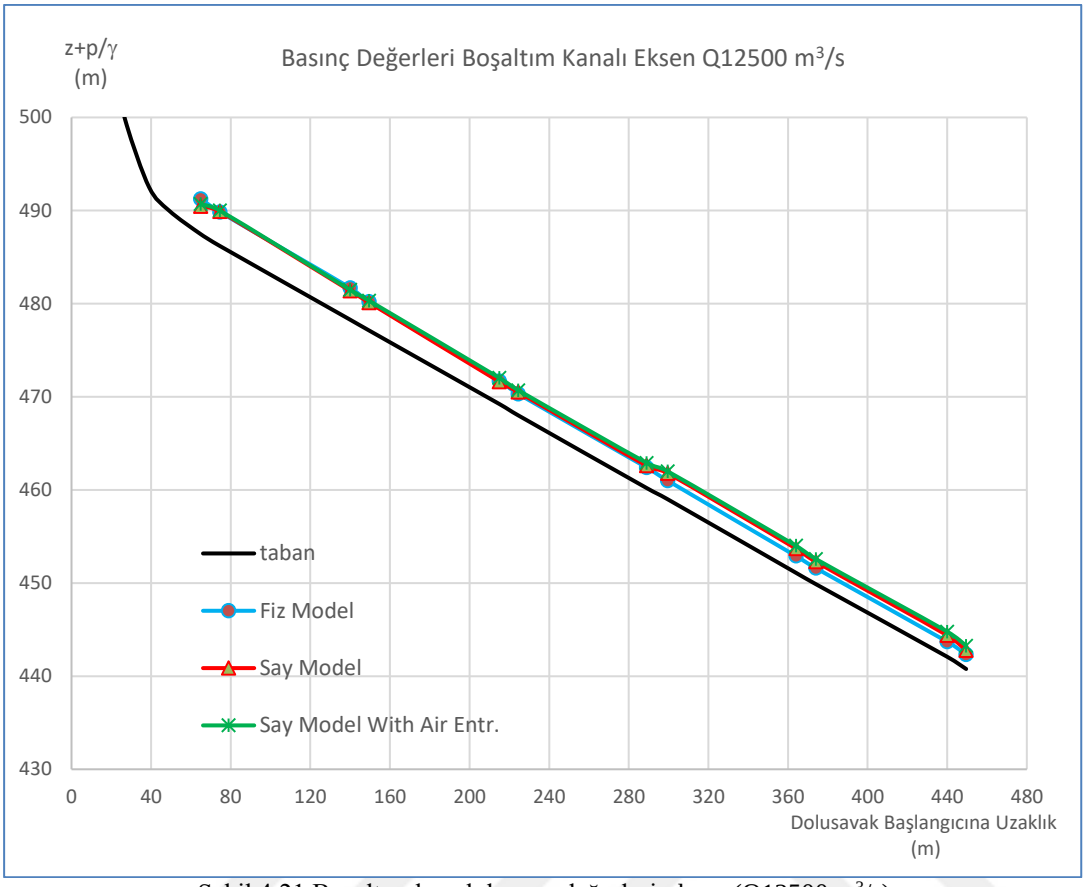

Şekil 4.18 Basınç değerleri boşaltım kanalı eksen (Q12500 $m^3/s$)



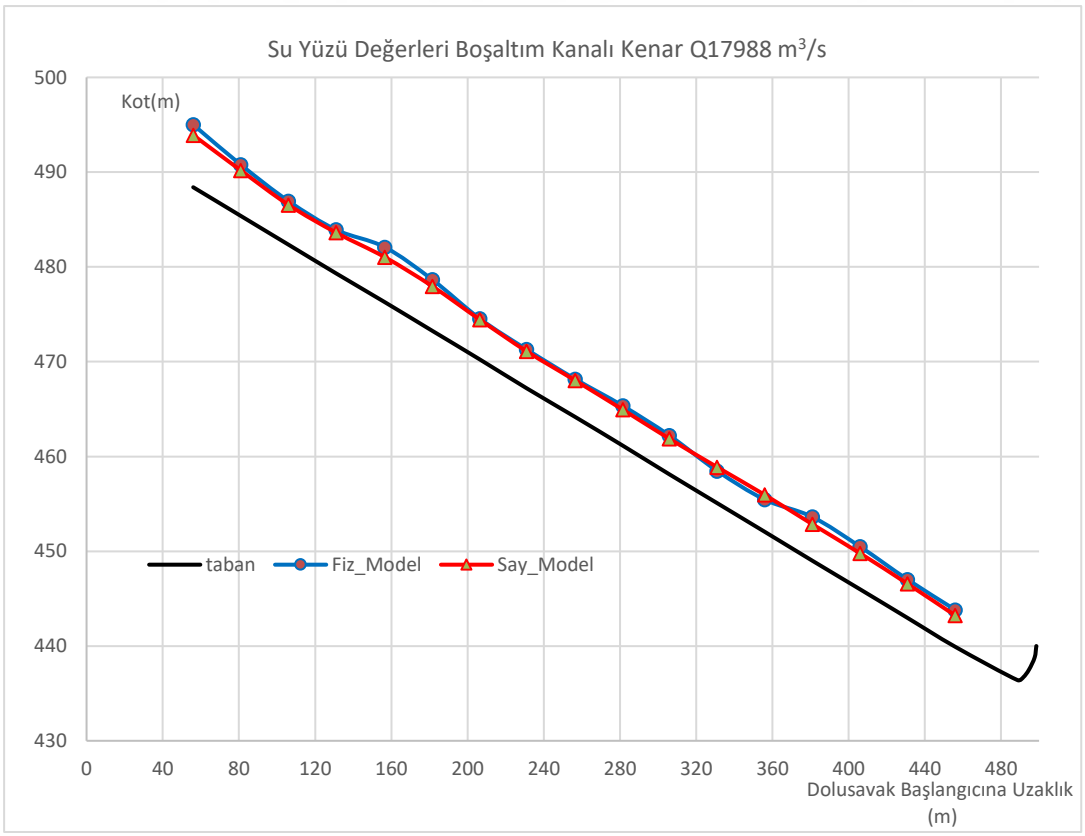

Şekil 4.19 Fiziksel model boşaltım kanalı su yüzü profilleri (Q17988 $m^3/s$)



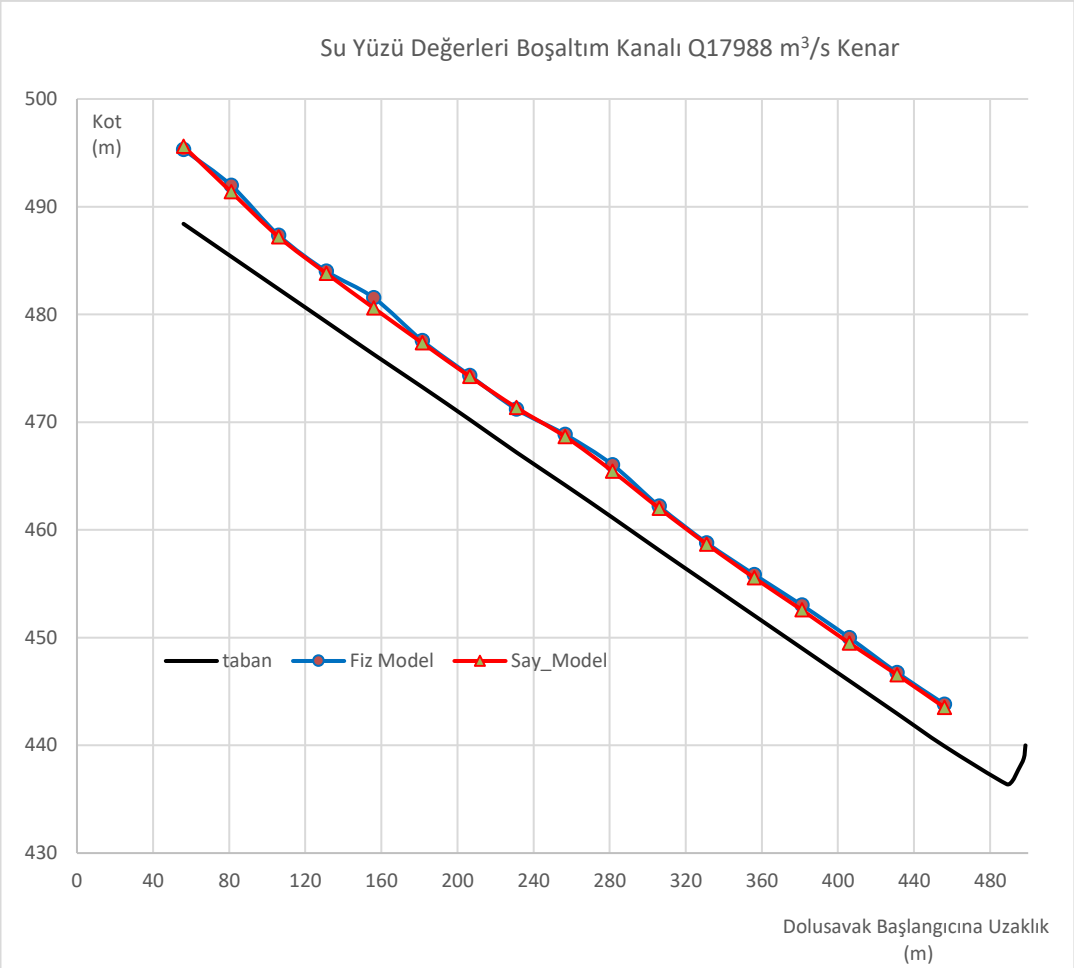

Şekil 4.20 Fiziksel model boşaltım kanalı su yüzü profilleri Q12500 $m^3/s$ için



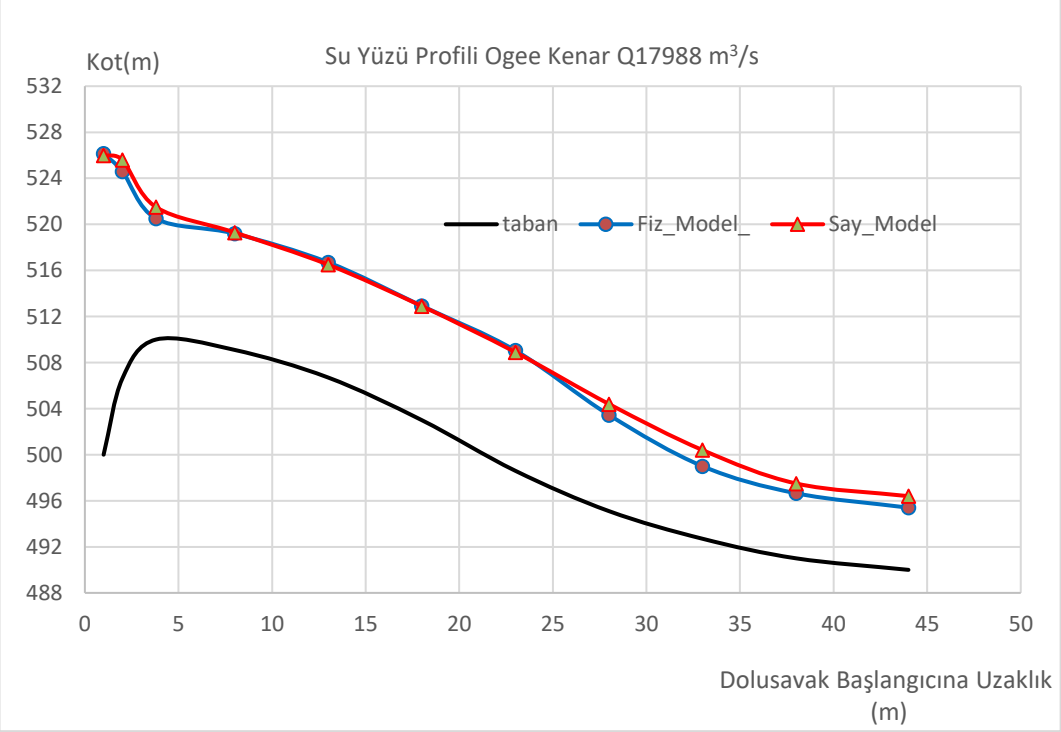

Şekil 4.21 Boşaltım kanalı basınç değerleri-eksen (Q12500 $m^3/s$)



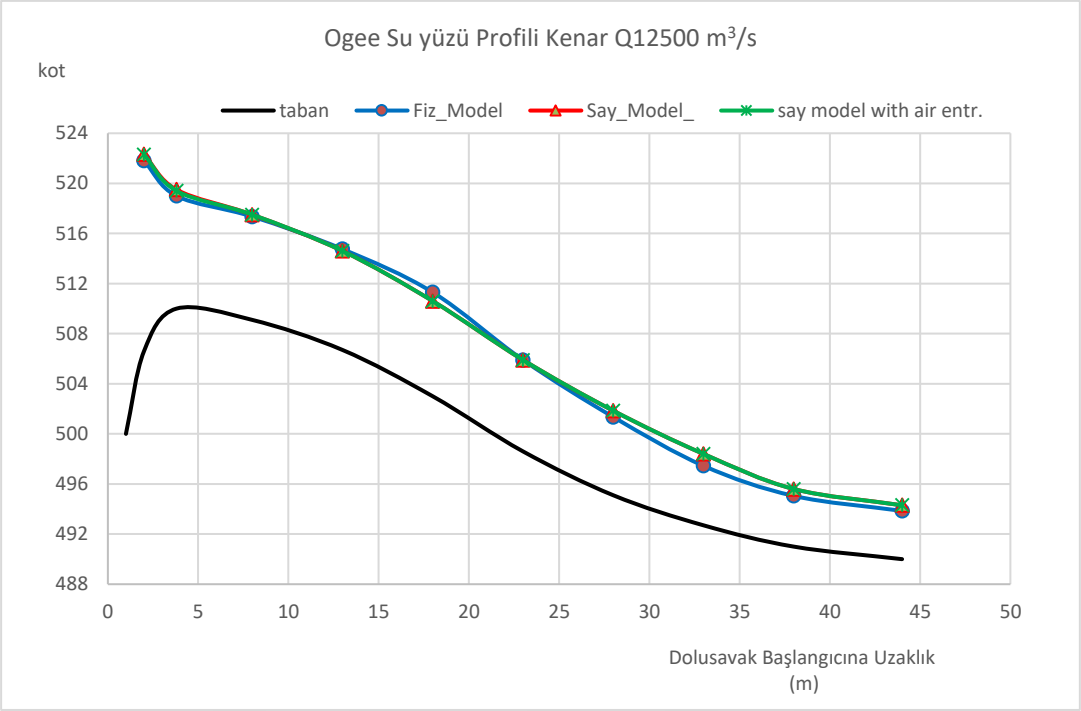

Şekil 4.22 Su yüzü değerleri boşaltım kanalı kenar (Q17988 $m^3/s$)



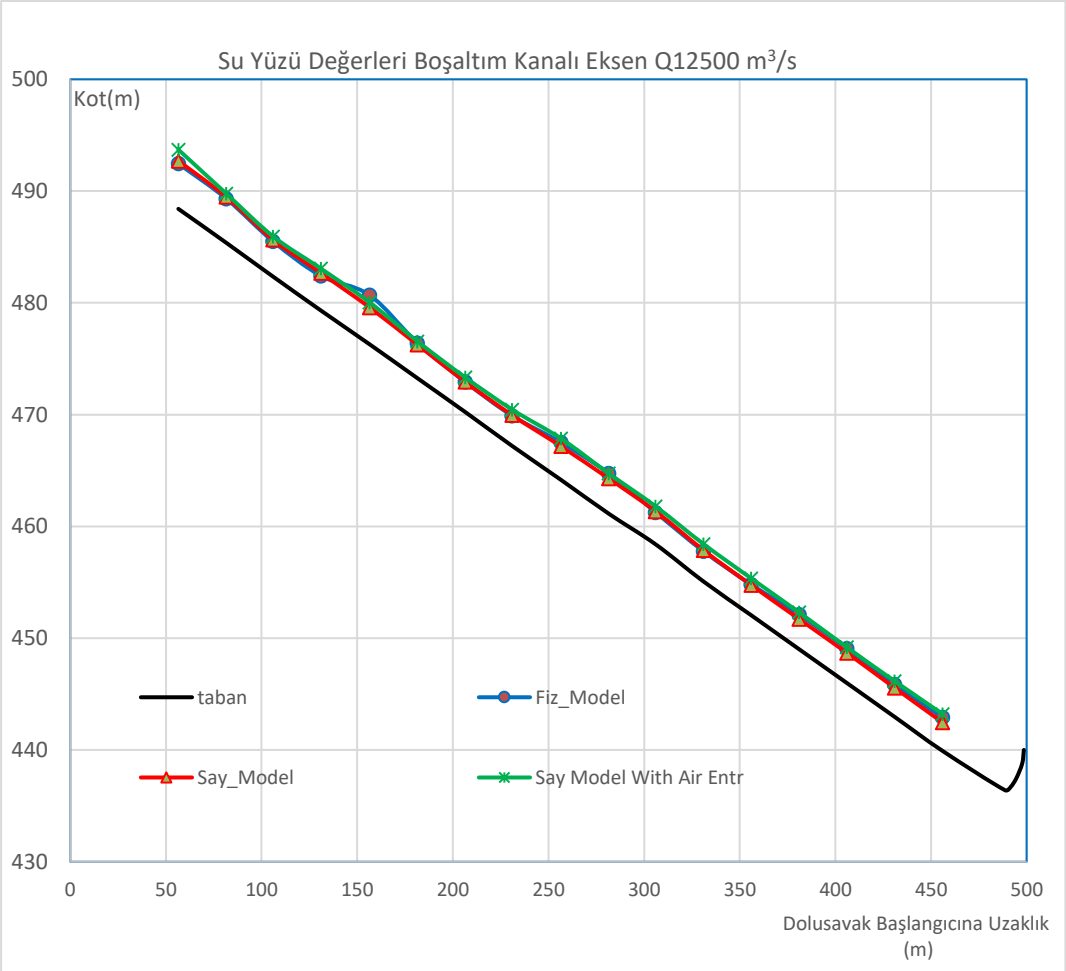

Şekil 4.23 Su yüzü değerleri boşaltım kanalı eksen (Q17988 $m^3/s$)



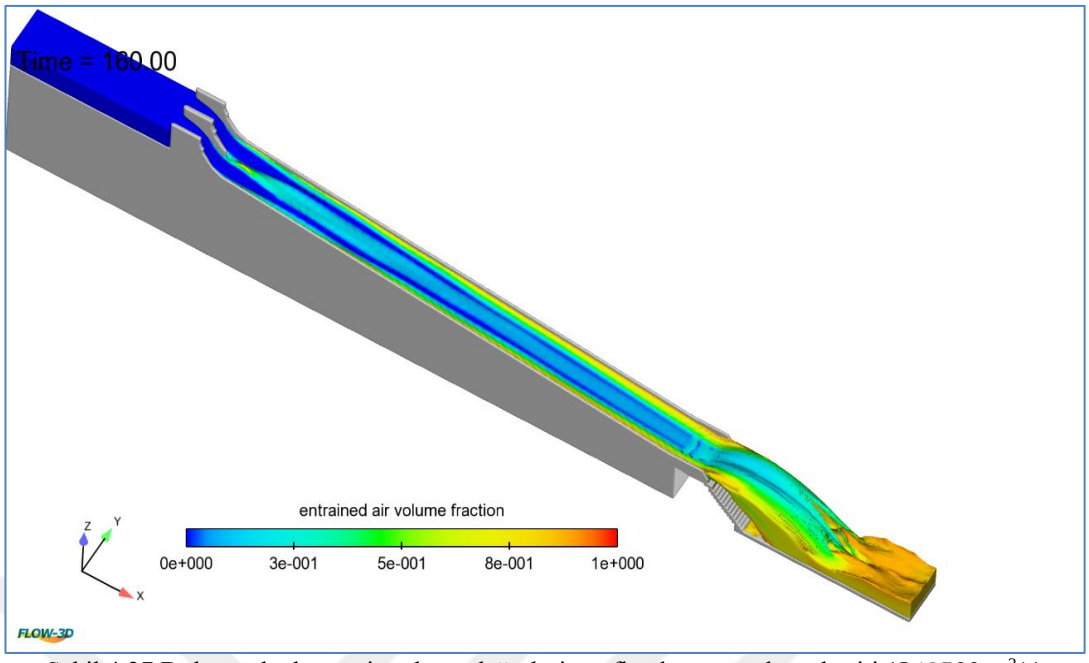

Şekil 4.24 Su yüzü değerleri ogee kenar (Q17988 $m^3/s$)



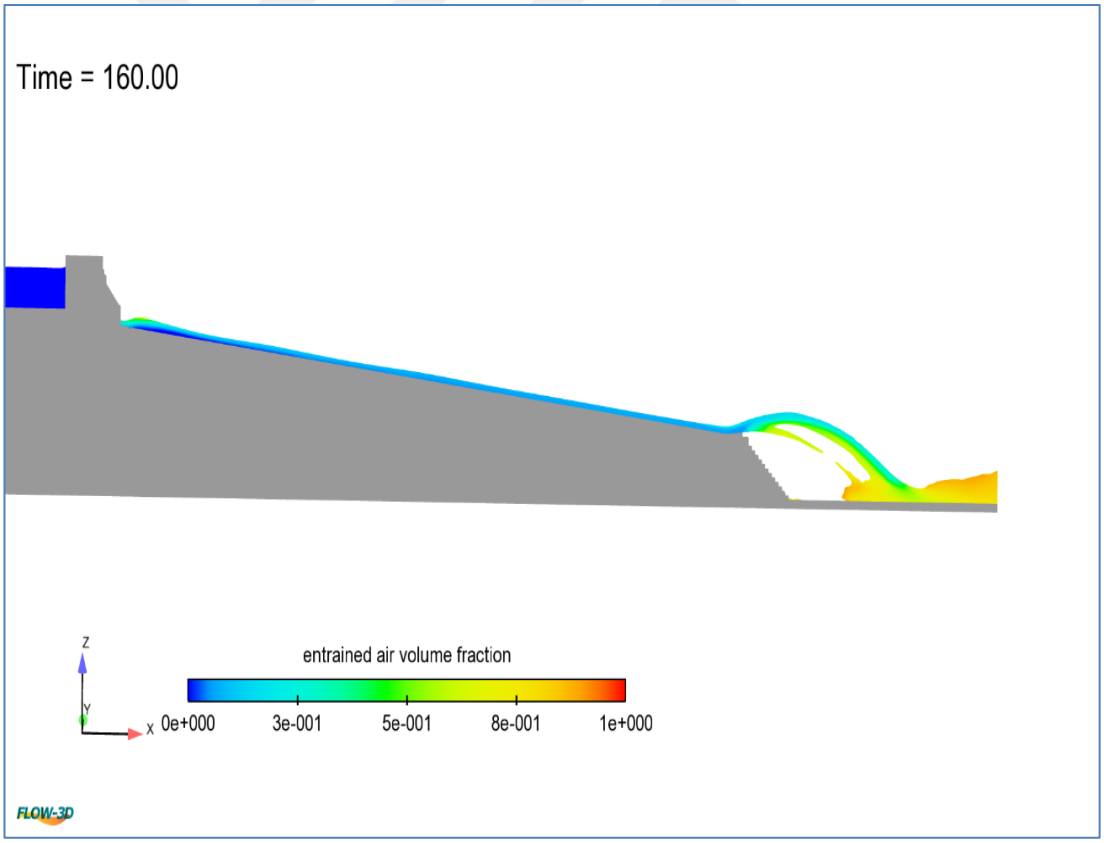

Şekil 4.25 Su yüzü değerleri ogee kenar (Q12500 $m^3/s$)



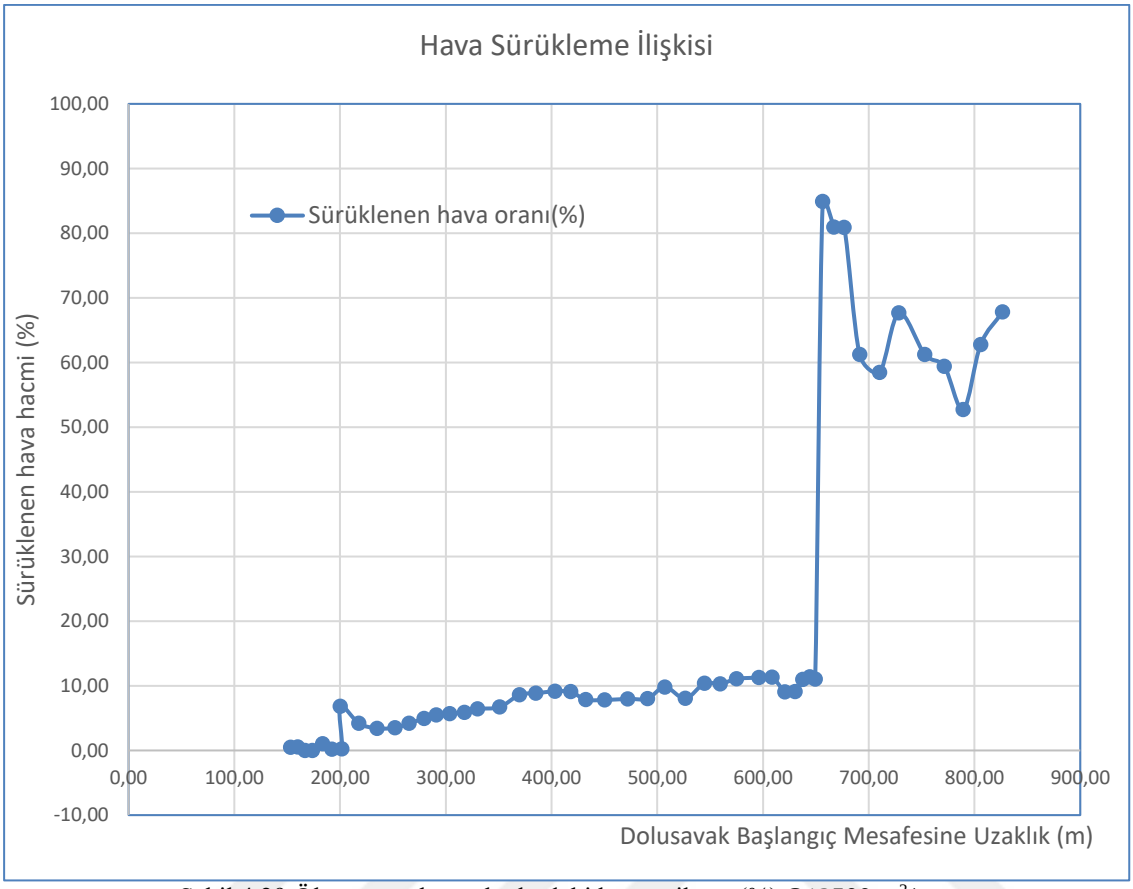

Şekil 4.26 Su yüzü değerleri boşaltım kanalı eksen (Q12500 $m^3/s$)




Şekil 4.27 Dolusavak akıma giren hava değerleri sınıflandırma ve eksen kesiti (Q12500 $m^3/s$)




Şekil 4.28 Dolusavak akıma giren hava değerleri sınıflandırma ve 2D eksen kesiti (Q12500 $m^3/s$)

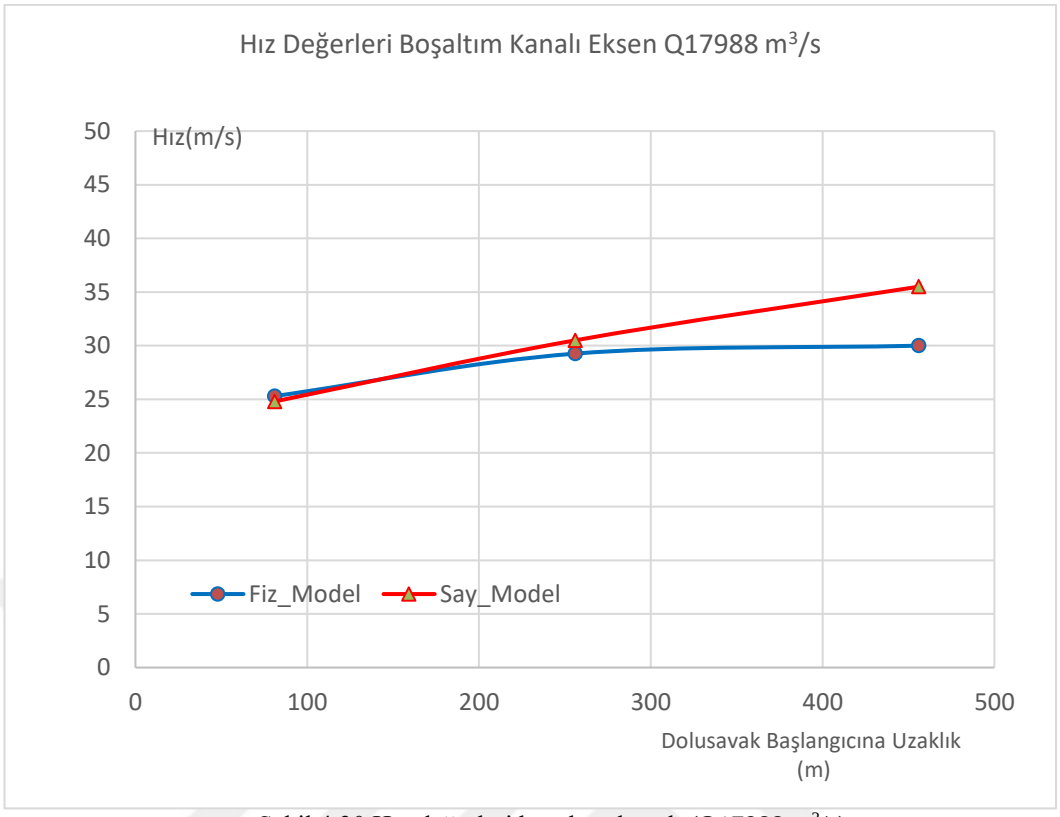



Şekil 4.29 Ölçüm yapılan noktalardaki hava miktarı (%) Q12500 $m^3/s$

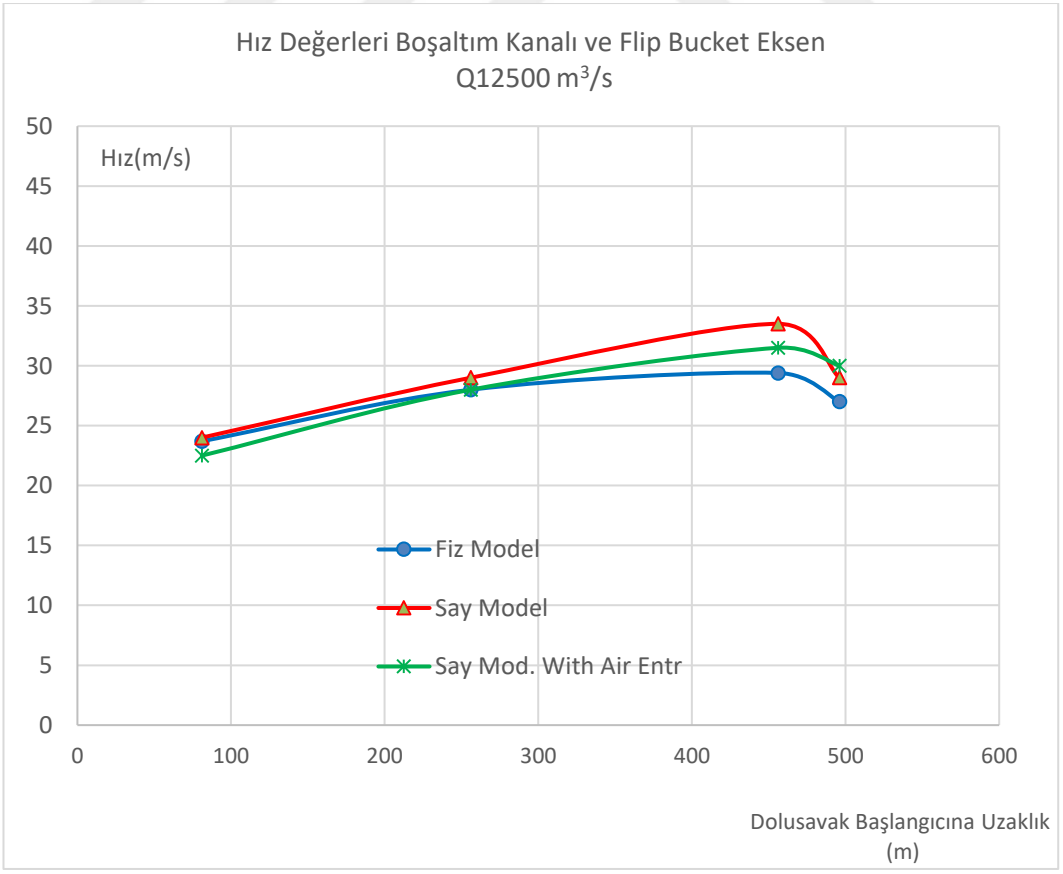
| Tablo 4.4 Boşaltım kanalı hız değerleri fiziksel model &sayısal model karşılaştırma(Q179888 $m^3/s$ için) | | | |
|---|---|---|---|
| nokta_ eksen | x(eksen) Fiziksel_Model (m) | Fiziksel Model_Hız Değerleri (m/s) | Sayısal Model_Hız Değerleri (m/s) |
| 1 | 81 | 25,3 | 25 |
| 2 | 256 | 29,26 | 31 |
| 3 | 456 | 30 | 35,5 |

Tablo 4.5 Boşaltım kanalı ve sıçratma eşiği hız değerleri karşılaştırma(Q12500 $m^3/s$)

| Nokta Eksen | X(Eksen) Fiziksel Model (m) | Fiziksel Model Hız Değerleri (m/s) | Sayısal Model Hız Değerleri (m/s) |
|---|---|---|---|
| 1 | 81 | 23,7 | 22,5 |
| 2 | 256 | 28 | 29,2 |
| 3 | 456 | 29,4 | 33,7 |
| 4(eşik sonu) | 496 | 27 | 29 |
| Varyant-I (diş üstü) | 496 | 26,3 | 29 |
| Varyant-I (diş arası) | 496 | 27,3 | 32 |
| Varyant-II(diş üstü) | 496 | 26,9 | 30 |
| Varyant-II (diş arası) | 496 | 27 | 31,5 |




Şekil 4.30 Hız değerleri boşaltım kanalı (Q17988 $m^3/s$)

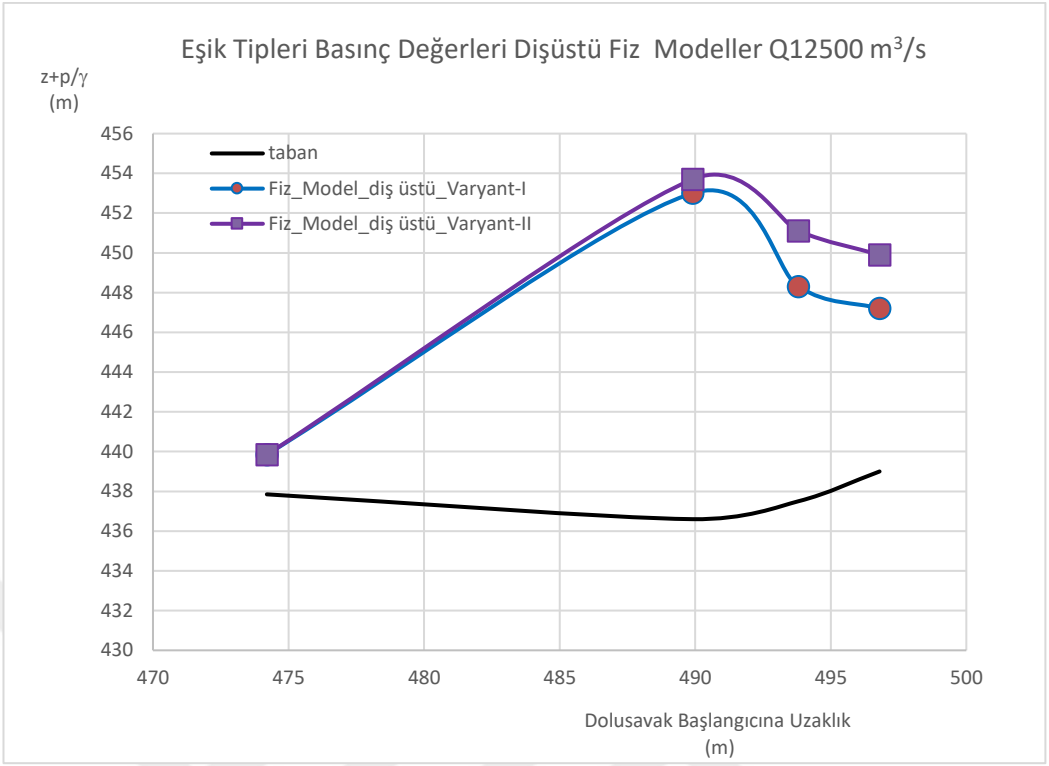



Şekil 4.31 Hız değerleri boşaltım kanalı (Q12500 $m^3/s$)

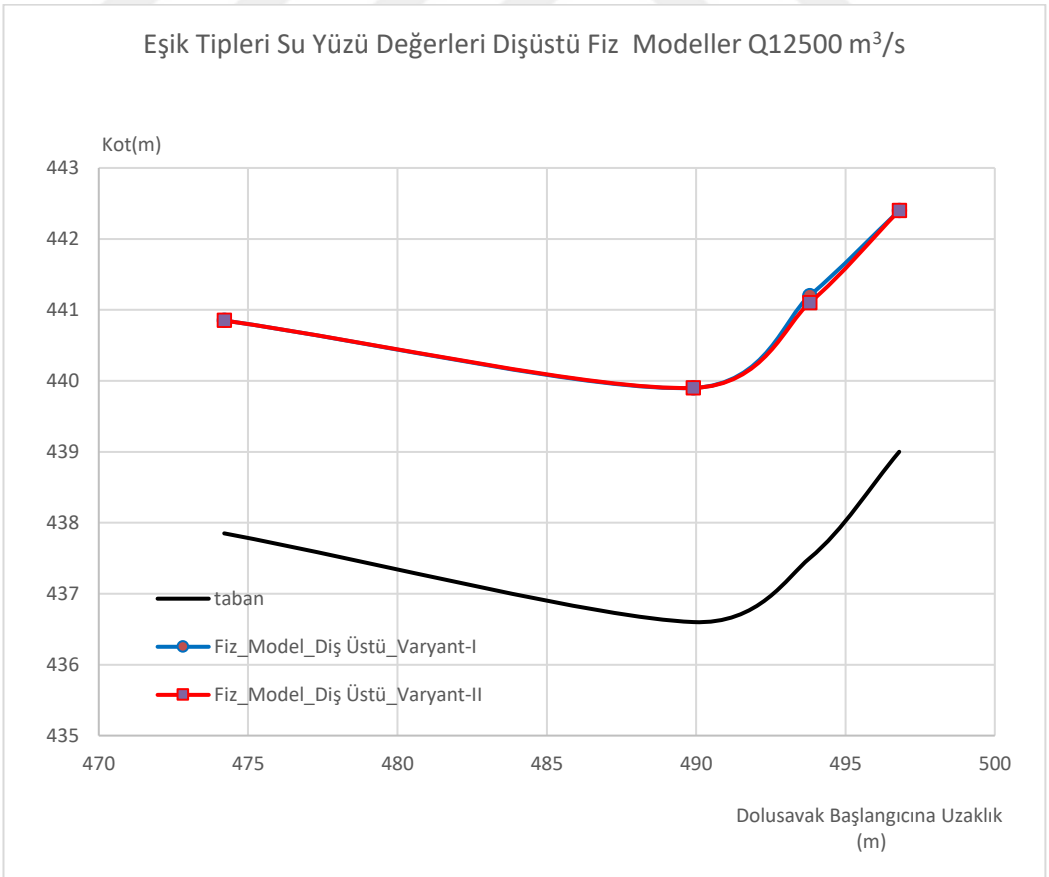
### 4.1.3 Sıçratma eşiği incelenmesi

#### 4.1.3.1 Varyant I, Varyant II (slotted bucket) basınç ve su yüzü değerleri

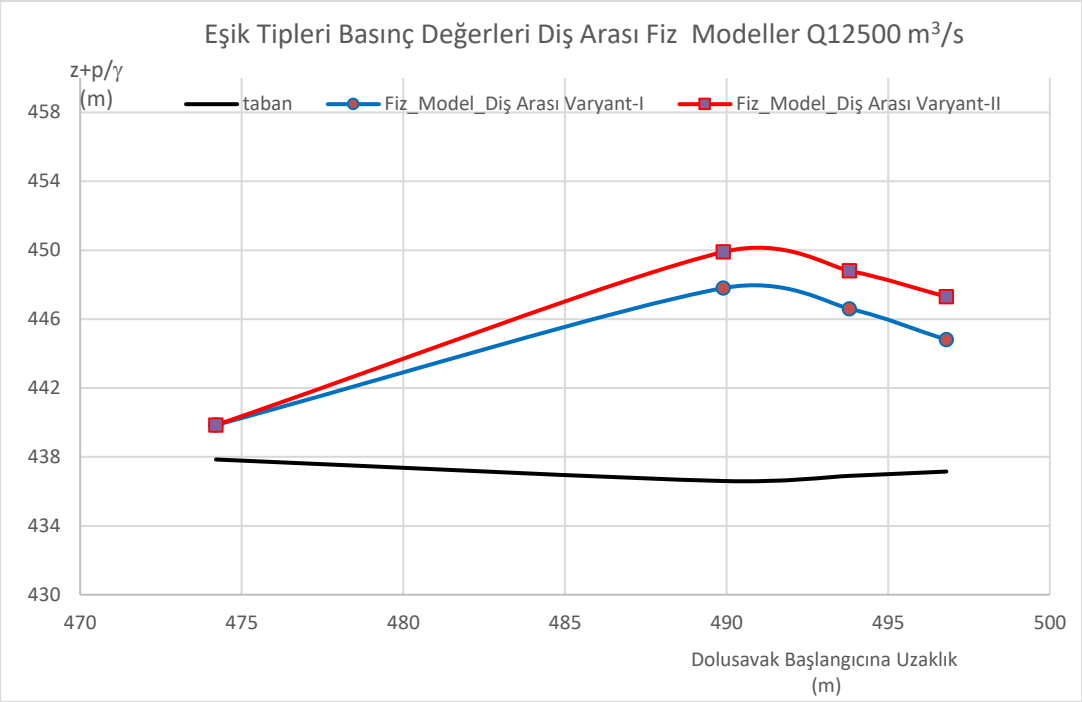
Bu bölümde sıçratma eşiğindeki varyantlarda elde edilen sonuçlar değerlendirilmektedir. Fiziksel modelde eşik içerisinde olmak üzere üç farklı noktada ölçümler yapılmıştır. Bilindiği üzere varyantlar yani slotted bucket, çevirmeli(flip bucket) sıçratma eşiğinden sonra denenen tasarımlardır. Varyant-I tasarımının diş aralıkları Varyant-II'ye nazaran daha küçük, diş üst genişlikleri ise daha büyüktür. Diş aralığının büyümesiyle sisteme sürüklenen hava girişinin artması amaçlanmıştır. Yapılan değişiklik sonrası fiziksel modellerde eşik içerisinde ikinci varyantın basınç miktarında artış gözlenirken su yüzü profillerinde kısmi de olsa azalma gözlenmiştir. Basınç kadar su yüzü değerlerinde görülmeyen farkın nedeni fiziksel modelde kullanılan ölçek etkisi olabilir. Fiziksel modellerde eşik içerisinde artan basınçla birlikte sıçrama sonrasında sisteme daha fazla hava girişi gözlenmiş ve jet profilleri daha kısa mesafeye düşmüştür. İlgili durumların sayısal analizde de tespit edilmesi analizlerin kalitesini göstermesi açısından dikkat çekicidir. Air entrainment modeli kullanılmadan tanzim edilen sayısal analizlerde elde edilen sonuçlarda sıçratma eşiği yapısında su yüzü değerlerinin eşik içi çevrintide oluşan hava-su ilişkilerinden dolayı fiziksel model değerlerinden daha küçük, bu duruma paralel olarak sıçratma eşiğindeki basınç değerlerinde de tam tersi durumun oluştuğu tespit edilmiştir. Air entrainment modeli kullanıldığında su yüzü profillerinde fiziksel model değerlerinin üstünde artış gerçekleşmiştir. Boşaltım kanalına kıyasla daha fazla artışın görülmesi de eşikteki çevrintiden kaynaklanmaktadır. Yine fiziksel modelin ölçekli olması model su yüzü değerlerinin düşük kalmasında etkili olmuştur. Basınç değerleri ile ilgili olarak, Varyant-II diş üstündeki değerlerinde bir miktar artış görülürken Varyant-I'de ise bir miktar azalış kaydedilmiştir. Azalan ve artan değerlerin %5 seviyelerinde olduğu görüldüğünden yukarıda da değinildiği üzere air entrainment modelinin dolusavak boşaltım kanalı ve sıçratma eşiği dahil olmak üzere bu kısımlardaki hidrolik karakteristiklere etkisi olmamıştır. Sıçratma eşiğindeki sayısal analizlerde eşiğin kavisli olduğu da göz önüne alındığında analizlerde kullanılan "blocked to volume" ağ cinsinin elde edilen sonuçlara olumlu katkısı göz ardı edilemeyecektir. İlgili sonuçlara ait grafikler sırasıyla fiziksel model sonuç grafikleri ve her iki çalışmaların karşılaştırılması verilmiştir (Şekil 4.32-4.43).



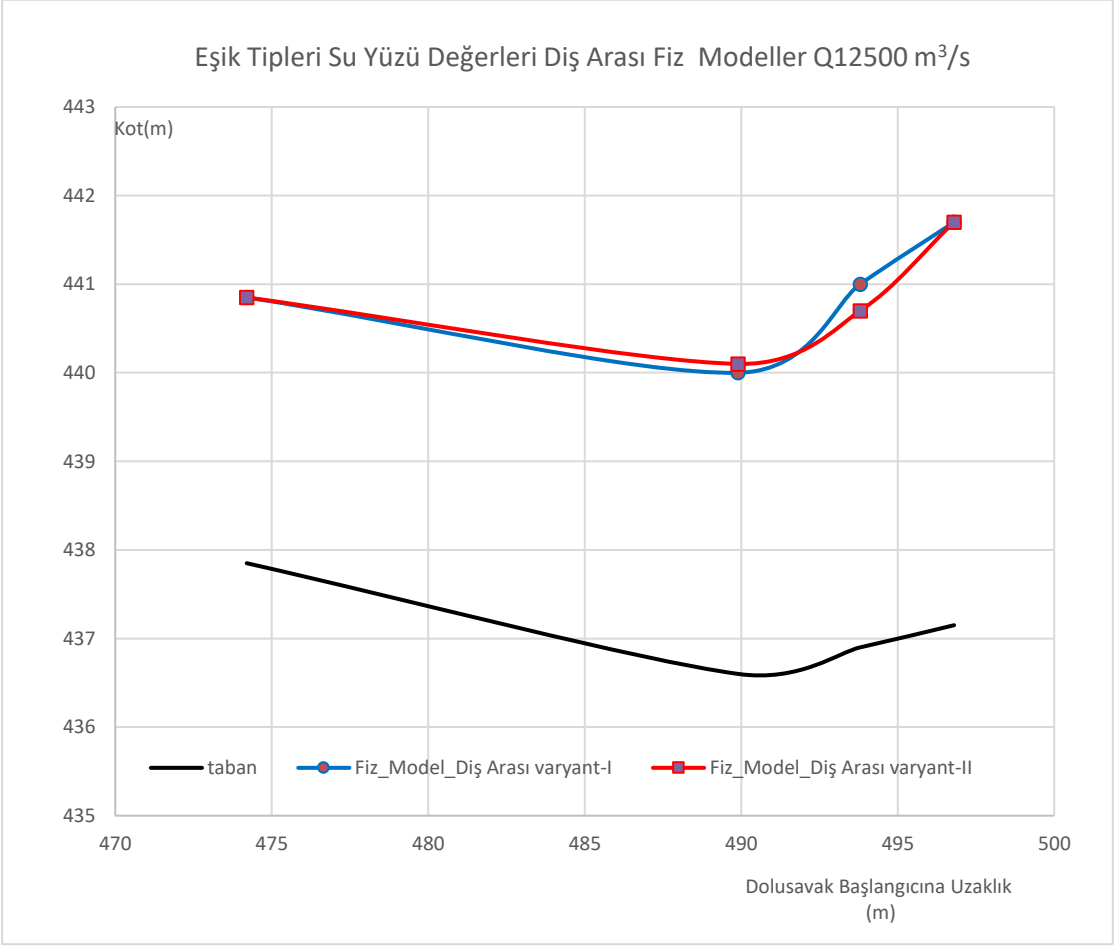

Şekil 4.32 Basınç değerleri diş üstü fiziksel model sonuçları varyantlar karşılaştırma



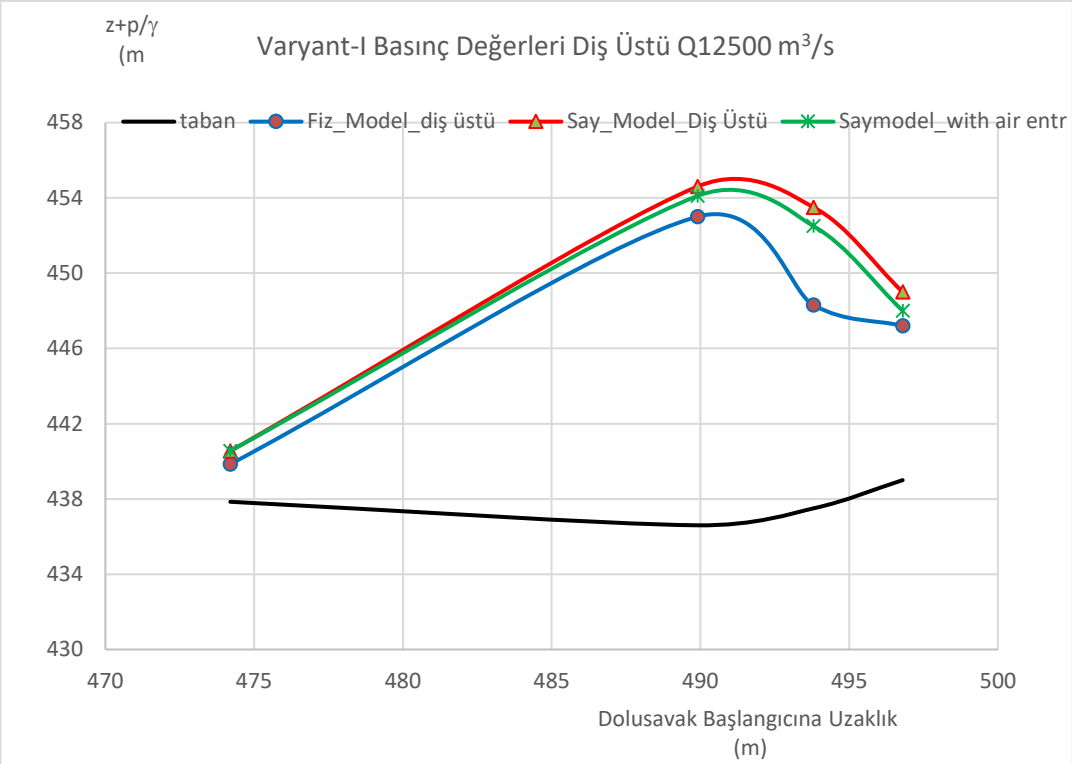

Şekil 4.33 Su yüzü değerleri diş üstü fiziksel model sonuçları varyantlar karşılaştırma



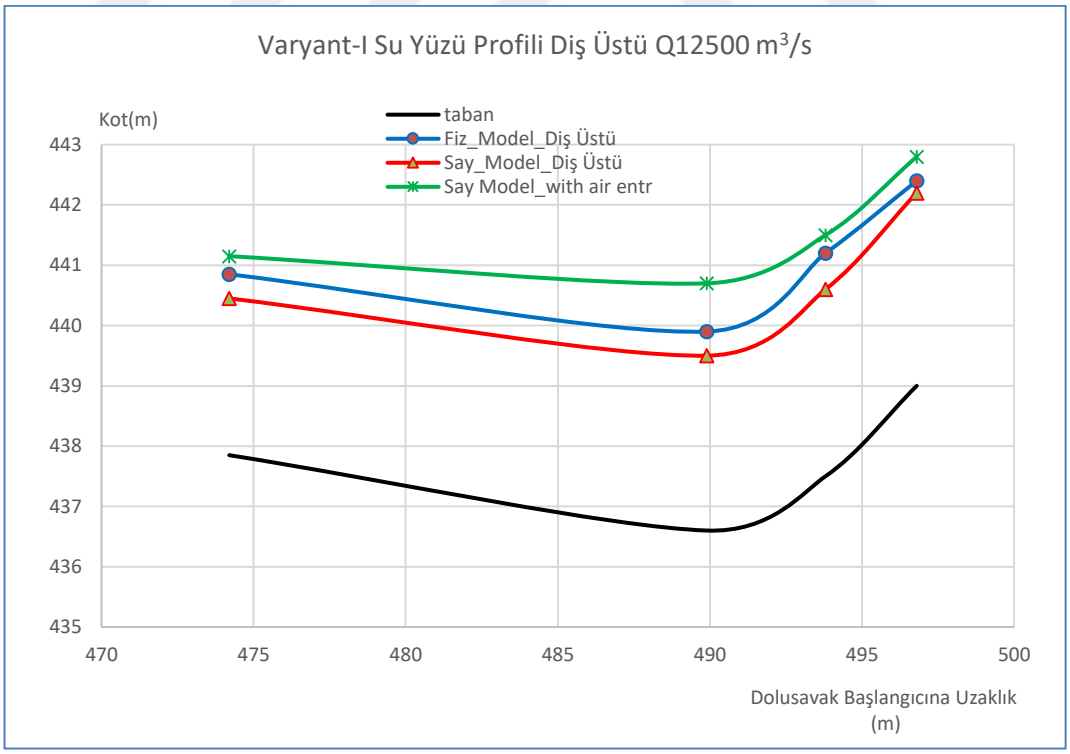

Şekil 4.34 Basınç değerleri diş arası fiziksel model sonuçları varyantlar karşılaştırma



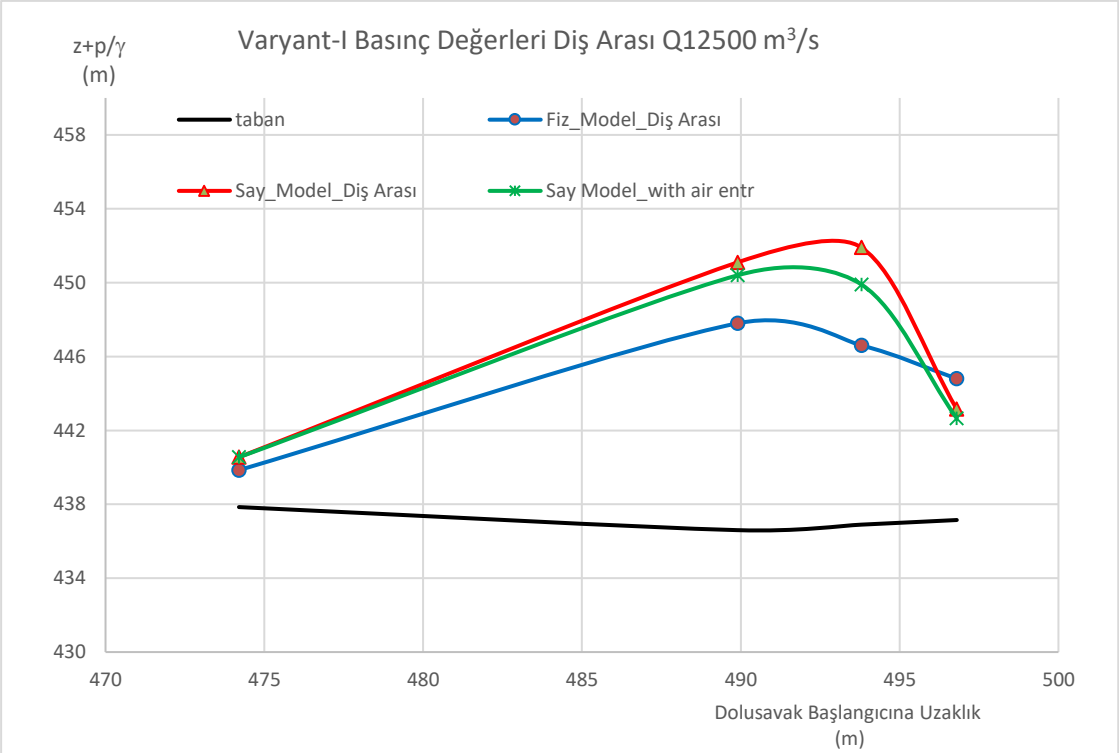

Şekil 4.35 Su yüzü değerleri diş arası fiziksel model sonuçları varyantlar için



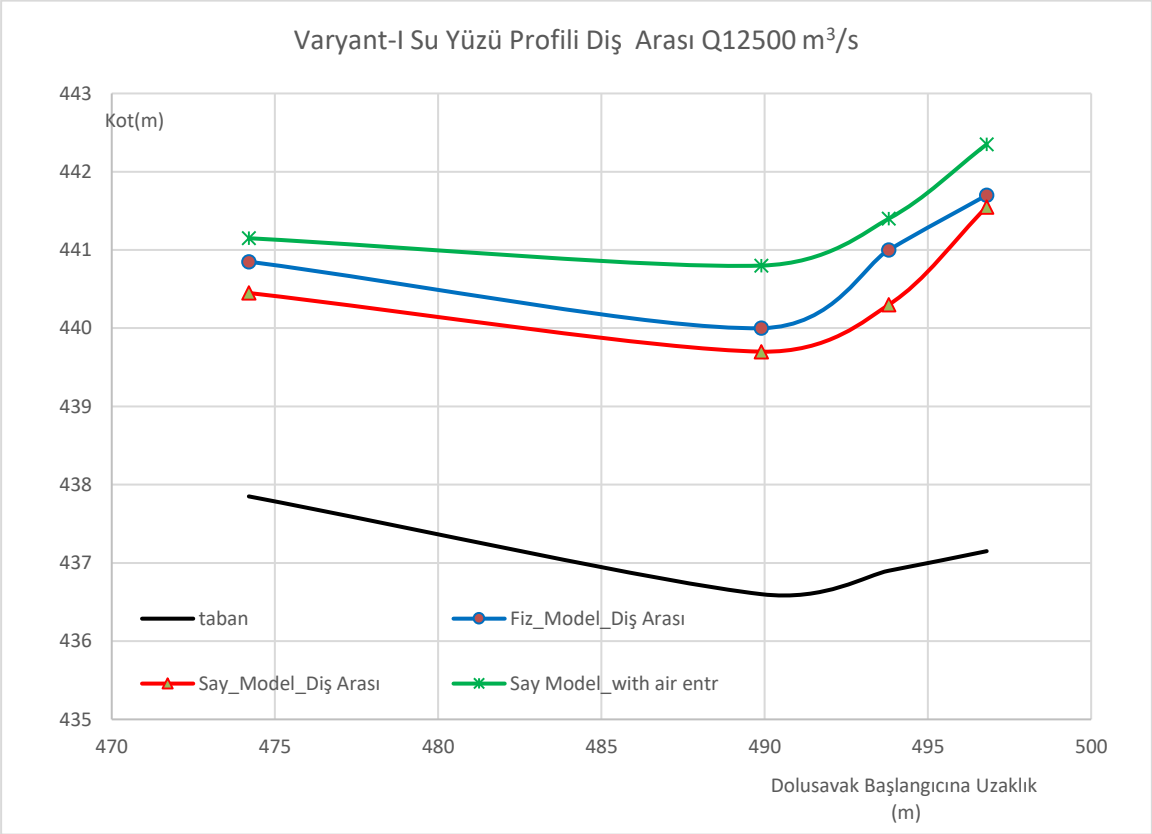

Şekil 4.36 Basınç değerleri diş üstü Varyant-I sayısal ve fiziksel model sonuçları



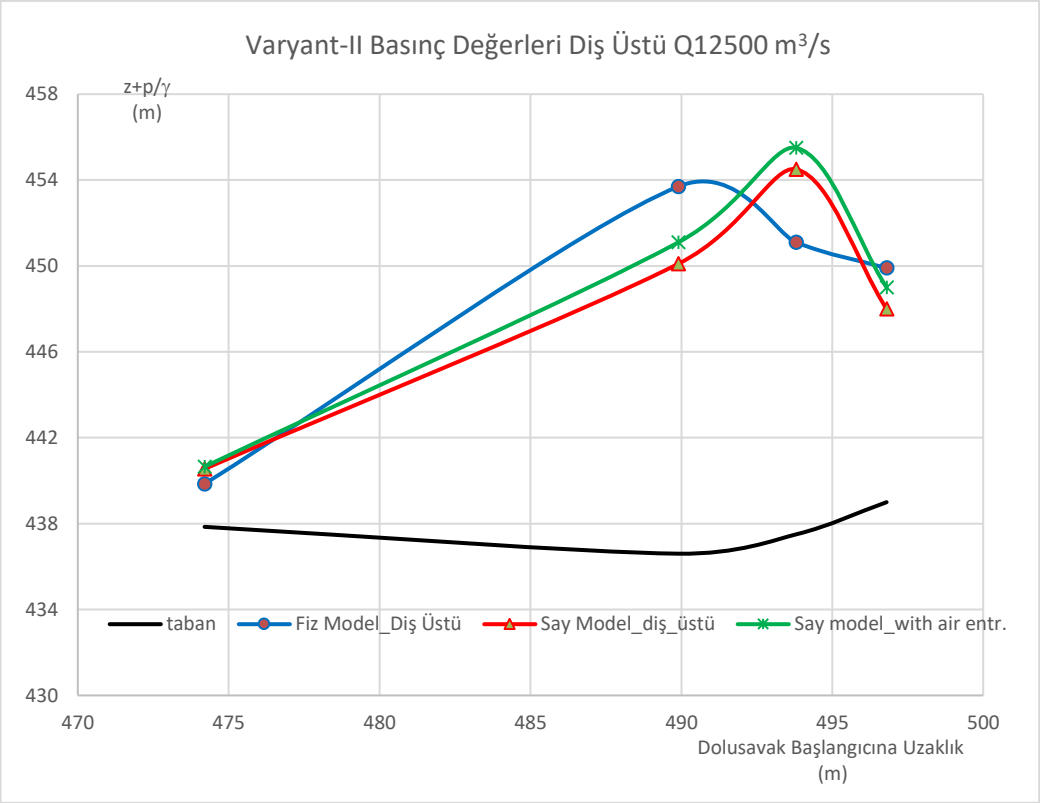

Şekil 4.37 Su yüzü değerleri diş üstü Varyant-I sayısal ve fiziksel model sonuçları



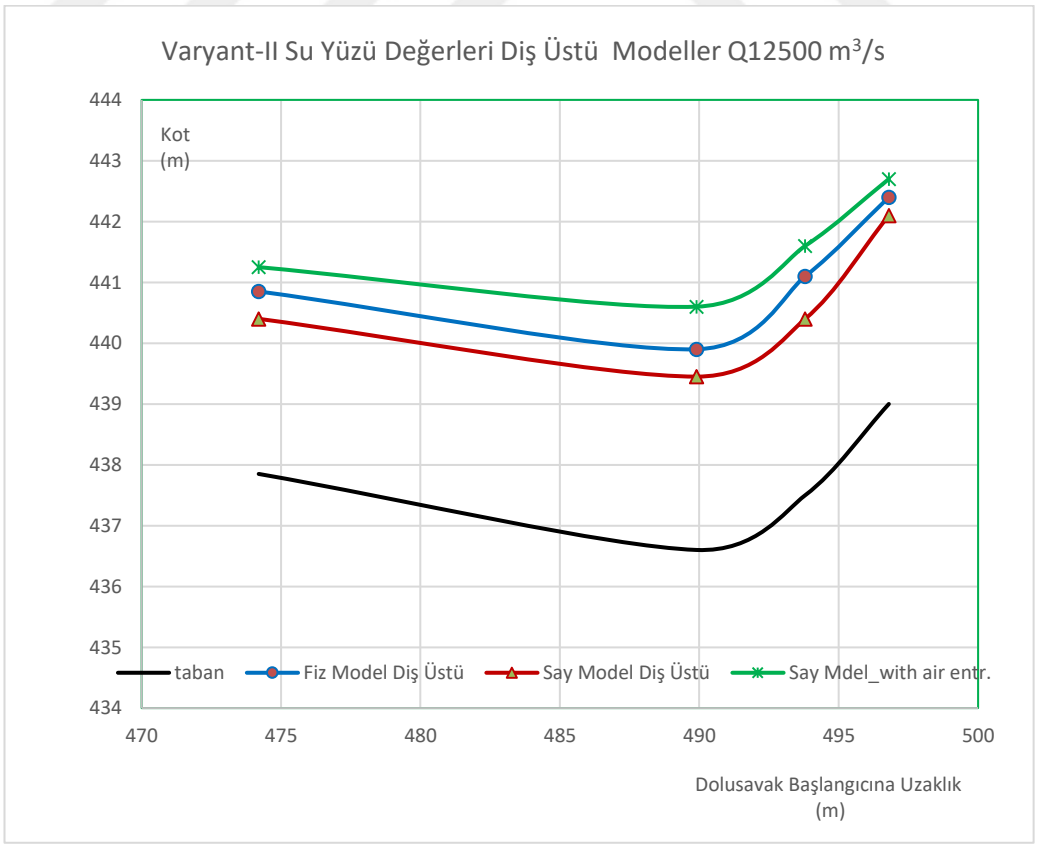

Şekil 4.38 Basınç değerleri diş arası Varyant-I sayısal ve fiziksel model sonuçları



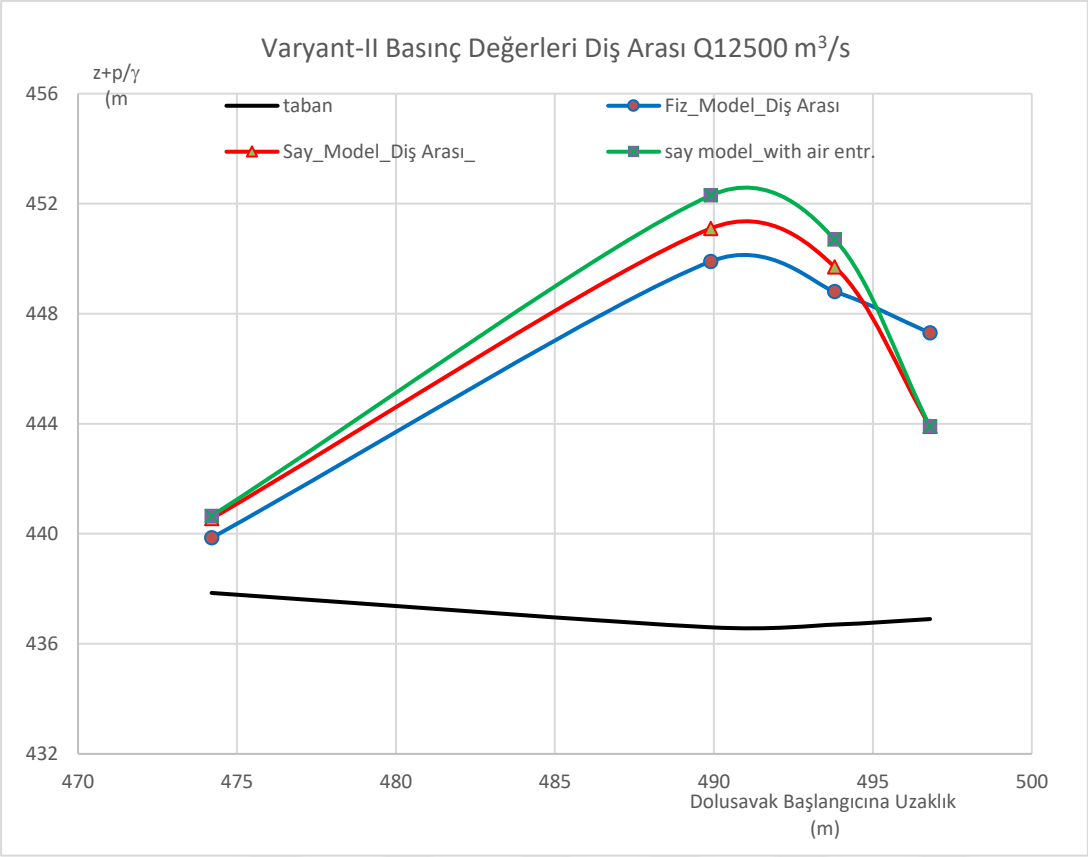

Şekil 4.39 Su yüzü değerleri diş arası Varyant-I sayısal ve fiziksel model sonuçları



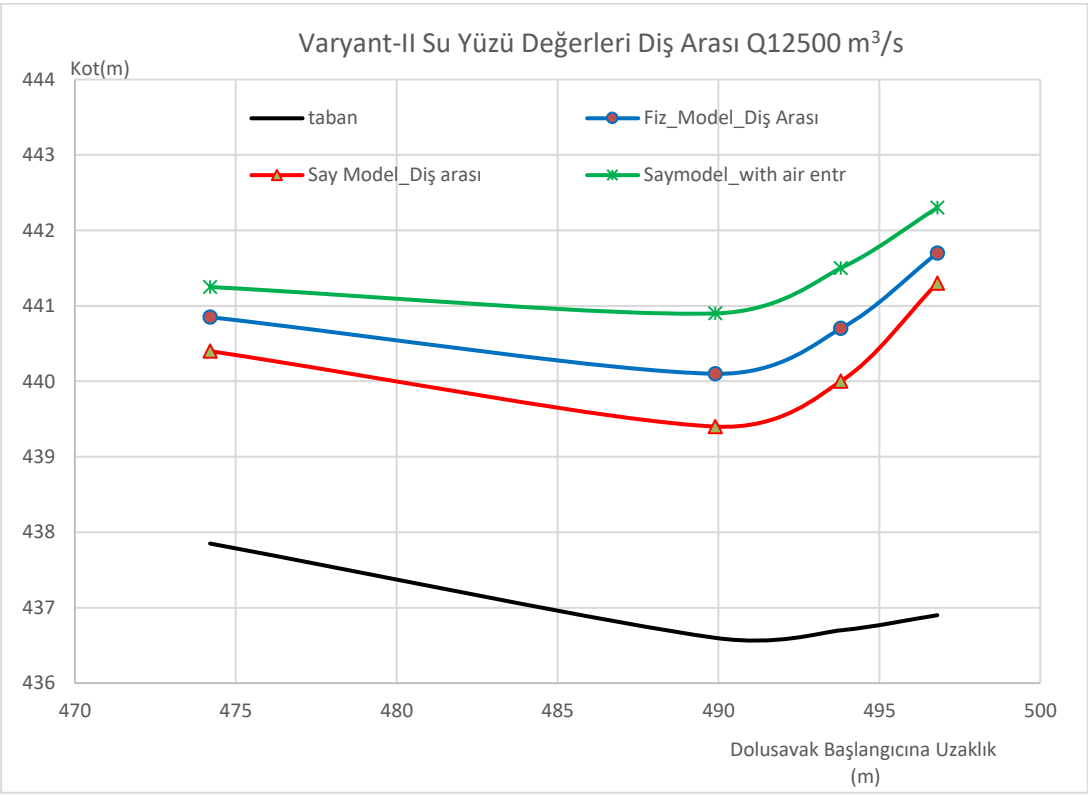

Şekil 4.40 Basınç değerleri diş üstü Varyant-II sayısal ve fiziksel model sonuçları




Şekil 4.41 Su yüzü değerleri diş üstü Varyant-II sayısal ve fiziksel model sonuçları



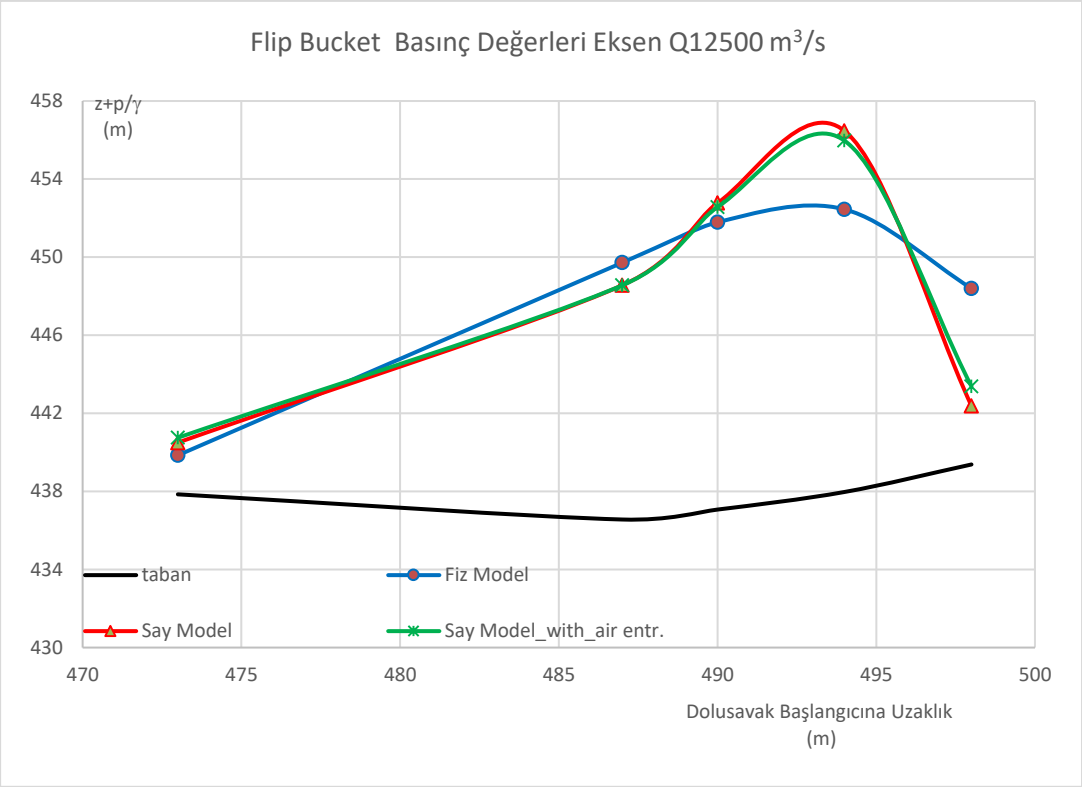

Şekil 4.42 Basınç değerleri diş arası Varyant-II sayısal ve fiziksel model sonuçları



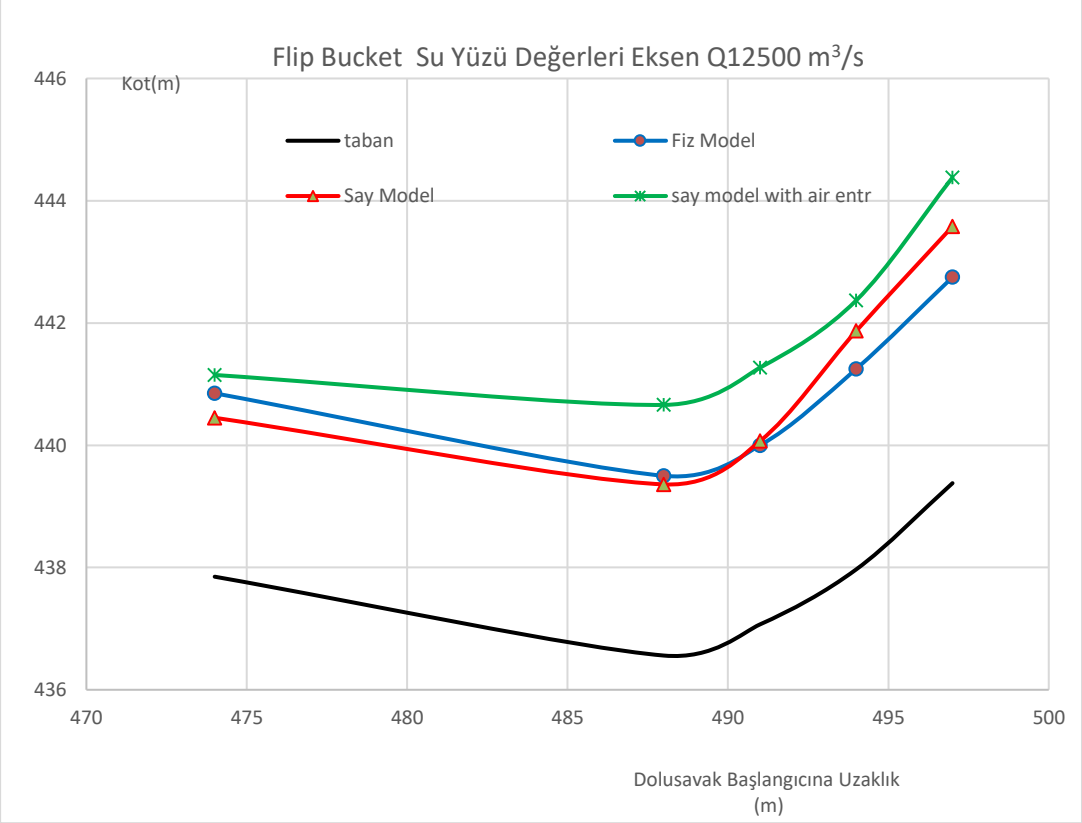

Şekil 4.43 Su yüzü değerleri diş arası Varyant-II sayısal ve fiziksel model sonuçları

#### 4.1.3.2 Sıçratma eşiği çevirmeli tip (flip bucket) basınç ve su yüzü değerleri

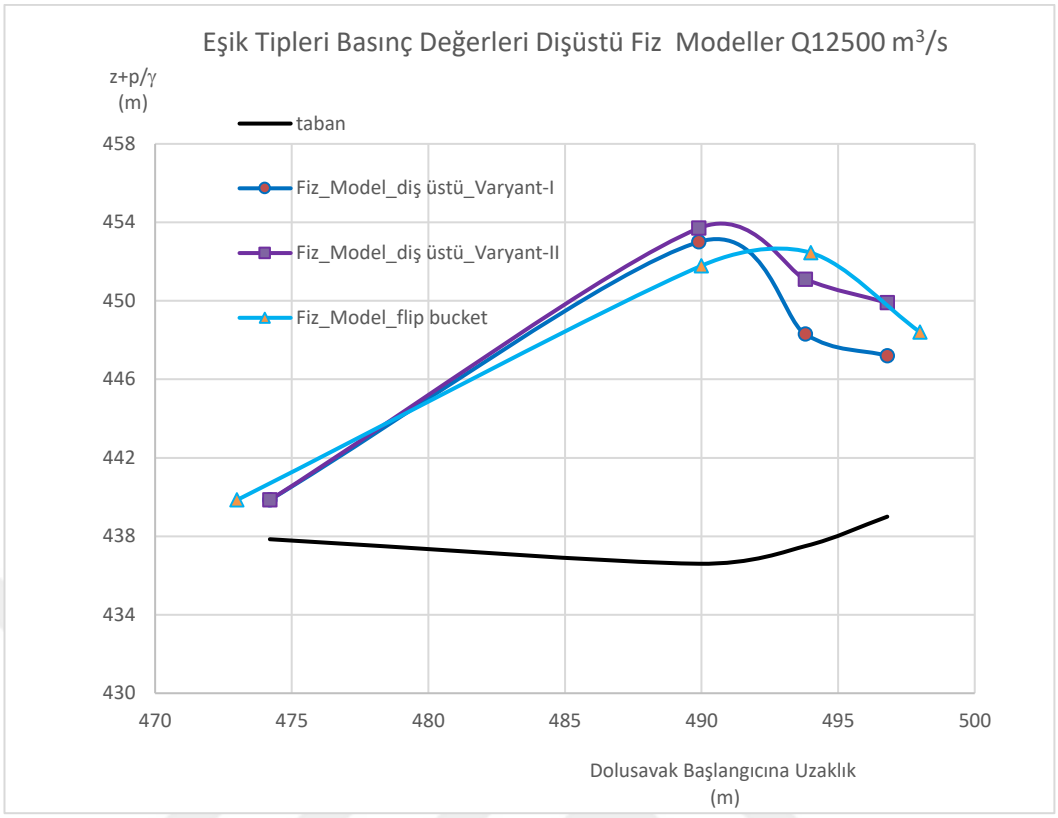
Çevirmeli sıçratma eşiği(flipbucket) tasarımının fiziksel model sonuçları ile sayısal model sonuçları karşılaştırıldığında; fiziksel modelde elde edilen akış yüksekliğinin sayısal modele kıyasla akış hızı nedeniyle kurpta meydana gelen çevrinti etkisiyle oluşan hava sürüklemesinden dolayı fazla olması beklenmektedir. Ancak su seviyelerinde sayısal model verileri daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca jet uzaklığı mesafesi hususunda fiziksel model jet profili daha uzağa sıçramıştır. Sıçrama mesafesinin uzak ve su seviyesinin düşük olması fiziksel modelde ölçek etkisine işaret etmektedir. Air entrainment modelinin kullanılmadığı 1/1 ölçekli sayısal modellerde diğer varyantlarda olduğu gibi elde edilen jet mesafelerinin fiziksel modellerden daha fazla olması beklenmektedir. Nitekim diğer varyantlarda da böyle bir durum gerçekleşmiştir. Katı geometrinin değiştiği eşikte, sıçratma eşiğinin kavisli olmasından dolayı sayısal model analiz programı tarafından yeterince algılanamadığından böyle bir durumun oluştuğu ihtimali de göz önüne alınarak ilgili durumun çözümü için devamındaki analiz çalışmalarında ağ boyutları yarıya indirilmişse de istenen sonuçlar elde edilememiştir. İlgili durumun çözümü için alternatif olarak eğrilikteki ağ blok sayısının artırımına gidilmişse de yine beklenen durum gerçekleşmemiştir. Bu nedenle çevirmeli sıçratma eşiğindeki farklılığın nedeninin ölçek kaynaklı olduğu sonucuna varılmıştır. Dişli tasarımlarda, dişlerin genişliği kanal genişliğinin yarısına sahip olduğundan çevirmeli sıçratma eşiğindeki ölçek etkisine rastlanmamıştır. Fiziksel model çalışmalarında eşikte elde edilen basınç değerlerinin farklı profile sahip olması çalışma tarzı olarak çevirmeli sıçratma eşiğinin farklı olduğunu göstermektedir. Air entrainment modelinin çalıştırıldığı analiz sonuçlarına göre varyantlarda olduğu gibi su yüzü değerlerinde artış gözlenmiş, ancak basınç değerlerinde değişiklik neredeyse gözlenmemiştir (Şekil 44-47).



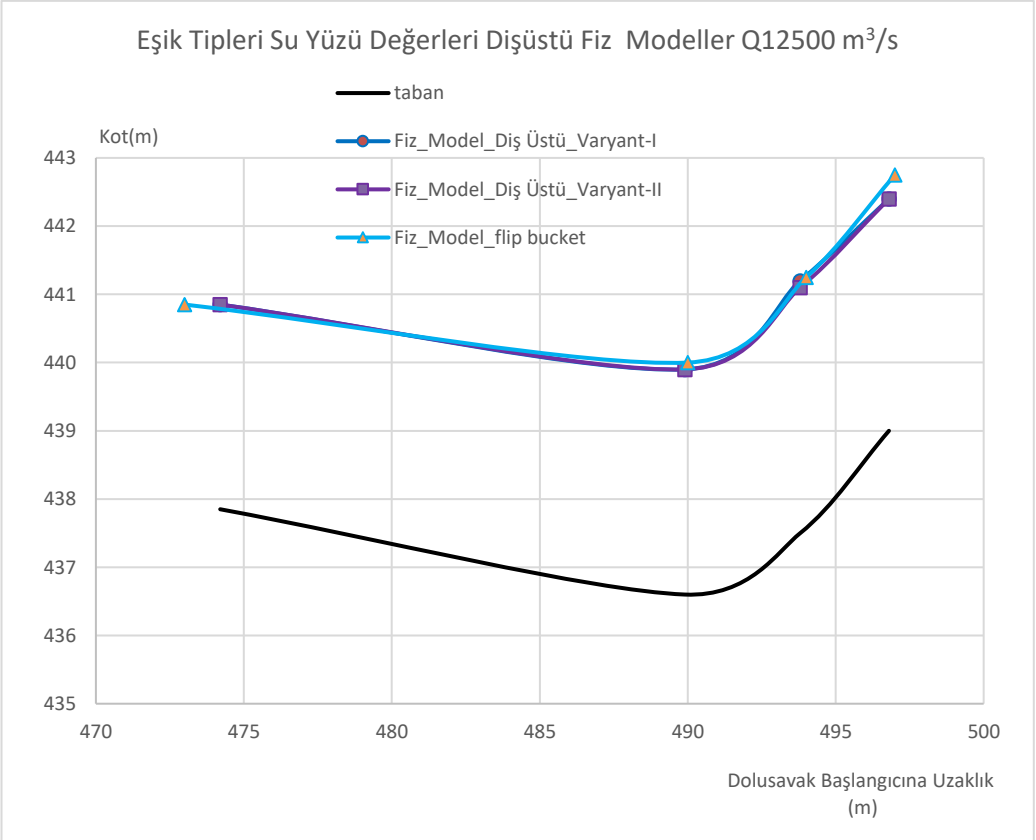

Şekil 4.44 Basınç değerleri eksen flip bucket sayısal ve fiziksel model sonuçları




Şekil 4.45 Su yüzü değerleri eksen flip bucket sayısal ve fiziksel model sonuçları



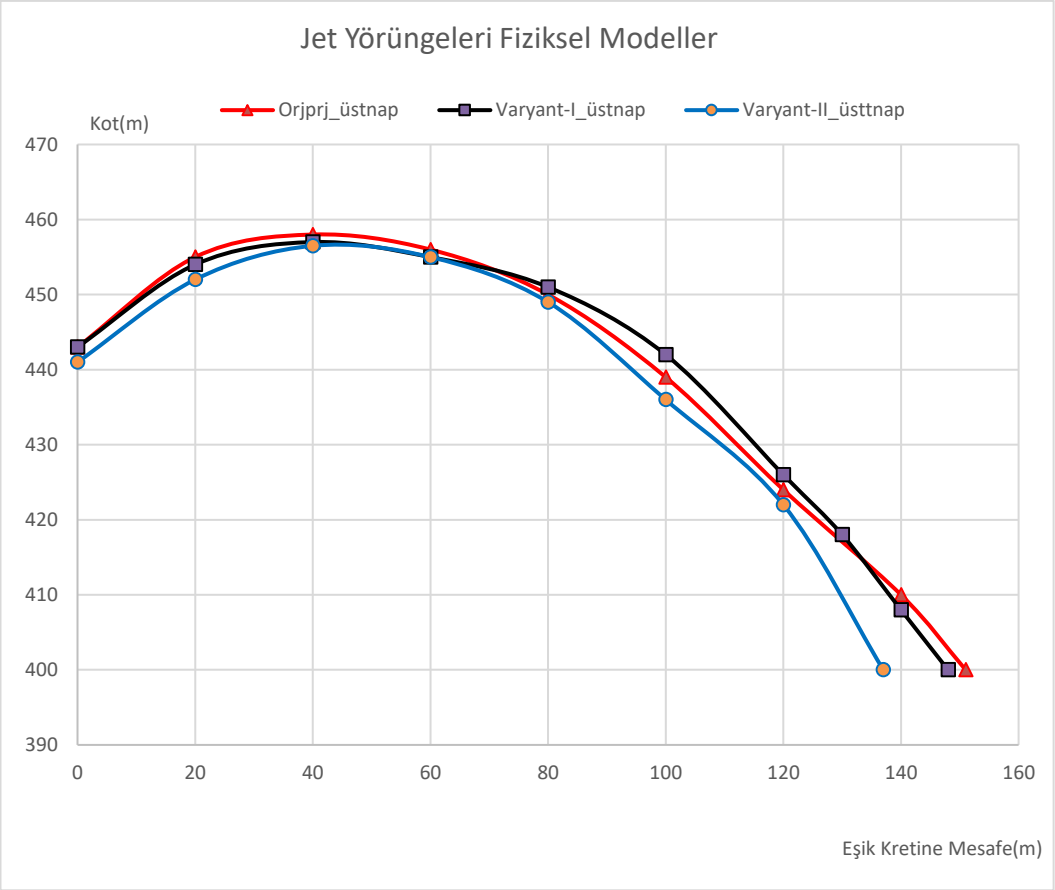

Şekil 4.46 Basınç değerleri eksen full fiziksel model sonuçları



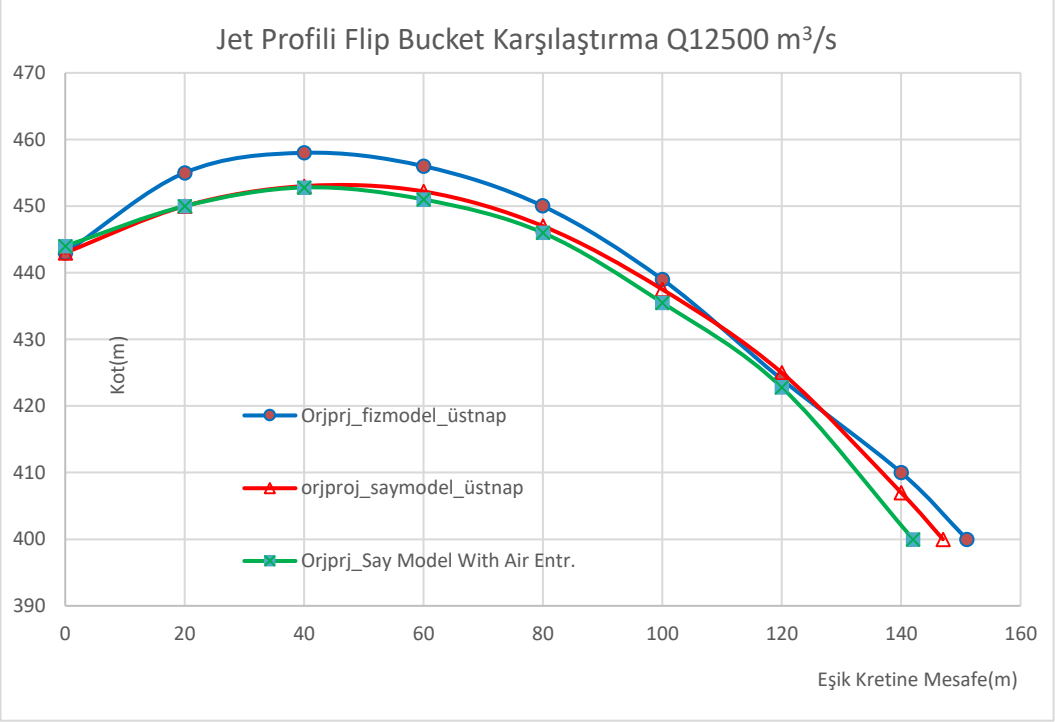

Şekil 4.47 Su yüzü değerleri eksen full fiziksel model sonuçları

### 4.1.4 Jet profillerinin incelenmesi

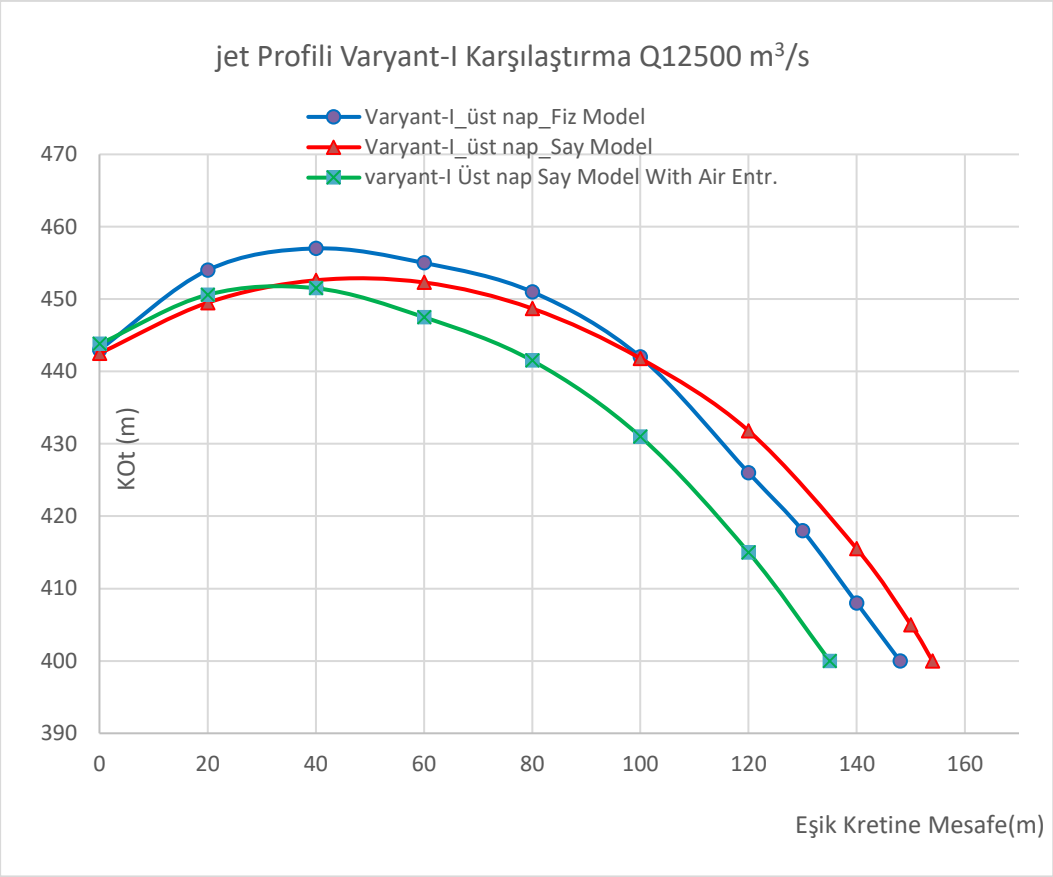
Orijinal projedeki çevirmeli(flip bucket) sıçratma eşiği ile yapılan fiziksel model deneylerinde Q12500 m3/s'lik debide sıçrayan su jetinin üst nap profilleri ölçümlerle bulunmuş ve şekillerde de verilmiştir. Fiziksel model deney sonuçlarına göre orijinal proje durumunda Q12500 m3/s'lik debinin deşarjında sıçrayan su jeti sıçratma eşiğinden 151 m, maksimum oyulmanın oluştuğu konum olarak ise 158 m, birinci dişli varyant durumunda Q12500 m3/s'lik debinin deşarjında sıçrayan su jeti sıçratma eşiğinden 148 m, maksimum oyulmanın oluştuğu konum olarak ise 156 m, ikinci dişli varyantta aynı debide sıçrayan su jeti sıçratma eşiğinden 137 m, maksimum oyulmanın oluştuğu konum olarak da 141 m mansaba düşmüştür. Su jeti profilleri açısından sıçratma eşiklerinin sayısal modelleri de gerçekleştirilmiş olup elde edilen sonuçlar fiziksel model sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Buna göre orijinal proje olan flip bucket eşiğinde su jeti sayısal model sonuçlarına göre 147 m mansaba düşerek fiziksel model değeri olan 151 m'ye kıyasla geride kalmıştır. Varyant-I tasarımında su jeti 154 m, Varyant-II tasarımında ise 145 m mansaba düşerek hava-su-ölçek etkisi ilişkilerinden dolayı fiziksel modele kıyasla beklendiği gibi daha uzak mesafeye mansaplanmıştır. Eşikten sonra basınç değerlerindeki sönümlenme en fazla Varyant-II de gözlemlenirken en az kırınım ise flip bucket' da gözlenmiştir. Bu sonuçlar fiziksel model çalışmalarının sonuçlarına da uygun olmakla birlikte fiziksel model çalışmalarında yer verilmeyen mansap kanalı tabanındaki basınç değerleri sayısal analiz yöntemi yardımıyla elde edilmiştir. Air entrainment modeli kullanıldığında ise jet profilleri daha kısa mesafeye düşmüştür. İlgili model varyantların sıçrama mesafesine %12 seviyelerinde etki ederken çevirmeli sıçratma eşiğine %5 seviyelerinde etki etmiştir. Dolayısıyla dişler sayesinde oluşan jet ayrılmalarına etkiyen hava sürüklenmesi miktarı çevirmeli yapıya göre iki kat olmuştur (Şekil 48-51). Sisteme sürüklenen hava neticesinde kuyruk suyu tabanındaki basınç değerlerinde de önemli azalmalar görülmüştür Şekil(52-75).



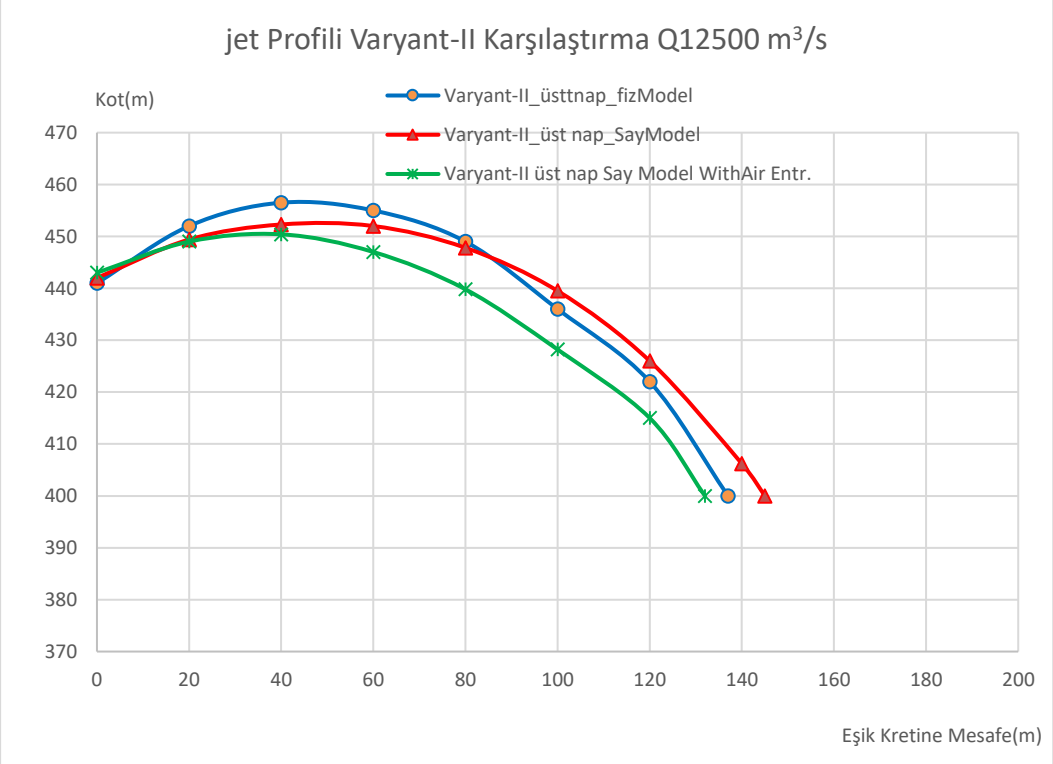

Şekil 4.48 Jet profilleri tüm tasarımlar fiziksel model sonuçları



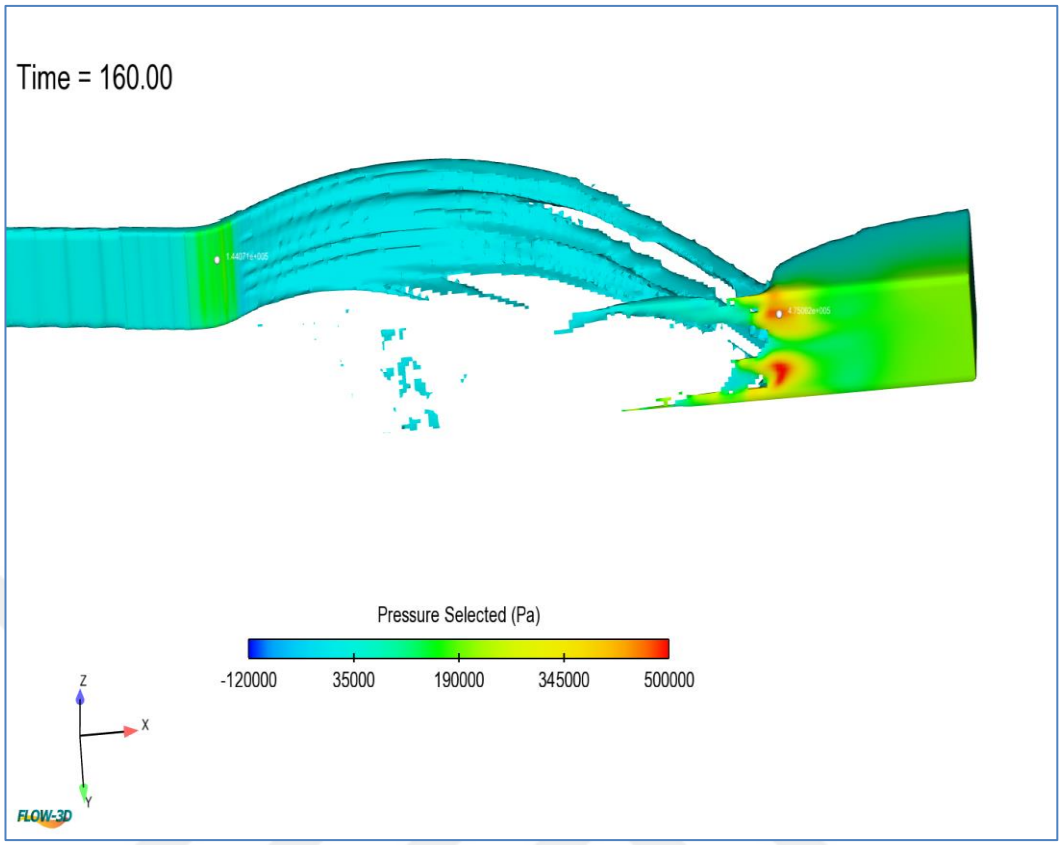

Şekil 4.49 Jet profilleri flip bucket fiziksel ve sayısal model sonuçları



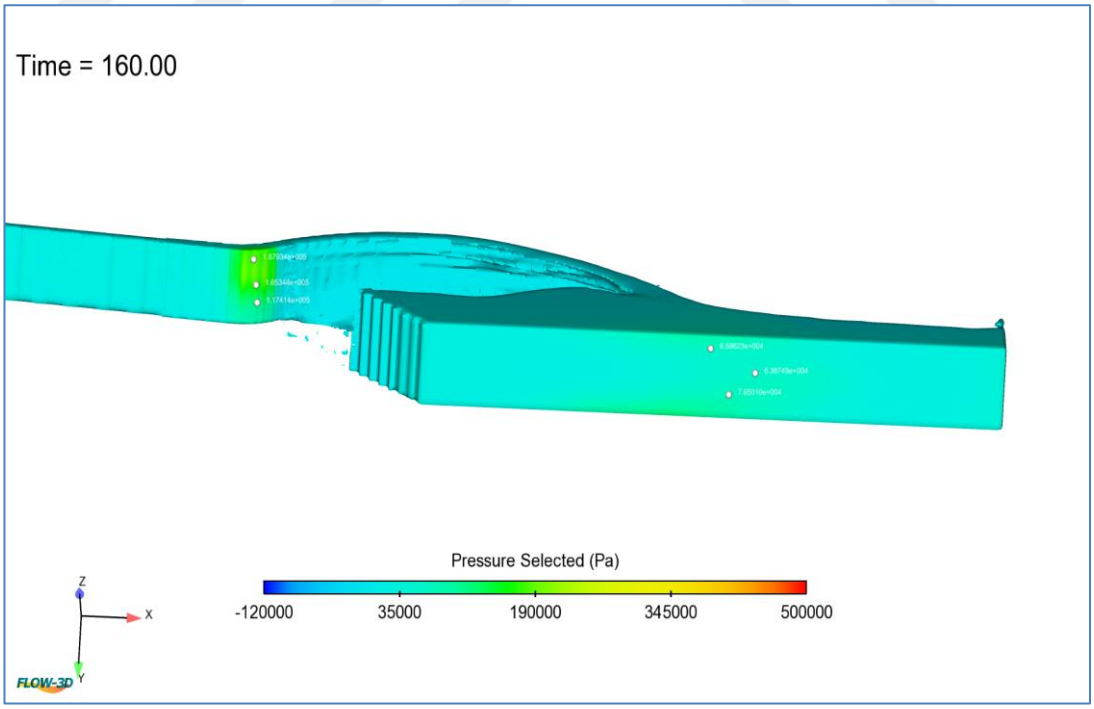

Şekil 4.50 Jet profilleri Varyant-I fiziksel ve sayısal model sonuçları



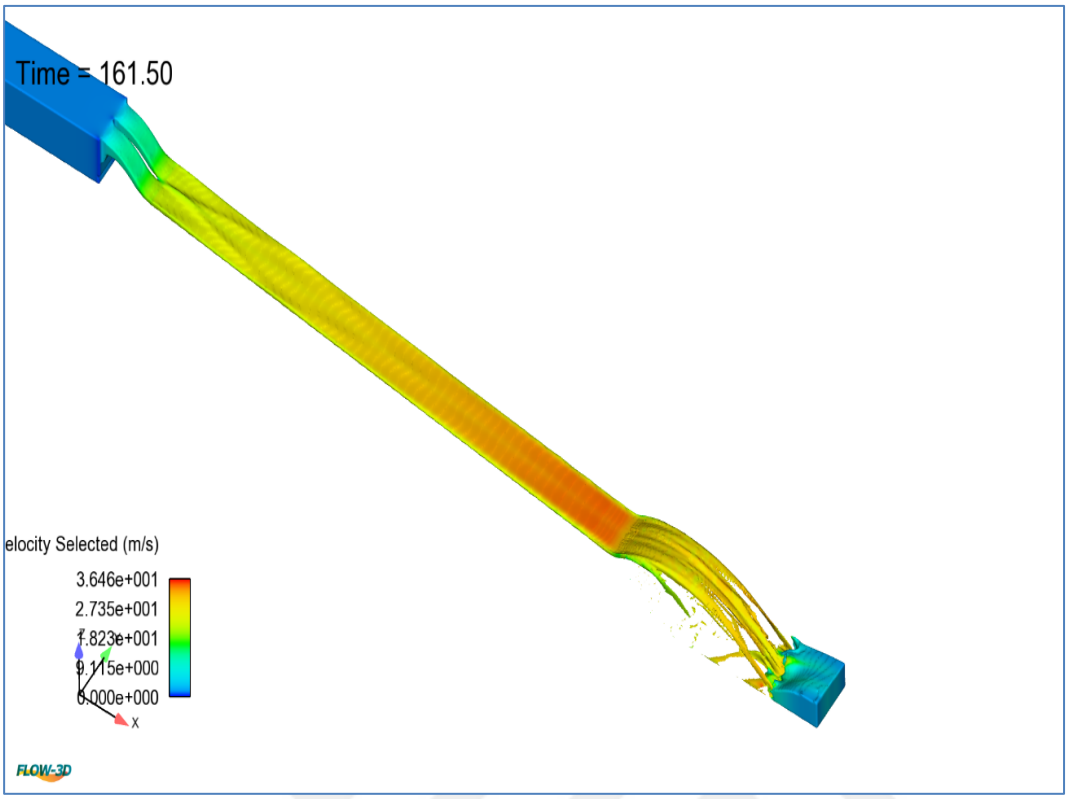

Şekil 4.51 Jet profilleri Varyant-II fiziksel ve sayısal model sonuçları



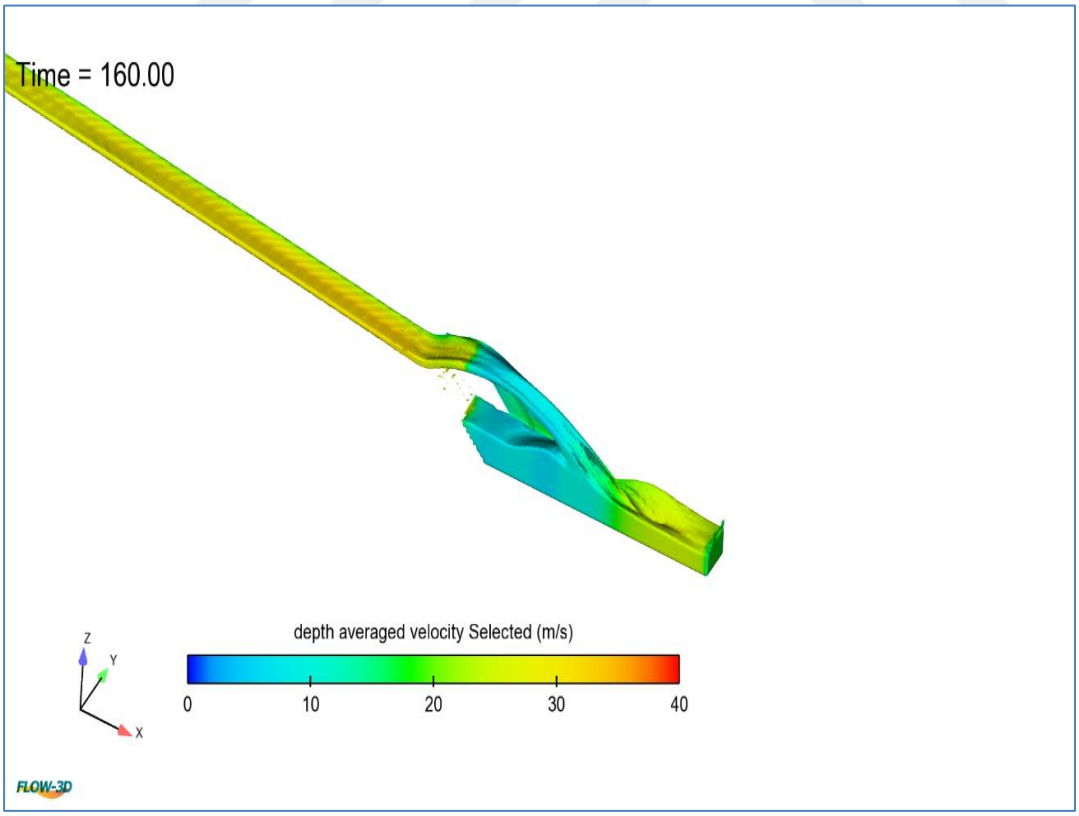

Şekil 4.52 Basınç değerlerine göre mansap kanalı tabanı alttan görünüş (Q12500 $m^3/s$ flip bucket)



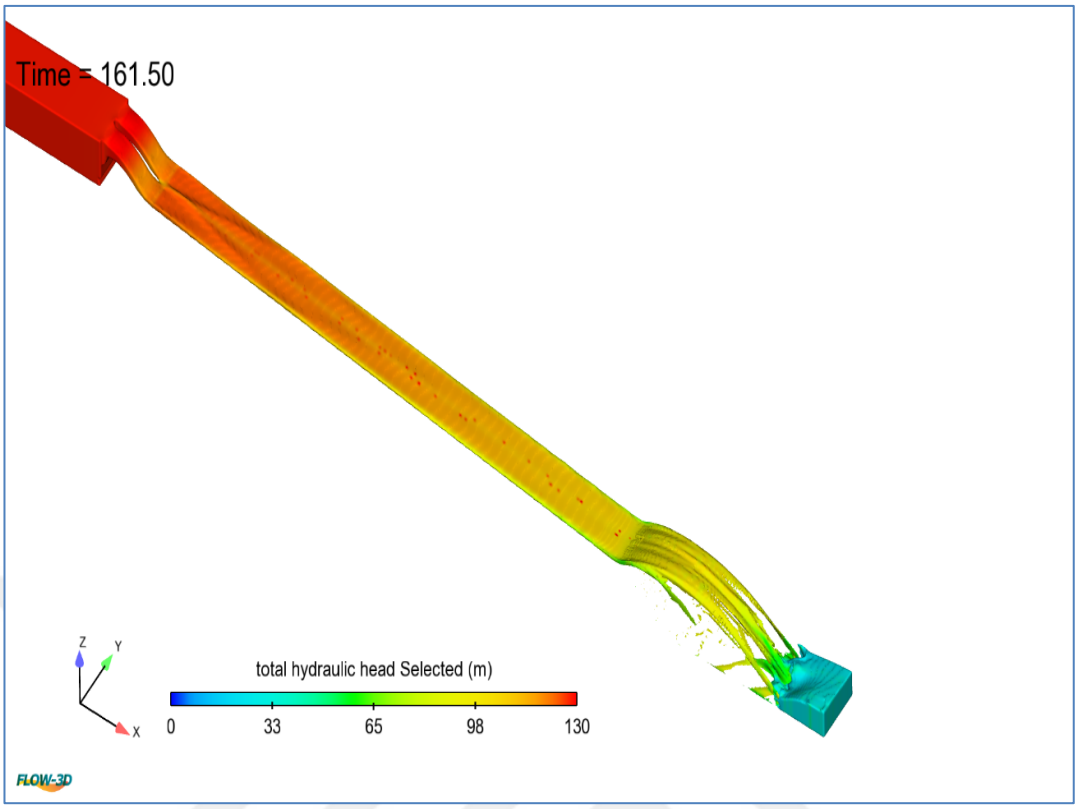

Şekil 4.53 Basınç değerlerine göre mansap kanalı tabanı alttan görünüş (Q12500 $m^3/s$ flip bucket with air entrainment)



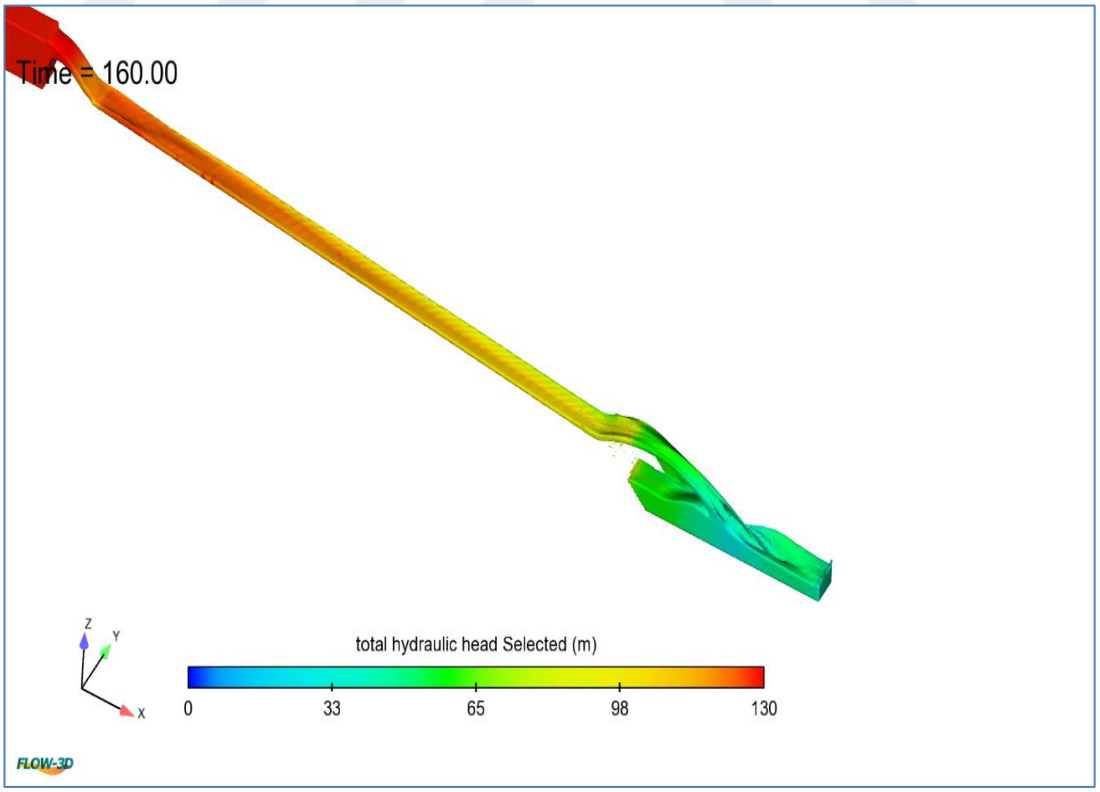

Şekil 4.54 Ort.hız değerlerine göre sınıflandırma (Q12500 $m^3$/s flip bucket)



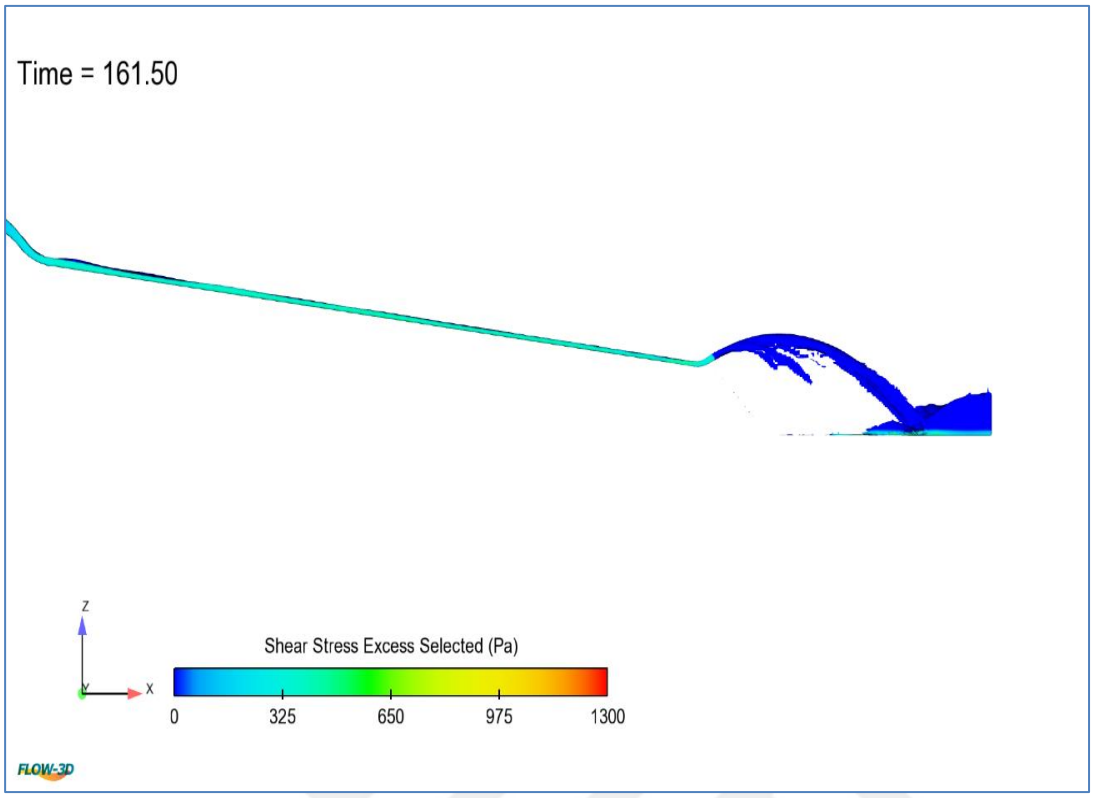

Şekil 4.55 Ort.hız değerlerine göre sınıflandırma (Q12500 $m^3$/s flip bucket with air entrainment)



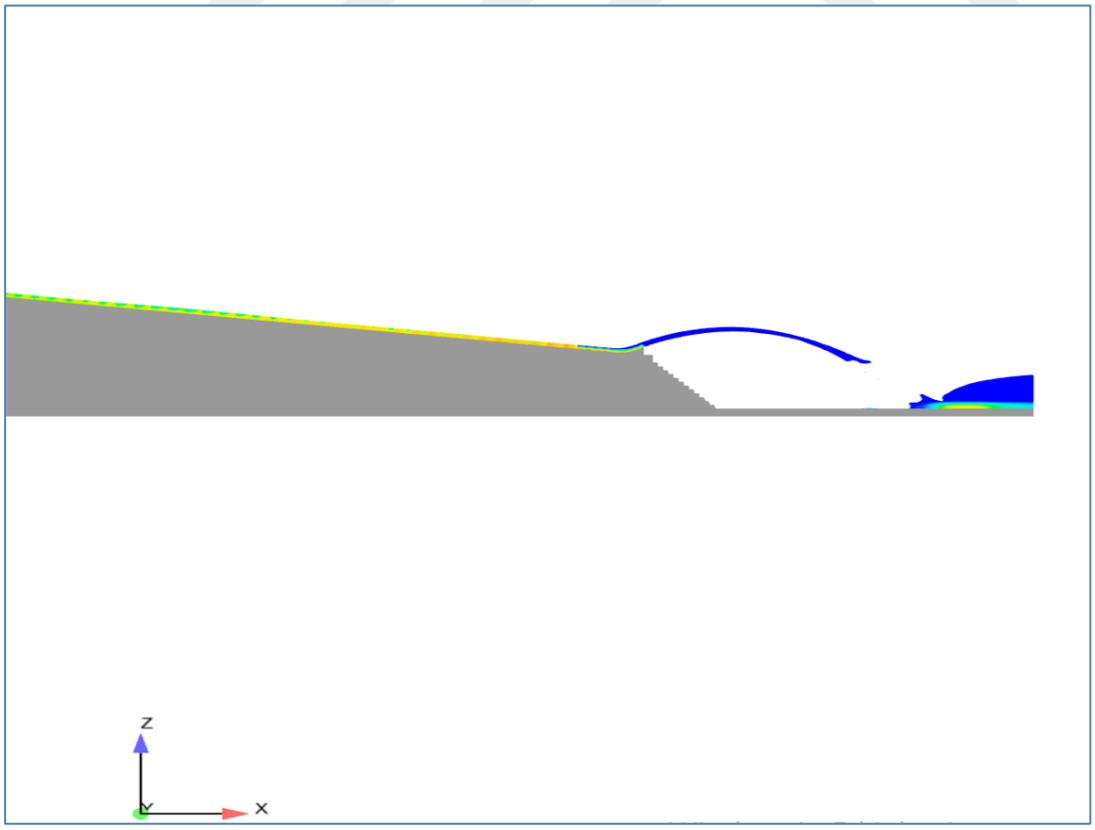

Şekil 4.56 Toplam hidrolik enerji yüksekliğine göre sınıflandırma (Q12500 $m^3/s$ flip bucket)



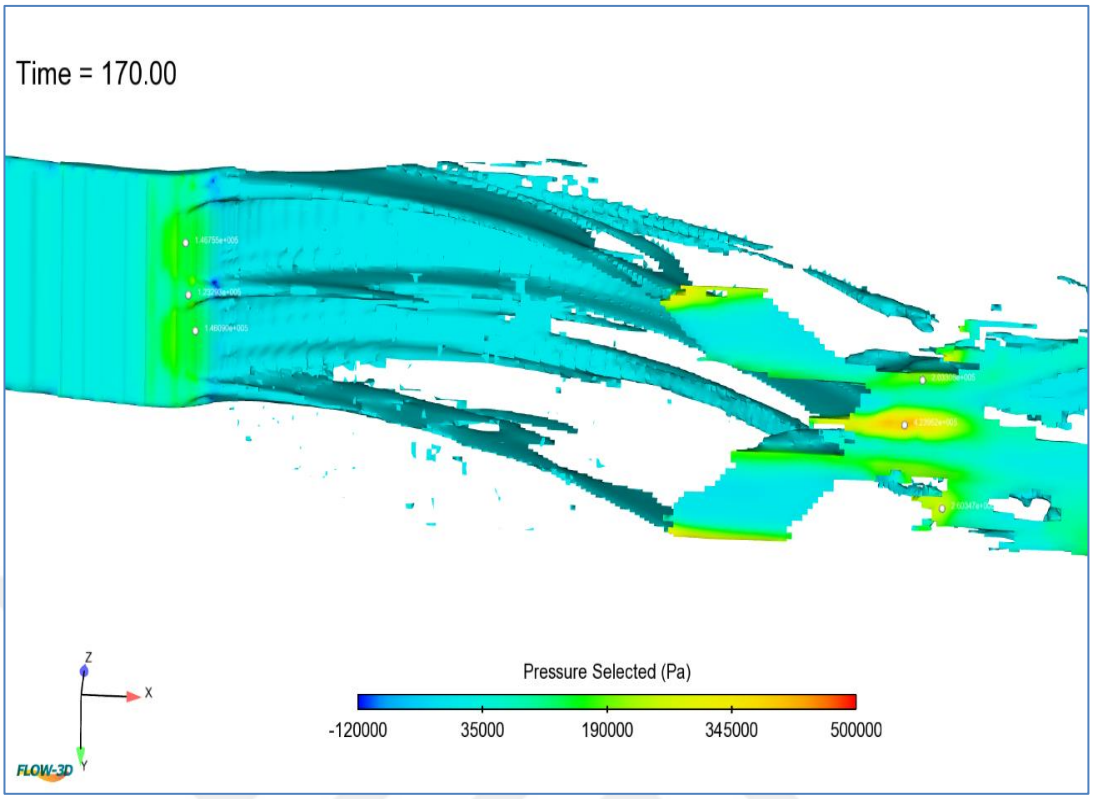

Şekil 4.57 Toplam hidrolik enerji yüksekliğine göre sınıflandırma (Q12500 m3/s flip bucket with air entrainment)



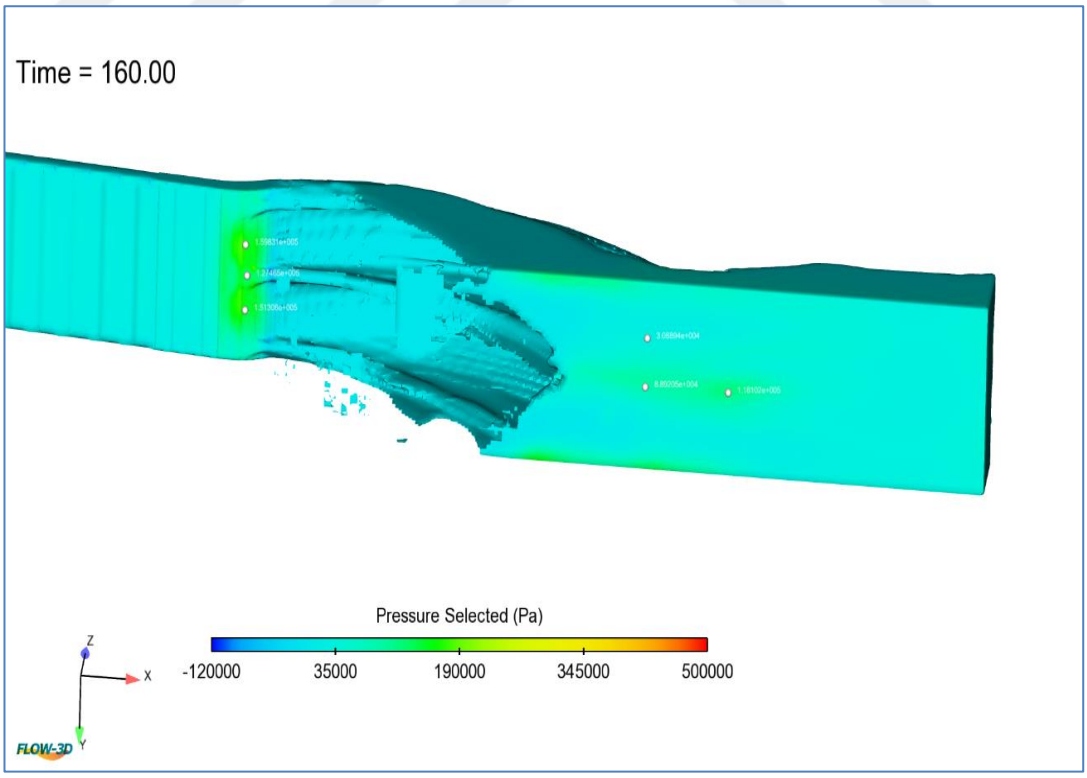

Şekil 4.58 Kayma gerilmesi değerlerine göre sınıflandırma ve eksen kesiti(Q12500 $m^3/s$ flip bucket)



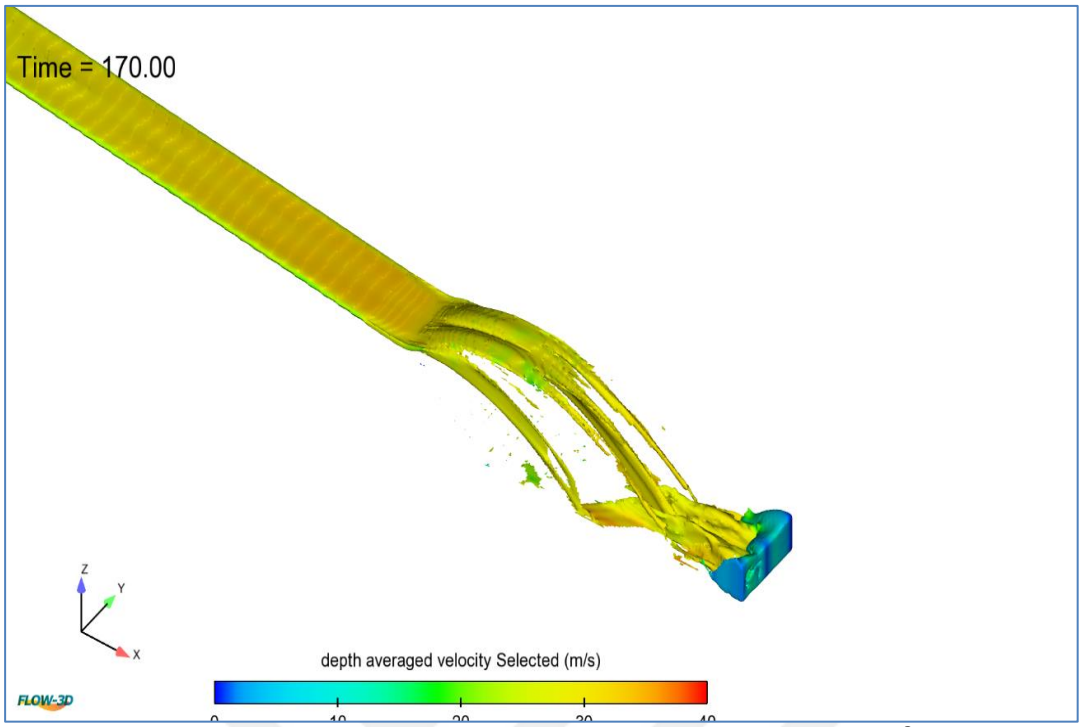

Şekil 4.59 Kayma gerilmesi değerlerine göre sınıflandırma ve eksen kesiti (Q12500 $m^3/s$ flip bucket with air entrainment)



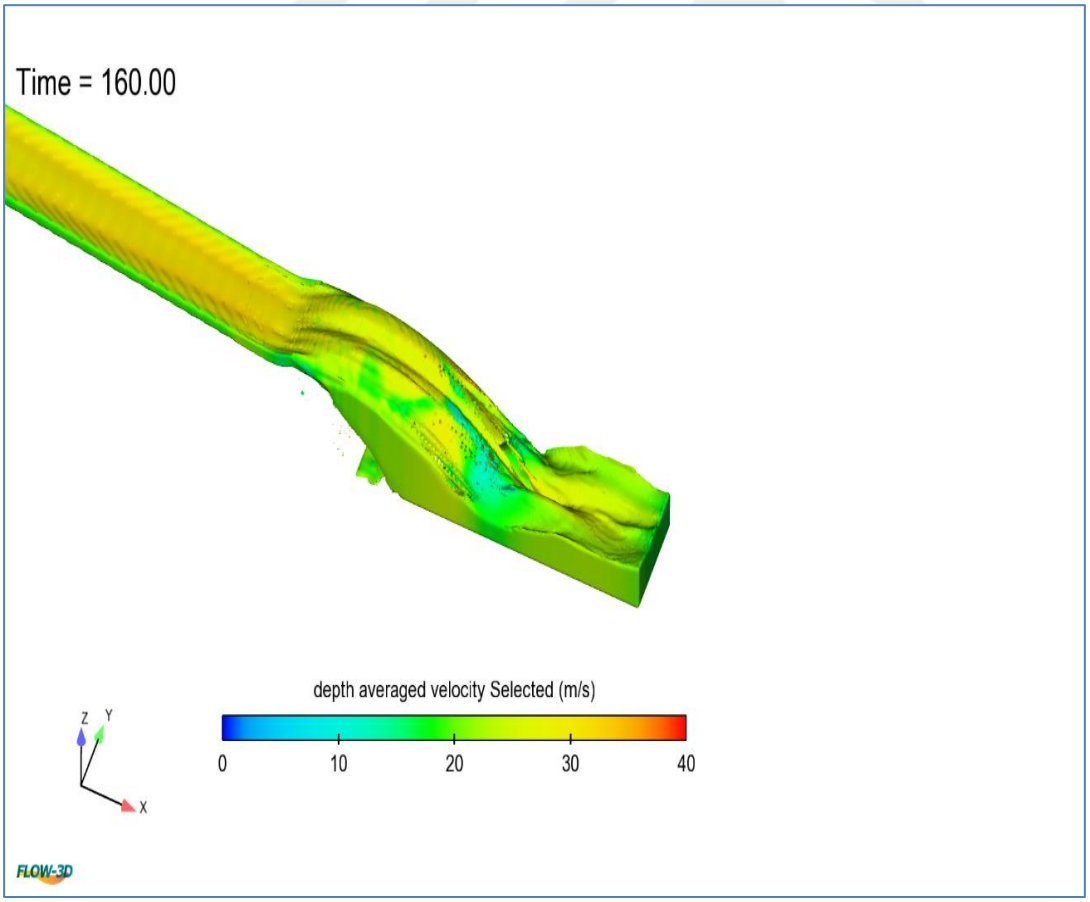

Şekil 4.60 Basınç değerlerine göre mansap kanalı tabanında sınıflandırma alttan görünüş (Q12500 $m^3/s$ Varyant-I)



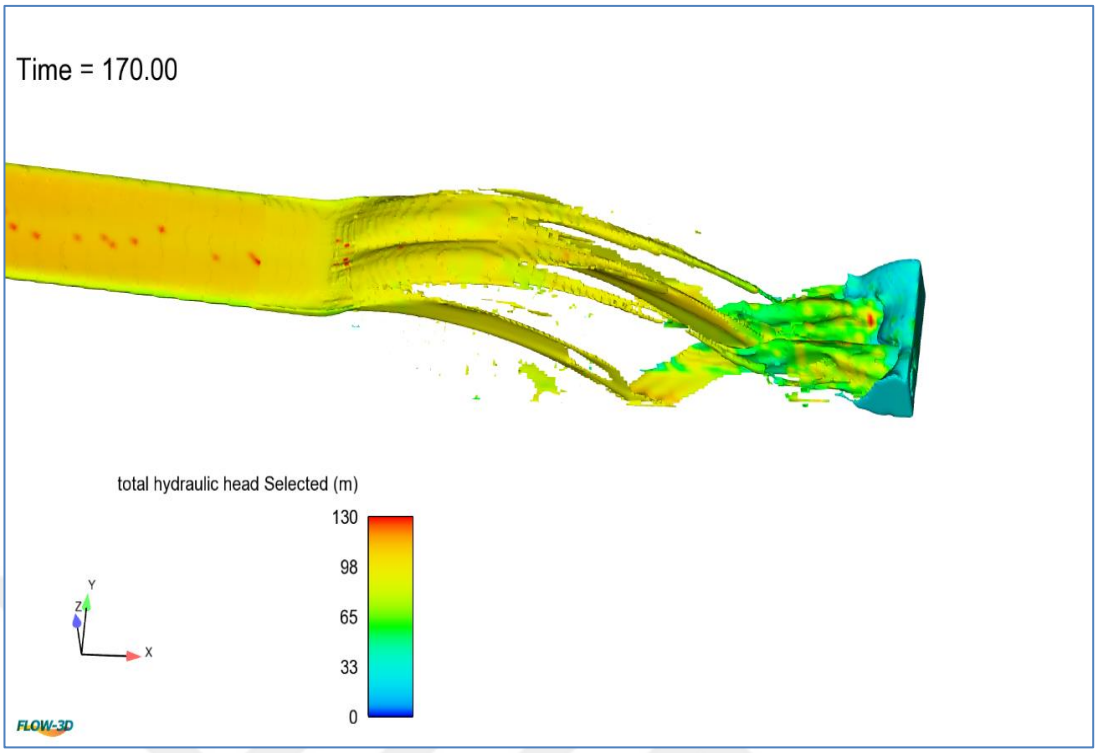

Şekil 4.61 Basınç değerlerine göre mansap kanalı tabanında sınıflandırma alttan görünüş (Q12500 $m^3/s$ Varyant-I with air entrainment)



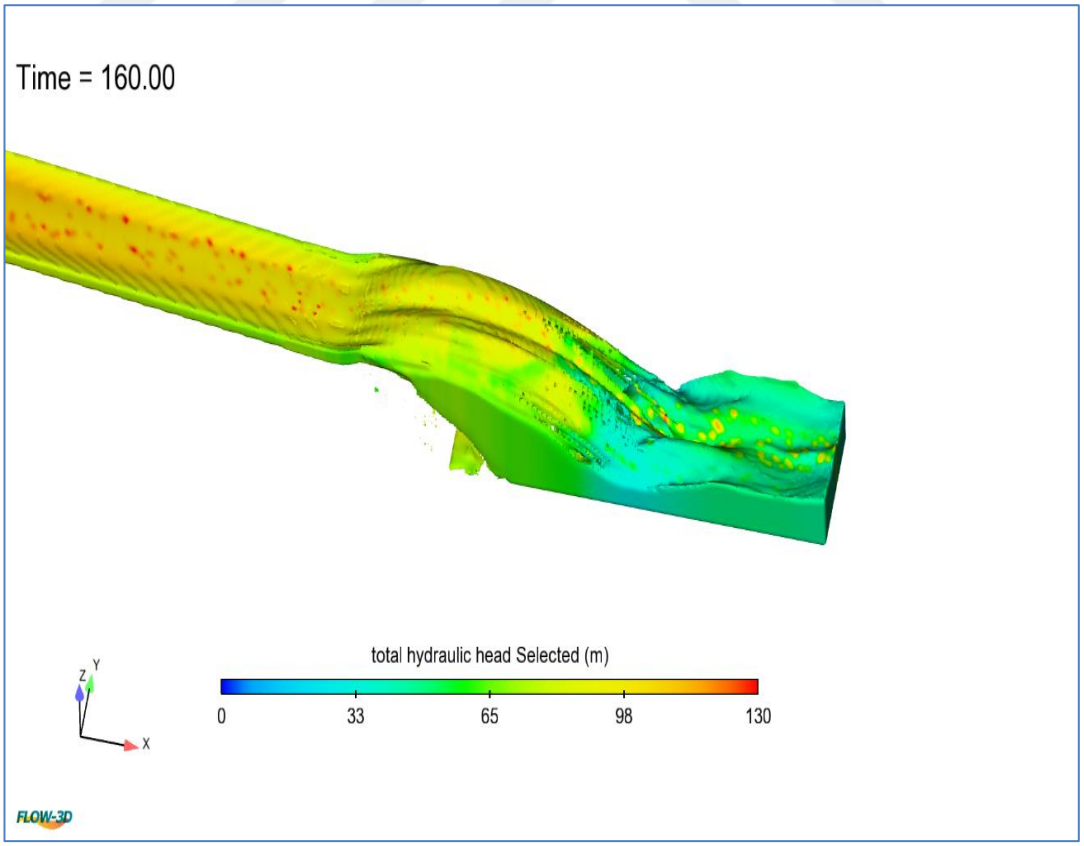

Şekil 4.62 Ortalama hız değerlerine göre sınıflandırma ve eksen kesiti(Q12500 $m^3$/s Varyant-I)



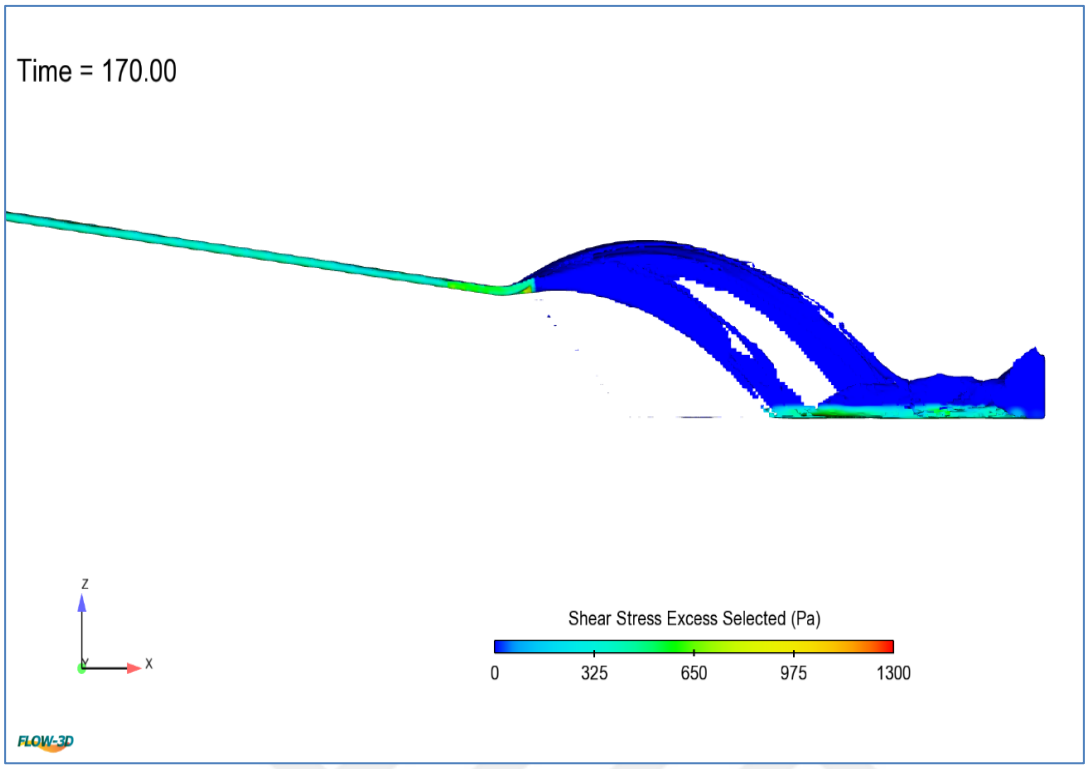

Şekil 4.63 Ortalama hız değerlerine göre sınıflandırma ve eksen kesiti (Q12500 $m^3$/s Varyant-I with air entrainment)



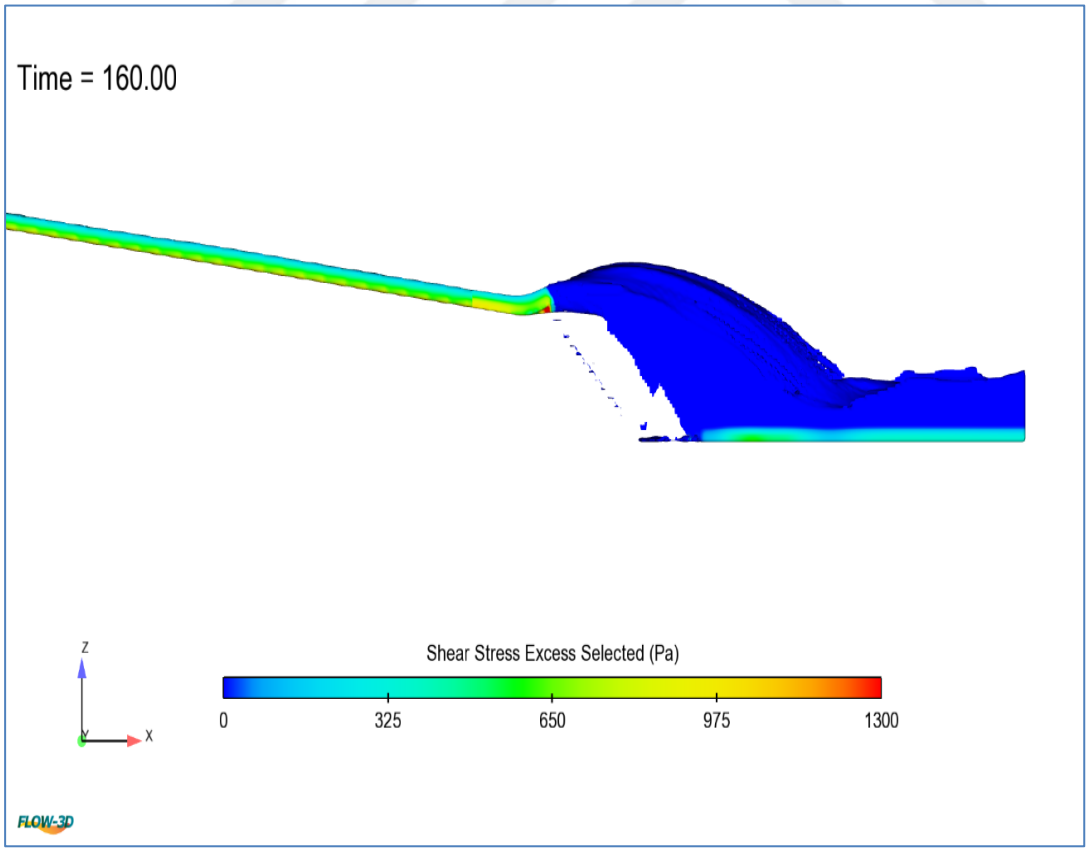

Şekil 4.64 Toplam hidrolik enerji yükseklik değerlerine göre sınıflandırma ve eksen kesiti(Q12500 $m^3/s$ Varyant-I)



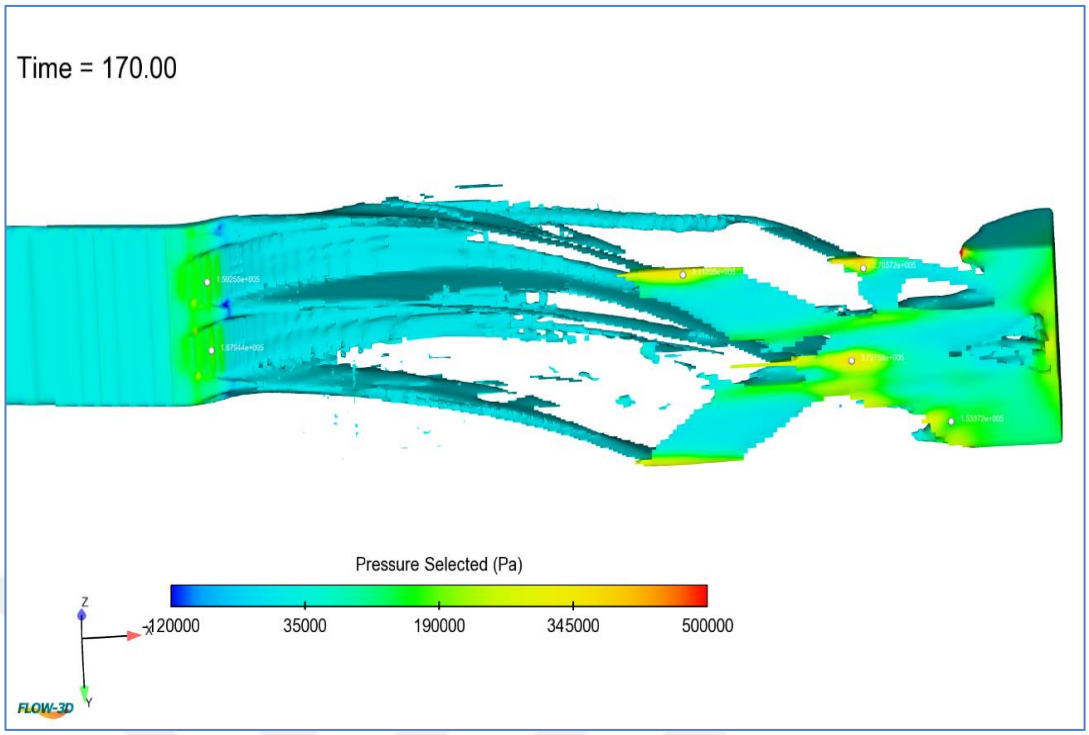

Şekil 4.65 Toplam hidrolik enerji yükseklik değerlerine göre sınıflandırma ve eksen kesiti (Q12500 $m^3/s$ Varyant-I with air entrainment)



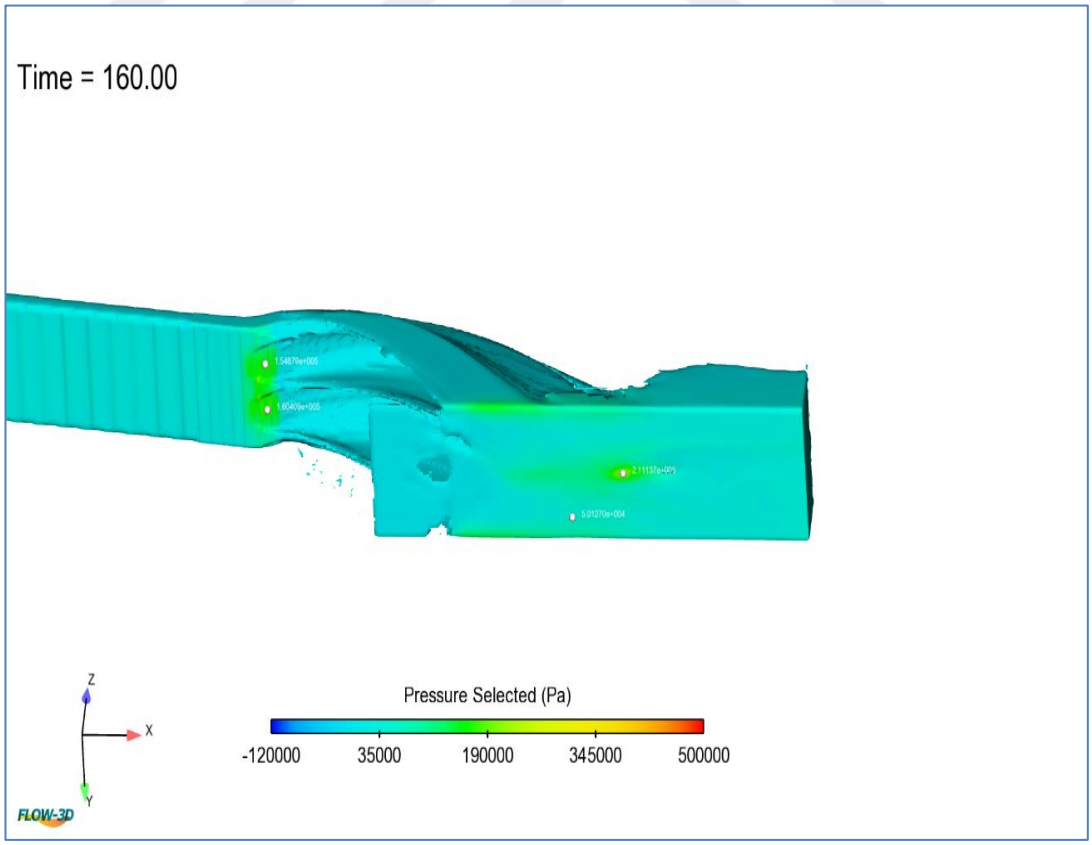

Şekil 4.66 Kayma gerilmesi değerlerine göre sınıflandırma ve eksen kesiti(Q12500 $m^3/s$ Varyant-I)



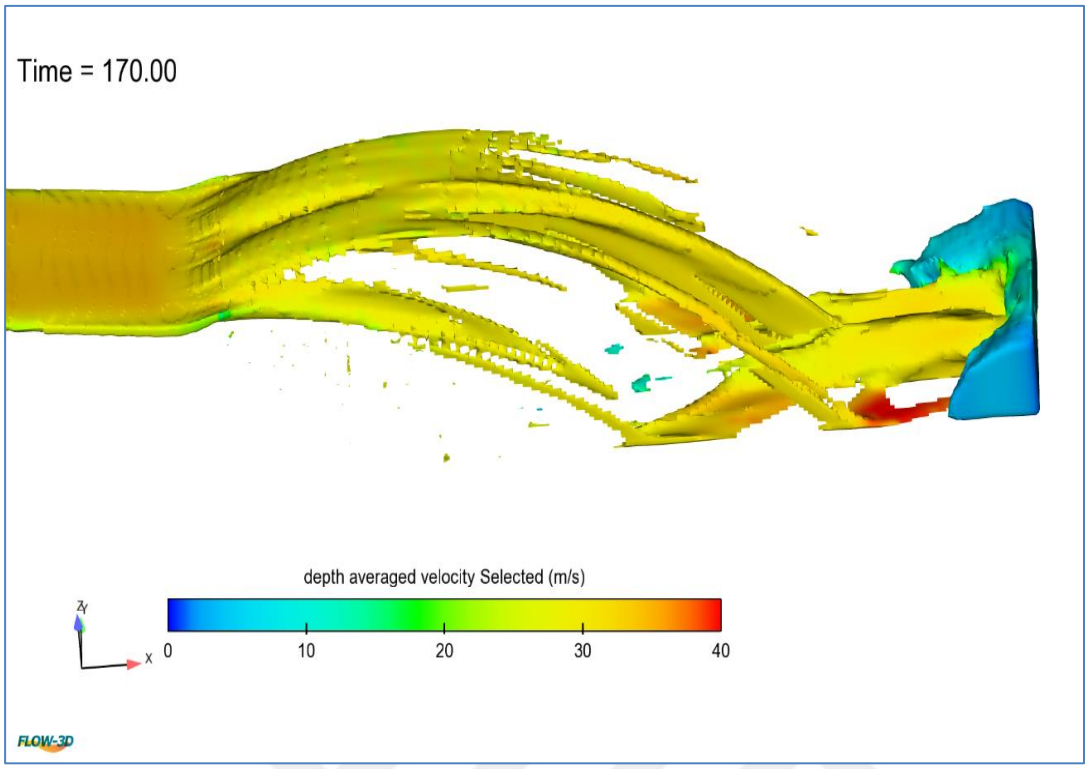

Şekil 4.67 Kayma gerilmesi değerlerine göre sınıflandırma ve eksen kesiti (Q12500 $m^3/s$ Varyant-I with air entrainment)



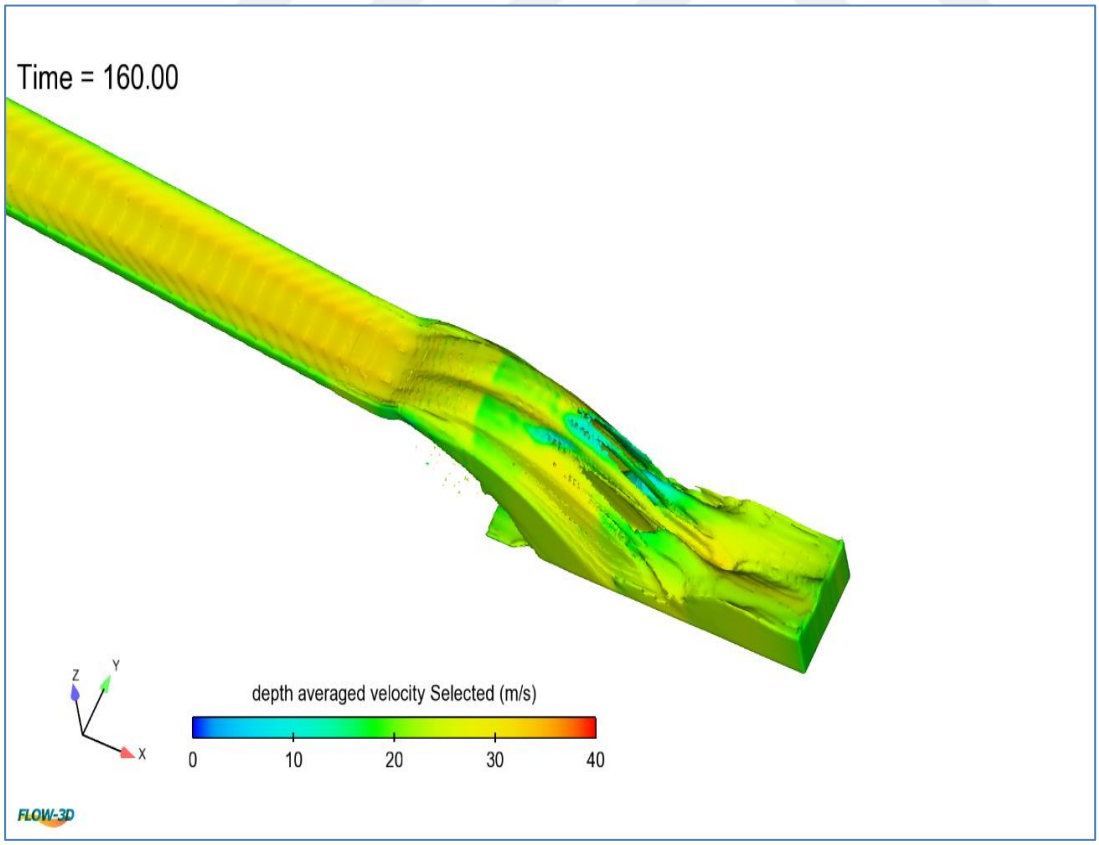

Şekil 4.68 Basınç değerlerine göre mansap kanalı tabanında sınıflandırma alttan görünüş (Q12500 $m^3/s$ Varyant-II)



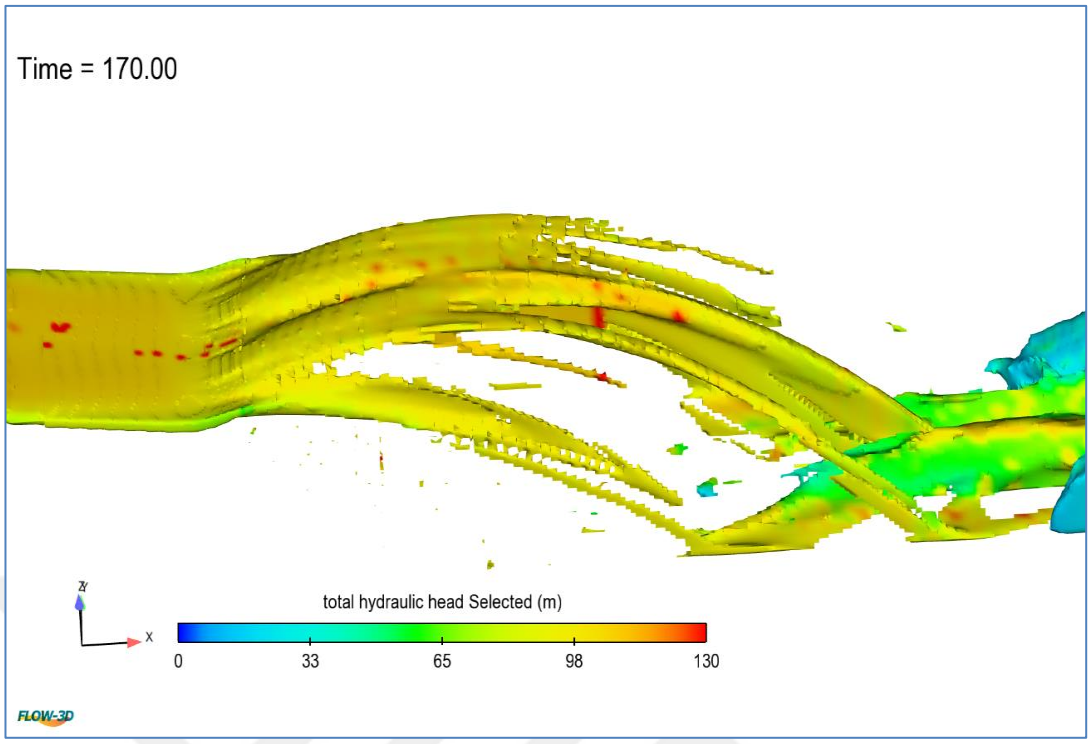

Şekil 4.69 Basınç değerlerine göre mansap kanalı tabanında sınıflandırma alttan görünüş (Q12500 $m^3/s$ Varyant-II with air entrainment)



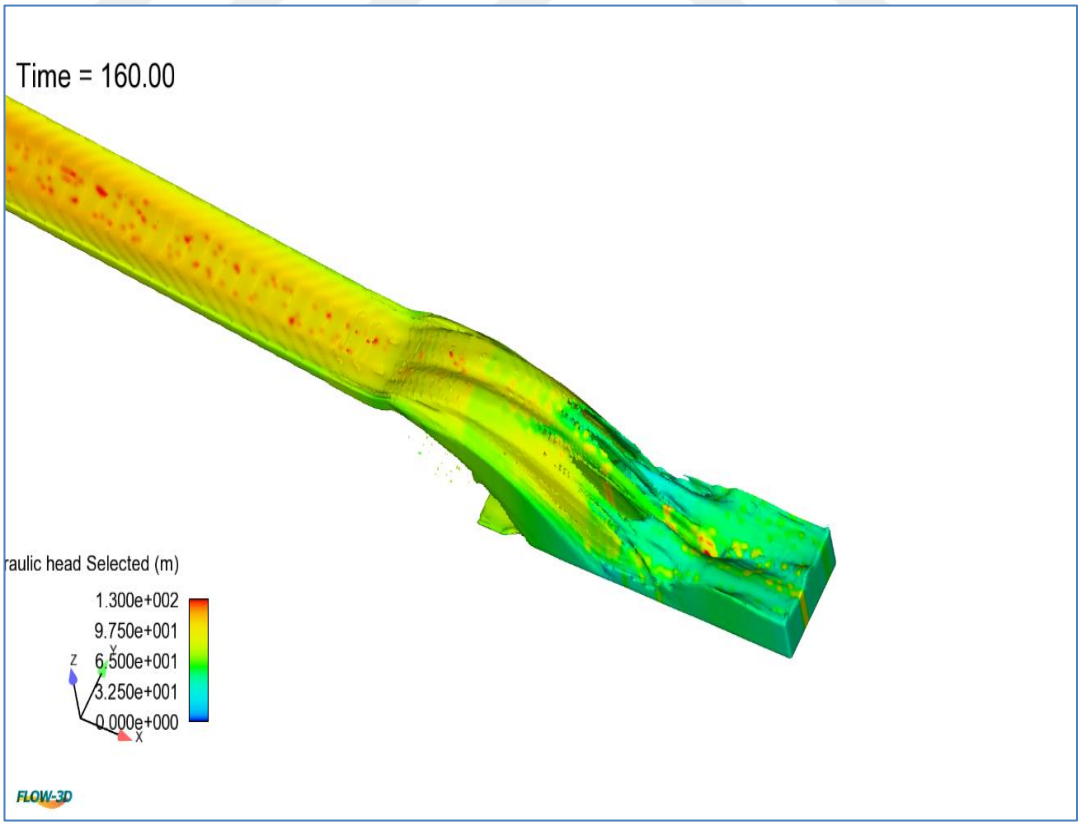

Şekil 4.70 Ortalama hız değerlerine göre sınıflandırma ve eksen kesiti(Q12500 $m^3/s$ Varyant-II)



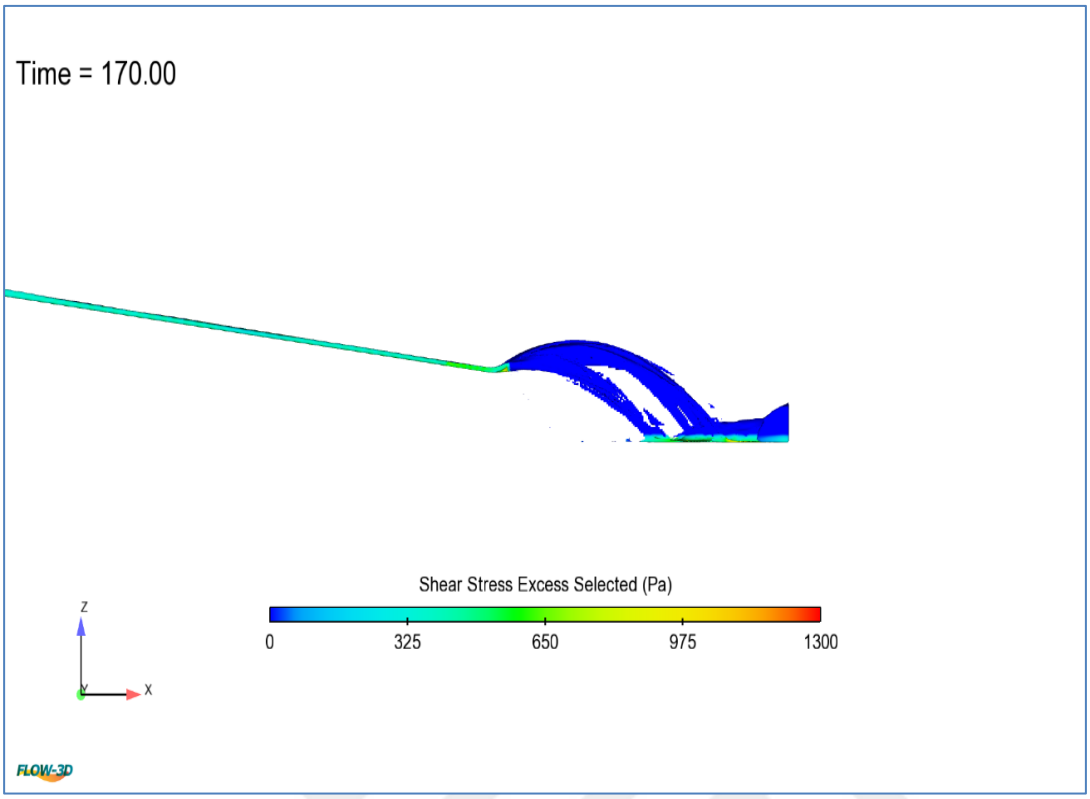

Şekil 4.71 Ortalama hız değerlerine göre sınıflandırma ve eksen kesiti (Q12500 $m^3/s$ Varyant-II with air entrainment)



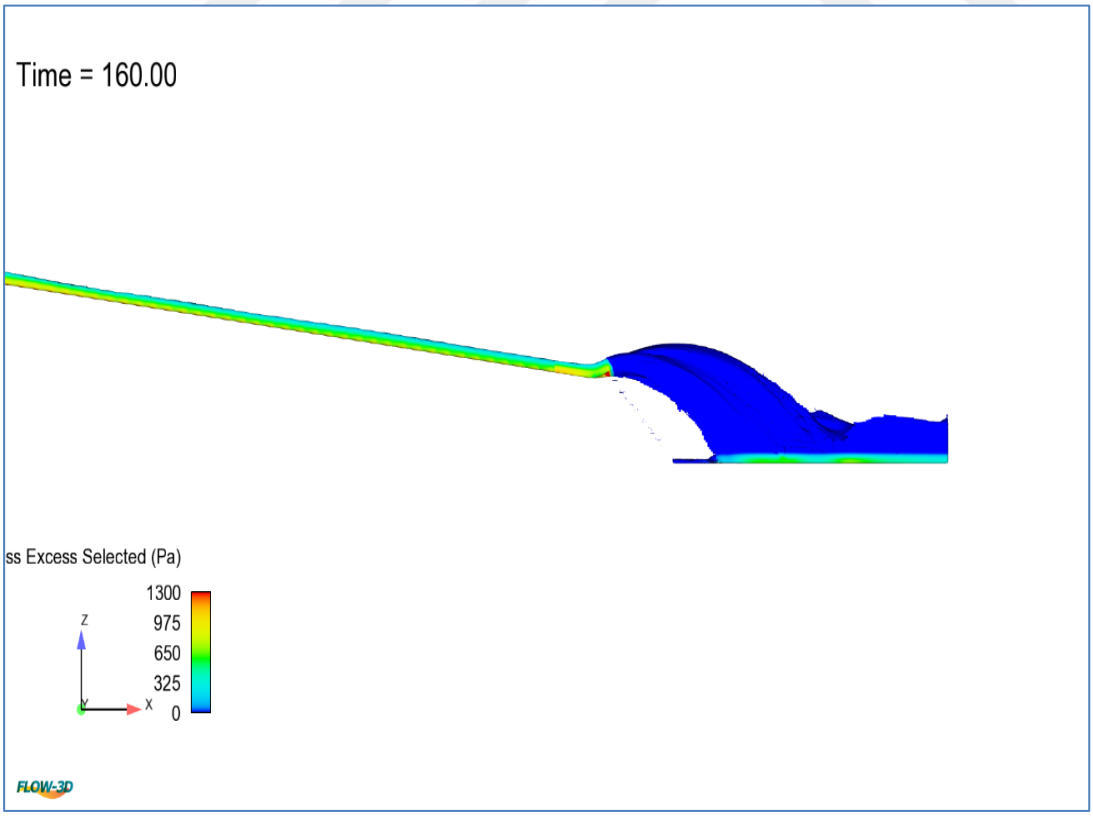

Şekil 4.72 Toplam hidrolik enerji yükseklik değerlerine göre sınıflandırma ve eksen kesiti(Q12500 $m^3/s$ Varyant-II)




Şekil 4.73 Toplam hidrolik enerji yükseklik değerlerine göre sınıflandırma ve eksen kesiti (Q12500 $m^3/s$ Varyant-II with air entrainment)




Şekil 4.74 Kayma gerilmesi değerlerine göre sınıflandırma ve eksen kesiti(Q12500 $m^3$/s Varyant-II)




Şekil 4.75 Kayma gerilmesi değerlerine göre sınıflandırma ve eksen kesiti (Q12500 $m^3$/s Varyant-II with air entrainment)

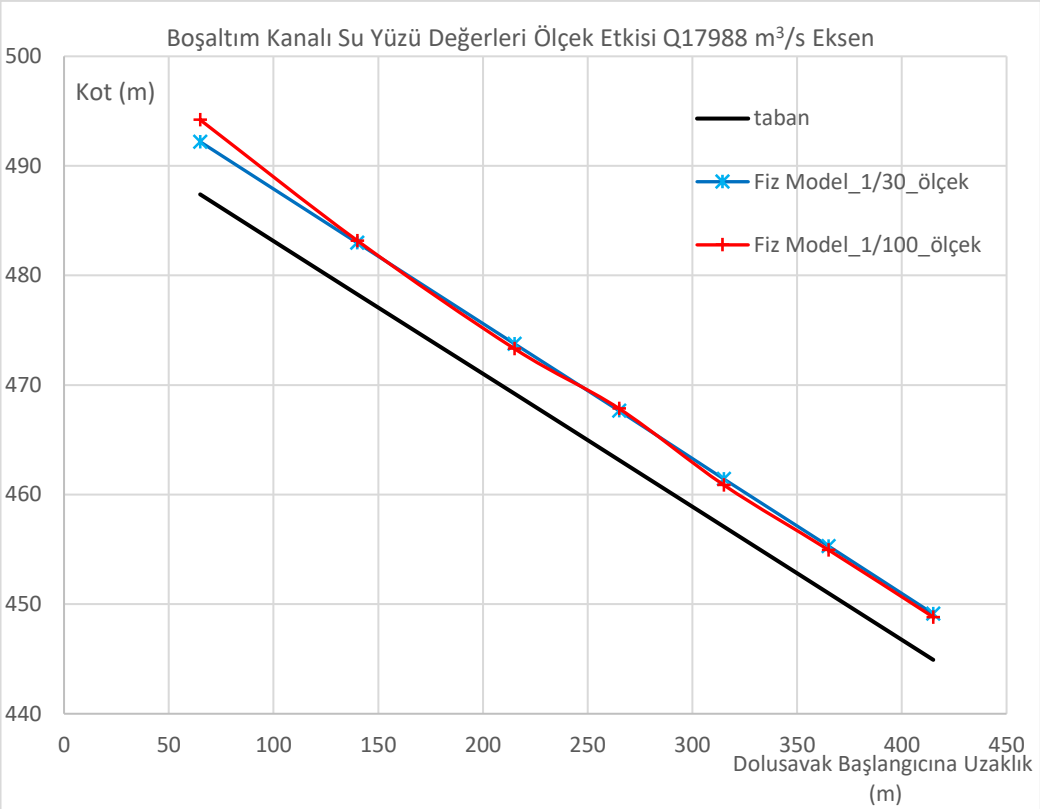
### 4.1.5 Ölçek Etkisi

Çalışmamızın buraya kadar ki kısmında sayısal analizlerimiz 1/1 (prototip) ölçek ile gerçekleştirilmiştir. Çünkü fiziksel model çalışmalarındaki Varyant-I ve Varyant-II dişli sıçratma eşiklerinin sayısal analizleri ile ilgili olarak; tanzim edilen 1/100 ölçekli varyant modellerinin Flow3D ile yapılan sayısal analizi için ihtiyaç olunan çözüm süresinin yaklaşık 55 gün olduğu tespit edilmiştir. Bu duruma neden olarak, hem modelin 1/100 gibi oldukça küçük ölçeğe sahip olması hem de boşaltım kanalı sonundaki dişli yapıda kullanılan "blocked to volume" ağ türü olmak üzere ilgili durumlar sayısal analiz süresini zaman/kaynak açısından oldukça olumsuz etkilemiştir. Daha önceki çalışmalarda araştırmacılarca da tespit olunan basınç ve su yüzü gibi hidrolik karakteristiklere ölçek etkisinin (özellikle 200'den küçük ölçek) neredeyse olmadığı hususu bilinmektedir [33,42]. İlgili hususun tarafımızca da tespit edilmesi için 1982 yılında gerçekleştirilen 1/100 ve 1/30 ölçekli fiziksel model sonuçları göz önünde bulundurularak 1/30, 1/100 ve prototip ölçek(1/1 ölçek) modellerinin sayısal analizleri gerçekleştirilip gerek fiziksel ve sayısal model arasında gerekse de 30 ve 100 ölçekli fiziksel model arasındaki ölçek farkının etkisi tespit edilmeye çalışılmıştır. Buna göre;

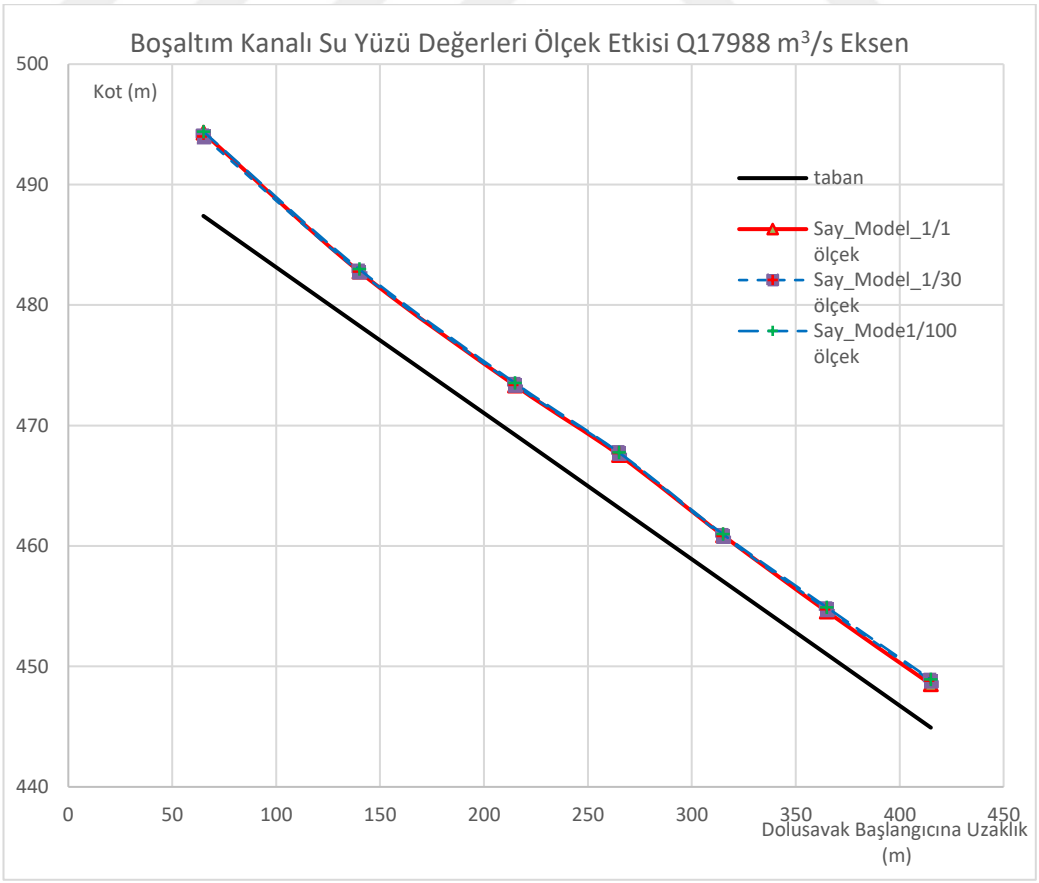
1/30 ölçekli fiziksel model sadece boşaltım kanalı için gerçekleştirilmiştir. Boşaltım kanalında 1/30 ölçekli fiziksel modellerde oluşan su yüzü değerleri ile 1/100 ölçekli model değerlerinin birbirleriyle uyumlu olmakla birlikte 30 ölçekli fiziksel modelin su seviyesi daha yüksek çıkmıştır. Ancak bu fark %12 seviyelerindedir. Söz konusu her iki ölçekli modeller sayısal olarak da çözümlenmiş ve ilgili sayısal sonuçlar arasında fark gözlenmemiştir. Yine gerçekleştirilen sayısal modellerde ölçek küçüldükçe boşaltım kanalı ve sıçratma eşiğinde su yüzü değerlerinde artış gözlenirken, eşik sonrasında jet profil mesafesi kısalmıştır. Dolayısıyla kritik kısımlarda yani sıçratma eşiği hemen öncesi, eşik yapısı ve sonrasında ölçek etkisinin ciddi boyutlarda olduğu tespit edilmiştir. Ölçek küçüldükçe yani 1/100 ölçekli sayısal model sonuçları aynı ölçekteki fiziksel model sonuçlarıyla boşaltım kanalı sonunda dahi neredeyse aynı olması hava-su ilişkileri de göz önüne alındığında olması gereken vaziyete aykırıdır. Çünkü küçülen geometri ile birlikte sıçratma eşiği gibi kritik noktalarda akış daha az çevrintiye maruz kalıp daha uzağa fırlayacaktır. Ancak küçük ölçekli sayısal modelde sıçratma eşiğinde su seviyesi artmış ve sonrasında oluşan jet profilleri daha kısa

mesafeye düşmüştür. Gelinen noktada sayısal modelde ölçek büyüdükçe sonuçların daha gerçekçi ve anlaşılabilir olduğundan su yüzü profilleri için sayısal modelde prototip ölçekte çözümlemenin daha doğru olacağı değerlendirilmektedir (Şekil 4.76-87).

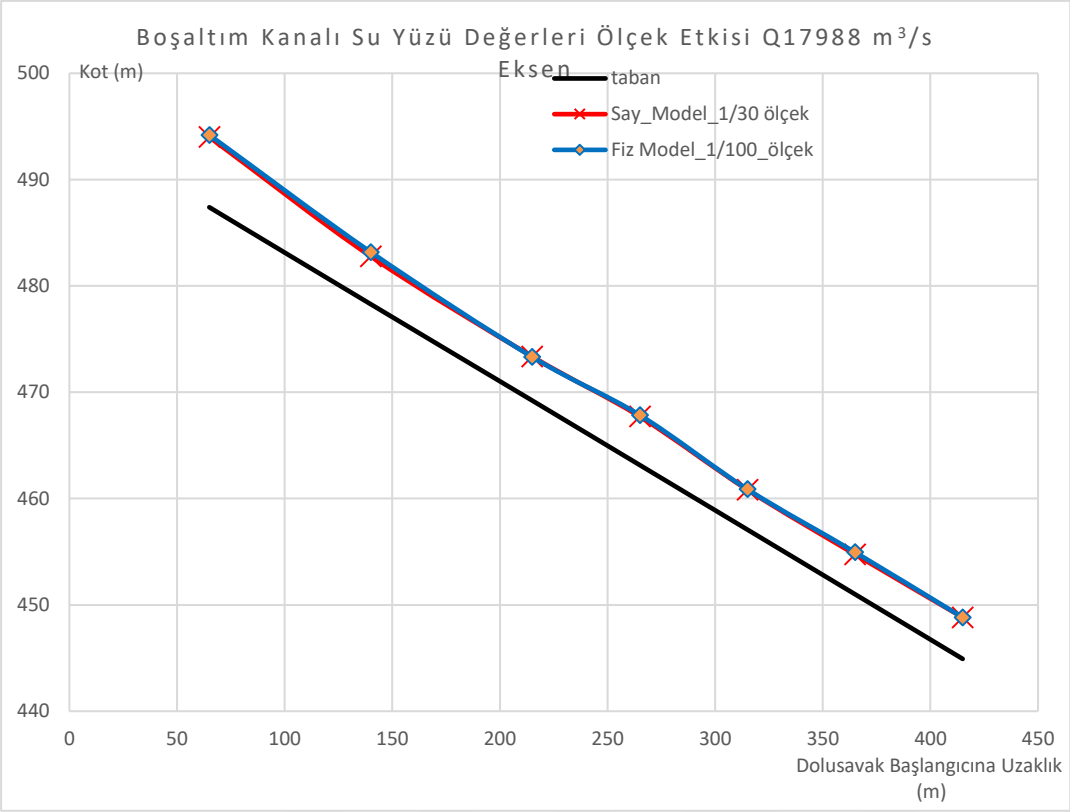
Basınç değerleri için ise yapılan analiz sonuçlarına göre ölçek etkisi ihmal edilecek düzeydedir. 30 ve 100 ölçekli fiziksel model sonuçları boşaltım kanalının ilk iki noktasında farklı olsa da kalan kısımlarda aynı değerler elde edilmiştir. Boşaltım kanalının girişindeki basınç değerlerindeki farklılık akışın giriş koşullarından kaynaklanmaktadır. 30 ölçekli modelde sadece boşaltım kanalındaki karakteristikler değerlendirildiğinden kanala giriş yapan akış, ogee üzerinden dökülen akış değildir. Deney düzeneği ile mümkün mertebe ilgili giriş şartları sağlanmaya çalışılmışsa da aynı şartları sağlamak mümkün değildir. Dolayısıyla buradan da anlaşılacağı gibi sınır şartları akış karakteristikleri üzerinde oldukça etkilidir. 1/1, 1/30 ve 1/100 ölçekli sayısal modellerde elde edilen basınç değerleri birbirine yakın olup bu durum boşaltım kanalının hemen her noktası için geçerlidir. Aynı durum sıçratma eşiği için de geçerli olmuştur. Dolayısıyla fiziksel ve sayısal ölçekli modellerdeki ölçek etkisi yapılan incelemelerde basınç üzerinde olmadığı tespit edilmiştir. Ölçek etkisinin akış hızı üzerindeki durumu ile ilgili olarak; 1/30 ve 1/100 ölçekli fiziksel modellerde ölçek büyüdükçe boşaltım kanalında hız değerlerinde artışlar gerçekleşmiştir. Bu durumun nedeni geometrinin büyümesiyle akış-taban arasında sürüklenen havadan kaynaklı sürtünme gerilmelerinin azalmasıdır. Ancak bu fark ihmal edilecek düzeydedir. Ayrıca sayısal modellerdeki hızların durumu ise ölçek büyüdükçe yani 1/100'den 1/1'e gelindikçe az önce değinilen sebepten kaynaklı hızlarda artışın olduğu görülmüş, özellikle prototip ölçekteki hızlar net bir şekilde 1/30 ve 1/100'den sıyrılmıştır (Şekil 4.88-95)



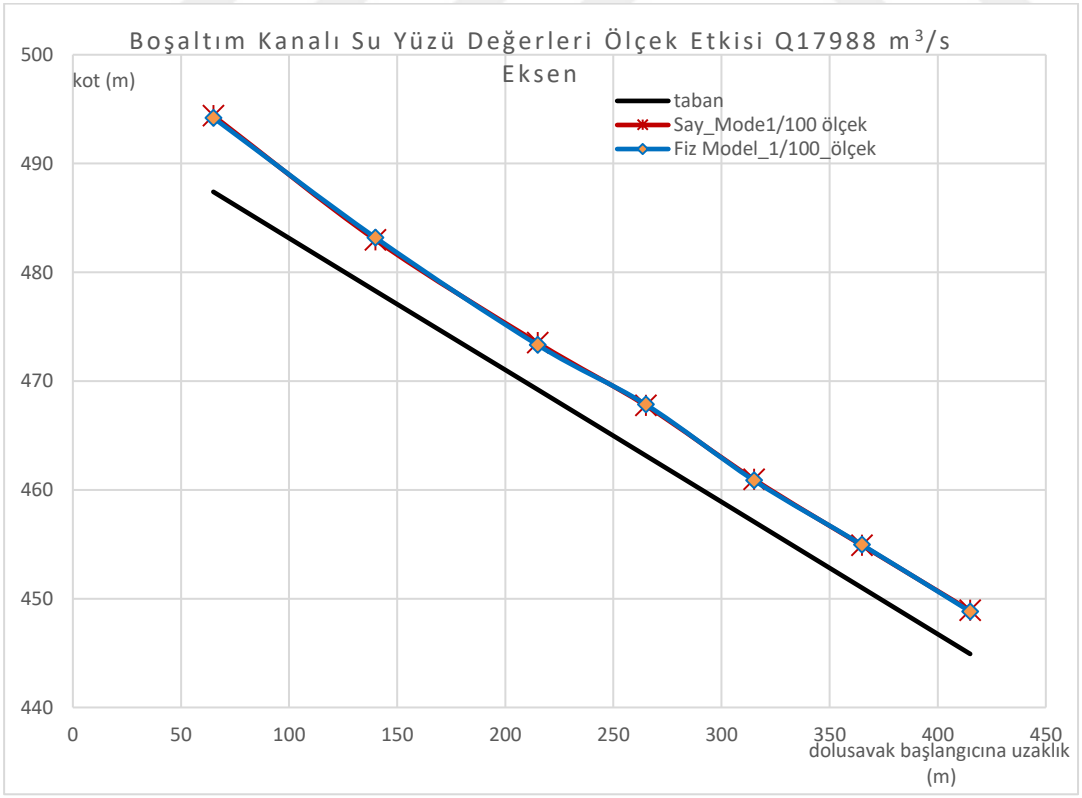

Şekil 4.76 Su yüzü değerleri eksen fiziksel model sonuçları 30 ve 100 ölçek



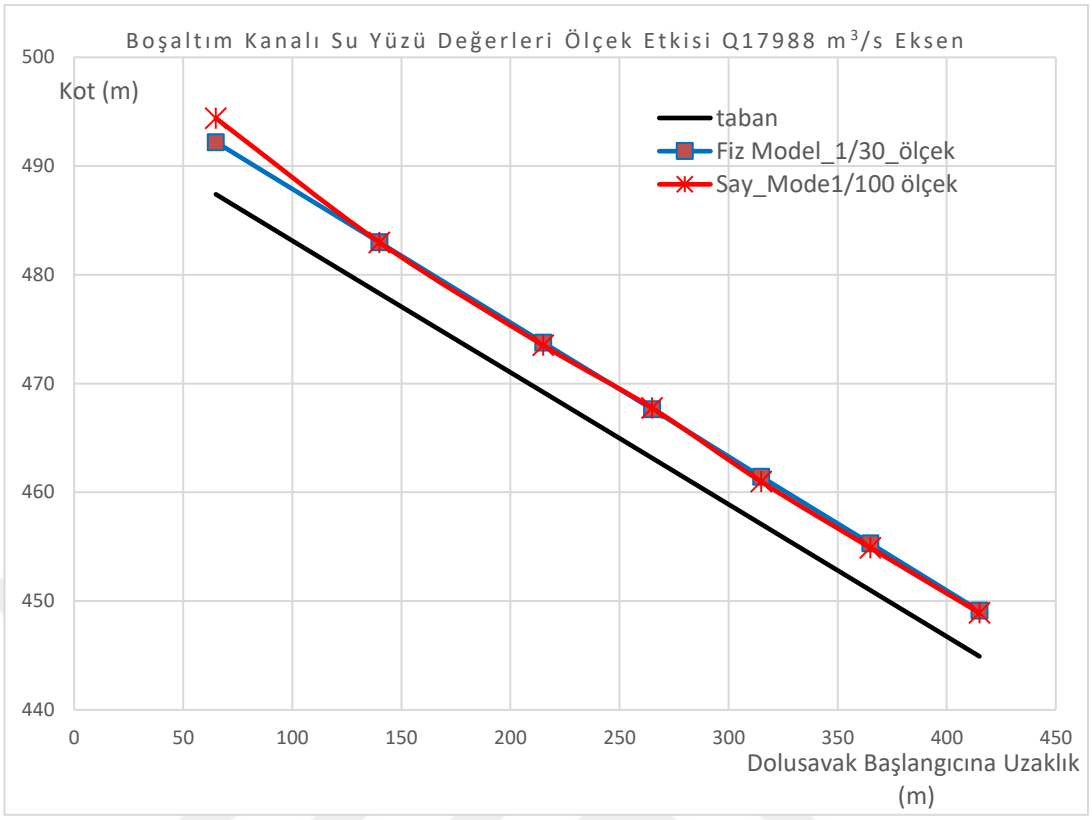

Şekil 4.77 Su yüzü değerleri eksen sayısal model sonuçları prototip, 30 ve 100 ölçek



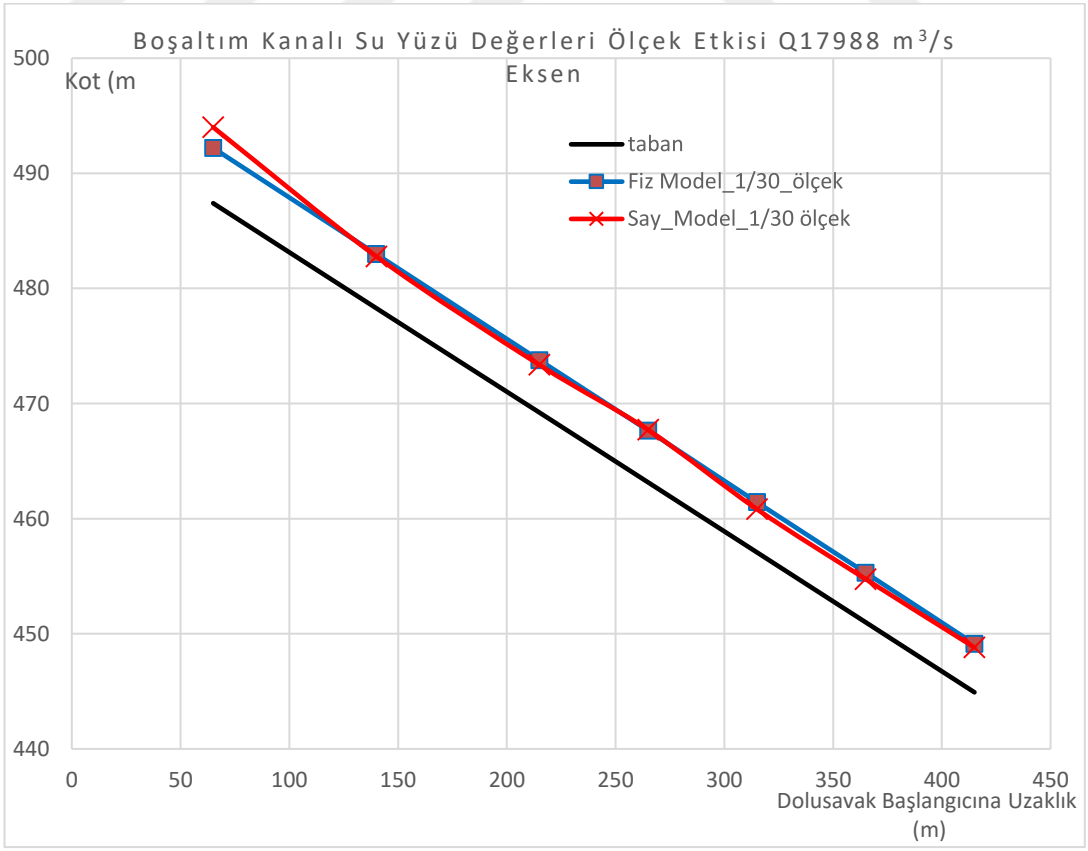

Şekil 4.78 Su yüzü değerleri eksen sayısal ve fiziksel model sonuçları 30 ve 100 ölçek



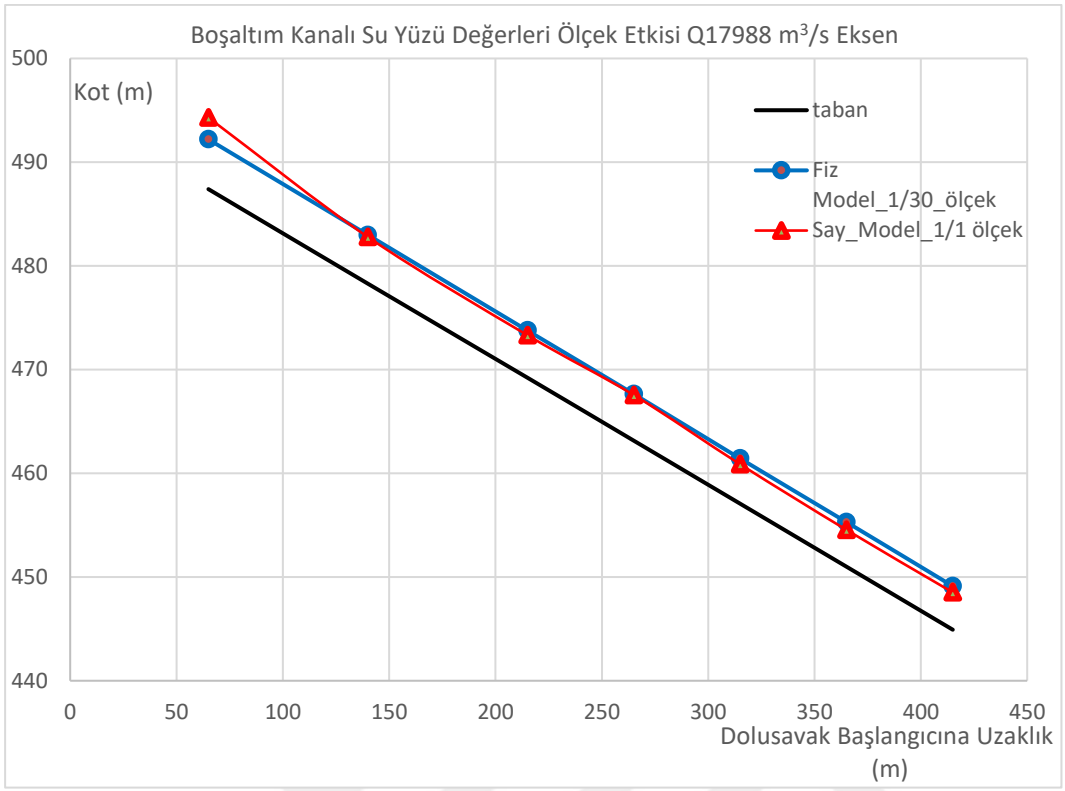

Şekil 4.79 Su yüzü değerleri eksen sayısal ve fiziksel model sonuçları 100 ölçek



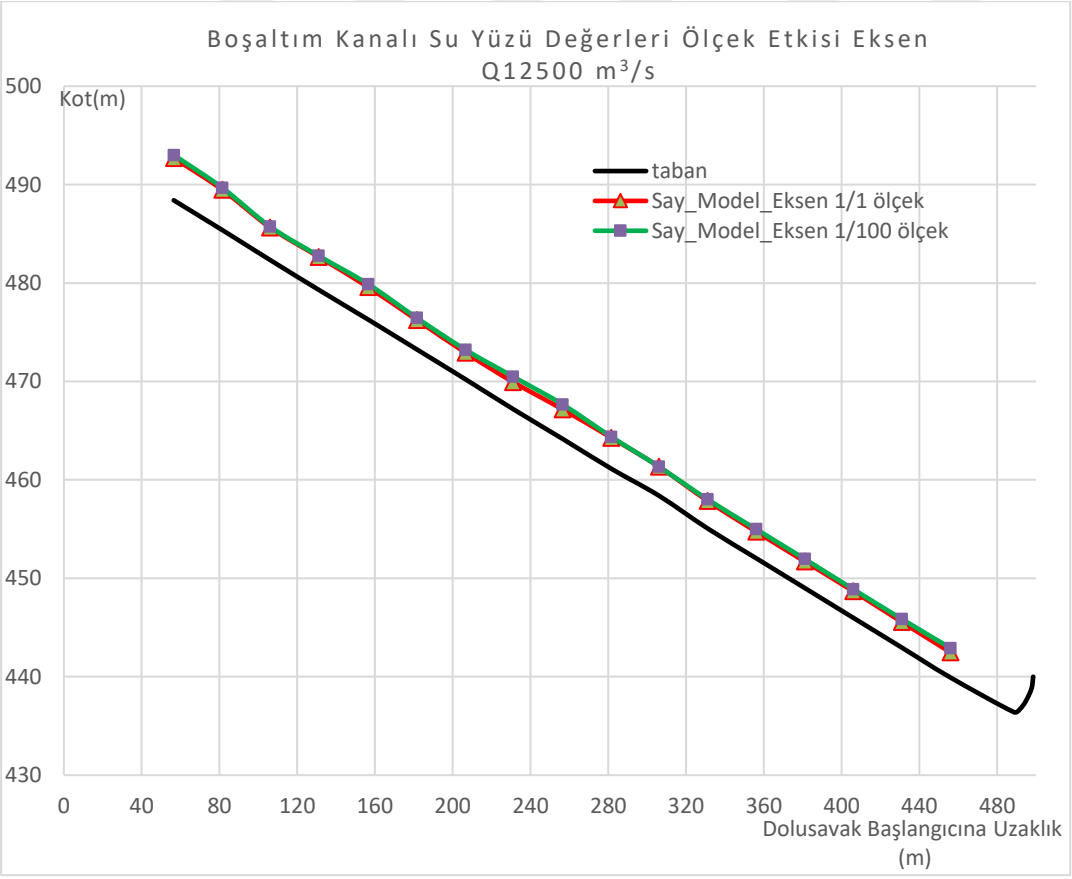

Şekil 4.80 Su yüzü değerleri eksen sayısal ve fiziksel model sonuçları 100 ve 30 ölçek



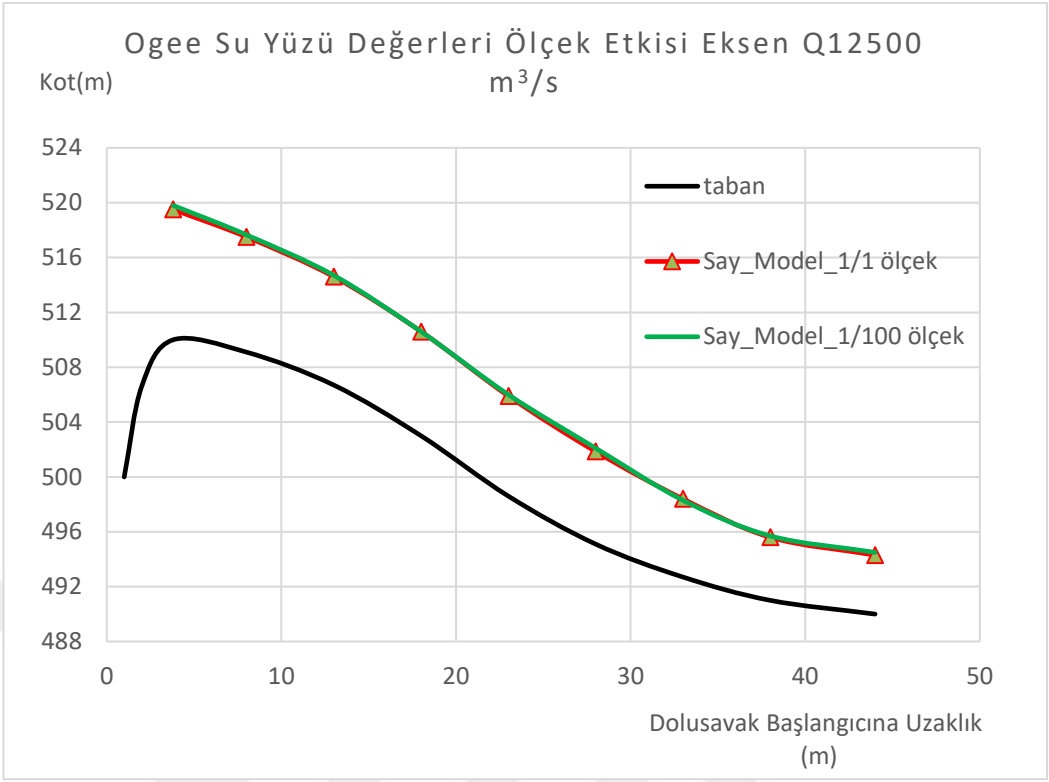

Şekil 4.81 Su yüzü değerleri eksen sayısal ve fiziksel model sonuçları 30 ölçek



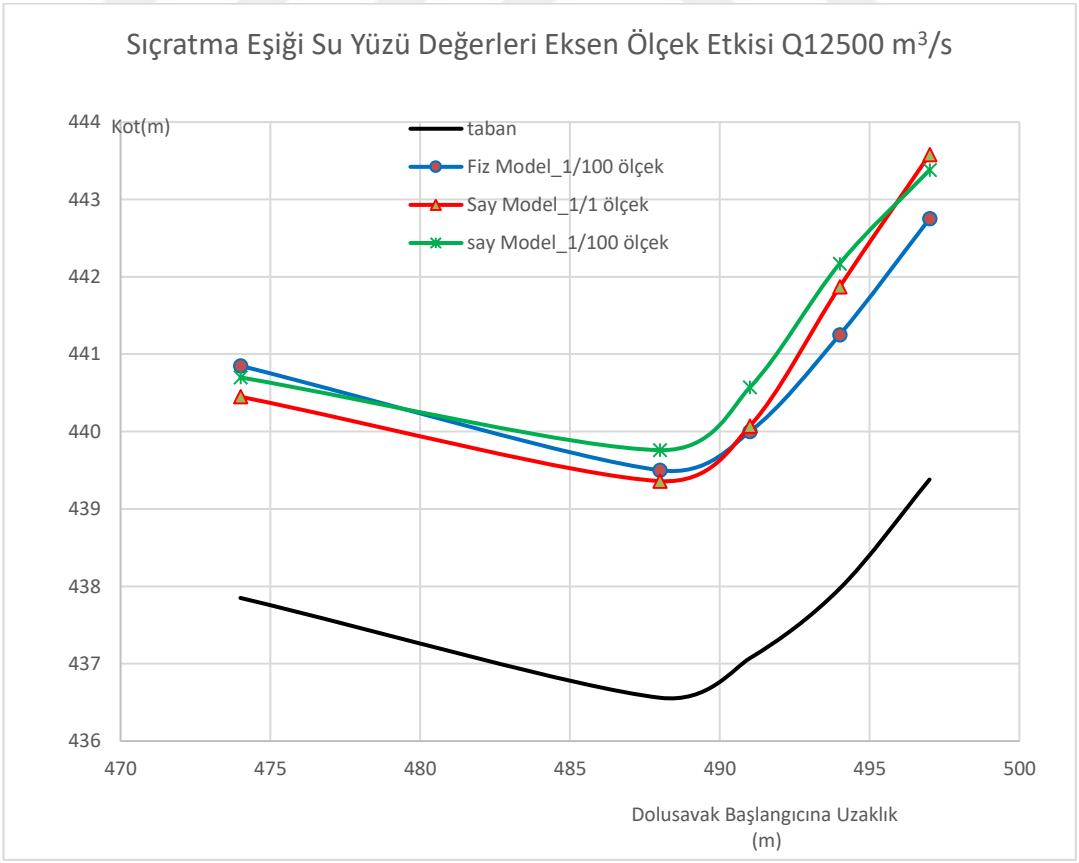

Şekil 4.82 Su yüzü değerleri eksen sayısal ve fiziksel model sonuçları prototip ve 30 ölçek



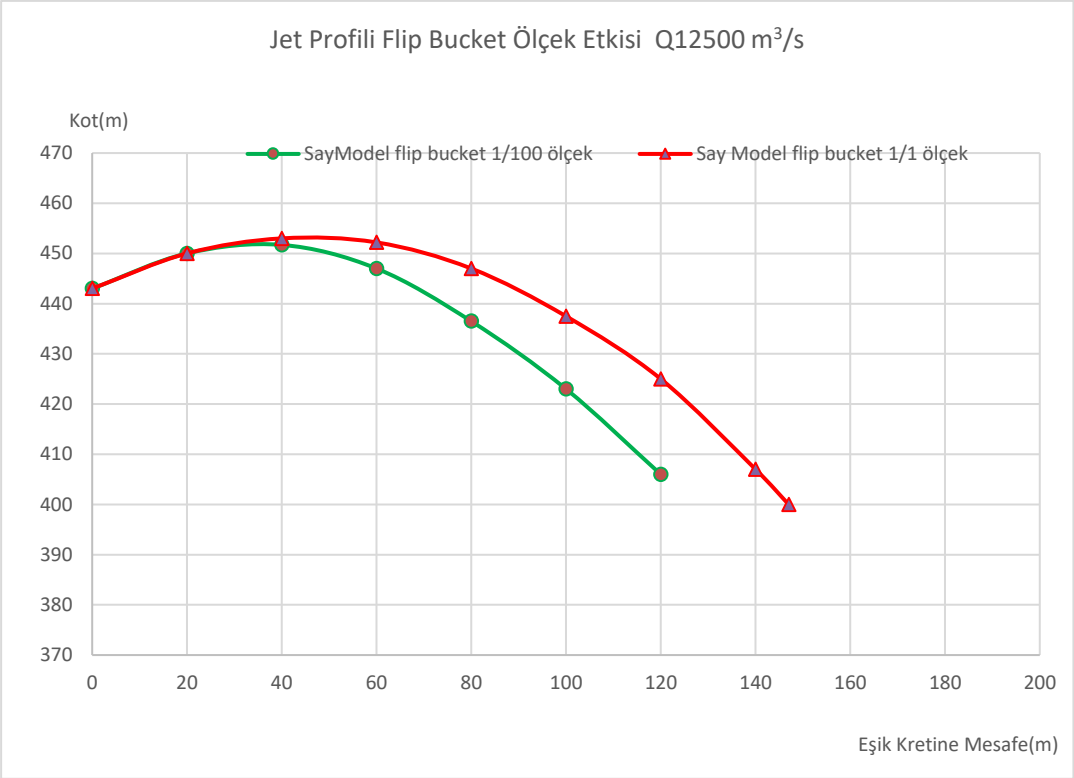

Şekil 4.83 Su yüzü değerleri eksen sayısal model sonuçları prototip ve 100 ölçek



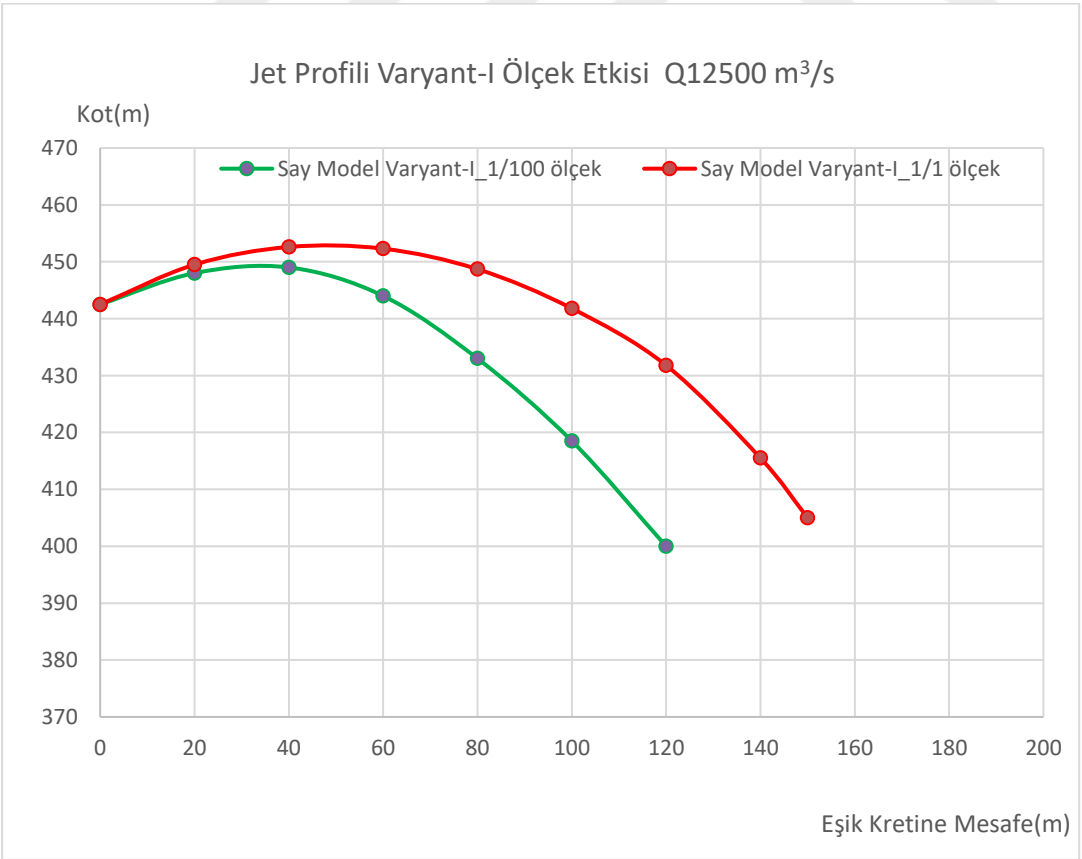

Şekil 4.84 Su yüzü değerleri eksen sayısal model sonuçları prototip ve 100 ölçek(ogee)



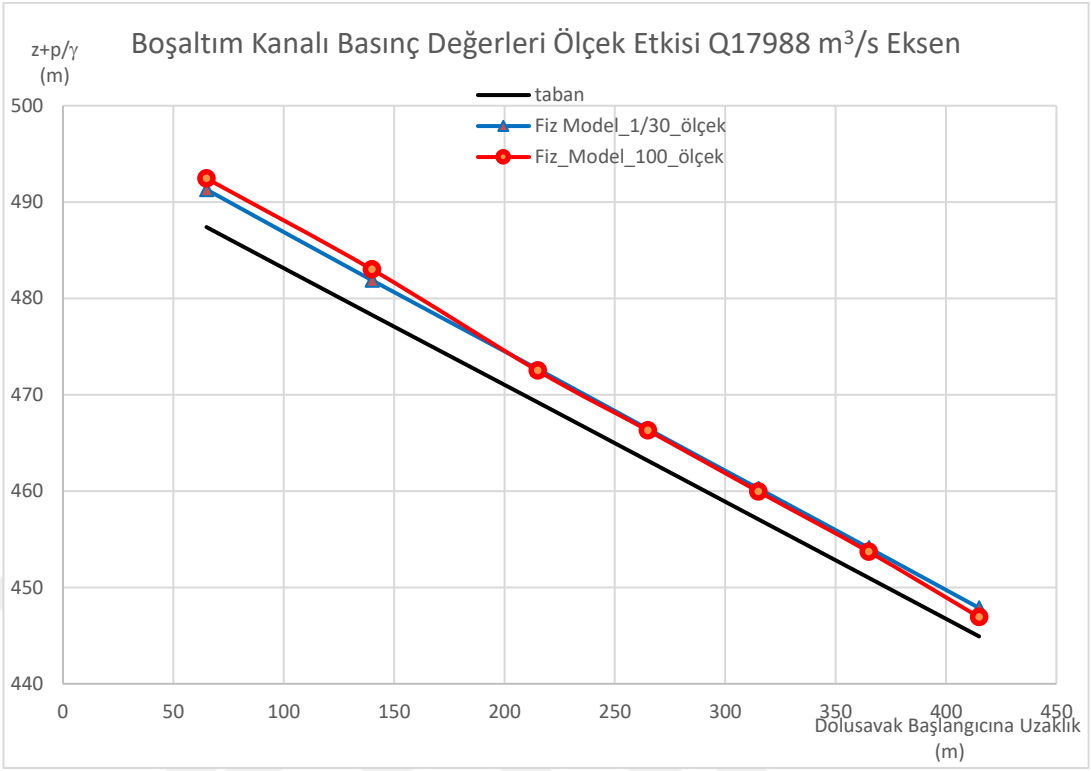

Şekil 4.85 Su yüzü değerleri eksen sayısal model sonuçları prototip ve 100 ölçek(eşik)



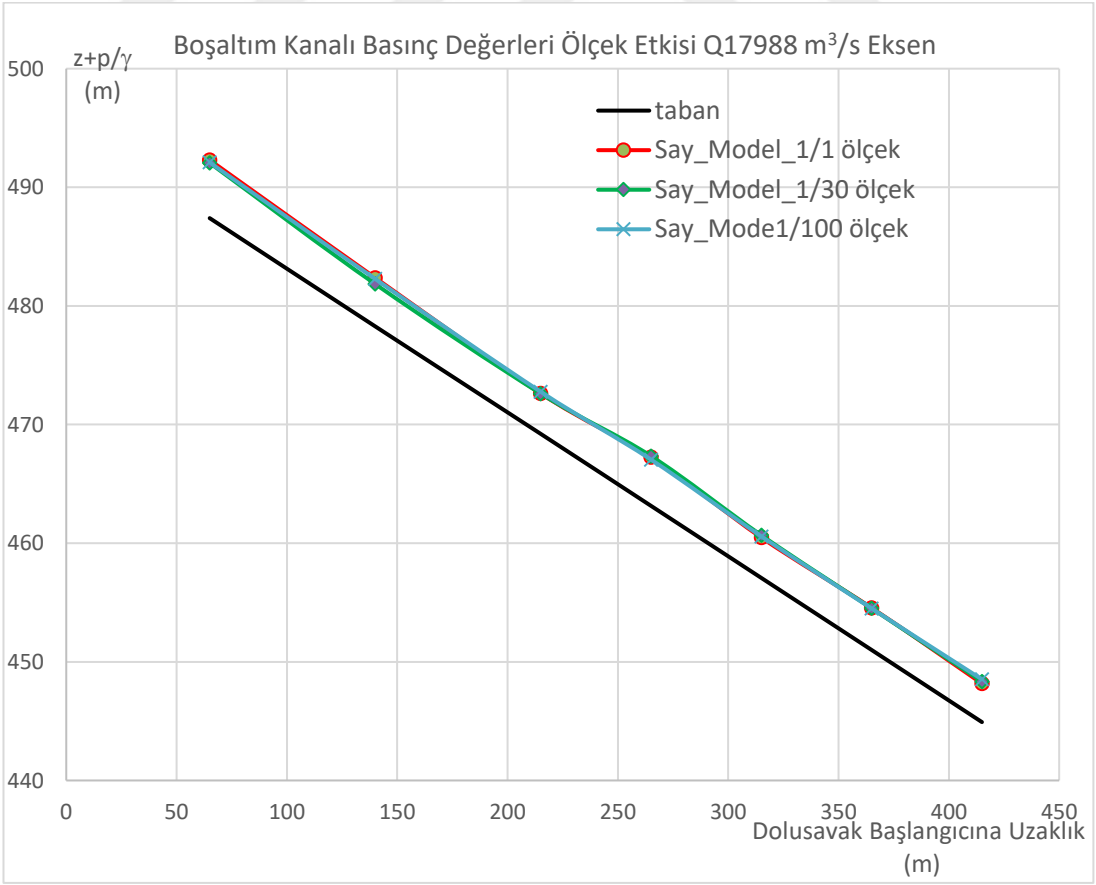

Şekil 4.86 Su yüzü değerleri eksen model sonuçları flip bucket prototip ve 100 ölçek(jet profili)



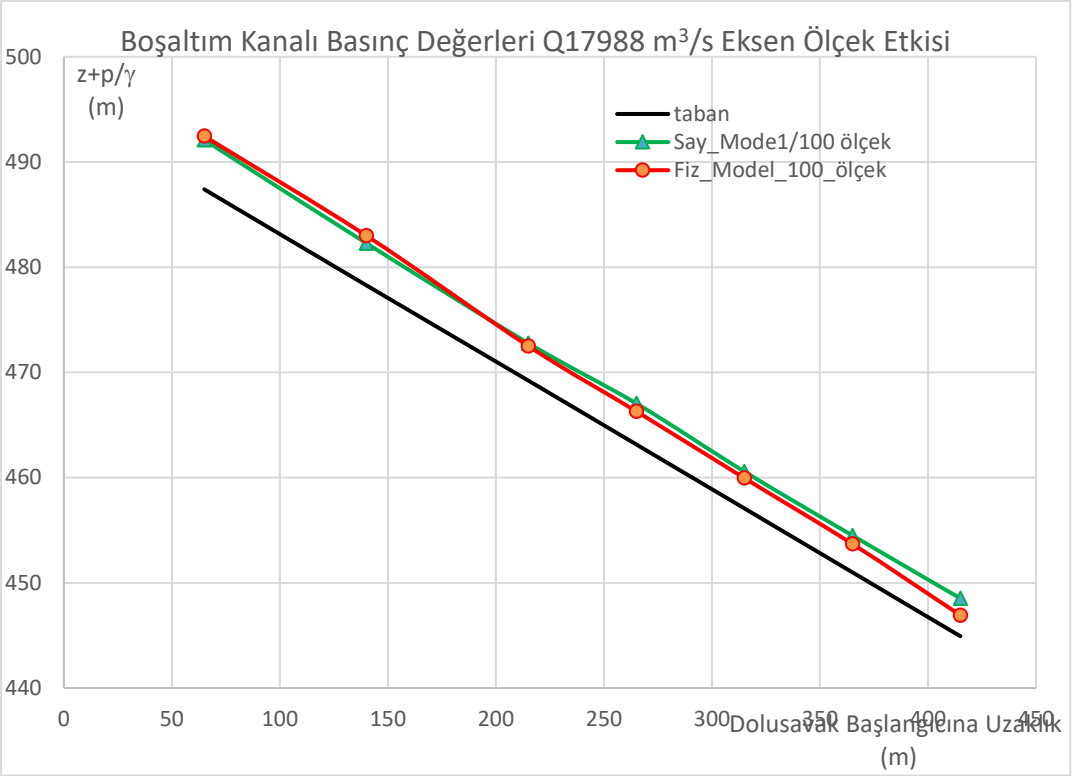

Şekil 4.87 Su yüzü değerleri eksen model sonuçları Varyant-I prototip ve 100 ölçek(jet profili)



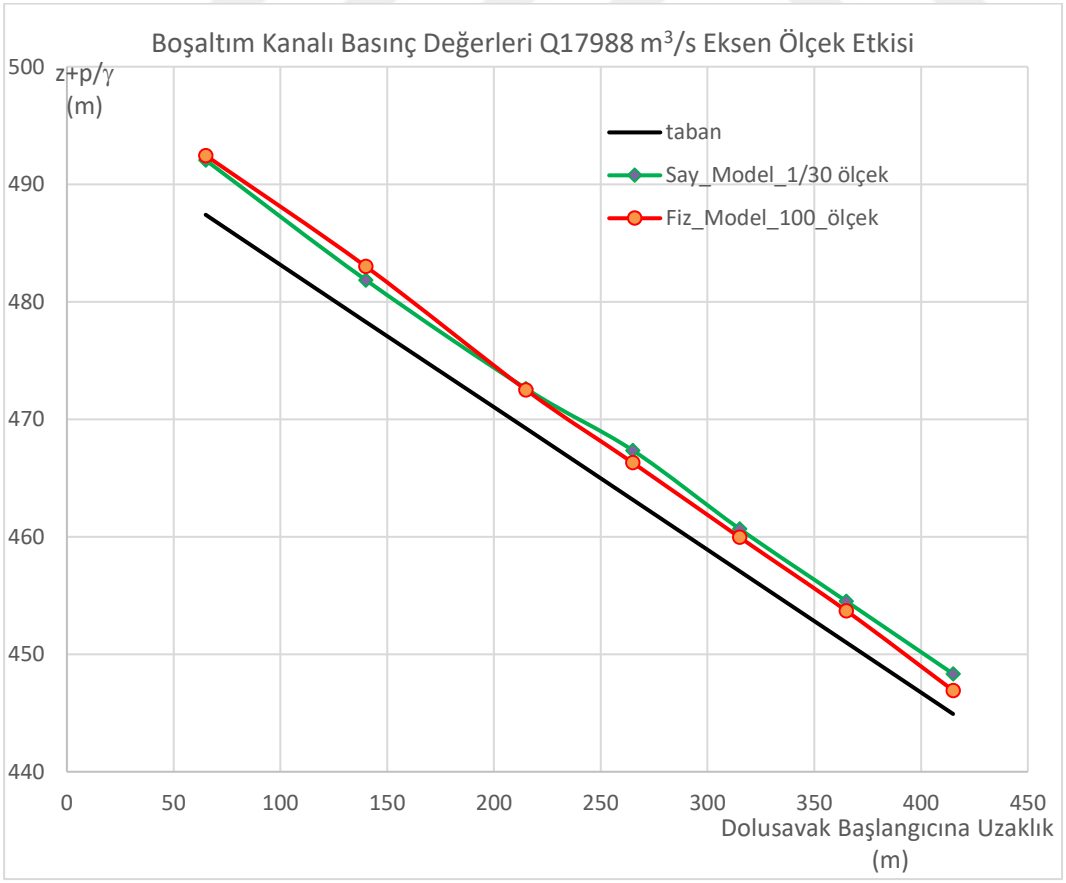

Şekil 4.88 Basınç değerleri eksen fiziksel model sonuçları 30 ve 100 ölçek



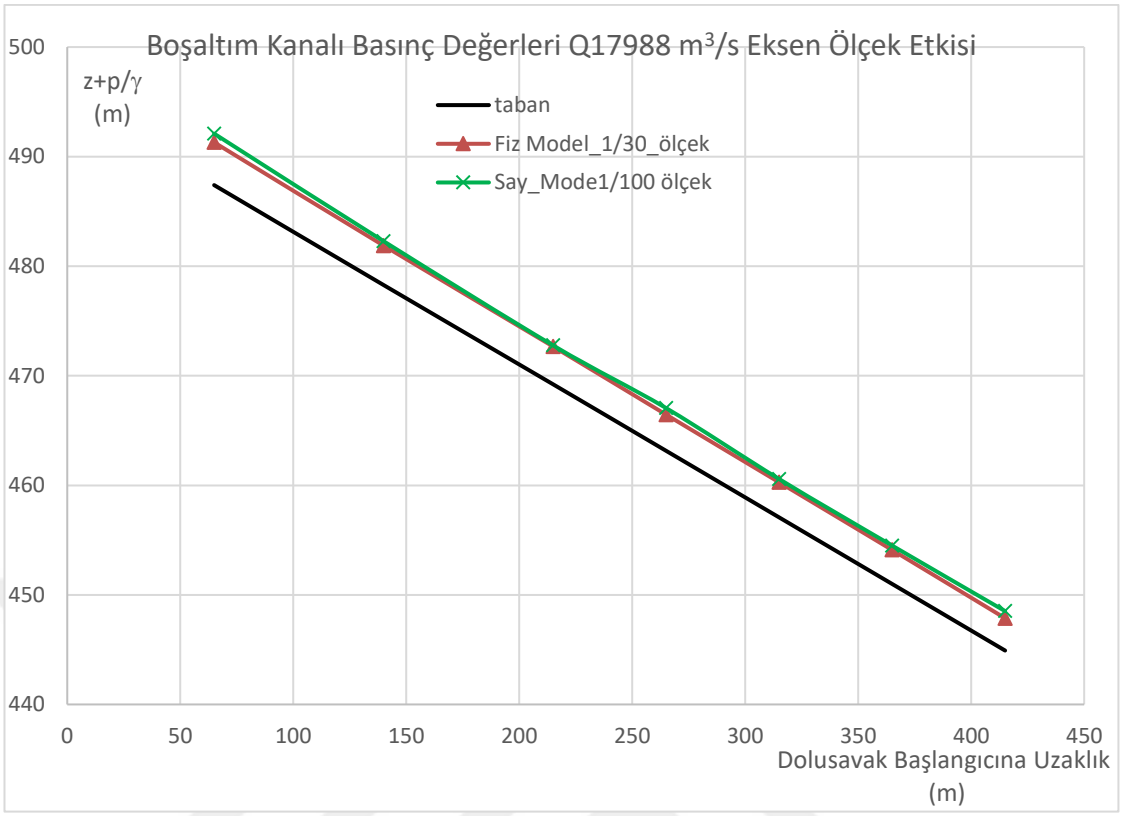

Şekil 4.89 Basınç değerleri eksen sayısal model sonuçları prototip, 30 ve 100 ölçek



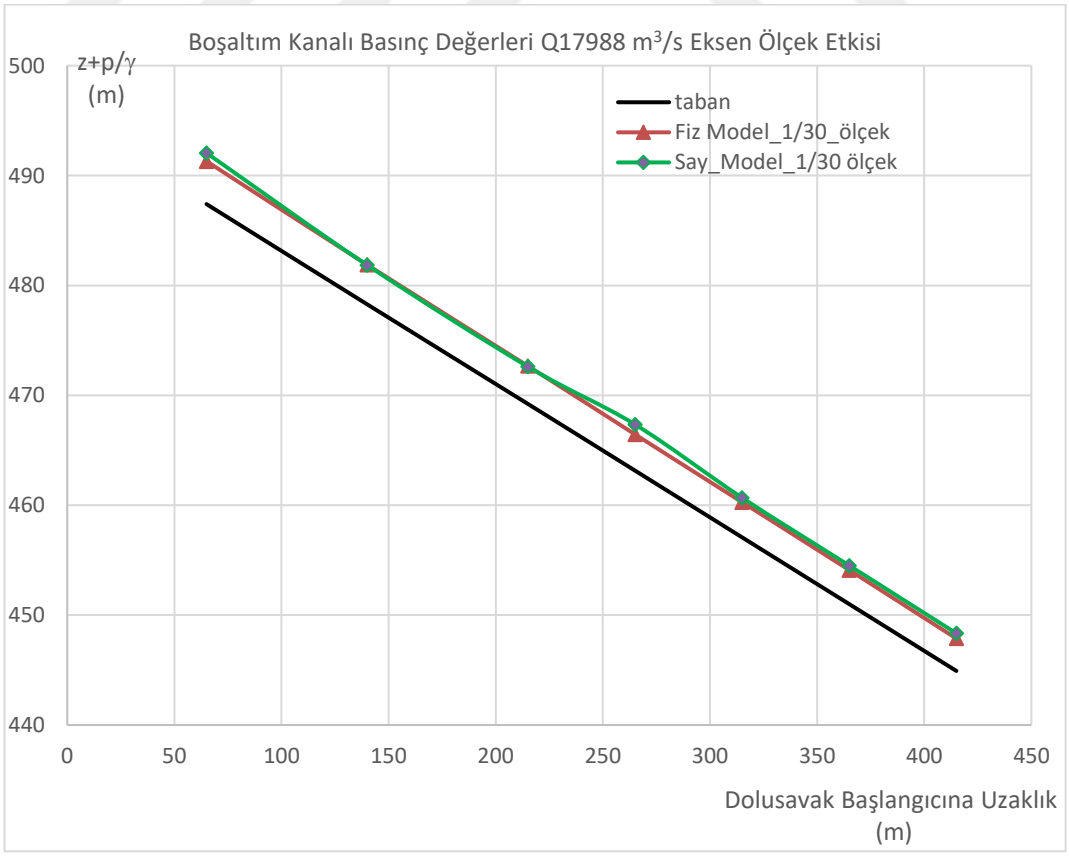

Şekil 4.90 Basınç değerleri eksen sayısal ve fiziksel model sonuçları 100 ölçek



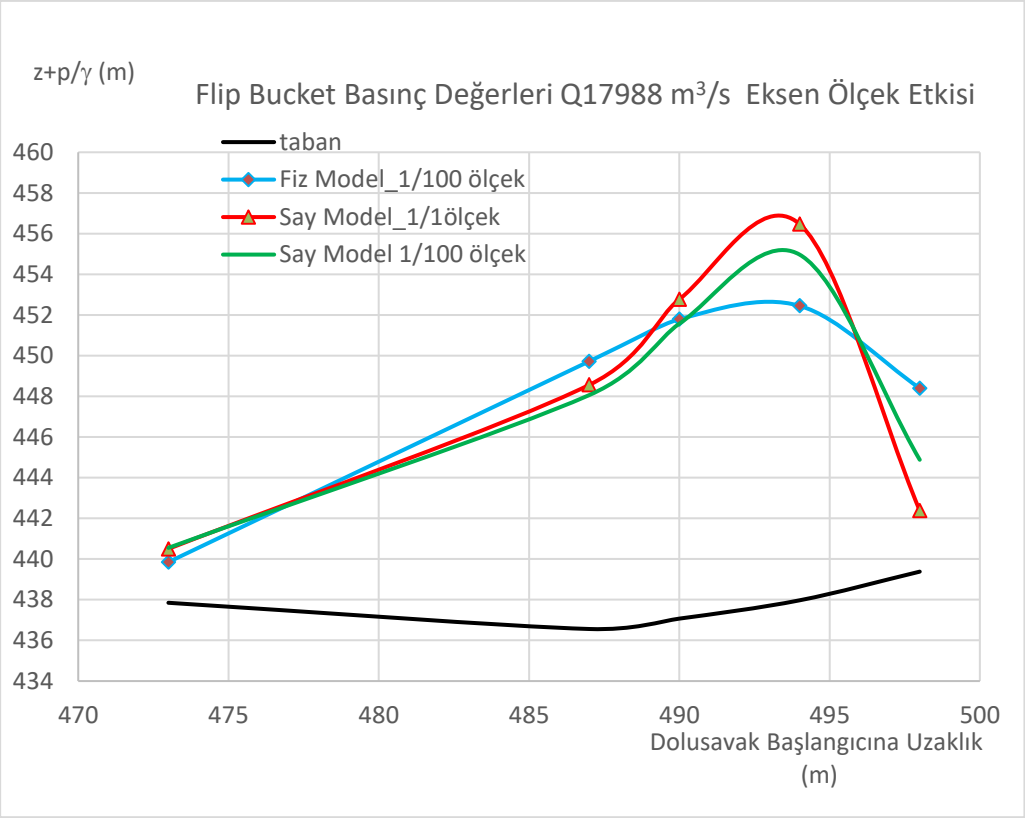

Şekil 4.91 Basınç değerleri eksen sayısal ve fiziksel model sonuçları 30 ve 100 ölçek



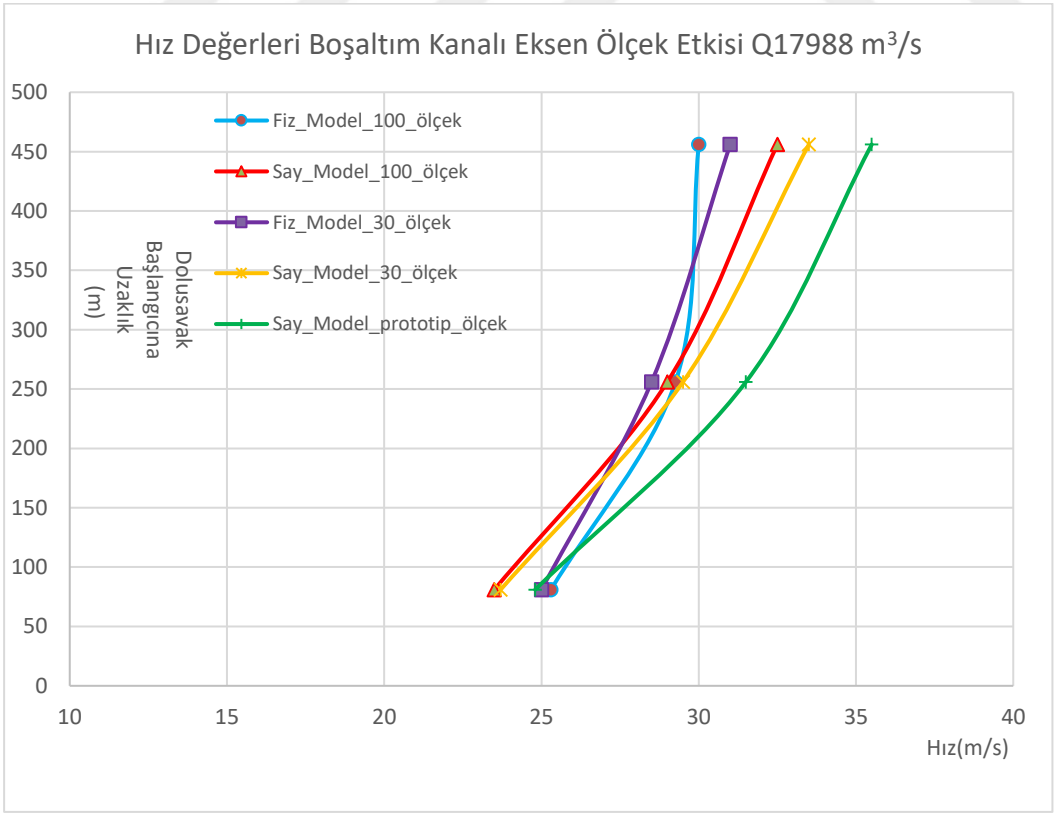

Şekil 4.92 Basınç değerleri eksen sayısal ve fiziksel model sonuçları 30 ve 100 ölçek




Şekil 4.93 Basınç değerleri eksen sayısal ve fiziksel model sonuçları 30 ölçek




Şekil 4.94 Basınç değerleri eksen sayısal ve fiziksel model sonuçları prototip ve 100 ölçek




Şekil 4.95 Hız değerleri eksen sayısal ve fiziksel model sonuçları prototip, 30 ve 100 ölçek

### 4.2 Ilısu barajı dolusavak 2010 yılı tasarımı HAD analizi

Çalışmamızın bu kısmında yapımı tamamlanmış olan Ilısu Barajı ve HES projesi dolusavağının sayısal analizi yapılmıştır. Söz konusu barajın 1982 yılı modeli sayısal analizi başlığında detaylarına değinilen bazı değişikliklerle nihai halini almış olan kati projenin fiziksel modelleri gerçekleştirilememiştir(Şekil 4.96-97). 1982 yılı tasarımının sayısal modelleri gerçekleştirilmiş, elde edilen sayısal verilerin fiziksel model verileriyle iyi uyum sağladığı görülmüştür. Bu doğrultuda nihai projenin sayısal modelleri gerçekleştirilmek suretiyle bir yönden ilgili açığı kapatmış olacağız. Tanzim edilen bu modelde Air Entrainment, Variable Density Flow ve Dispersed Multiphase Model seçenekleri kullanılmış, gerek boşaltım kanalında gerekse de sıçratma eşiği sonrasındaki jet profilleri ve bu jetlerin düştüğü dalma havuzunda oluşacak hidrolik durum, hava sürüklenmesi hususu da göz önüne alınarak belirlenmiştir. İlgili modellerin yanı sıra air entrainment modeli kullanılmadan gerçekleştirilen sayısal model sonuçları da dikkate alınarak hava sürüklenmesi hususunun yapının tümünde nasıl etki ettiği tespit edilmeye çalışılmıştır.

Sayısal analiz için en uygun hesap ağı olarak, önceki bölümlerde anlatılan DS-006 nolu formülasyon kullanılmıştır. Uygun hesap ağı konfigürasyonuyla dolusavak deşarj kanalı boyunca ve enerji kırıcı yapıdaki basınç ve hız karakteristikleri, maksimum hesap yüküne denk gelen 527,86 m rezervuar su seviyesi için incelenmiştir. Bu modellemede sınır koşulları olarak, maksimum hesap yüküne denk gelen 527,86 m rezervuar seviyesi giriş koşulu iken (Xmin), çıkış koşulu ise santral tam kapasite çalışırken oluşacak kuyruksuyu kotu olan 423,5 m'dir (Xmax). Kalan diğer bölgelerdeki sınır koşulları ile türbülans modeli, 1982 yılı sayısal modelleme ile aynı alınmıştır. Mevcut modeldeki enerji kırıcı havuzdan dolayı dolusavağı terk eden akışın oluşturduğu dalgaların havuzda sönümlenmesi ve akabinde deşarj suyunun mansaba geçmesi hususları göz önüne alındığında sistemin kararlı duruma gelmesi zaman ve kaynak açısından daha kapsamlıdır. Bu nedenle simülasyon 300 s boyunca çalıştırılmıştır.

#### 4.2.1 Sayısal analiz sonuçları

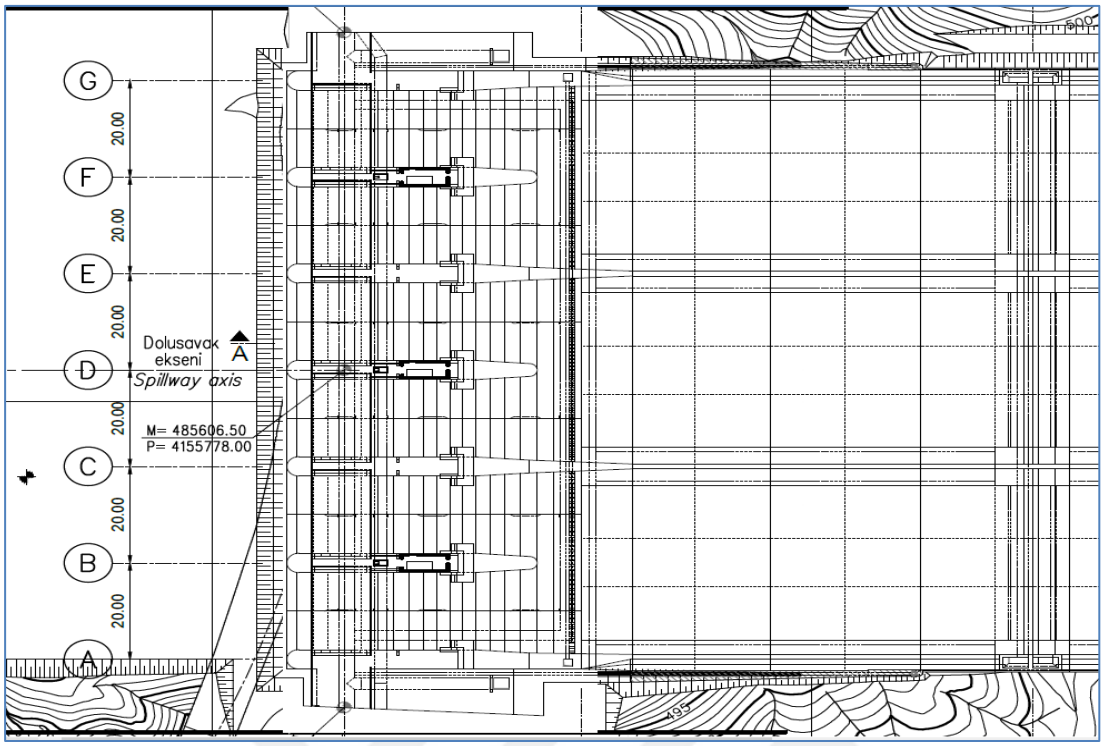
Yukarıda anlatılan aşamalardan sonra üç boyutlu simülasyonlar zamana bağlı çözülerek tamamlanmıştır. Belirlenen hesap ağı (DS-006) kullanılarak elde edilen ilk

hidrolik değerler tabloda verilmiştir (Tablo 4.6). Daha sonra dolusavak üzerinde eksende 65'er farklı noktada hidrolik karakteristikler (basınç, hızlar vb.) detaylı olarak ortaya konulmuştur. Ölçüm yapılan noktaların koordinatları ve ilgili değerler Tablo 4.7 de, dolusavak üzerinde gösterimi ise Şekil 4.98 da verilmiştir. Tespit edilen noktalar dolusavağın katı modeli üzerinde direkt seçilen noktalar olup bu hususta detaylı koordinat belirlenmemiştir. Detayları önceki bölümlerde anlatıldığı üzere Ilısu Barajı dolusavağının yarısı hesap ağına dahil edilmiştir. Debi sonuçları yapının tamamına göre verilmiştir. Model ekseni, enine olarak y= 0 koordinatına oturtulmuştur. Boyuna Km'ler ise dolusavak yaklaşım kanalı başlangıç noktası (x= 0) baz alınmıştır. Yükseklik bilgileri ise z eksenindedir.

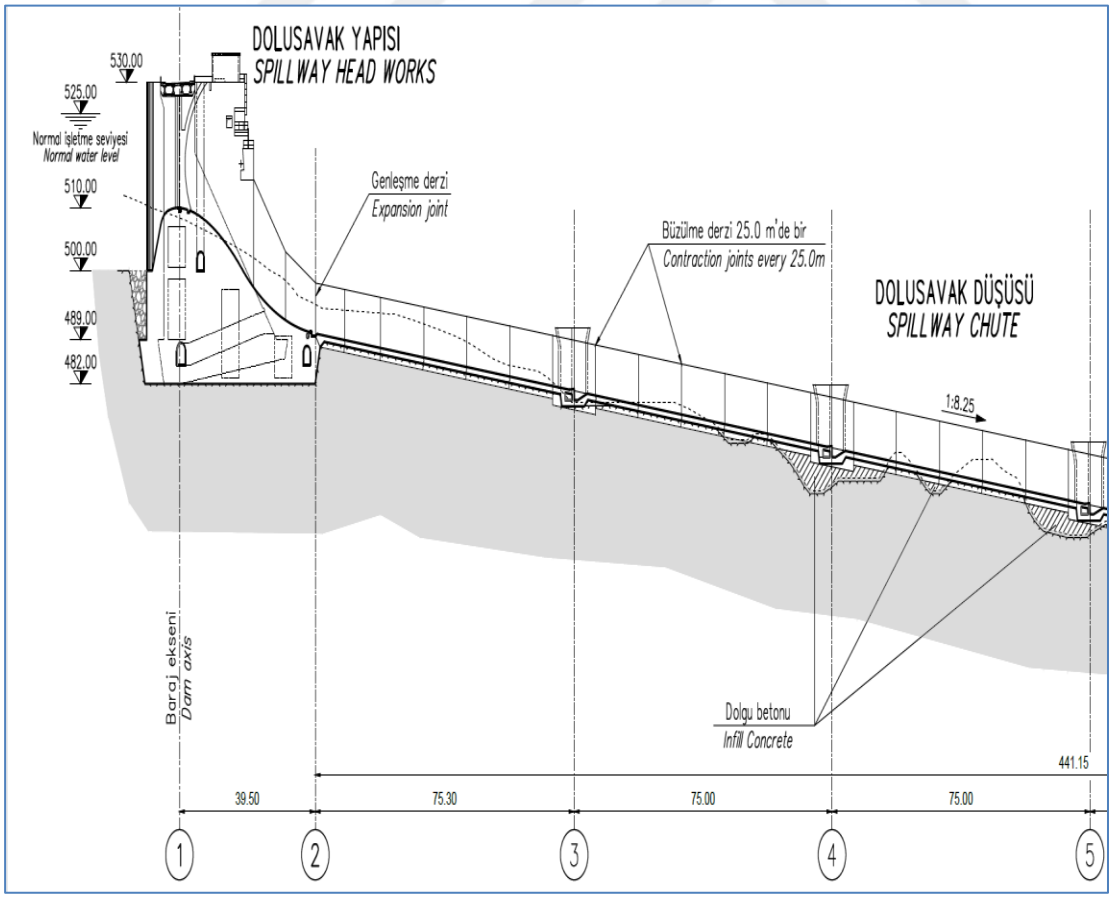
#### 4.2.1.1 Model basınç ve hız ölçüm sonuçları

Ilısu Barajı dolusavağı üzerindeki basınç değerlerine göre yapılan sınıflandırma ve eksenden alınan kesitteki basınç dağılımı Şekil 4.99'da verilmiştir. Grafikte 3 farklı basınç dağılımı görülmektedir. Hava sürükleme ilişkileri adlı başlıkta da ifade edildiği şekilde Flow3D'de air entrainment modelinin iki seçeneği vardır. Modelin ilki, sürüklenen havanın hacim oranı nispeten düşük olduğunda hava hacim oranını kaydetmek ve taşımak için pasif bir skaler değişken kullanır ve akışın dinamiklerini değiştirmediği için pasiftir. Bu modelin basınç değerlerine olan etkisi grafikte "with air entrainment scalar bulking off" olarak gösterilmiştir. İkinci hava sürüklenme modeli seçeneği ise, değişken yoğunluklu bir formülasyona dayanmaktadır. Bu model, havanın eklenmesiyle sıvı hacminin "kabarmasını" ve sürüklenen hava ile ilişkili kaldırma kuvveti etkilerini içerir. Ayrıca değişken yoğunluklu (variable density evaluation) formülasyon kullanılırken havanın su içinde nispi bir sürüklenmesini, suyun yüzeyine çıkması durumunda havanın olası kaçışını ve adiabatik olarak temsil edilen hapsolmuş kabarcık bölgelerine havanın çıkarılmasını veya eklenmesini içerebilir. Bu modelin basınç değerlerine olan etkisi ise grafikte "with air entrainment variable density evaluation bulking on" olarak gösterilmiştir. Ayrıca air entrainment modeli çalıştırılmadan (without air entrainment) elde edilen basınç değerleri de grafikte gösterilmektedir. Grafikler incelendiğinde sıçratma eşiğine kadarki kısımda basınç değerleri boşaltım kanalında türbülans enerjisinde kayda değer değişiklik gözlenmediğinden her üç durumda da aynı iken sıçratma eşiğinde oluşan türbülans enerjisindeki kısmi değişime paralel olarak değişken yoğunluklu model grafiğinin

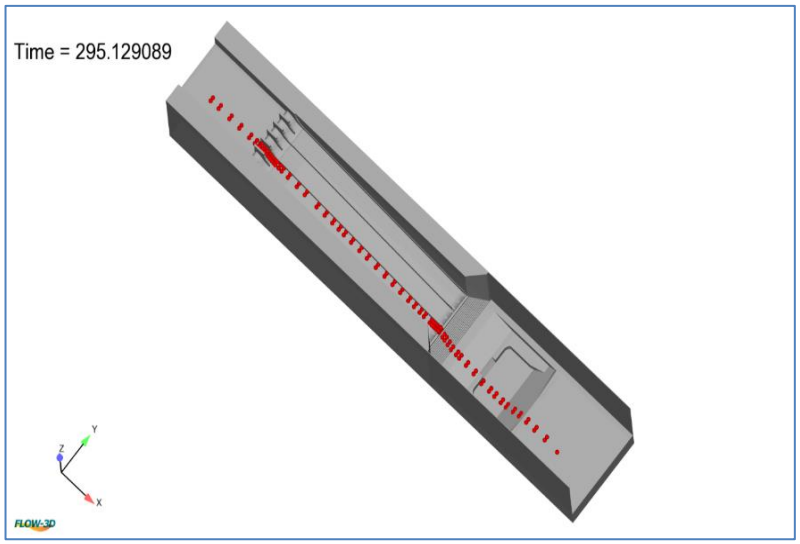
(with air entrainment density evaluation bulking on) basıncında diğer iki modelden daha düşük basınç değerleri gözlenmişse de bu oran 1982 yılı analiz sonuçlarında olduğu gibi %5 seviyelerinde olmuştur. Diğer iki modelde ise basınç açısından neredeyse aynı değerler elde edilmiştir. Yine "With air entrainment bulking on" model sonuçlarında havuzun tabanında oluşan basınç "without air entrainment" modeline göre %60 daha düşüktür. Scalar air entrainment modeli ile without air entrainment model basınç değerleri neredeyse birbirine eşittir. Bu durum simülasyon görüntülerinde net bir şekilde gösterilmektedir (Şekil 4.99-4.101). Ayrıca deşarj kanalında oluşan basınç değerleri tek başına değerlendirildiği zaman uygun değerler olarak görülmesine rağmen yüksek akım hızlarında önemli sorunlara neden olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Bu yüzden deşarj kanalındaki yapısal durumu hız karakteristiğiyle birlikte değerlendirmek gerekir. Dolusavak boyunca ortalama hız ölçümleri de yapılmıştır. Ortalama hız değerlerine göre yapılan sınıflandırma ve eksenden alınan kesitteki ortalama hız dağılımı Şekil 4.102-104'te verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere dolusavak üzerindeki akımın büyük çoğunluğu 20-25 m/s değerlerinin üzerindedir. Boşaltım kanalı sonuna doğru hava sürüklenmesi etkisiyle değişken yoğunluklu modelde(With Air Entrainment Bulking on) Without air entrainment ve scalar air entrainment modellerine kıyasla hız değerlerindeki ivmelenmede yavaşlama görülmüştür. Bu durum hava sürüklemesi etkisiyle kayma gerilmesinin azalması ve hızın artması teorisine zıt olduğundan dikkat çekicidir. Hız bakımından en yüksek değerler without air entrainment modelinde görülmüştür. Aynı durum froude sayıları için de geçerli olmuştur (Şekil 105-106). Eşik sonrasında oluşan hız profilleri hususunda "With air entrainment bulking on" modelinde dalma havuzunda meydana gelen türbülansın etkisiyle hız değerlerinde artış gözlenirken kalan her iki modelde de böyle bir durum oluşmamıştır. Yine "With air entrainment bulking on" modelinde eşikten sonra meydana gelen enerji kırınımı "without air entrainment" ve "scalar air entrainment bulking off" modeline göre daha düşük seviyede gerçekleşmiştir. Eşik sonrasında mansap kanalına geçişe kadarki kısımda oluşan enerji kırınımı değişken yoğunluklu hava sürükleme modelinde %40 seviyesinde gerçekleşmişken diğer modellerde %60 seviyelerindedir. Her iki modelin karşılaştırılmasında benzer durumlar türbülans enerji grafiği, türbülans dağılım grafiği ve yapı tabanında oluşan kayma gerilmesi değerlerinde de tespit edilmiş olup ilgili görüntüler Şekil 4.107-115'de verilmiştir.




Şekil 4.96 Ilısu barajı dolusavak yapısı plan görünüşü




Şekil 4.97 Ilısu barajı dolusavak yapısı kesit görünüşü




Şekil 4.98 Ölçüm yapılan noktaların görüntüsü(eksen)

Tablo 4.6 Dolusavak 2010 yılı tasarım sayısal analiz sonuçları

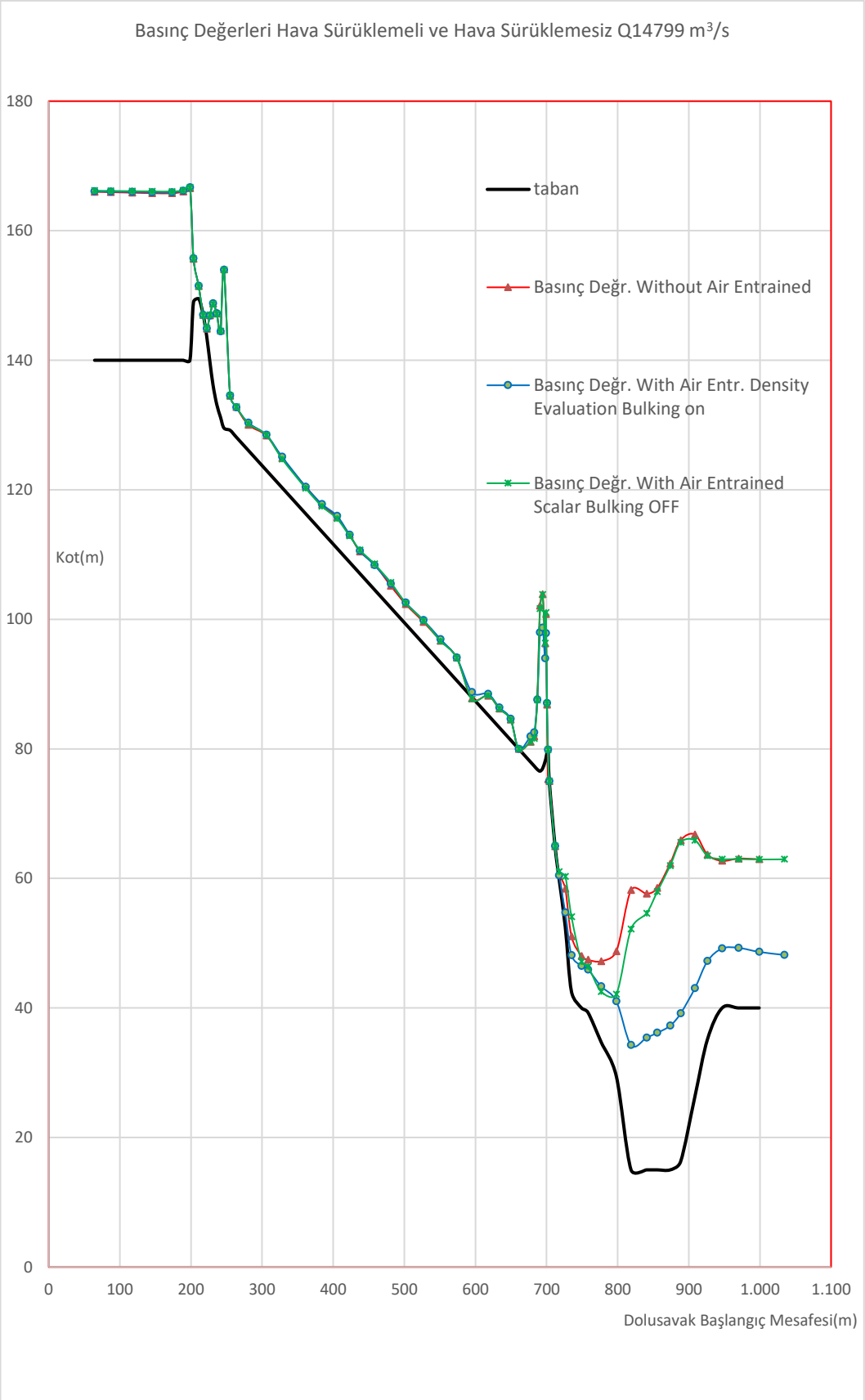
| Simulasyon No | Hesap Hücresi Boyutları | $H_0$ (m) | Q($m^3$/s) | Jet Yüksekliği(m) | Jet Uzunluğu(m) | Jet Alt Nap | Jet Derinliği(m) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| DS-006 | 1/0,5 | 17,86 | 15120 | 14 | 160 | 50 | 28 |

Tablo 4.7 Dolusavak üzerinde eksendeki problar

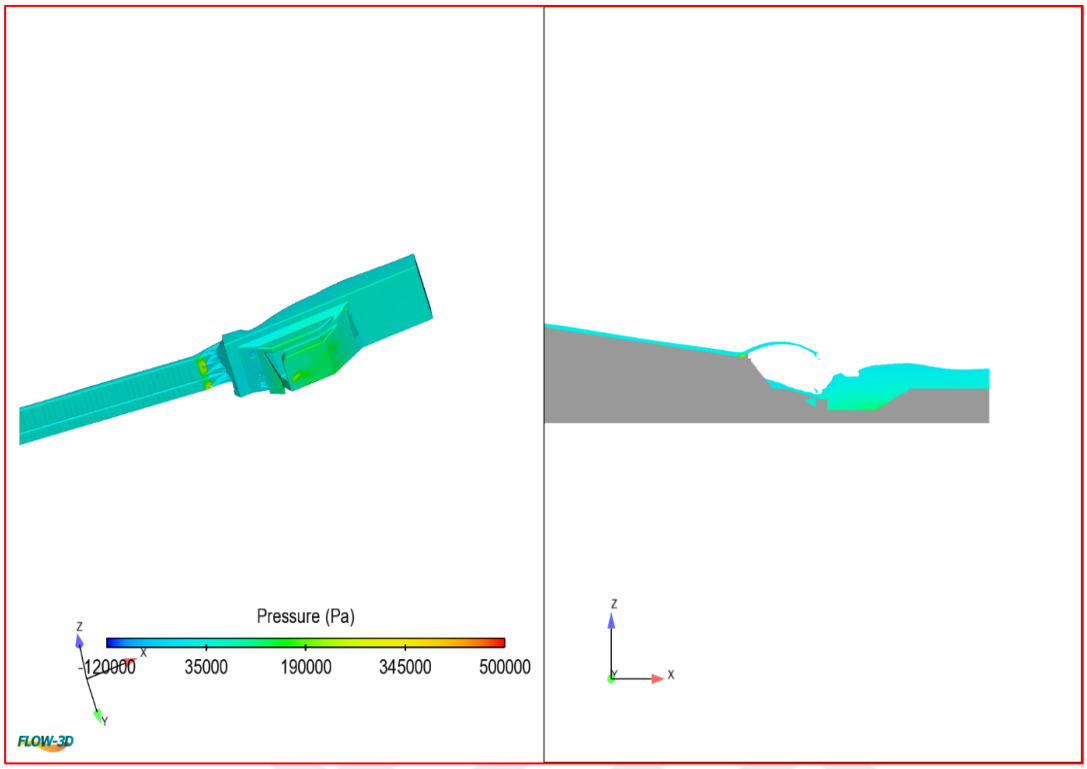
| **Probe** | **x** | **y(eksen)** | **z** | **P (m) (basınç)** | **Serbest Su Seviyesi(m)** | **Ortalama Hız(m/s)** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 64,53268 | -30 | 140,00 | 26,08 | 167,02 | 4,72 |
| 2 | 87,15842 | -30 | 140,00 | 26,03 | 166,47 | 4,79 |
| 3 | 117,2076 | -30 | 140,00 | 25,98 | 166,46 | 4,80 |
| 4 | 145,1604 | -30 | 140,00 | 25,92 | 166,43 | 4,81 |
| 5 | 173,1131 | -30 | 140,00 | 25,90 | 166,38 | 4,81 |
| 6 | 189,1859 | -30 | 140,00 | 26,15 | 166,18 | 4,85 |
| 7 | 198,5585 | -30 | 140,00 | 26,67 | 165,68 | 5,48 |
| 8 | 203,6235 | -30 | 148,99 | 6,75 | 164,80 | 9,70 |
| 9 | 210,9045 | -30 | 149,50 | 1,96 | 162,10 | 12,83 |
| 10 | 217,0775 | -30 | 147,08 | -0,08 | 157,73 | 14,36 |
| 11 | 222,1425 | -30 | 143,71 | 1,16 | 153,77 | 14,80 |
| 12 | 226,6913 | -30 | 139,73 | 7,15 | 149,95 | 14,75 |
| 13 | 231,063 | -30 | 136,17 | 12,60 | 145,27 | 15,76 |
| 14 | 236,2549 | -30 | 133,19 | 14,05 | 140,98 | 18,09 |
| 15 | 241,5798 | -30 | 131,21 | 13,24 | 138,14 | 20,45 |
| 16 | 246,3722 | -30 | 129,54 | 24,40 | 136,31 | 20,41 |
| 17 | 255,0917 | -30 | 129,18 | 5,36 | 134,39 | 24,65 |
| 18 | 263,7447 | -30 | 128,13 | 4,61 | 132,90 | 25,30 |
| 19 | 280,9169 | -30 | 126,05 | 4,28 | 130,63 | 26,14 |

Tablo 4.7 Dolusavak üzerinde eksendeki problar (Devam)

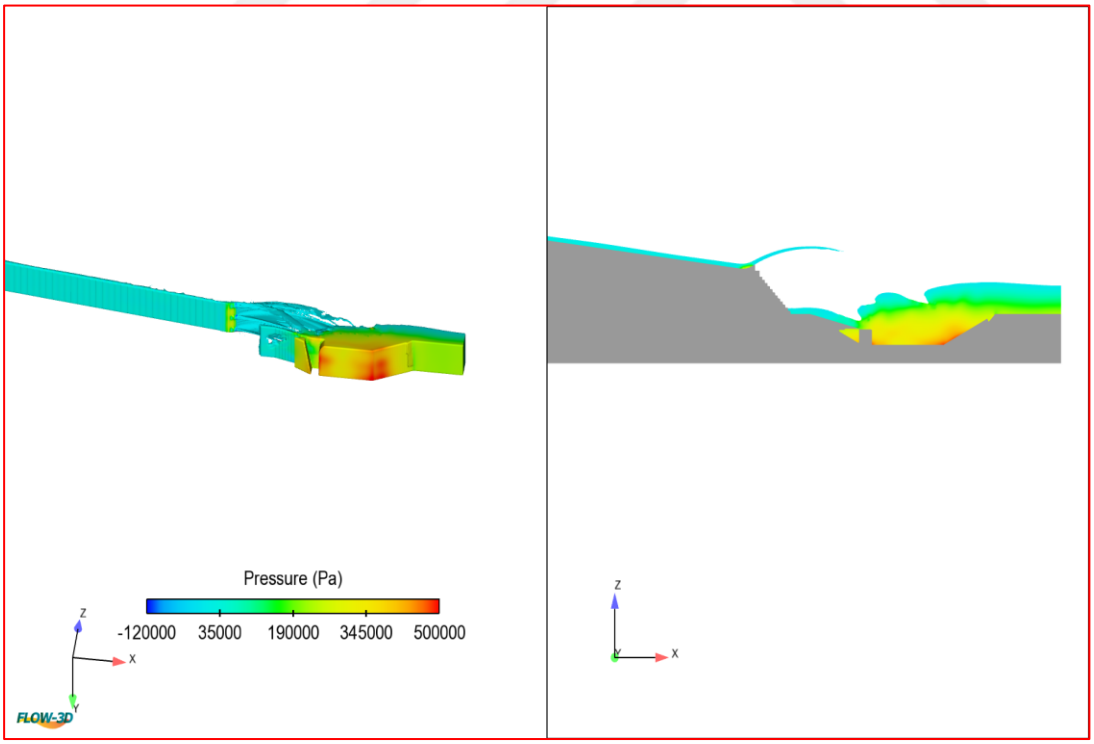
| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 20 | 306,1044 | -30 | 123,00 | 5,48 | 129,07 | 26,96 |
| 21 | 328,2619 | -30 | 120,31 | 4,77 | 126,27 | 27,79 |
| 22 | 361,4035 | -30 | 116,29 | 4,17 | 121,86 | 29,26 |
| 23 | 384,1291 | -30 | 113,54 | 4,25 | 119,56 | 30,04 |
| 24 | 405,3397 | -30 | 110,97 | 5,00 | 117,35 | 30,74 |
| 25 | 422,9521 | -30 | 108,83 | 4,21 | 115,69 | 31,29 |
| 26 | 437,5491 | -30 | 107,06 | 3,51 | 113,50 | 31,76 |
| 27 | 458,0022 | -30 | 104,58 | 3,76 | 111,19 | 32,40 |
| 28 | 480,9172 | -30 | 101,80 | 3,69 | 108,62 | 32,58 |
| 29 | 501,9384 | -30 | 99,25 | 3,31 | 106,55 | 32,70 |
| 30 | 526,9366 | -30 | 96,22 | 3,63 | 104,37 | 33,28 |
| 31 | 550,9879 | -30 | 93,31 | 3,61 | 101,59 | 33,26 |
| 32 | 573,5242 | -30 | 90,58 | 3,52 | 99,83 | 34,19 |
| 33 | 595,1135 | -30 | 87,96 | 0,78 | 96,78 | 33,66 |
| 34 | 617,6497 | -30 | 85,23 | 3,26 | 94,59 | 33,82 |
| 35 | 633,7471 | -30 | 83,28 | 3,09 | 93,06 | 33,99 |
| 36 | 649,4656 | -30 | 81,37 | 3,25 | 91,41 | 34,14 |
| 37 | 660,983 | -30 | 79,97 | 0,00 | 89,81 | 34,42 |
| 38 | 677,4592 | -30 | 77,98 | 3,93 | 86,83 | 33,71 |
| 39 | 682,7021 | -30 | 77,34 | 5,18 | 87,96 | 33,54 |
| 40 | 686,9575 | -30 | 76,82 | 10,74 | 88,69 | 32,11 |
| 41 | 690,8241 | -30 | 76,56 | 21,39 | 89,16 | 30,94 |
| 42 | 694,4803 | -30 | 76,97 | 21,73 | 89,66 | 29,53 |
| 43 | 697,9749 | -30 | 78,09 | 15,87 | 89,48 | 29,00 |
| 44 | 699,0623 | -30 | 78,53 | 19,34 | 90,93 | 29,63 |
| 45 | 700,5344 | -30 | 79,37 | 7,69 | 90,39 | 29,43 |
| 46 | 702,035 | -30 | 79,85 | 0,00 | 91,74 | 30,24 |
| 47 | 703,8434 | -30 | 75,00 | 0,00 | 93,39 | 30,77 |
| 48 | 711,9086 | -30 | 65,00 | 0,00 | 95,08 | 30,37 |
| 49 | 717,516 | -30 | 60,00 | 0,45 | 92,54 | 27,42 |
| 50 | 726,3199 | -30 | 52,50 | 2,23 | 94,58 | 20,13 |
| 51 | 735,0302 | -30 | 42,50 | 5,64 | 94,36 | 14,47 |
| 52 | 749,1335 | -30 | 40,00 | 6,46 | 94,65 | 13,38 |
| 53 | 758,2996 | -30 | 39,29 | 6,63 | 93,81 | 13,98 |
| 54 | 776,7984 | -30 | 34,71 | 8,62 | 90,91 | 14,33 |
| 55 | 798,1304 | -30 | 29,43 | 11,60 | 83,99 | 8,31 |
| 56 | 818,7957 | -30 | 15,00 | 19,27 | 75,59 | 8,86 |
| 57 | 840,6276 | -30 | 15,00 | 20,41 | 68,87 | 11,47 |
| 58 | 855,6266 | -30 | 15,00 | 21,15 | 69,43 | 12,64 |
| 59 | 873,7921 | -30 | 15,00 | 22,25 | 77,28 | 9,59 |
| 60 | 888,4578 | -30 | 16,26 | 22,89 | 80,71 | 8,97 |
| 61 | 908,5862 | -30 | 26,33 | 16,71 | 81,44 | 10,05 |
| 62 | 926,2517 | -30 | 35,16 | 12,06 | 80,44 | 11,37 |
| 63 | 946,917 | -30 | 40,00 | 9,18 | 79,48 | 12,66 |
| 64 | 969,9684 | -30 | 40,00 | 9,28 | 75,02 | 13,61 |
| 65 | 998,9381 | -30 | 40,00 | 8,65 | 72,32 | 14,84 |



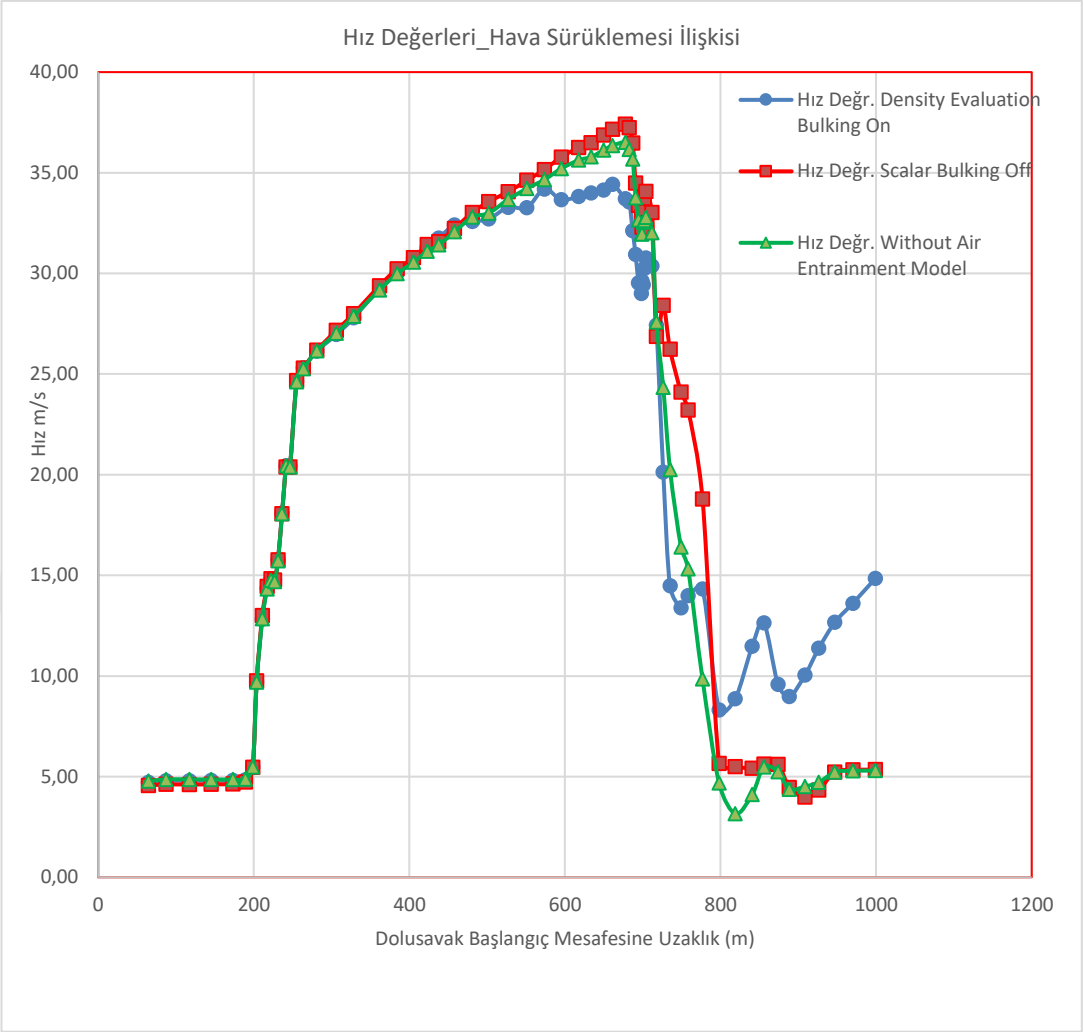

Şekil 4.99 Dolusavak ekseni boyunca oluşan basınç çizgisi



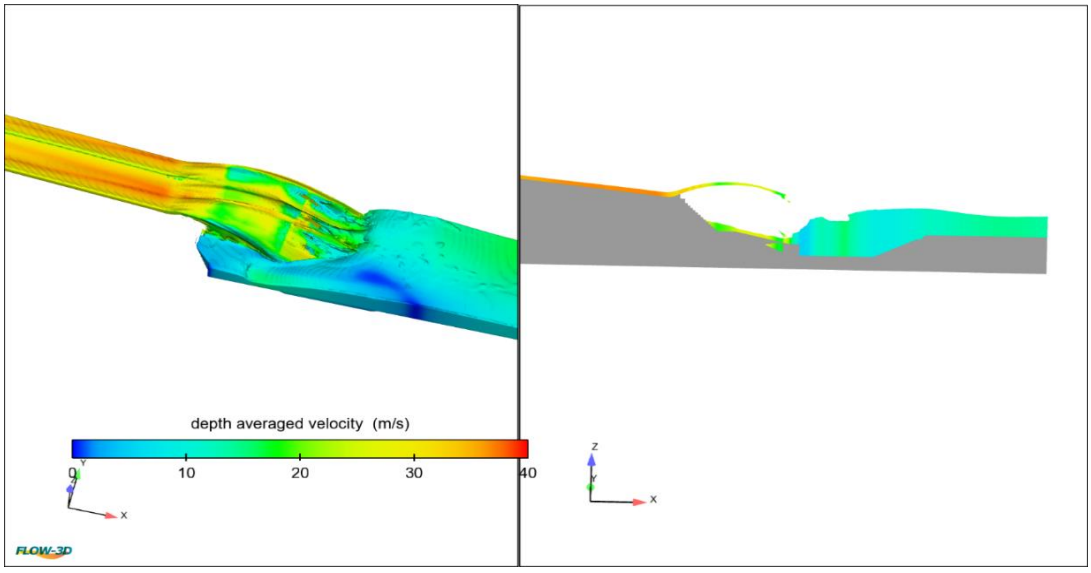

Şekil 4.100 Basınç değerlerine göre sınıflandırma ve eksen kesiti(with air entrainment bulking on)



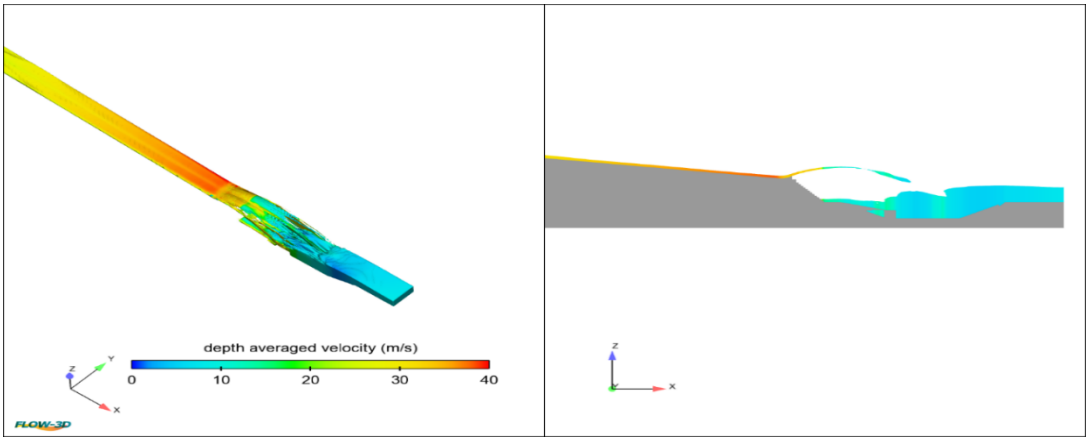

Şekil 4.101 Basınç değerlerine göre sınıflandırma ve eksen kesiti (without air entrainment)



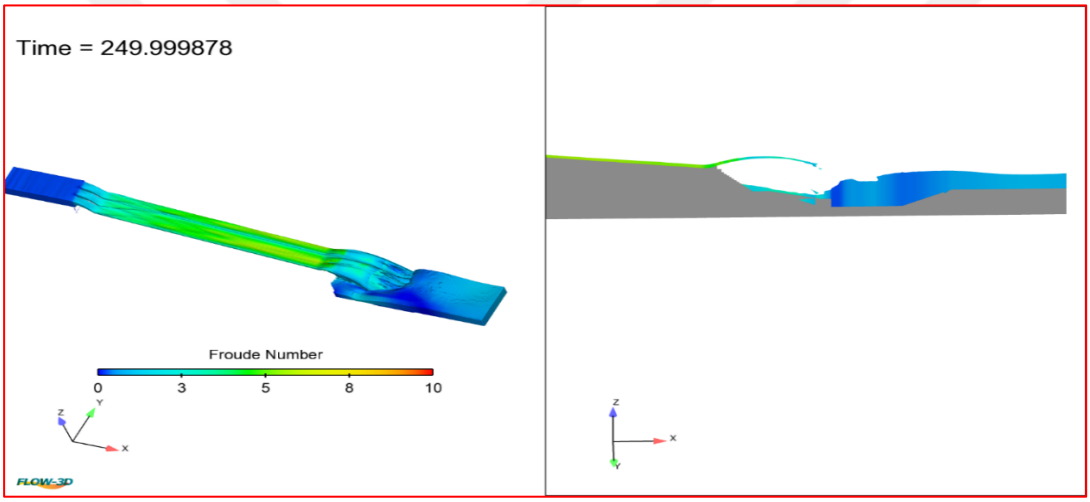

Şekil 4.102 Dolusavak ekseni boyunca hava sürükleme ilişkilerine göre oluşan hız değ. çizgisi



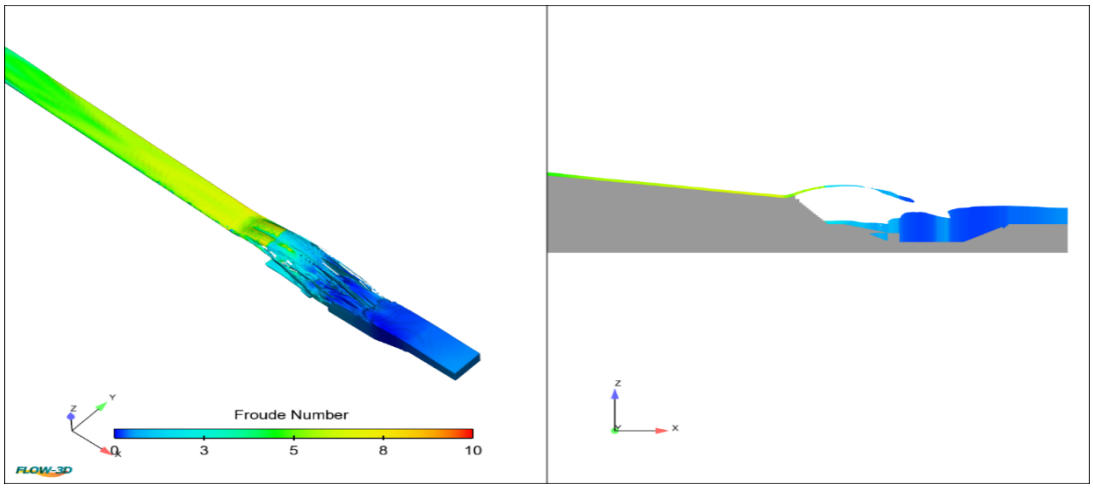

Şekil 4.103 Dolusavak ortalama hız değerlerine göre sınıflandırma ve eksen kesiti (with air entrainment bulking on)



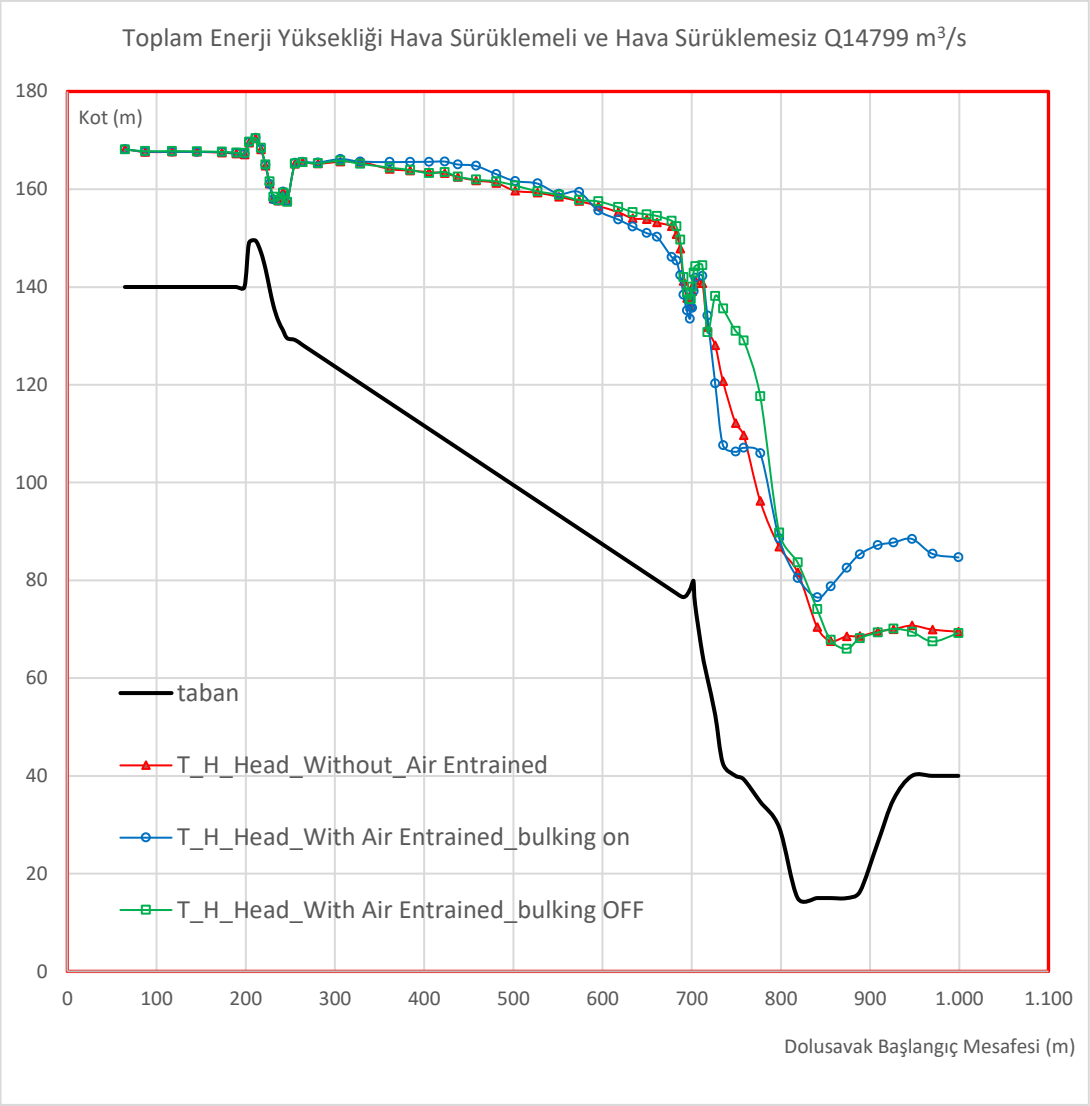

Şekil 4.104 Dolusavak ortalama hız değerlerine göre sınıflandırma ve eksen kesiti (without air entrainment)



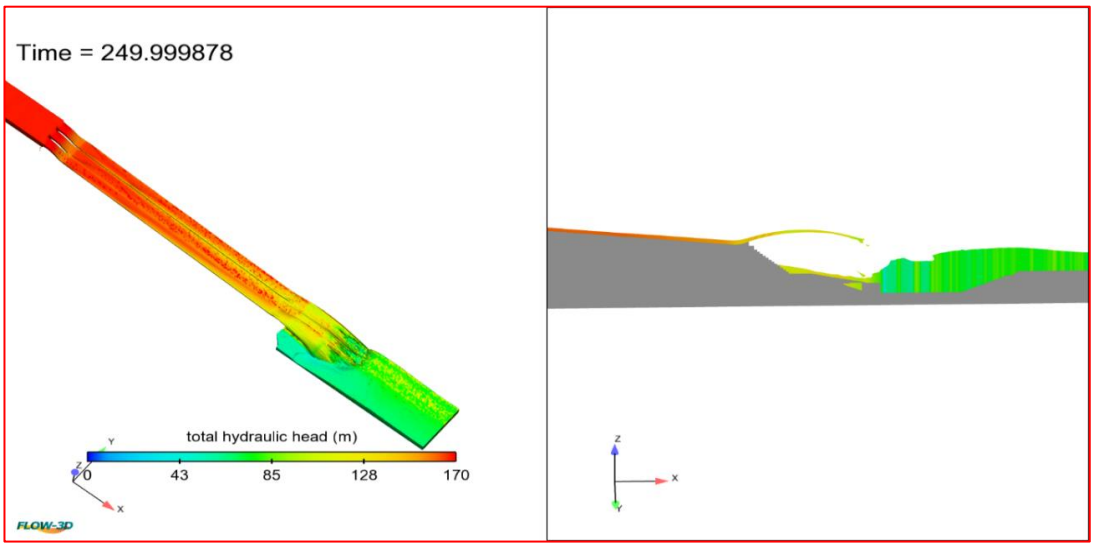

Şekil 4.105 Dolusavak Froude Sayısına Göre Sınıflandırma ve Eksen Kesiti (Wit Air Entrainment Bulking On)



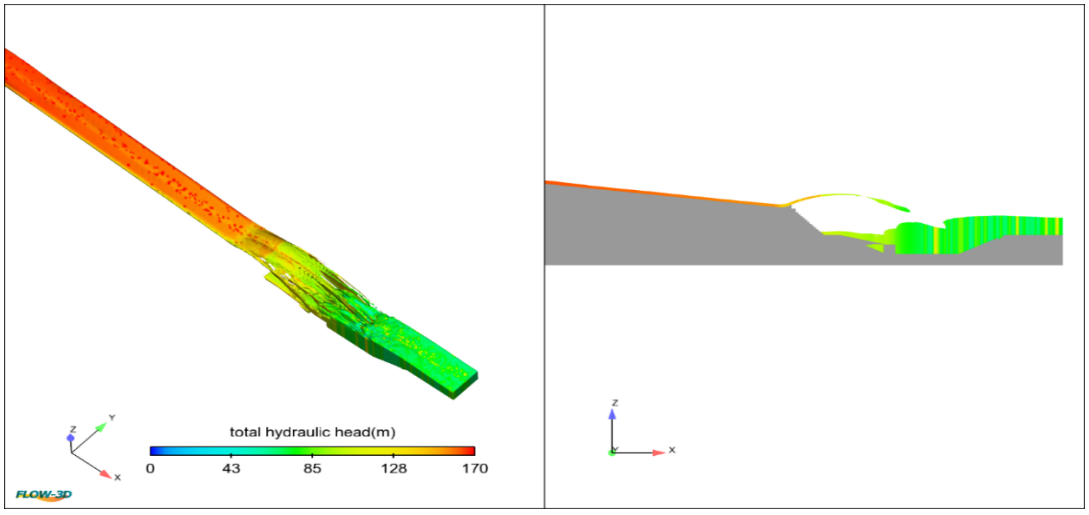

Şekil 4.106 Dolusavak Froude Sayısına Göre Sınıflandırma ve Eksen Kesiti (Without Air Entrainment)



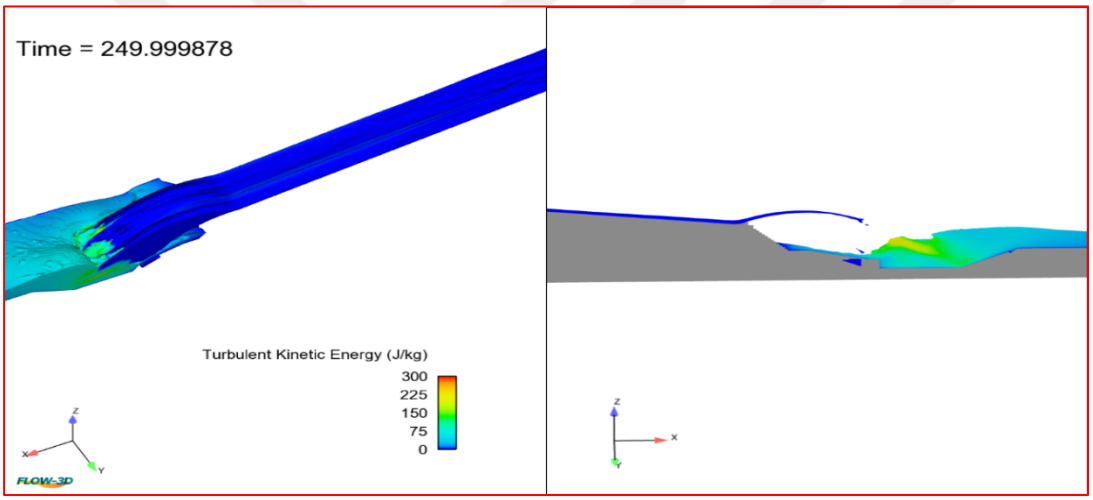

Şekil 4.107 Dolusavak ekseni boyunca oluşan toplam hidrolik enerji çizgisi



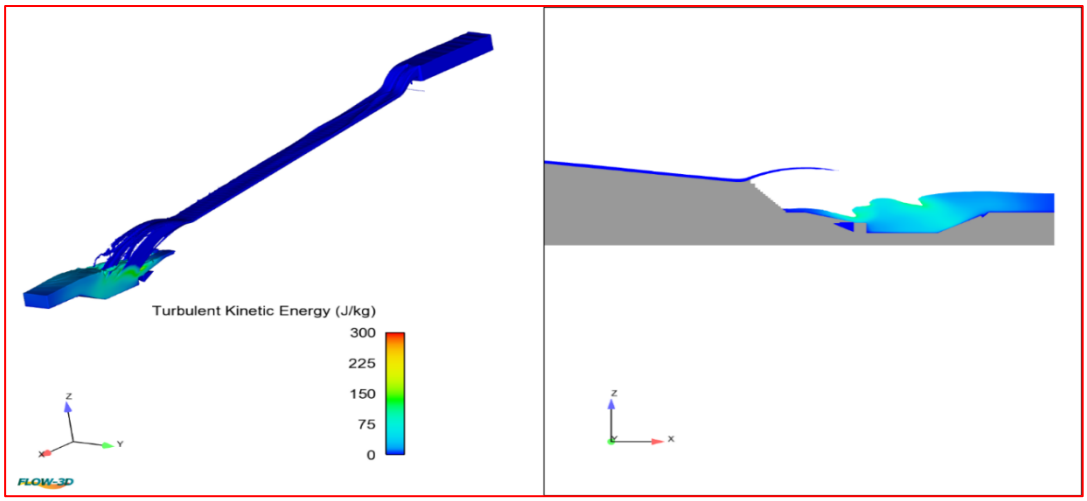

Şekil 4.108 Dolusavak yapısındaki toplam hidrolik enerji yüksekliği (with air entrainment)



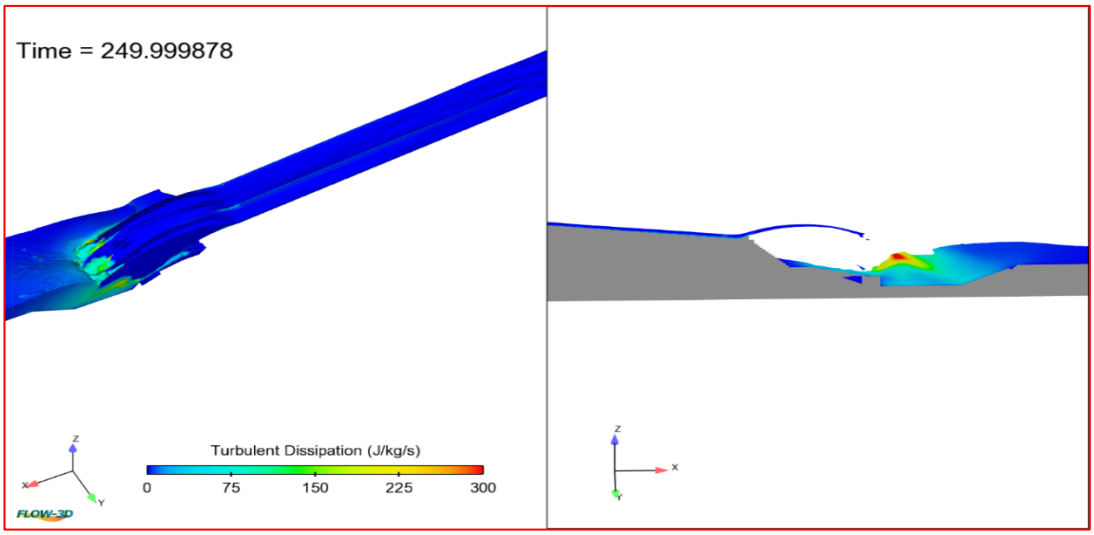

Şekil 4.109 Dolusavak yapısındaki toplam hidrolik enerji yüksekliği (without air entrainment)



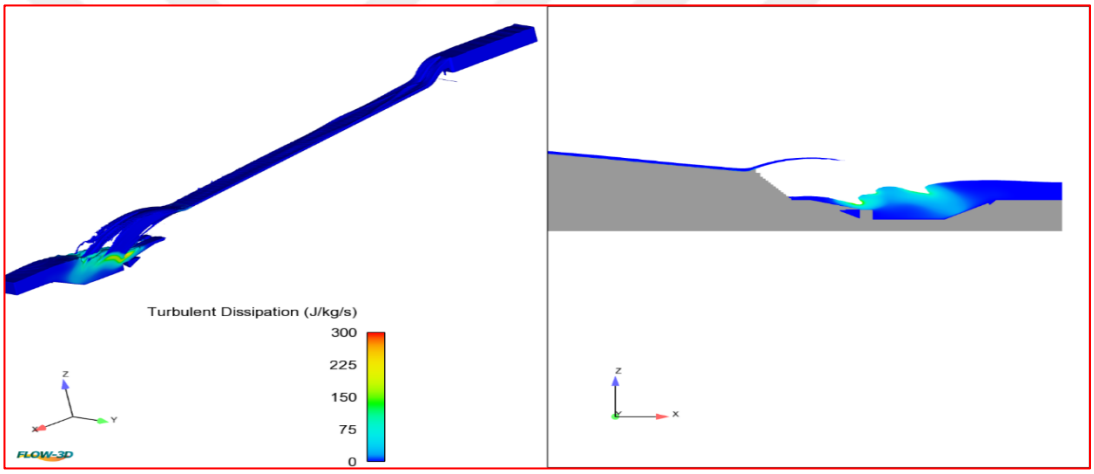

Şekil 4.110 Dolusavak yapısındaki türbülans kinetik enerjisi(with air entrainment)



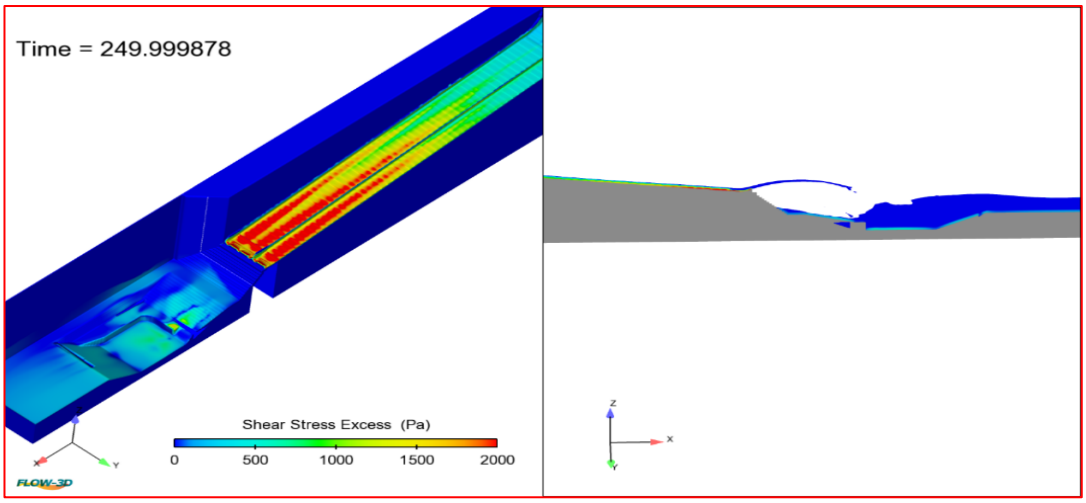

Şekil 4.111 Dolusavak yapısındaki türbülans kinetik enerjisi(without air entrainment)



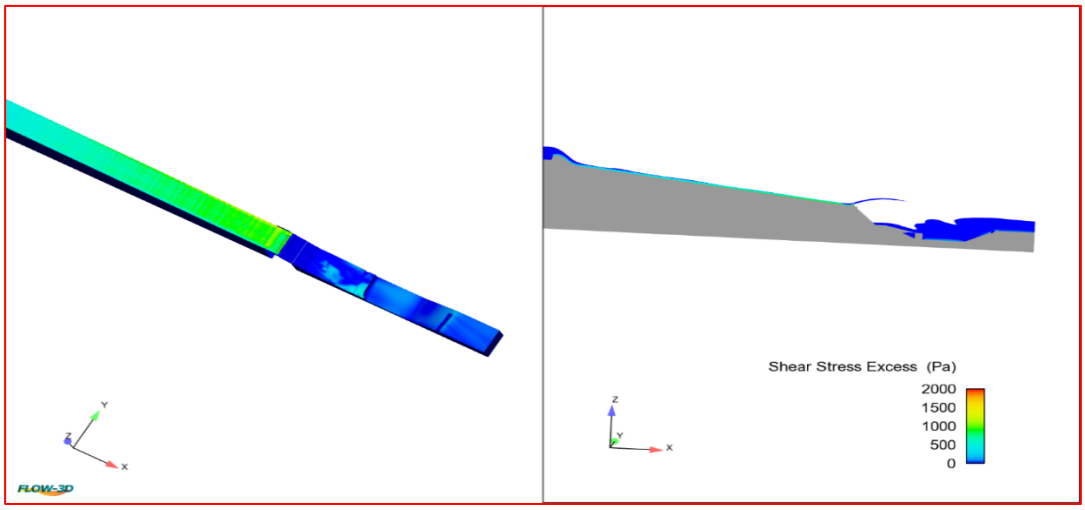

Şekil 4.112 Dolusavak yapısındaki türbülans kinetik enerjisi dağılımı(with air entrainment)




Şekil 4.113 Dolusavak yapısındaki türbülans kinetik enerjisi dağılımı(without air entrainment)



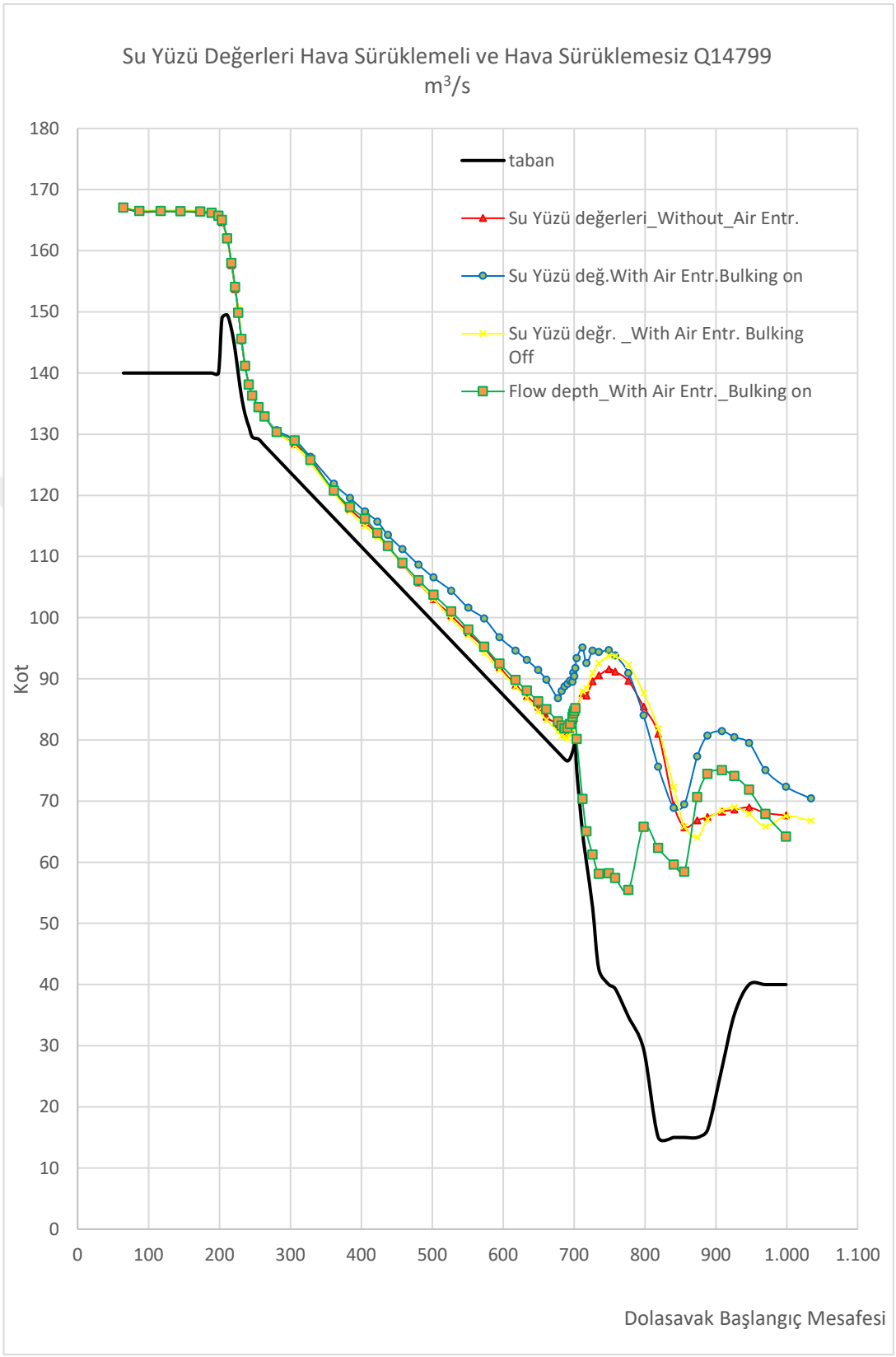

Şekil 4.114 Dolusavak yapısındaki kayma gerilmesi dağılımı(with air entrainment)



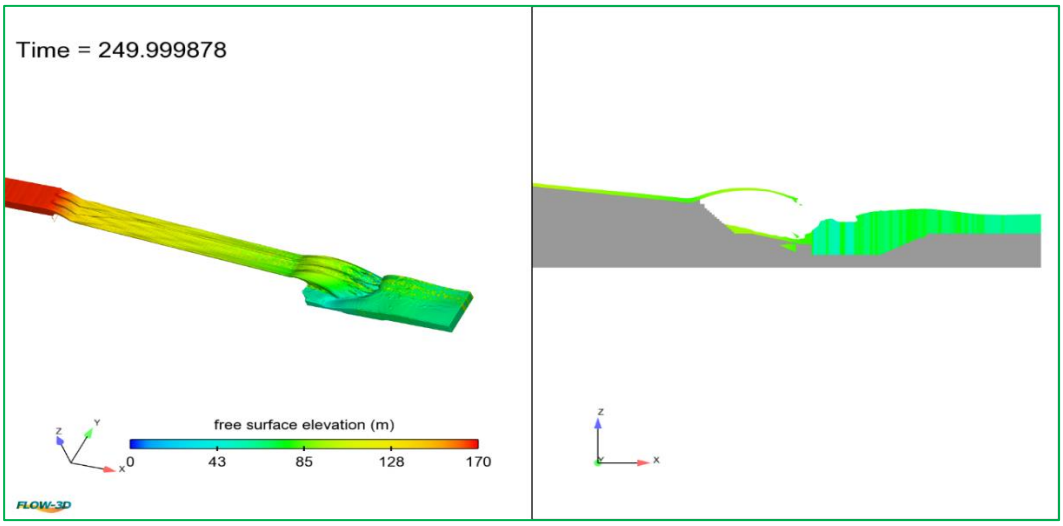

Şekil 4.115 Dolusavak yapısındaki kayma gerilmesi dağılımı(without air entrainment)

#### 4.2.1.2 Dolusavak boyunca su yüzü profilinin belirlenmesi

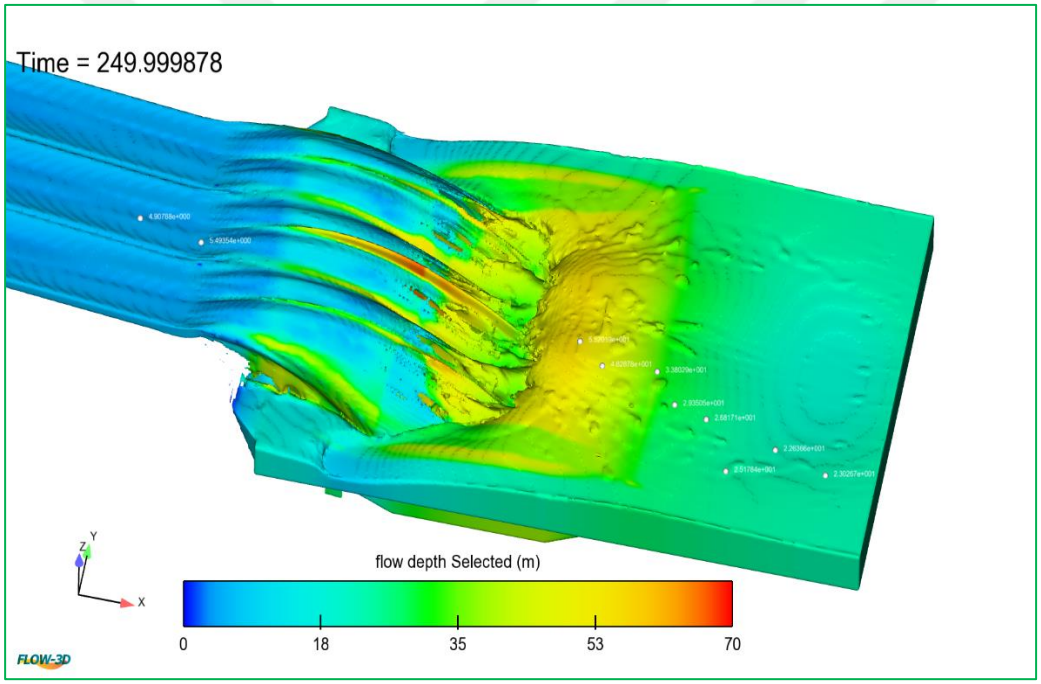
Sayısal analiz sonucu oluşan serbest su yüzeyi ile ilgili olarak; dolusavak eksen boyunca oluşan su yüzü profili Şekil 4.116'da verilmiştir. Ayrıca Şekil 4.117'de dolusavak üzerindeki serbest su yüksekliğine(free surface elevation) göre sınıflandırılmış görsel verilmiştir. Grafikler incelendiğinde değişken yoğunluklu modelin (Variable Density Flow) belirlediği su seviyesi, kabaran suyun toplam hacmi (su+hava) olacak şekilde yüksek seviyelerde, diğer modellerde akışın dinamiklerinde değişiklik olmayacağından ilgili hacim değerleri düşük seviyede kalmıştır. Değişken yoğunluklu modelde sadece su hacimi olarak grafikte "flow depth" olarak verilmiş, böylece dolusavak boşaltım kanalı üzerindeki kabaran karışımın ulaştığı seviye kıyaslaması daha net görülmüştür. Boşaltım kanalından sonraki kısımda analiz sonucunda profillerden anlaşılacağı gibi, enerji kırıcı havuz sonunda su yüksekliği 23.5 m (423,5 m kotu) olan kuyruk suyunun üzerinde hava-su akışkan karışımı 55 m'ye yükselerek uygulanan projeye göre yaklaşık 455 m seviyelerine denk gelmektedir. Enerji kırıcı havuzun hemen girişindeki kenar şev yüksekliği 450 kotuna, havuzun orta kısmından itibaren ikinci kenar diye tabir edilen şev yüksekliği de 475 m kotuna yükselmektedir. Havuz mansabındaki nehir boşaltım kanalında düzenlenmiş kenar şevlerin yükseklikleri 430 m kotlarına çıktığı dikkate alındığında maksimum hesap debisinde, gerek havuzda gerekse de hidrolik sıçramadan sonra mansap kanalındaki deşarj suyu, seviye bakımından herhangi bir olumsuzluk oluşturmayacak şekilde mansaplanacaktır (Şekil 4.118).




Şekil 4.116 Dolusavak eksen boyunca serbest su yüzü profili



Şekil 4.117 Dolusavak üzerinde serbest su yüzü değerlerine göre sınıflandırma ve eksen kesiti

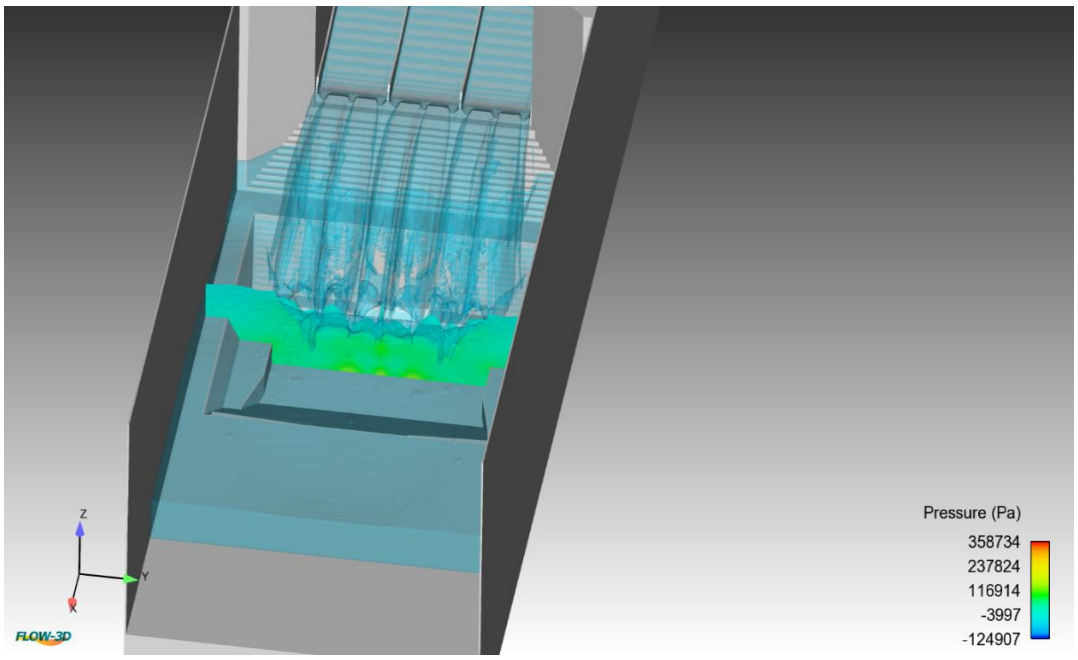


Şekil 4.118 Dolusavak dalma havuzu sonrası su seviye görüntüsü

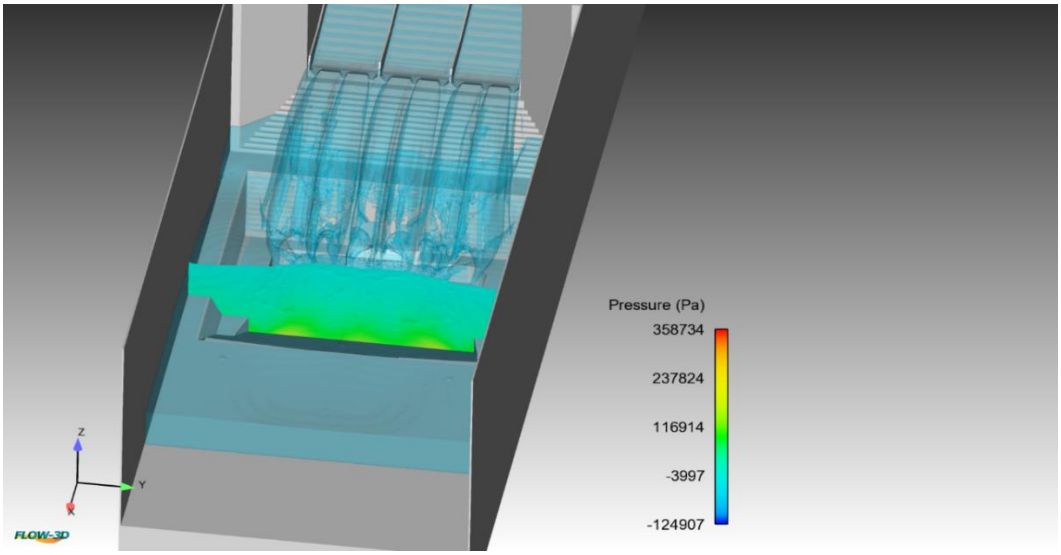
### 4.2.1.3 Enerji kırıcı havuz ile ilgi yapılan çalışmalar

Dalma havuzları, nehir yatağındaki oyulmaların önlenmesi için inşa edilmektedir. Nehir yatağı üzerindeki etki alanının ve bu alandaki çözümün belirlenmesi için model üzerinde deneysel çalışmalar ve bu veriler kullanılarak sayısal hesaplamaların yapılması yöntem olarak oldukça etkilidir. Fiziksel ve sayısal model kullanılarak jetin etki değerlendirmesi nehir yatağında doğru bir şekilde belirlenebilirse, oyulma kontrol mekanizmaları prototipe kolaylıkla uygulanabilir. Ilısu Barajı dolusavağı enerji kırıcı yapısı dişli sıçratma eşikli ve enerji kırıcı dalma havuzdan oluşmaktadır. Dolusavak

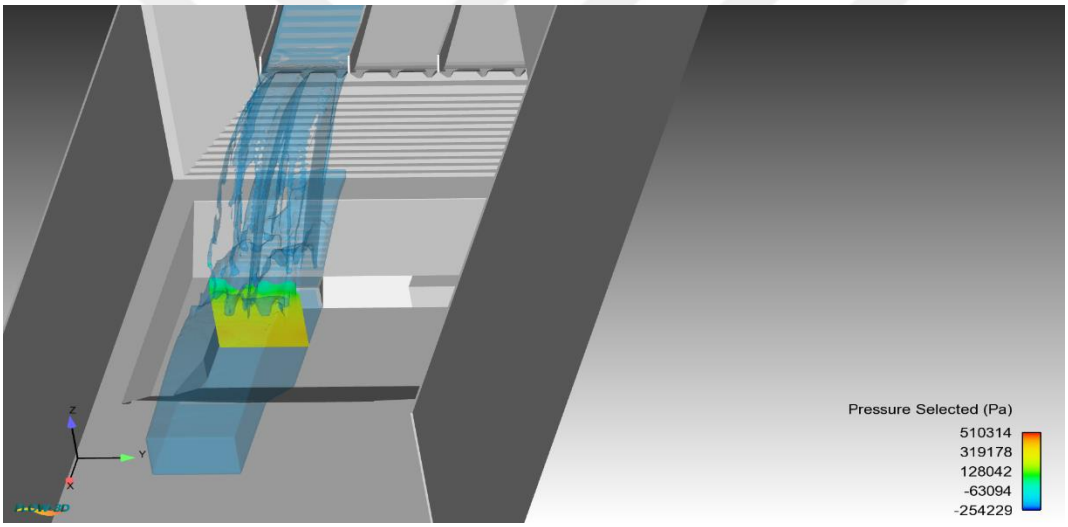
boyunca air entrainment model sonuçlarına göre yukarıdaki şekillerde de görüleceği gibi froude sayısı boşaltım kanalı sonunda 5.5, ortalama hız ise 35 m/s olarak hesaplanmıştır. Dişli eşik yapısında oluşan jet profili etkili bir şekilde yayılmak suretiyle 160 m mansaba düşmektedir. Bu mesafe air entrainment modeli kullanılmadan yapılan analizde 175 m olarak gerçekleşmiştir. Jet mesafeleri arasındaki farka bakıldığında air entrainment modelinin %9 oranında etkili olduğu görülmektedir. Fırlayan jetin havada yayılarak ve enerji kırıcı havuzda türbülans etkisiyle tabanda oluşturduğu basınç da böylelikle azalmaktadır. Şekillerden de (Şekil 4.119-122) görüleceği üzere air entrainment modeli çalıştırılmadan elde edilen havuz tabanındaki basınç yaklaşık 450000 pa iken değişken yoğunluklu modeldeki sonuç ise yaklaşık 200000 pa olarak tespit edilmiştir. Ayrıca 1982 yılı varyantlarından Q12500 $m^3/s$ için Varyant-II nin jet profilinin direkt mansap kanalı tabanında uyguladığı basıncın 300000 pa olduğu göz önüne alındığında, dalma havuzunun basınç sönümlenmesine etkisinin debi miktarı ve dişli eşik farklılığı da göz önüne alındığında ortalama %30 olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla 1982 yılı tasarımında bulunmayan enerji kırıcı dalma havuzunun nihai tasarıma eklenmesi baraj güvenliği dikkate alındığında oldukça yerinde bir tasarım olmuştur. Dalma havuzunun hidrolik karakteristiklere üzerindeki olumlu katkısı sayısal analiz yöntemi sayesinde tespit edilmiş ve buna göre dişli eşik yapısı ve enerji kırıcı havuz yapısının projelendirilmesi uygun görülmüştür.



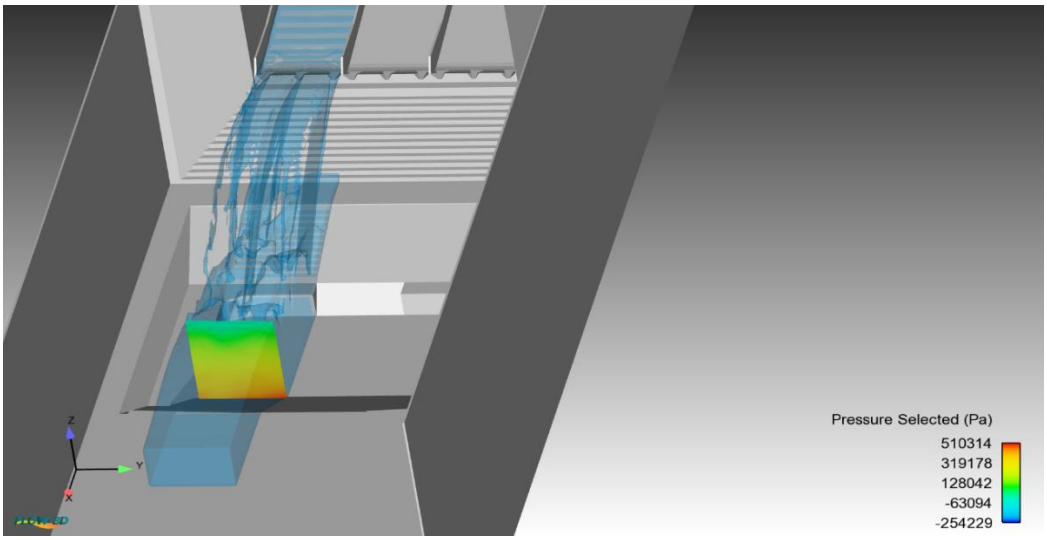

Şekil 4.119 Enerji kırıcı havuz ortasında oluşan basınç (x ekseni with air entrainment)




Şekil 4.120 Enerji kırıcı havuzun sonunda oluşan basınç (x ekseni with air entrainment)



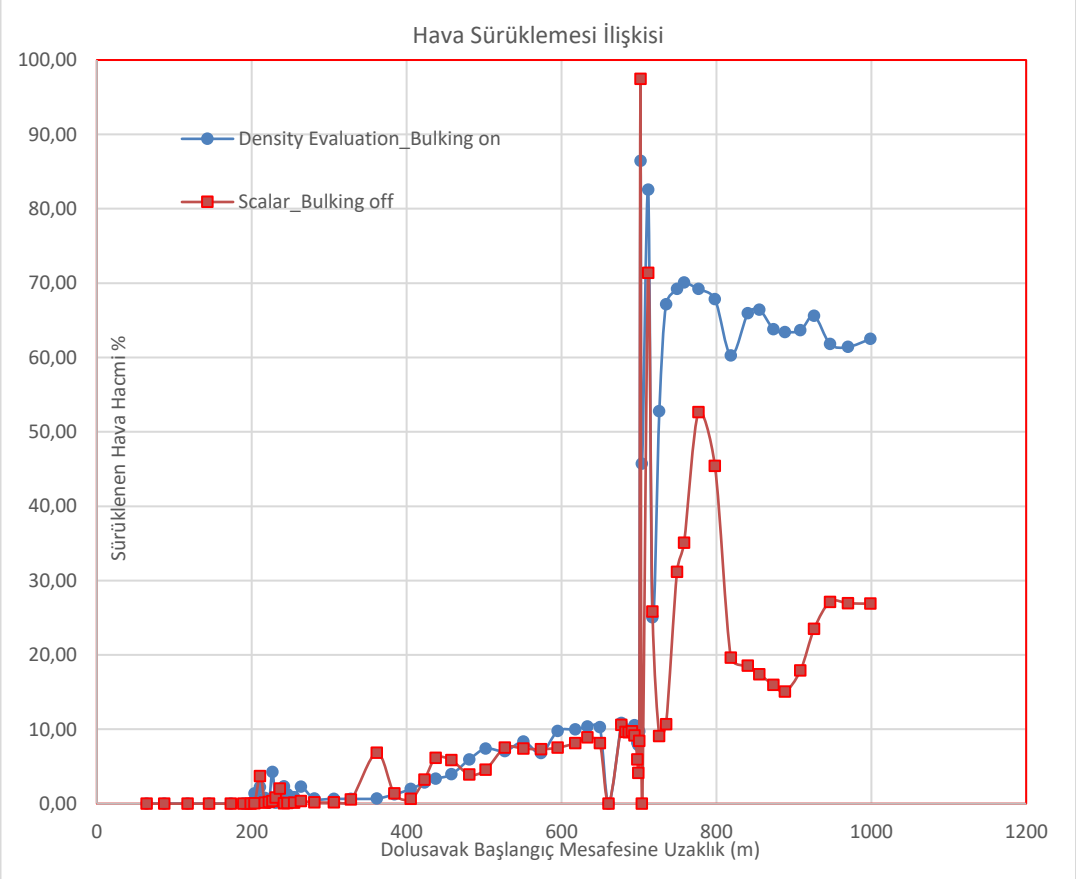

Şekil 4.121 Enerji kırıcı havuz üzerinde oluşan basınç (x ekseni without air entrainment)



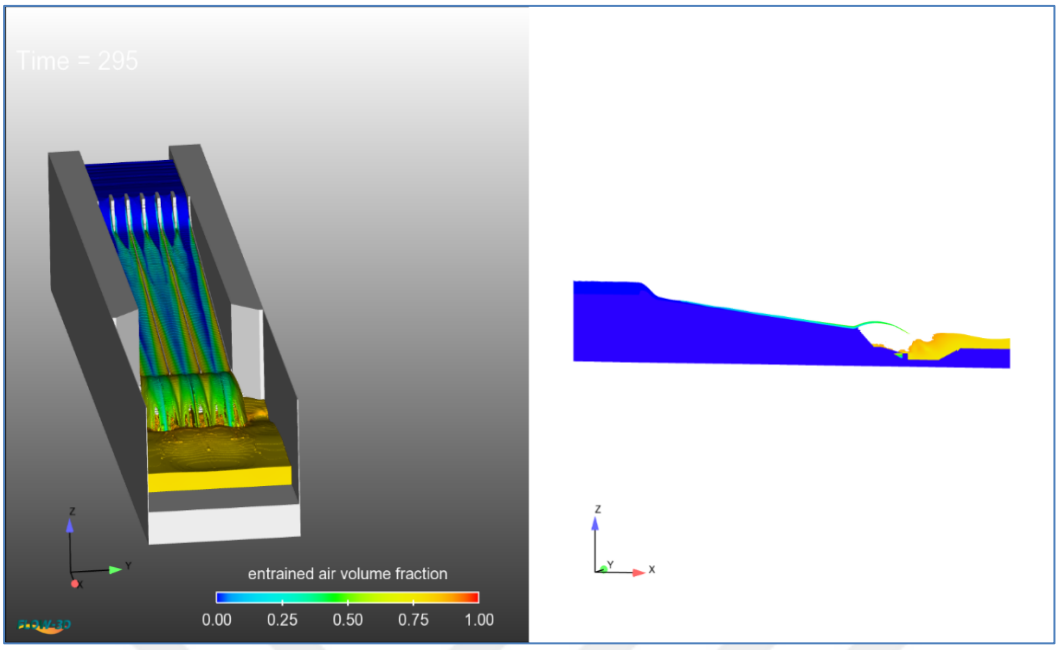

Şekil 4.122 Enerji kırıcı havuz üzerinde oluşan basınç (x ekseni without air entrainment)

#### 4.2.1.4 Dolusavak hava sürükleme ilişkileri

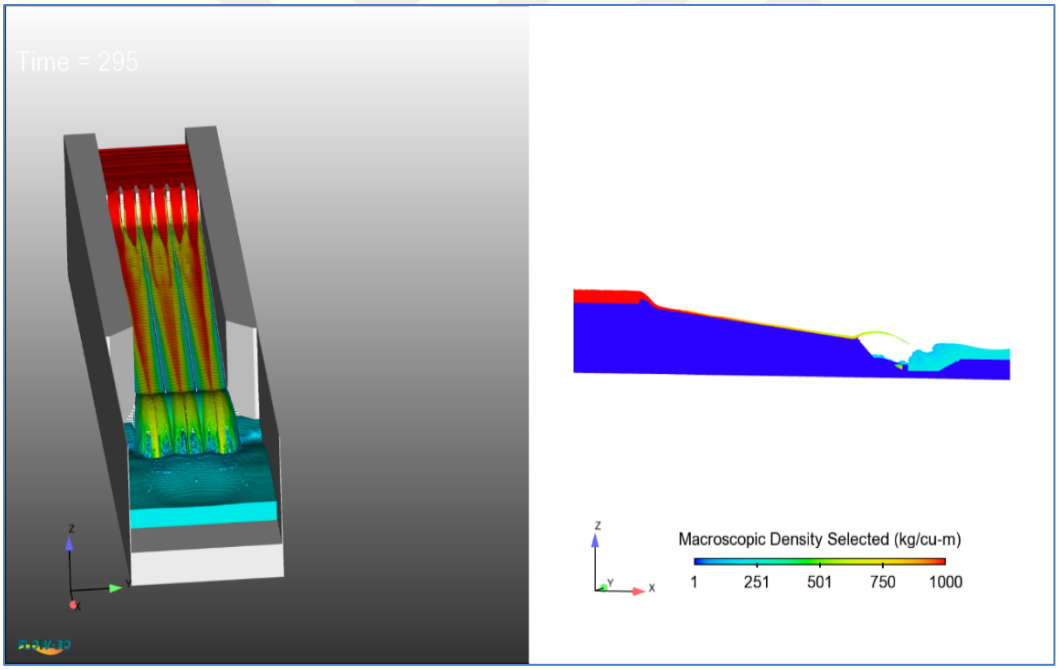
Dolusavak yapısındaki akımın havalanması hususunun tespiti için mevcut barajımızın uygulanmış projesinin sayısal modellemesi, hava sürüklenmesi (Air Entrainment Model, Variable Density Model, Dispersed Multiphase Model) modelleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İlgili analizler tasarım su yüküne denk gelen 527,86 m rezervuar su seviyesi için yapılmıştır. Analiz sonucunda akıma karışan hava ile birlikte 1000 kg/m$^3$ olan suyun yoğunluğunun azalması beklenmektedir. Akımda gerçekleşen havalanma miktarı ölçüm yapılan noktalarda yüzde olarak Şekil 4.123 ve dinamik görüntü şekil 4.124'te verilmiştir. Yoğunluğu 1.225 kg/m$^3$ olarak alınan havanın akıma katılmasıyla birim hacimdeki akışkan ağırlığı azalacaktır. Bu durum sonucunda hesaplanan akımdaki yoğunluk durumu (makroskopik yoğunluk) yine Şekil 4.125'te verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere akım boşaltım kanalında ilerledikçe artan enerji ile birlikte havalandığı ve böylelikle akışkan yoğunluğunun azaldığı görülmektedir. Özellikle enerji kırıcı havuzda akıma giren hava ile birlikte yoğunluğun 1/3'e düştüğü gözlenmiştir.




Şekil 4.123 Ölçüm yapılan noktalardaki hava miktarı (%)



Şekil 4.124 Dolusavak hava sürüklemesi olayı ve eksen kesiti



Şekil 4.125 Dolusavak makroskopik yoğunluk değerlerine göre sınıflandırma ve eksen kesiti

### 4.3 Alternatif Çevirmeli Sıçratma Eşiği (Flip Bucket) Tasarımları

Enerji sönümlenmesinde jet fırlatma mesafesi, dolayısıyla jet yüksekliği oldukça etkilidir. Hatta bu veriler kuyruk suyu derinliğinden daha etkilidir [47]. Oluşturulan alternatif çevirmeli sıçratma eşikleri, mevcut Ilısu Barajı dolusavağının çevirmeli sıçratma ucunda farklı deflektör açısı ve yarıçapları dikkate alınarak biri orijinal proje olmak üzere toplam 16 adet farklı tasarım yapılmıştır. Enerji sönümlenmesi açısından

yeni tasarımların etkinliklerinin tespitinde Flow3D' de "Flux Surface" olarak adlandırılan iki boyutlu yüzeyler tanımlanarak ortalama derinlikli hız değerleri, üç boyutlu "Sampling Volume"lar tanımlanarak kinetik enerji değerleri ve noktasal olarak basınç değerleri dikkate alınmıştır. İlgili karakteristikler boşaltım kanalı sonunda eşik öncesinde (inlet point), fırlatma noktasında (takeoff point) ve dalma havuzuna çarptığı noktada (impact point) ölçülmüştür. Böylece akışın eşik içerisindeki hidrolik durumu, jetin havalanması, sonrasında düşüş ve çarpma anına kadar oluşan değişiklikler tahmin edilemeye çalışılmıştır. Başlangıç ve sınır koşulları gibi bütün özellikler fiziksel model koşulları ile aynı alınmış, deşarj debisi olarak Q12500 $m^3/s$ seçilmiştir. Gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre çevirmeli sıçratma eşiği tasarımlarında en etkili yapı olan TF3 tasarımı, küçük yarıçap ve büyük deflektör açısına sahiptir. Bu tasarımda akış 25 m yükselirken 152 m mesafe ile en uzak mesafeye fırlamıştır. Hidrolik karakteristiklerle ilgili olarak, ortalama hız ve enerji değerlerindeki kırınım %40 seviyelerindedir. Eşik içi basınç ile kuyruk suyu tabanındaki basınç arasındaki sönümlenme %60 olarak gerçekleşmiştir. Sonuçlardaki en etkisiz kırınım TF1 tasarımında gerçekleşmiştir. Bu tasarımın yarıçap ve deflektör açısı en küçük değerlere sahiptir. En etkili tasarımın da küçük yarıçapa sahip olduğu dikkate alındığında enerji kırınımında kritik parametrenin deflektör açısı olduğu görülecektir (Şekil 4.126-173). Tüm çalışmaya ait elde edilen sonuçlar tablo halinde verilmiştir (Tablo 4.8-9). Sonuçlara göre bazı tasarımlarda eşik içi hız veya enerji kırınımı iyi seviyede iken jetin daha yukarı sıçraması ve akabinde bu duruma bağlı olarak büyük hızlarda mansap kanalına çarptıklarından dolayı eşik sonrası kırınım düşük seviyede kalmış, bazı tasarımlarda da eşik küçük deflektör açısına sahip olduğundan eşik içerisinde enerji kırınımı gerçekleşmemiş aksine daha büyük enerji ile akış sistemi terk etmiştir. Deflektör açısının büyümesiyle de eşik içerisinde alınan yol arttığından oluşan çevrinti etkisiyle hız ve enerji değerlerindeki kırınım artmıştır. Bu nedenle etkili enerji kırınımının tespiti için sadece jet yüksekliği veya mesafesi değil, bütün karakteristiklerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Literatür çalışmalarında da fiziksel model çalışmalarıyla çevirmeli sıçratma eşiğinin farklı deflektör ve yarıçap değerleri için oluşan karakteristikler tespit edilmiştir. Söz konusu çalışmalarda [28], β10-β40 arasında değişen deflektör açı değerleri ile R10, R25 ve R40 yarıçaplarındaki değerler dikkate alınmıştır. İlgili çalışmada R25 tasarımı

sadece β25 için gerçekleştirilmiş olup R10 - R40 için ise β10 - β40 arasındaki değerler dikkate alınmıştır. Çalışma sonuçlarına göre deflektör ve yarıçap değerlerindeki artışla doğru orantılı olarak enerji kırınımının arttığı belirtilmiştir. Eşik içerisindeki maksimum basıncın ho/R arttıkça azalacağı ifade edilmiş, yanı sıra ilgili basıncın yarıçap(R) üzerinde pek bir etkisinin olmadığı, genel olarak β ve Froude sayısına bağlı olduğu, enerji kırımında jet fırlatma açısının önemli oranda etkili olduğu, bu hususun da β deflektör açısıyla olabileceği belirtilmiştir. Bir diğer çalışmada [12], β30 ve R20, R25 değerleri için yapılan fiziksel modellemede yarıçap değerlerinin eğrideki akış üzerinde pek bir etkisinin olmadığı belirtilmiştir. Heller ve ark. [44] göre de eşik içerisindeki maksimum basınç yüksekliği için deflektör açısının dikkate alınması gerektiği, küçük deflektör açılarında dinamik basıncın ihmal edilebilecek boyutta olduğu, deflektör açısıyla birlikte yarıçapın da küçük olması durumunda eşiğin deflektör özelliğini kaybedeceği belirtilmiştir. Laura ve ark. [37] çalışmalarına göre etkili sönümlenme β40 değerlerinde elde edilmiştir. Alternatif tasarımlarımızdaki sonuçlara göre; aynı yarıçaplarda deflektör açısı β arttıkça enerji kırınımında β50 hariç olacak şekilde artış, aynı şekilde jet mesafelerinde de büyük yarıçap değeri olan R35 hariç artış, ayrıca jet yüksekliğinde artış gerçekleşmiştir. Aynı deflektör açılarında yarıçap arttıkça jet yüksekliğinde artış, jet mesafelerinde küçük yarıçap R20 değeri hariç azalış ve enerji kırınımında da genel anlamda kısmi bir artış görülmüştür. Literatürdeki fiziksel çalışmalarda tespit edilen eğrideki akış üzerinde ho ve froude sayısının yanında yarıçap değerlerinin etkisinin az olması hususu, büyük ho/R ve küçük β açılarında eşiğin deflektör özelliğini kaybetmesi hususları alternatif çalışmalarımızla da tespit edilmiştir. β27,5 değeri için R20 ve R25 yarıçaplarında enerji kırınımı ve eşik içi maksimum basınç değerlerinde önceki çalışmalarda da tespit edildiği üzere pek bir fark oluşmamış, neredeyse eşit çıkmıştır. Eşikteki basınçlarla ilgili olarak, yine önceki çalışmalarda da tespit olunan aynı yarıçaplarda deflektör açısı arttıkça basınç değerlerinde artışın gerçekleşmesi alternatif tasarımlarda da görülmüştür(Şekil 4.174-177). Ancak β42,5 ve R30, R35 tasarımlarında beklenenin aksine basınç değerlerinde düşüşler tespit edilmiştir. Aynı deflektör açılarında ise yarıçap değerlerindeki artışın eşikteki basınç değerlerinde dikkate değer değişiklik oluşturmadığı, bununla birlikte R30, R35 grafiklerinde basınç azalmaları görülmüştür(Şekil 178-181). Dolayısıyla yukarıda da ifade edildiği üzere enerji

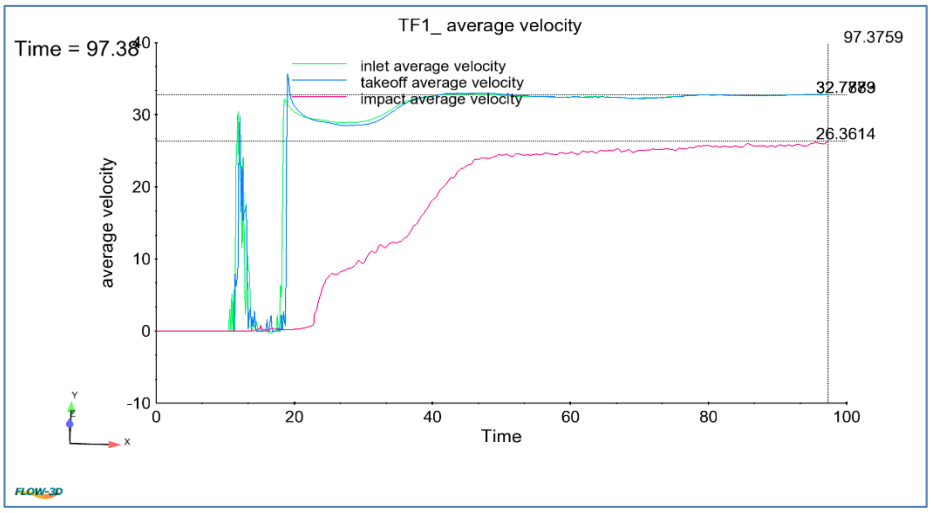
kırınımında deflektör açısı oldukça etkili iken yarıçapın bu konuda etkili olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

Tablo 4.8 Alternatif çevirmeli sıçratma eşikleri sayısal analiz sonuçları-1 (Q1250 $m^3/s$)

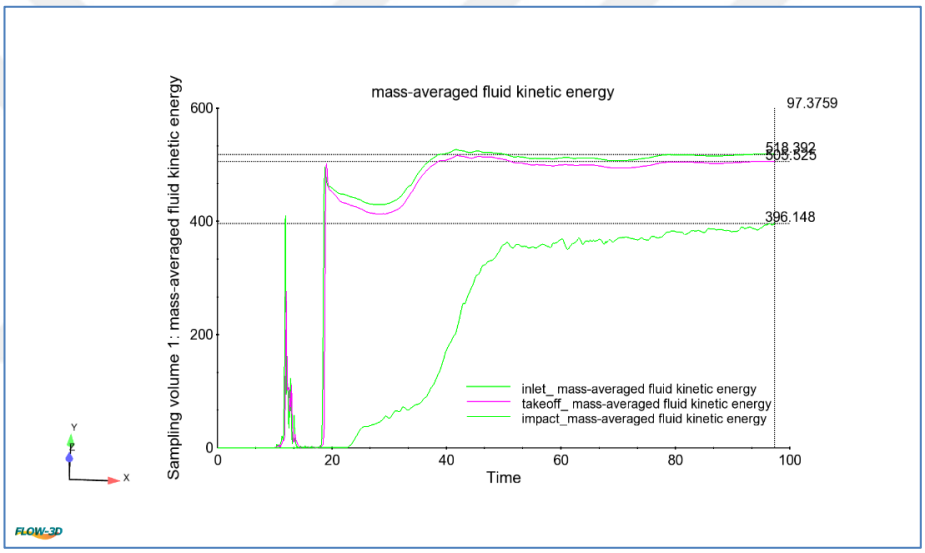
| Alternatif Flip Bucket Tasarımları Hidrolik Karakteristikler Tablosu | Jet Yüksekli k (m) | Jet Mesafe (m) | Hız (İnlet Point ) (m/s) (A) | Hız (Takeoff Point) (m/s) (B) | Hız (İmpact Point)(m/ s) ( C) | İnlet Point Kinetik Enerji (E) | Takeoff Point Kinetik Enerji (F) | İmpact Point Kinetik Enerji (G) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| TF1 β:27,5 R:20 | 9,5 | 130 | 32 | 31,7 | 26,3 | 500 | 520 | 395 |
| TF2 β:35 R:20 | 15 | 143 | 32 | 29,3 | 21 | 500 | 520 | 320 |
| TF3 β:42,5 R:20 | 24,5 | 152 | 32 | 25,5 | 20 | 500 | 498 | 295 |
| TF4 β:50 R:20 | 28,5 | 139 | 32 | 23,5 | 19 | 500 | 420 | 285 |
| TF5 β:27,5 R:25 | 11,5 | 139,3 | 32 | 30,5 | 25 | 500 | 490 | 362 |
| TF6 β:35 R:25 | 15 | 142,3 | 32 | 30 | 22 | 500 | 540 | 315 |
| TF7 β:42,5 R:25 | 23,7 | 147 | 32 | 26 | 18 | 500 | 480 | 265 |
| TF8 β:50 R:25 | 34,7 | 125 | 32 | 19,7 | 19 | 500 | 375 | 287 |
| TF9 β:27,5 R:30 | 10 | 146 | 32 | 29,7 | 25,3 | 500 | 540 | 335 |
| TF10 β:35 R:30 | 20,3 | 150,3 | 32 | 27,3 | 20,5 | 500 | 495 | 290 |
| TF11 β:42,5 R:30 | 28 | 148,4 | 32 | 24,3 | 19,8 | 500 | 465 | 300 |
| TF12 β:50 R:30 | 36 | 123,5 | 32 | 19,6 | 16,6 | 500 | 380 | 260 |
| TF13 β:27,5 R:35 | 14 | 148 | 32 | 29,5 | 23 | 500 | 530 | 330 |
| TF14 β:35 R:35 | 22,2 | 145 | 32 | 27 | 19,5 | 500 | 495 | 280 |
| TF15 β:42,5 R:35 | 28,5 | 141 | 32 | 24 | 23 | 500 | 470 | 270 |
| TF16 β:50 R:35 | 36,2 | 129 | 32 | 19 | 17 | 500 | 390 | 250 |

Tablo 4.9 Alternatif çevirmeli sıçratma eşikleri sayısal analiz sonuçları-2 (Q1250 $m^3/s$)

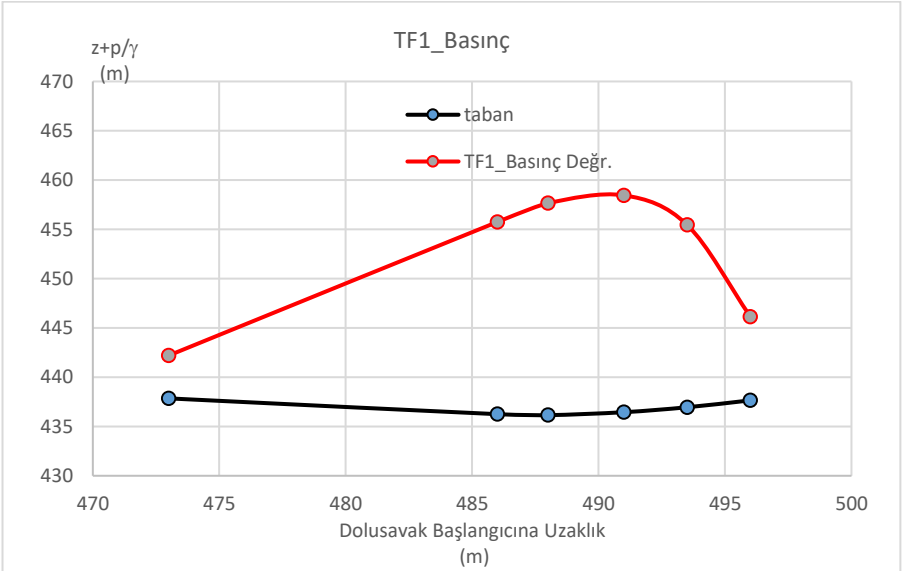
| Alternatif Flip Bucket Tasarımları Hidrolik Karakteristikler Tablosu | Eşik içi Hız Kırınımı(%) (100-B/A*100) | Jet Profil Hız Kırınımı (%)(100-C/B*100) | Eşik İçi Enerji Kırınımı (%)(100-F/E*100) | Jet Profili Enerji Kırınımı (%)(100-G/F*100) |
|---|---|---|---|---|
| TF1 β:27,5 R:20 | 0,94 | 17,03 | -4 | 24,04 |
| TF2 β:35 R:20 | 8,44 | 28,33 | -4 | 38,46 |
| TF3 β:42,5 R:20 | 20,31 | 21,57 | 0,4 | 40,76 |
| TF4 β:50 R:20 | 26,56 | 19,15 | 16 | 32,14 |
| TF5 β:27,5 R:25 | 4,69 | 18,03 | 2 | 26,12 |
| TF6 β:35 R:25 | 6,25 | 26,67 | -8 | 41,67 |
| TF7 β:42,5 R:25 | 18,75 | 30,77 | 4 | 44,79 |
| TF8 β:50 R:25 | 38,44 | 3,55 | 25 | 23,47 |
| TF9 β:27,5 R:30 | 7,19 | 14,81 | -8 | 37,96 |
| TF10 β:35 R:30 | 14,69 | 24,91 | 1 | 41,41 |
| TF11 β:42,5 R:30 | 24,06 | 18,52 | 7 | 35,48 |
| TF12 β:50 R:30 | 38,75 | 15,31 | 24 | 31,58 |
| TF13 β:27,5 R:35 | 7,81 | 22,03 | -6 | 37,74 |
| TF14 β:35 R:35 | 15,63 | 27,78 | 1 | 43,43 |
| TF15 β:42,5 R:35 | 25,00 | 4,17 | 6 | 42,55 |
| TF16 β:50 R:35 | 40,63 | 10,53 | 22 | 35,90 |



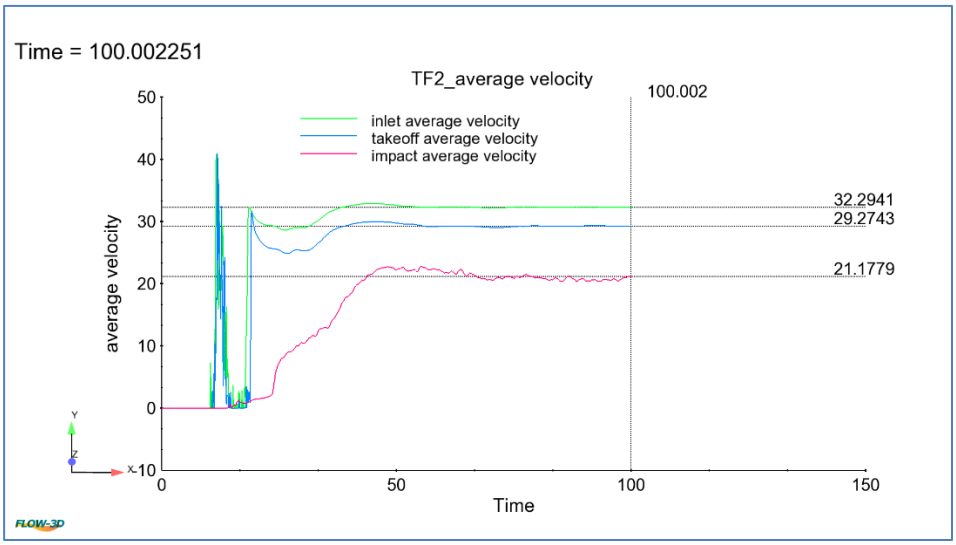

Şekil 4.126 Alternatif TF1 tasarımı ortalama hız değişimi



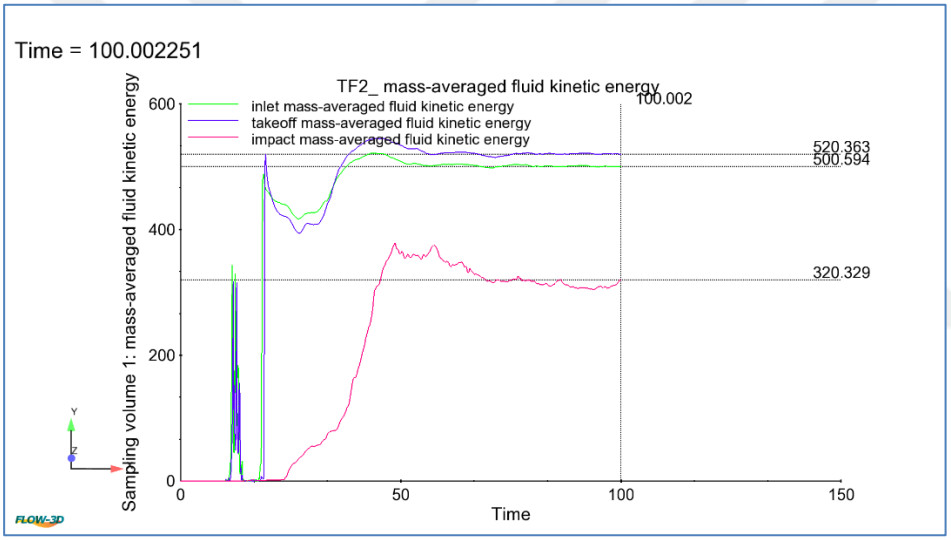

Şekil 4.127 Alternatif TF1 tasarımı kinetik enerji değişimi



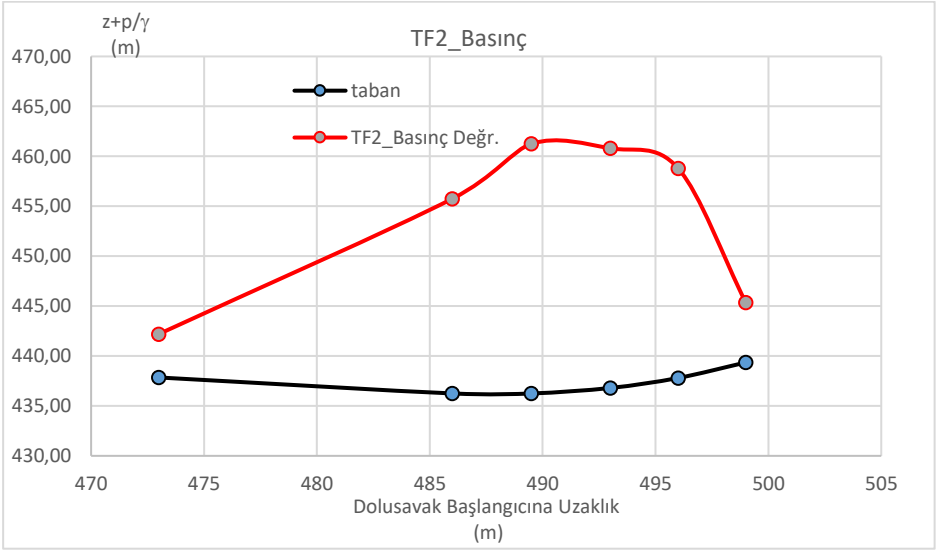

Şekil 4.128 Alternatif TF1 tasarımı eşik basınç değişimi



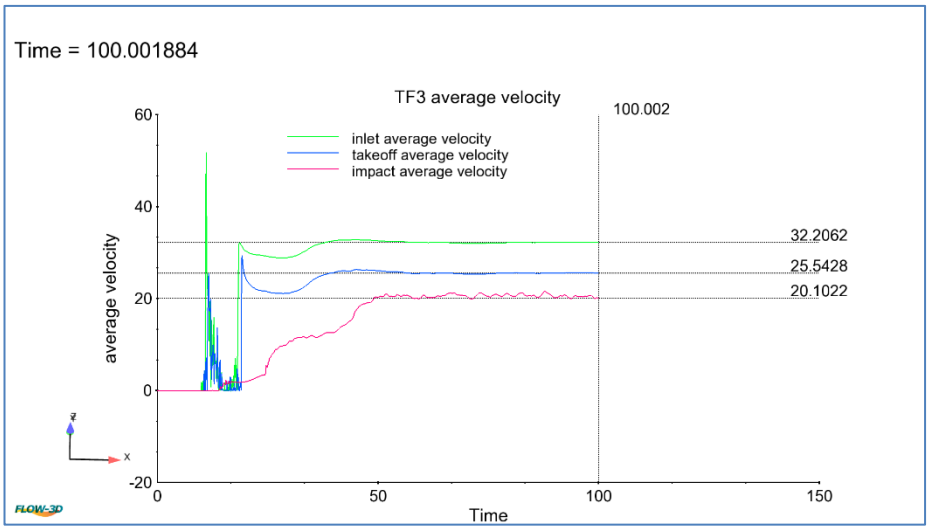

Şekil 4.129 Alternatif TF2 tasarımı ortalama hız değişimi



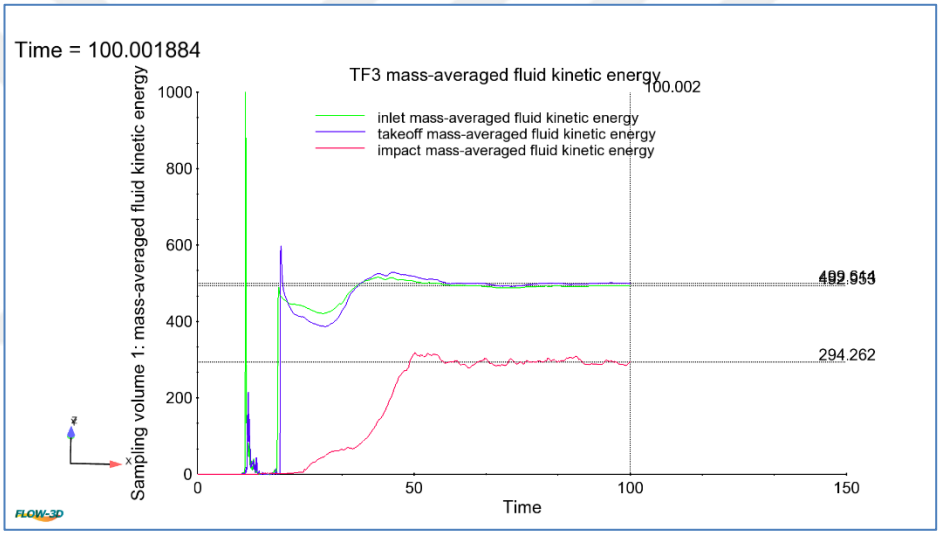

Şekil 4.130 Alternatif TF2 tasarımı kinetik enerji değişimi



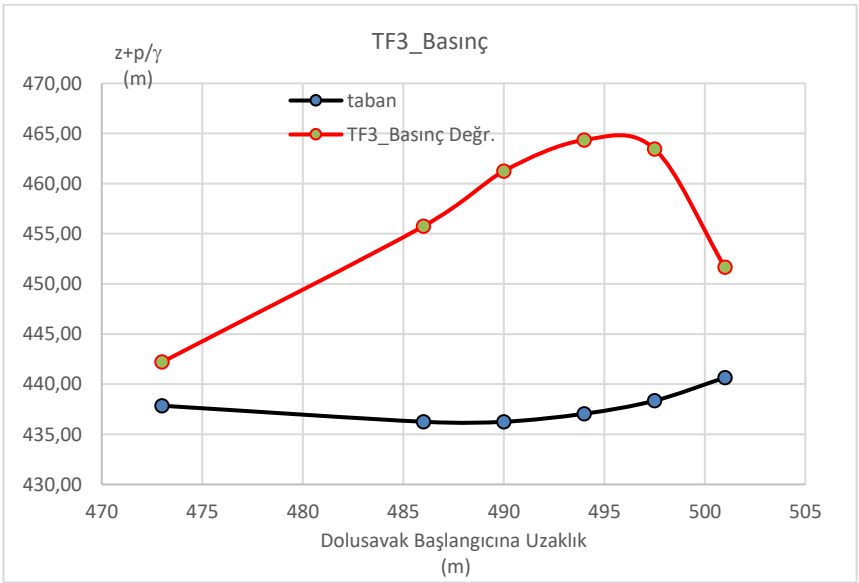

Şekil 4.131 Alternatif TF2 tasarımı eşik basınç değişimi



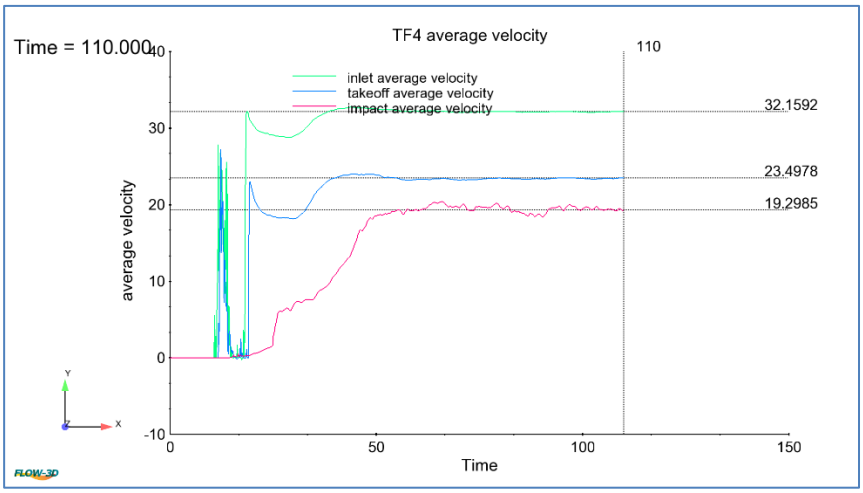

Şekil 4.132 Alternatif TF3 tasarımı ortalama hız değişimi



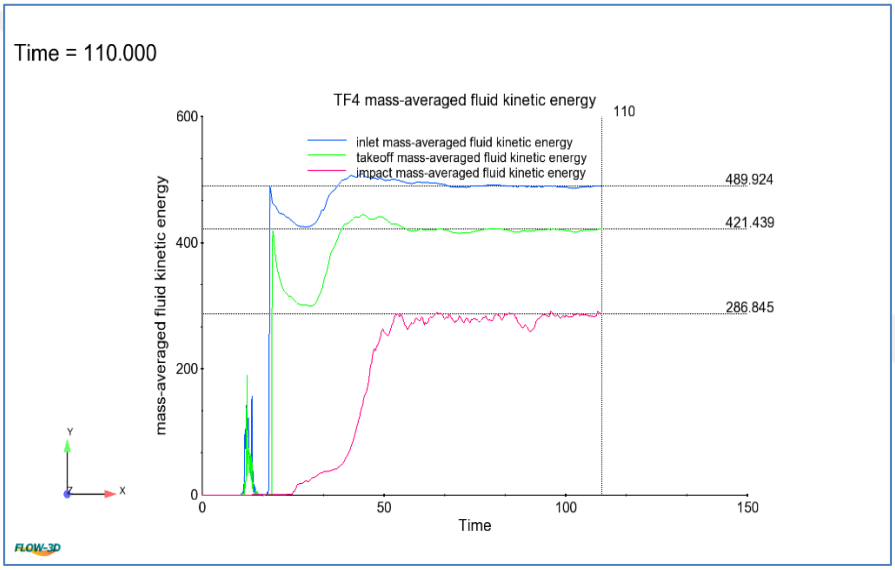

Şekil 4.133 Alternatif TF3 tasarımı kinetik enerji değişimi



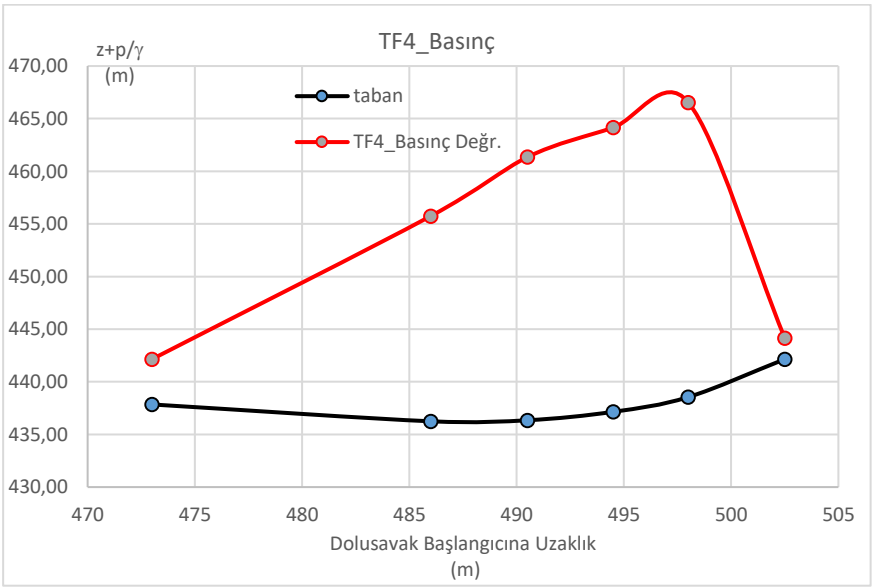

Şekil 4.134 Alternatif TF3 tasarımı eşik basınç değişimi



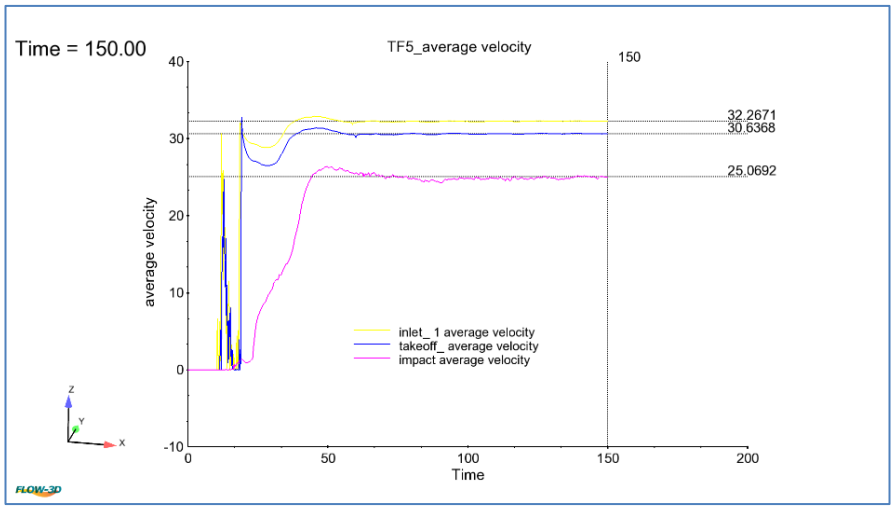

Şekil 4.135 Alternatif TF4 tasarımı ortalama hız değişimi



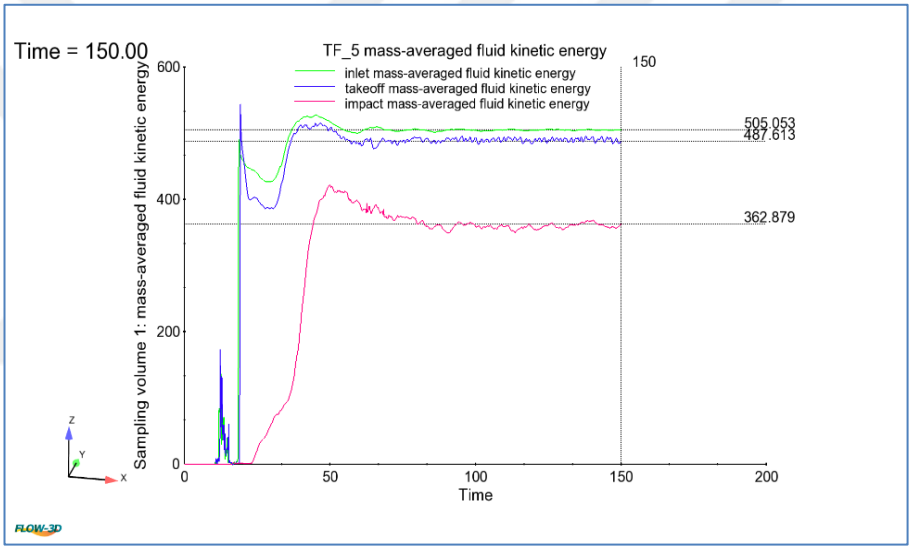

Şekil 4.136 Alternatif TF4 tasarımı kinetik enerji değişimi



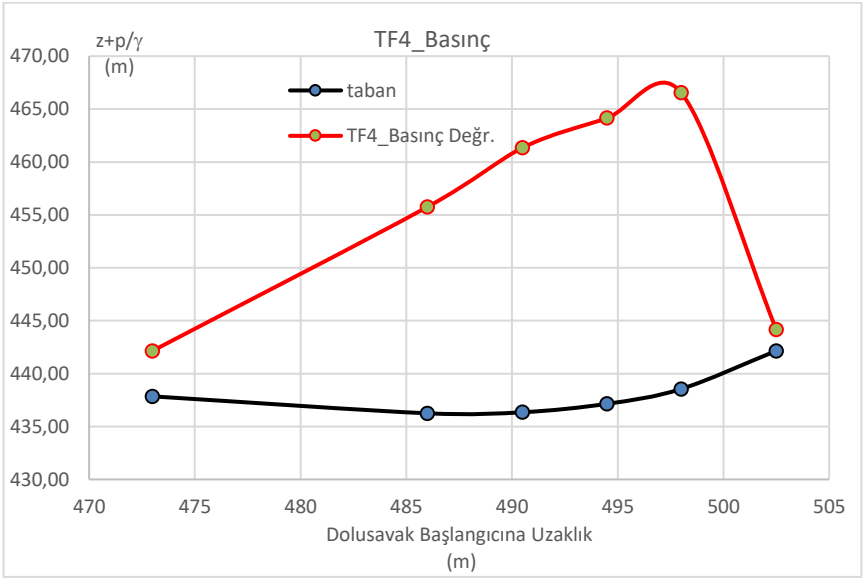

Şekil 4.137 Alternatif TF4 tasarımı eşik basınç değişimi



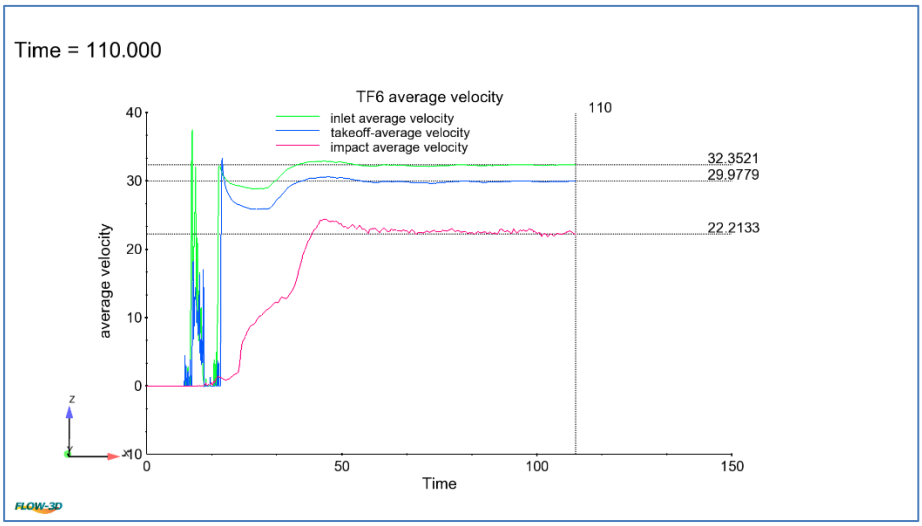

Şekil 4.138 Alternatif TF5 tasarımı ortalama hız değişimi



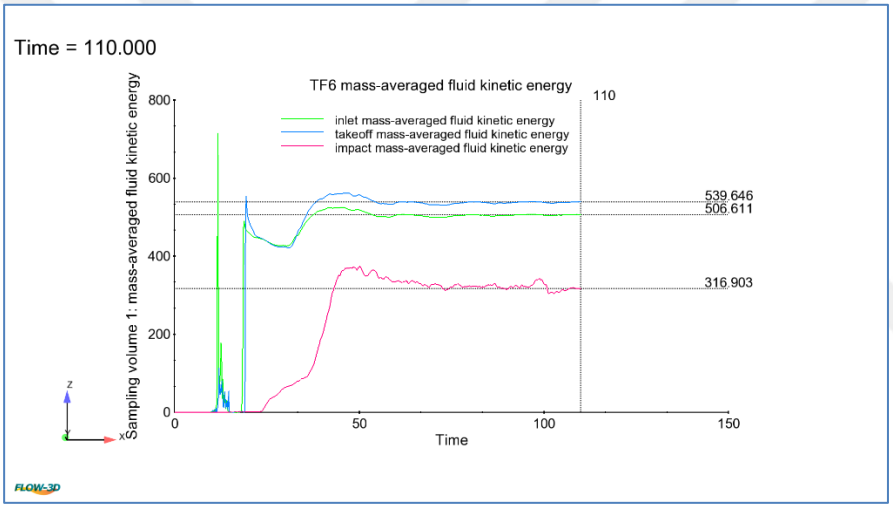

Şekil 4.139 Alternatif TF5 tasarımı kinetik enerji değişimi



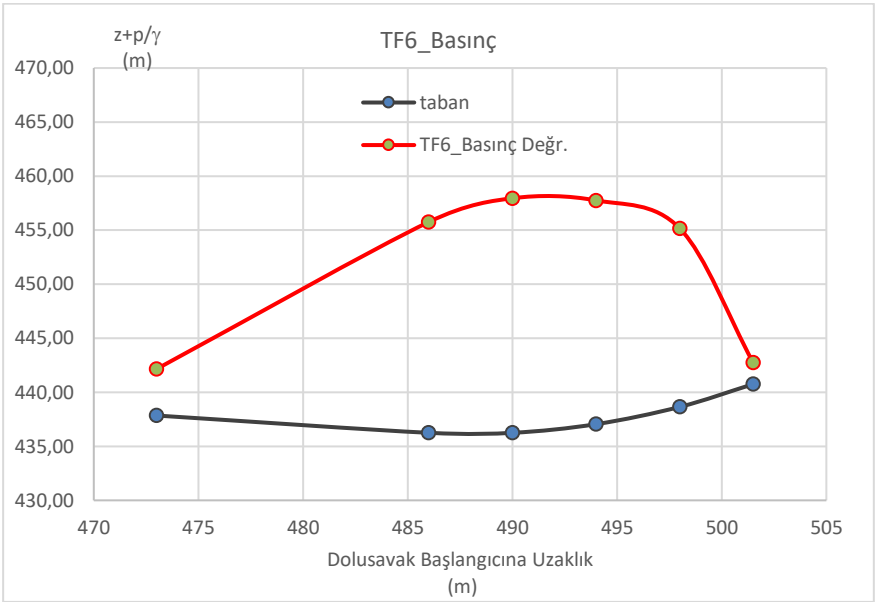

Şekil 4.140 Alternatif TF5 tasarımı eşik basınç değişimi



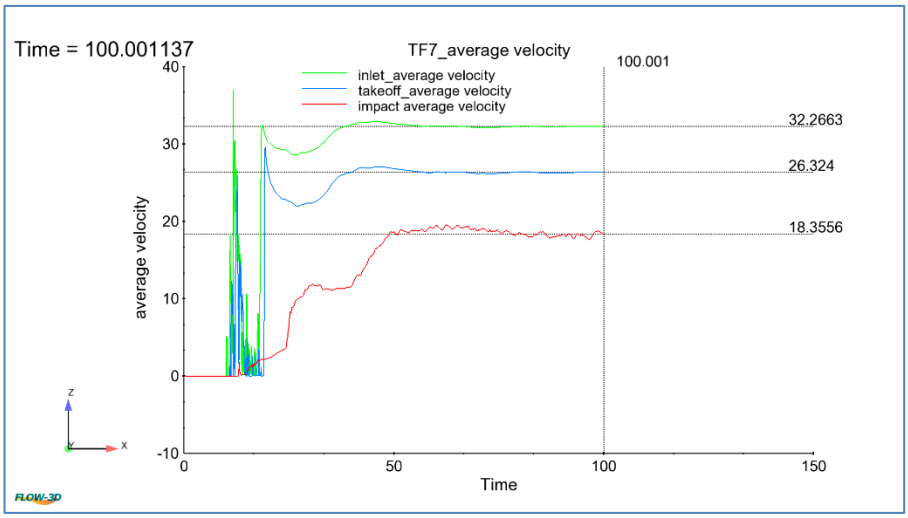

Şekil 4.141 Alternatif TF6 tasarımı ortalama hız değişimi



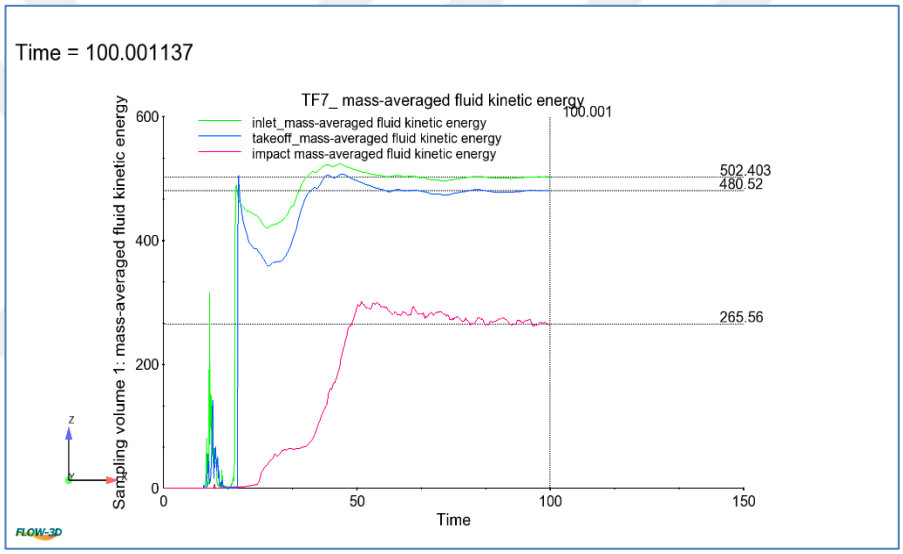

Şekil 4.142 Alternatif TF6 tasarımı kinetik enerji değişimi



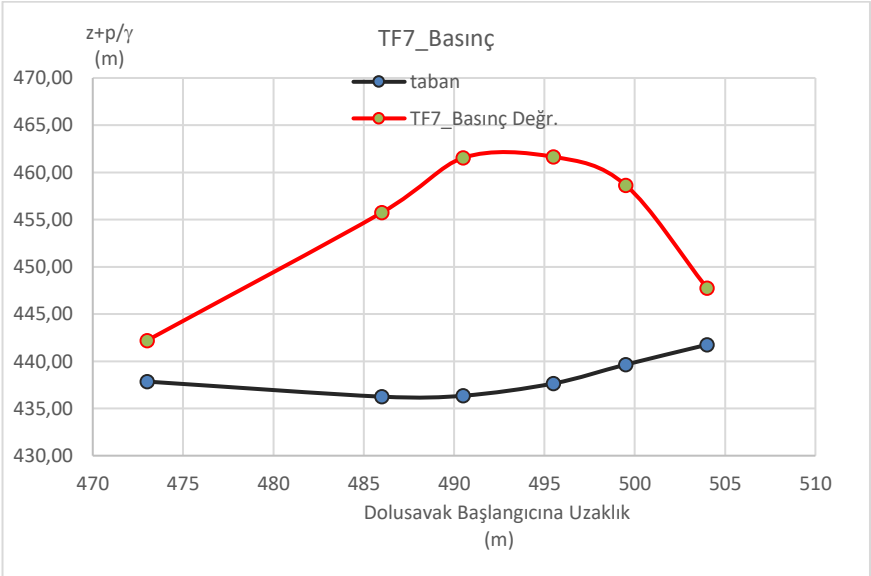

Şekil 4.143 Alternatif TF6 tasarımı eşik basınç değişimi



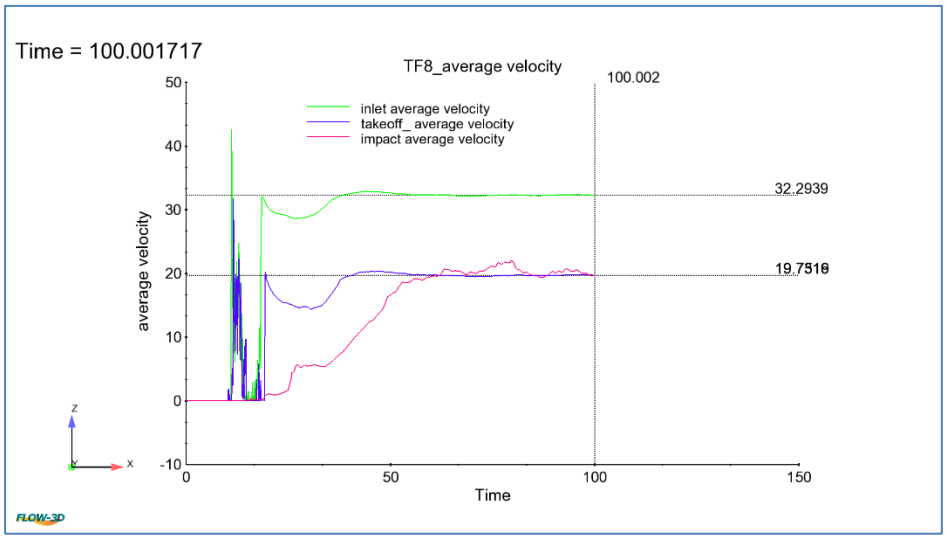

Şekil 4.144 Alternatif TF7 tasarımı ortalama hız değişimi



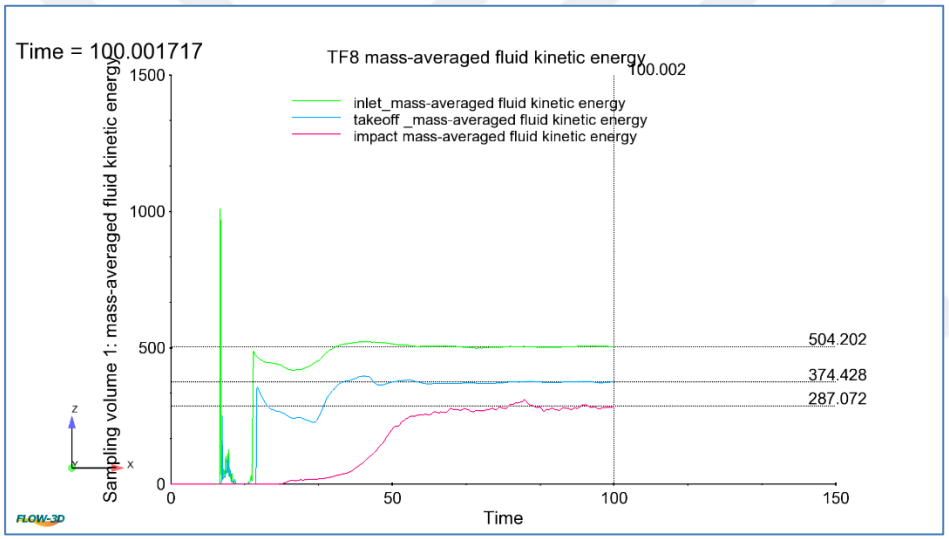

Şekil 4.145 Alternatif TF7 tasarımı kinetik enerji değişimi



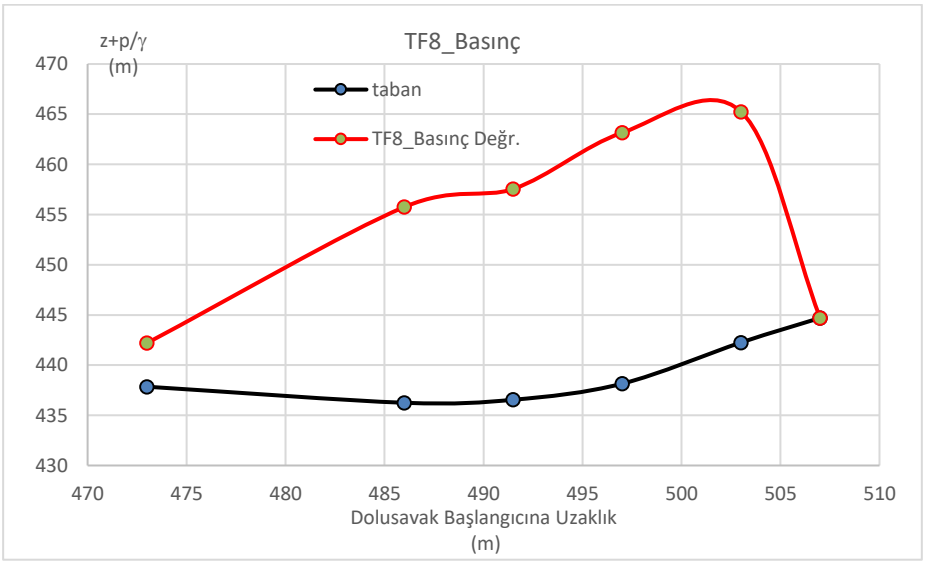

Şekil 4.146 Alternatif TF7 tasarımı eşik basınç değişimi



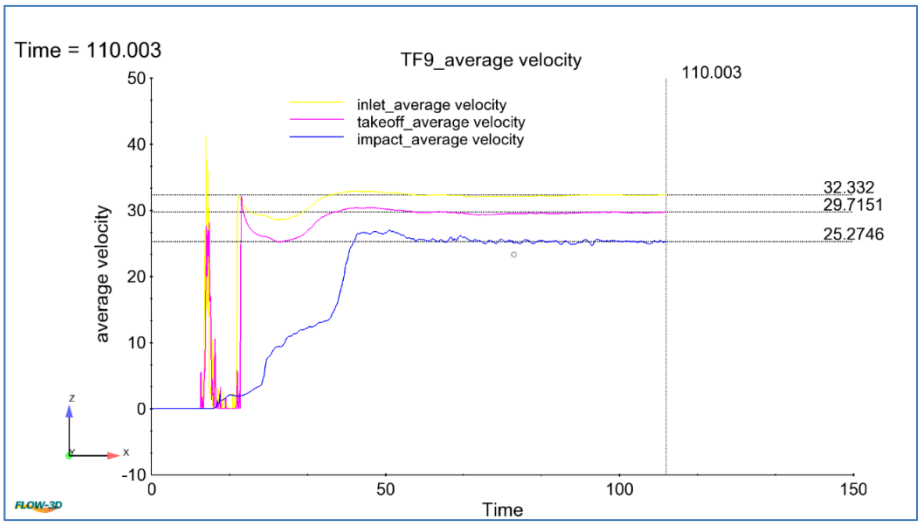

Şekil 4.147 Alternatif TF8 tasarımı ortalama hız değişimi



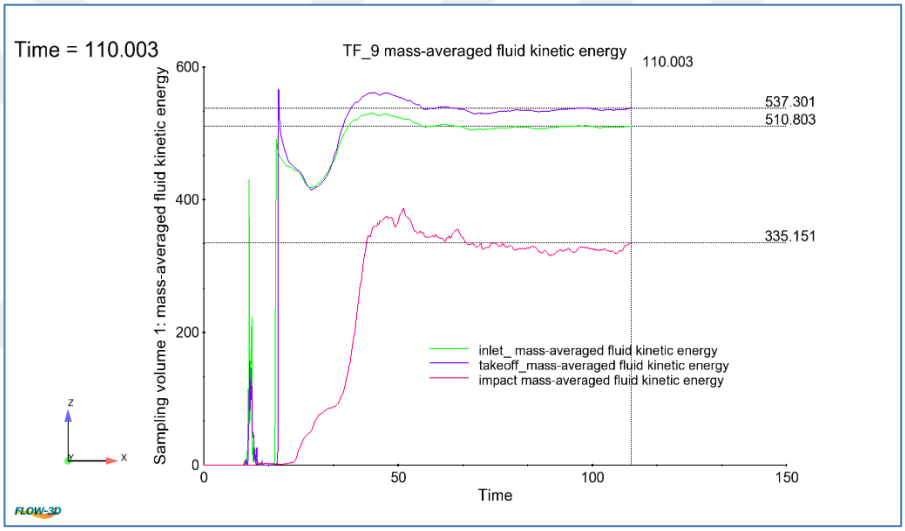

Şekil 4.148 Alternatif TF8 tasarımı kinetik enerji değişimi



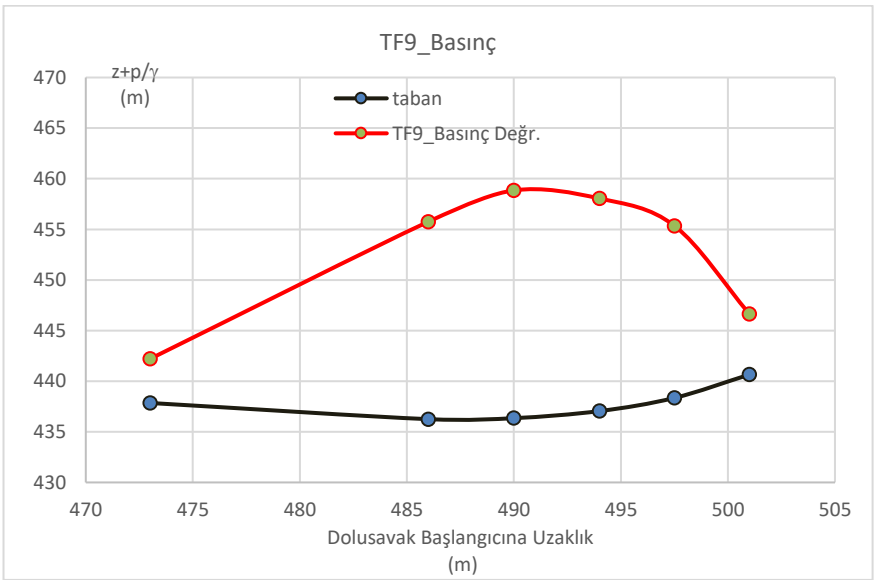

Şekil 4.149 Alternatif TF8 tasarımı eşik basınç değişimi



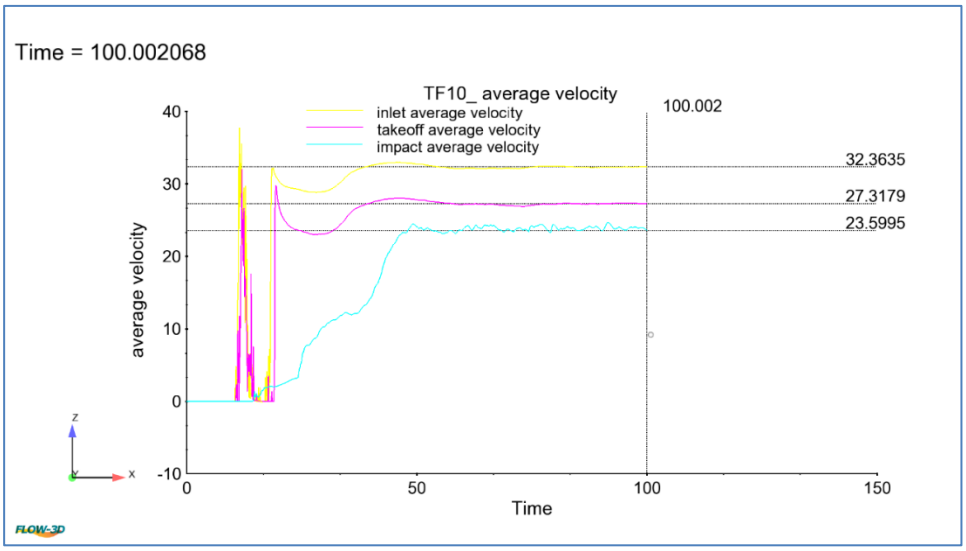

Şekil 4.150 Alternatif TF9 tasarımı ortalama hız değişimi



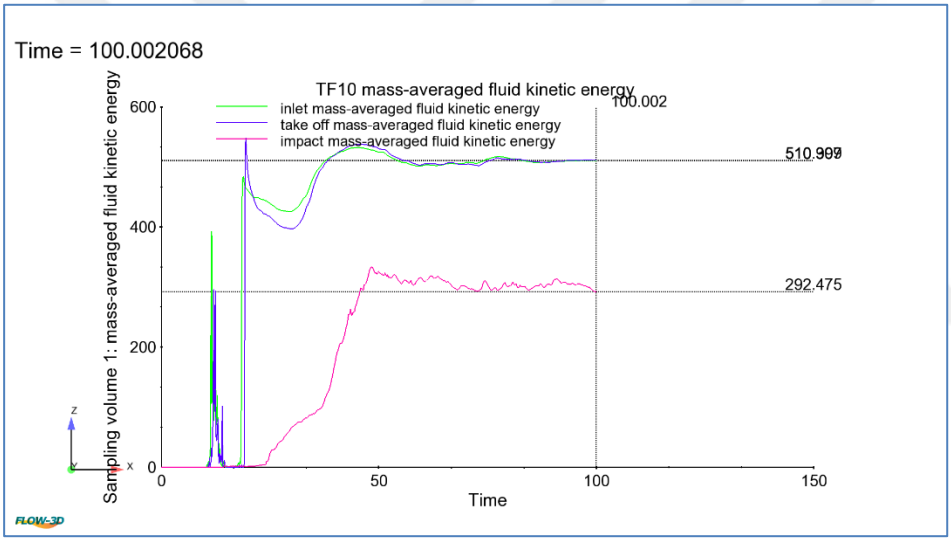

Şekil 4.151 Alternatif TF9 tasarımı kinetik enerji değişimi



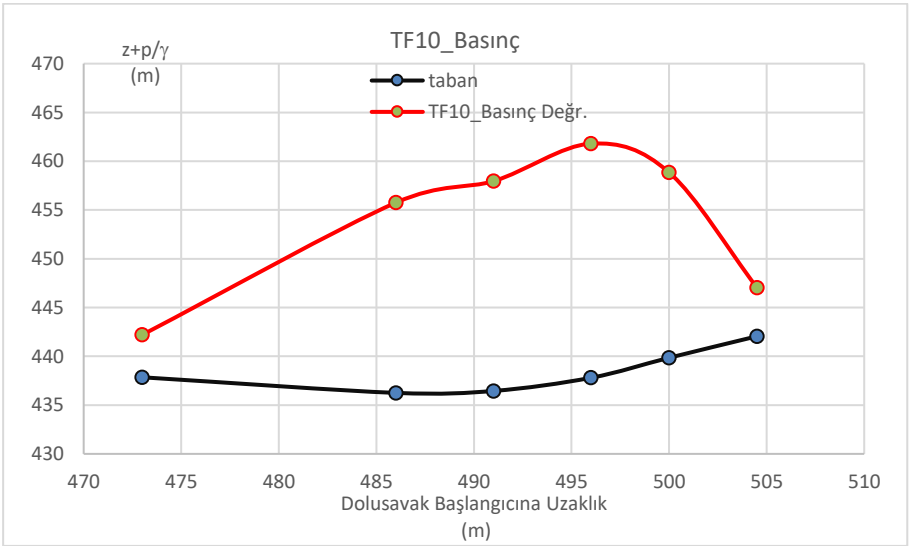

Şekil 4.152 Alternatif TF9 tasarımı eşik basınç değişimi



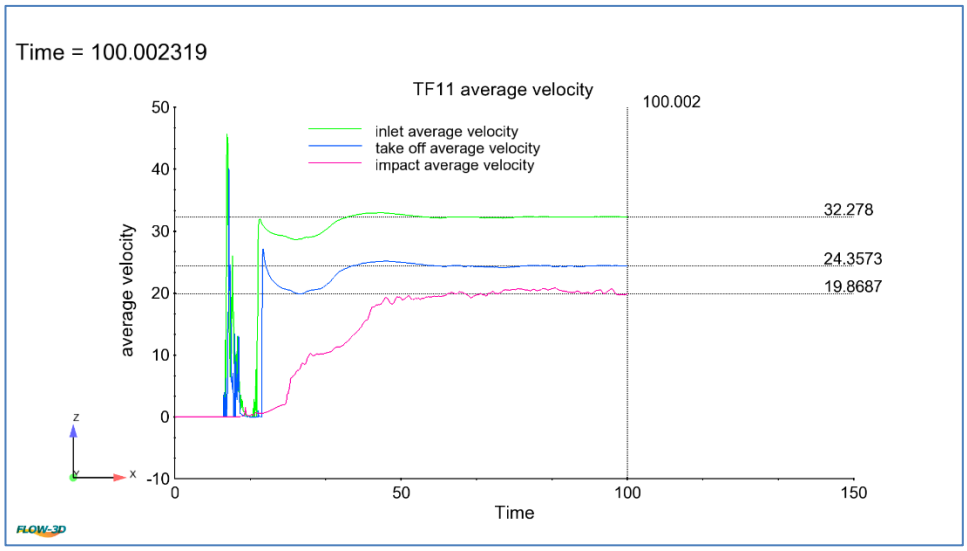

Şekil 4.153 Alternatif TF10 tasarımı ortalama hız değişimi



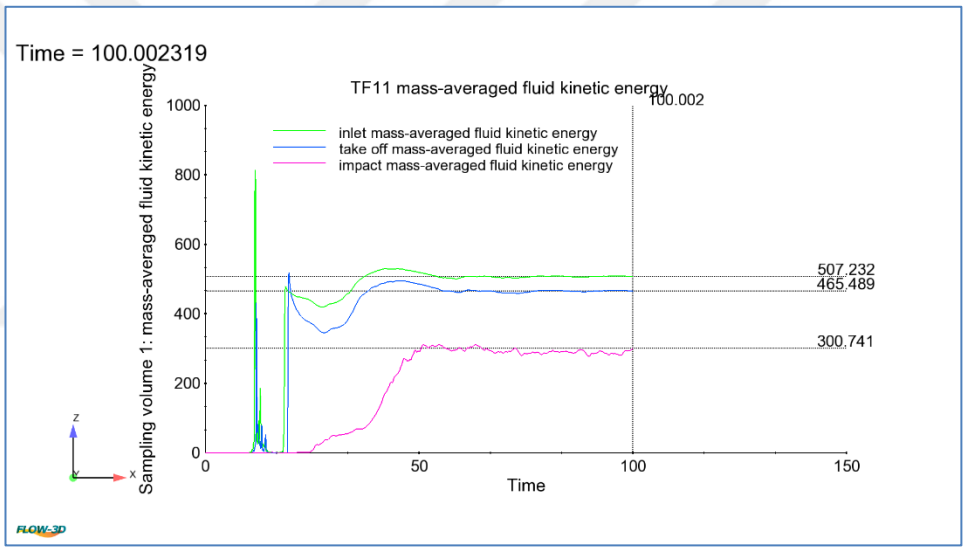

Şekil 4.154 Alternatif TF10 tasarımı kinetik enerji değişimi



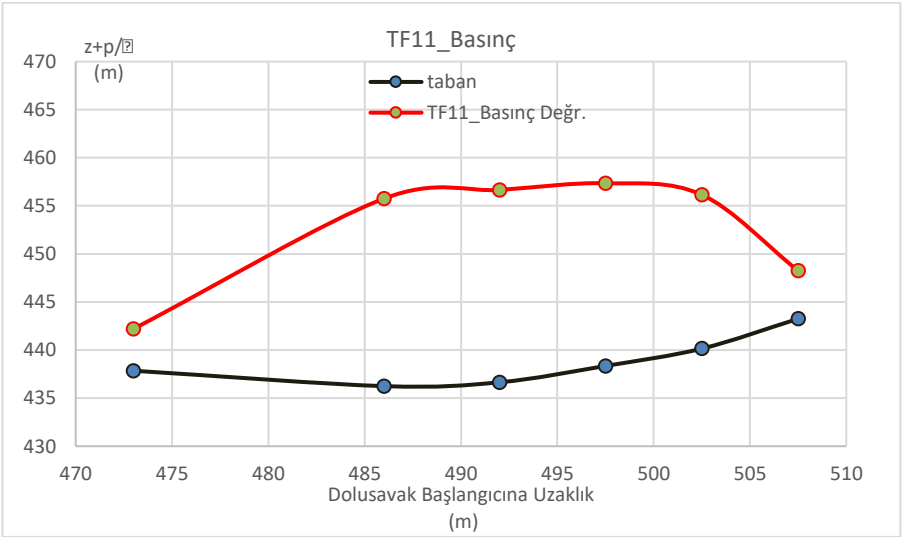

Şekil 4.155 Alternatif TF10 tasarımı eşik basınç değişimi



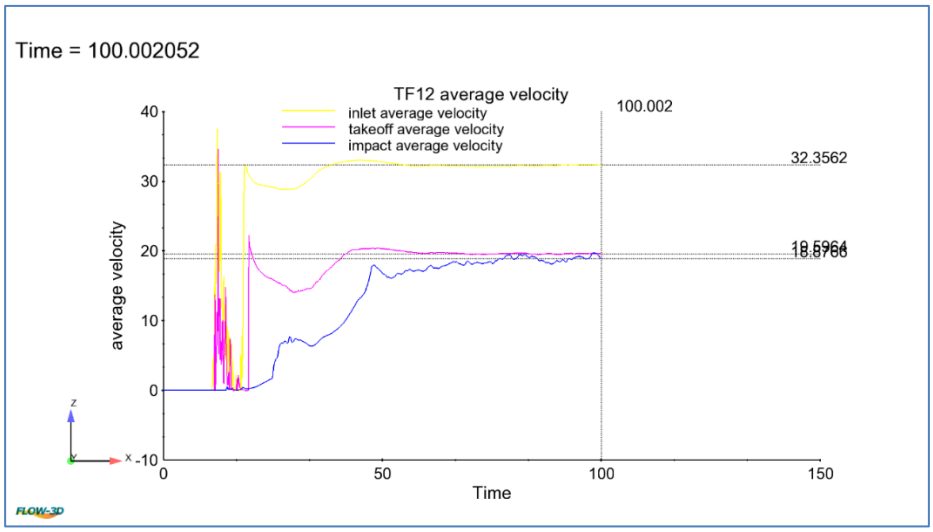

Şekil 4.156 Alternatif TF11 tasarımı ortalama hız değişimi



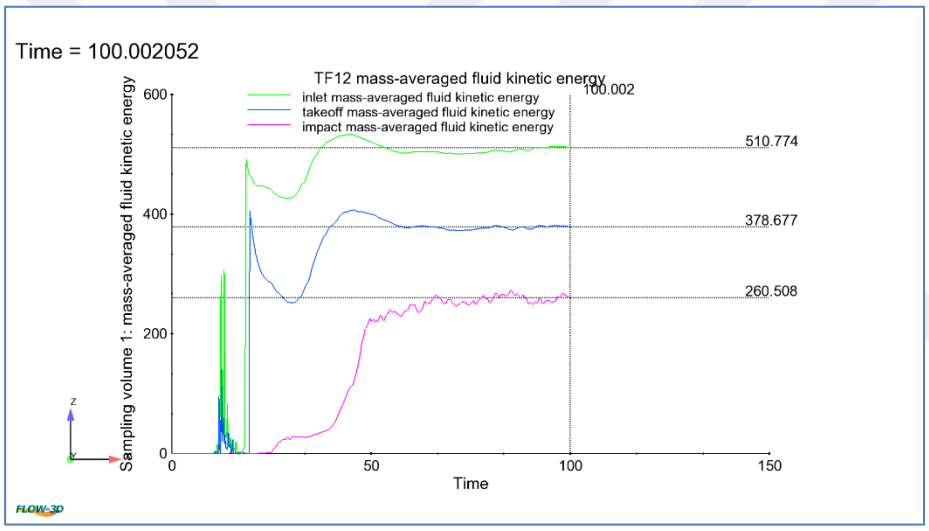

Şekil 4.157 Alternatif TF11 tasarımı kinetik enerji değişimi



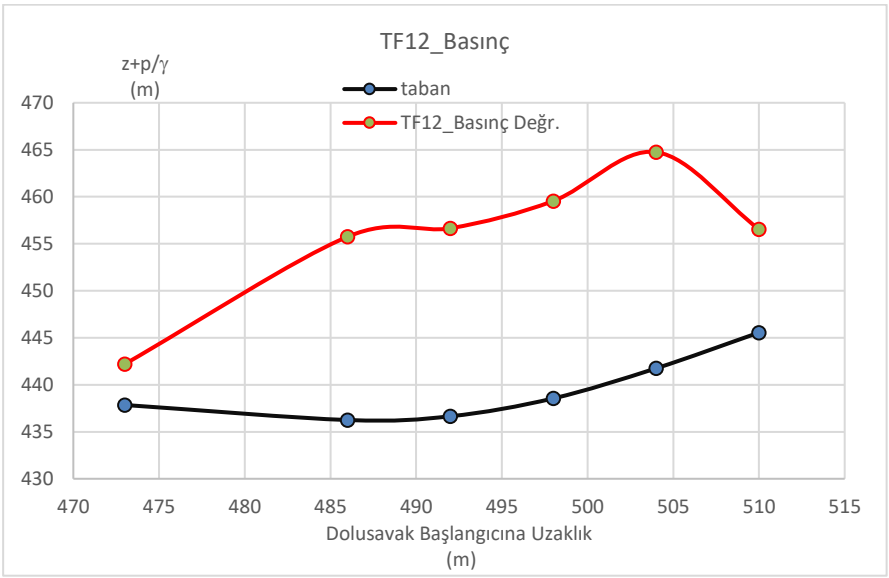

Şekil 4.158 Alternatif TF11 tasarımı eşik basınç değişimi



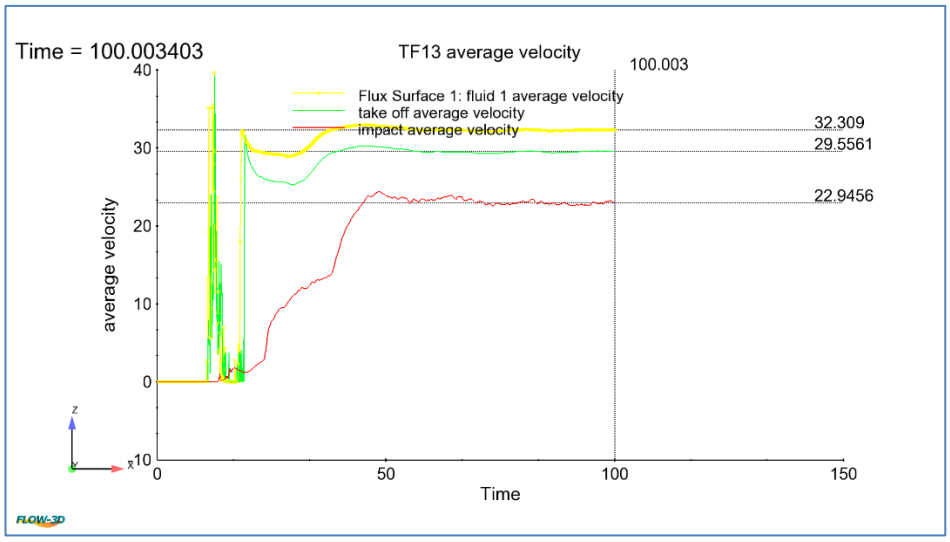

Şekil 4.159 Alternatif TF12 tasarımı ortalama hız değişimi



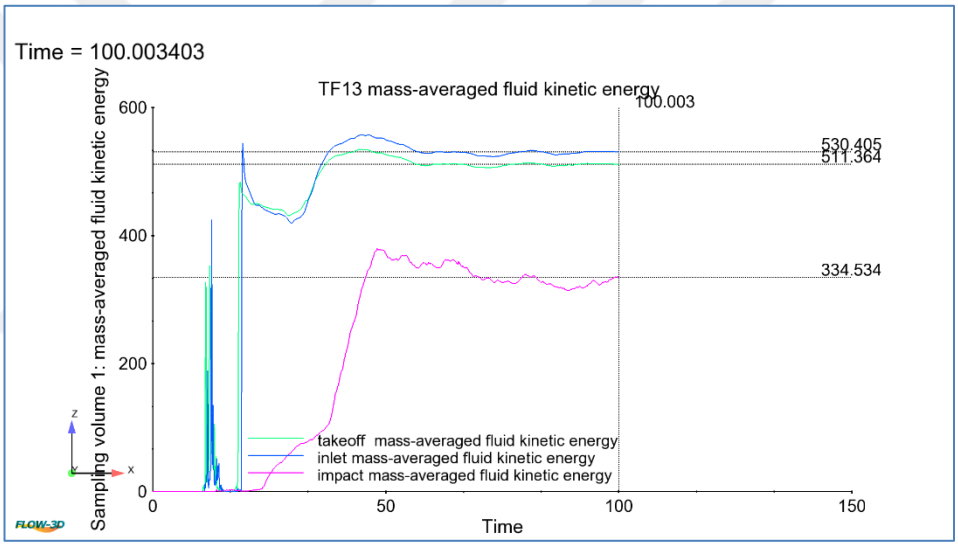

Şekil 4.160 Alternatif TF12 tasarımı kinetik enerji değişimi



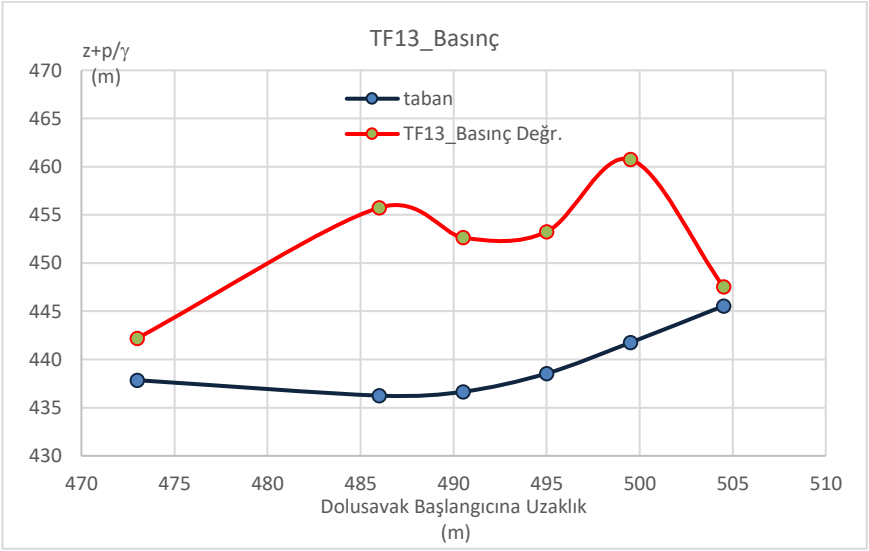

Şekil 4.161 Alternatif TF12 tasarımı eşik basınç değişimi



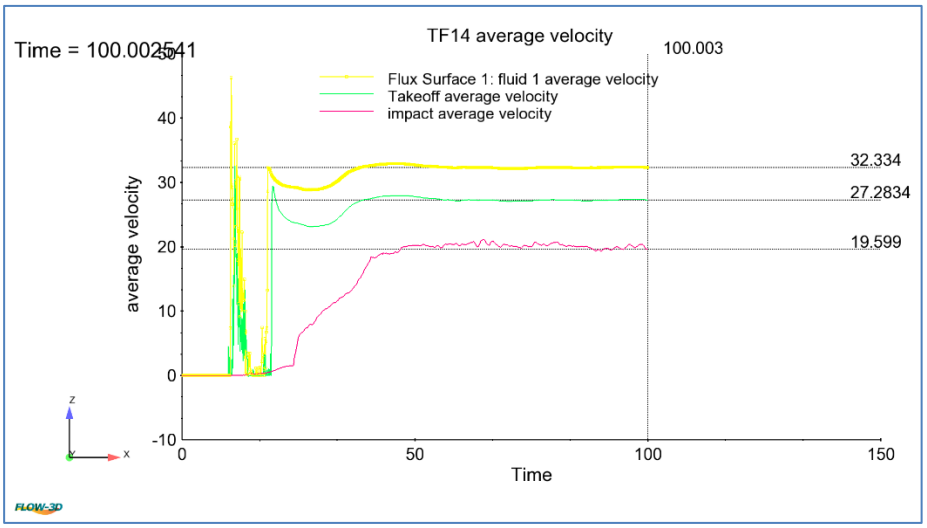

Şekil 4.162 Alternatif TF13 tasarımı ortalama hız değişimi



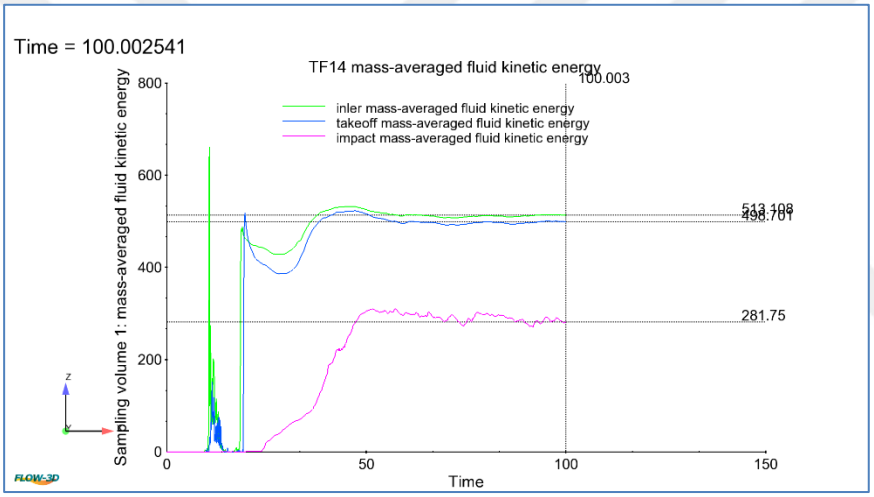

Şekil 4.163 Alternatif TF13 tasarımı kinetik enerji değişimi



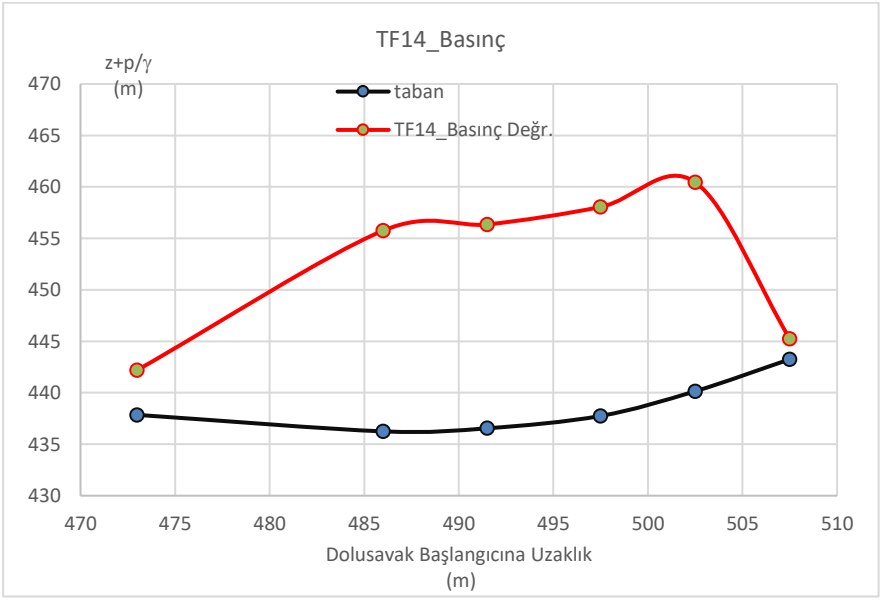

Şekil 4.164 Alternatif TF13 tasarımı eşik basınç değişimi



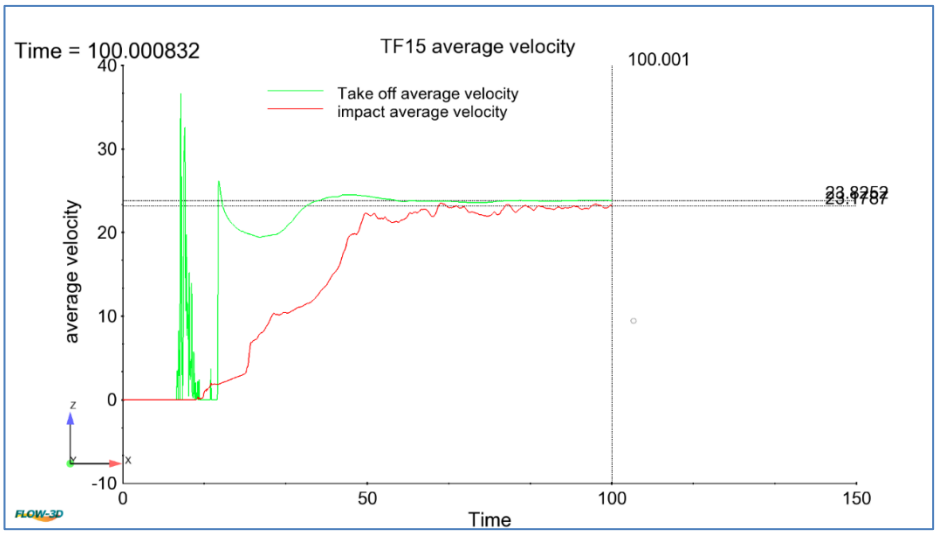

Şekil 4.165 Alternatif TF14 tasarımı ortalama hız değişimi



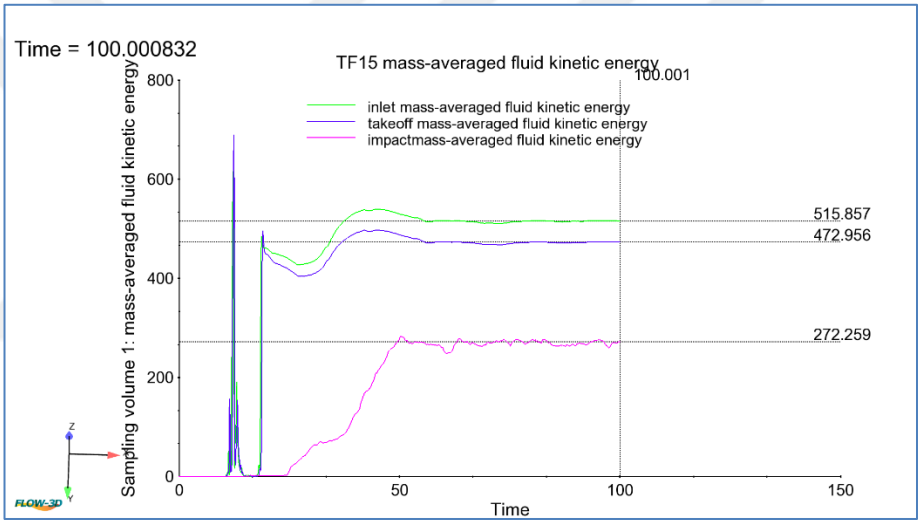

Şekil 4.166 Alternatif TF14 tasarımı kinetik enerji değişimi



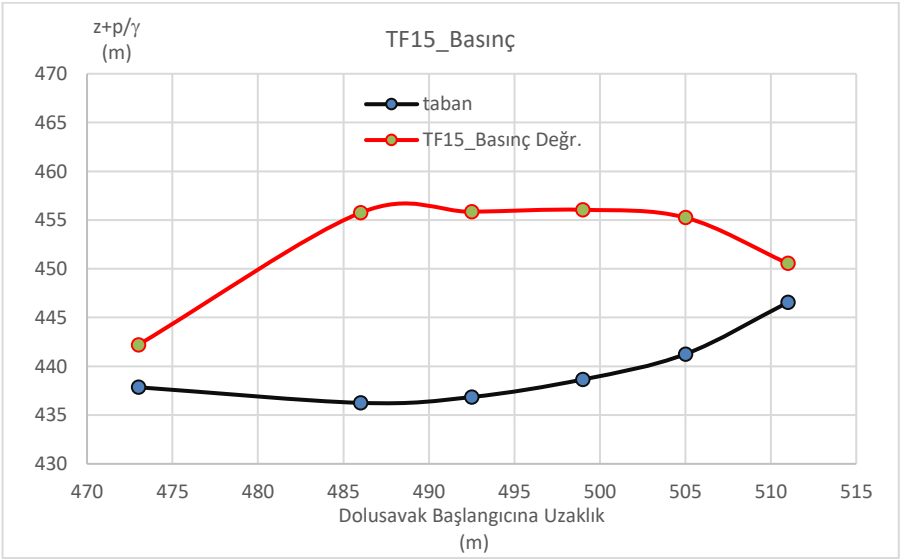

Şekil 4.167 Alternatif TF14 tasarımı eşik basınç değişimi



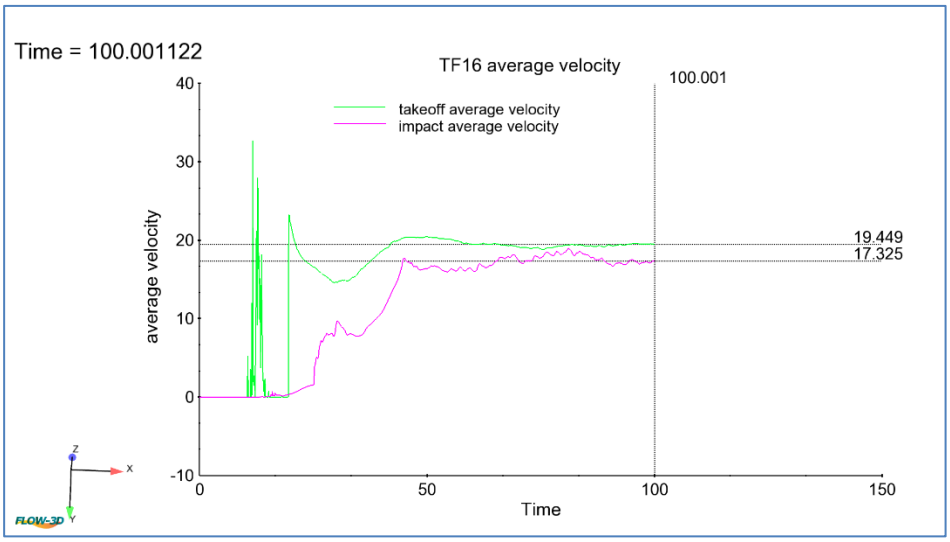
Şekil 4.168 Alternatif TF15 tasarımı ortalama hız değişimi



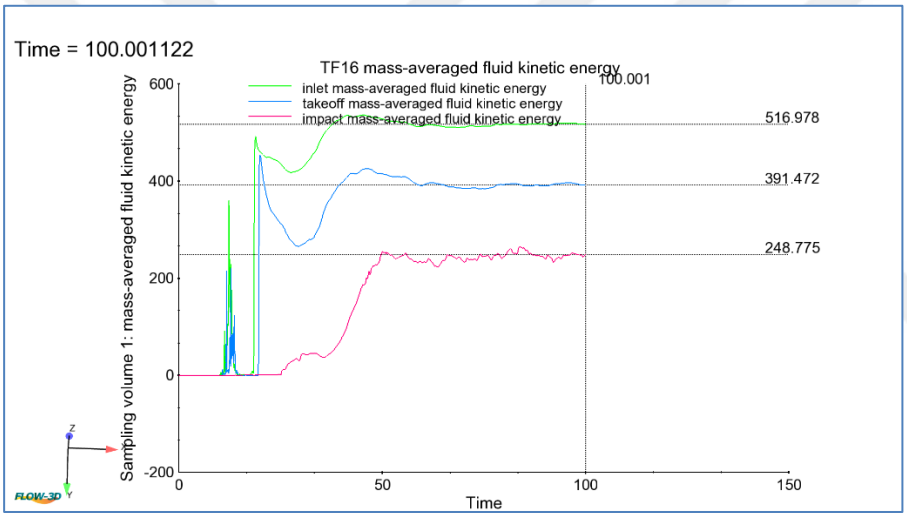
Şekil 4.169 Alternatif TF15 tasarımı kinetik enerji değişimi



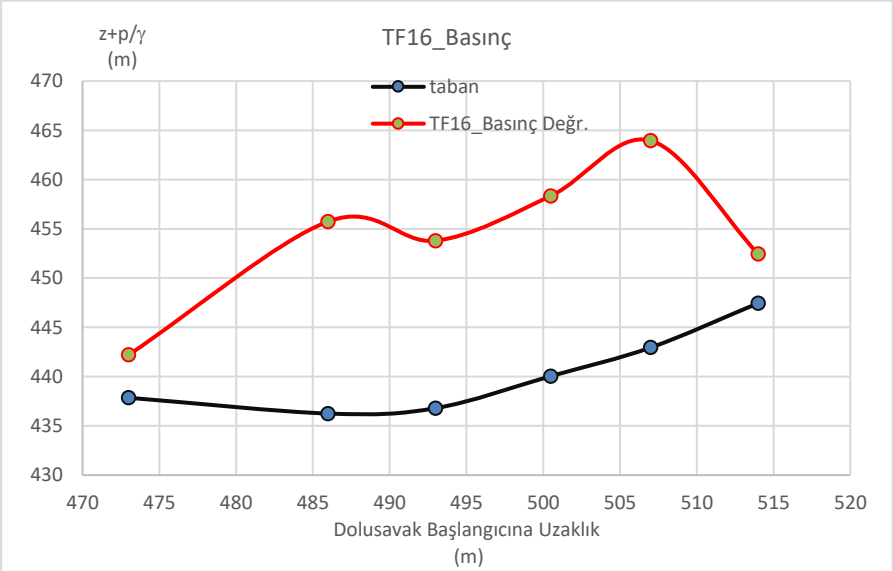
Şekil 4.170 Alternatif TF15 tasarımı eşik basınç değişimi



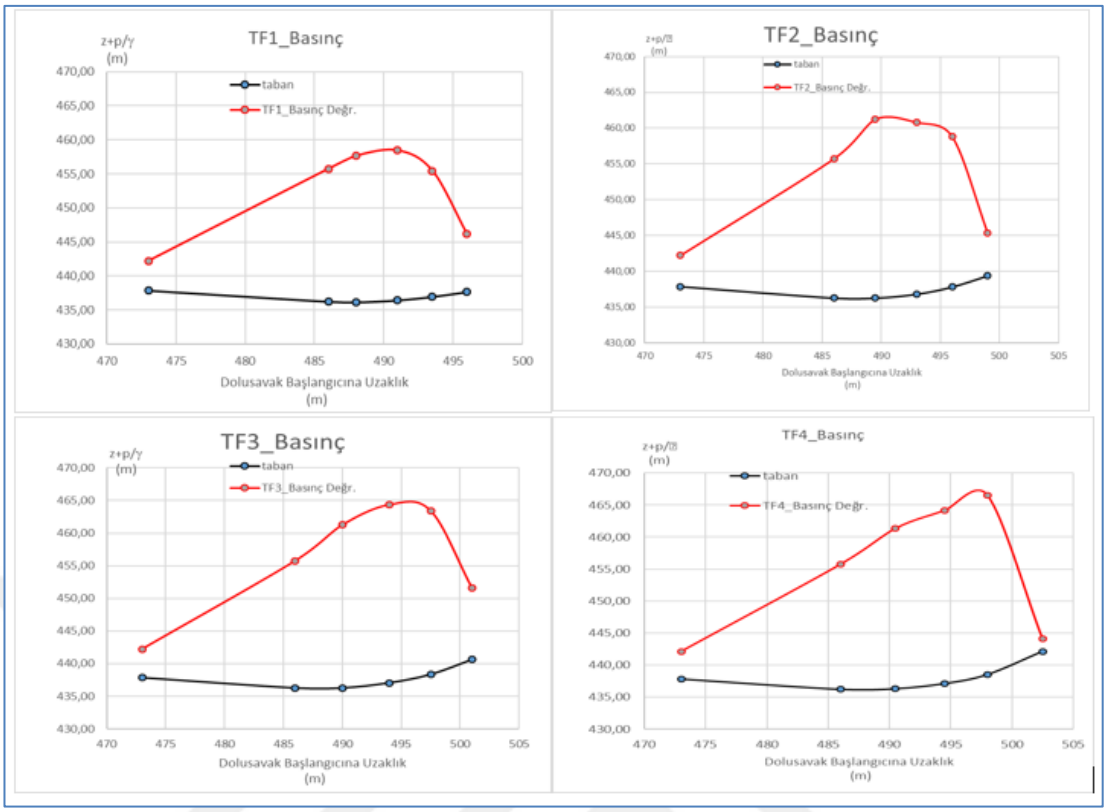

Şekil 4.171 Alternatif TF16 tasarımı ortalama hız değişimi



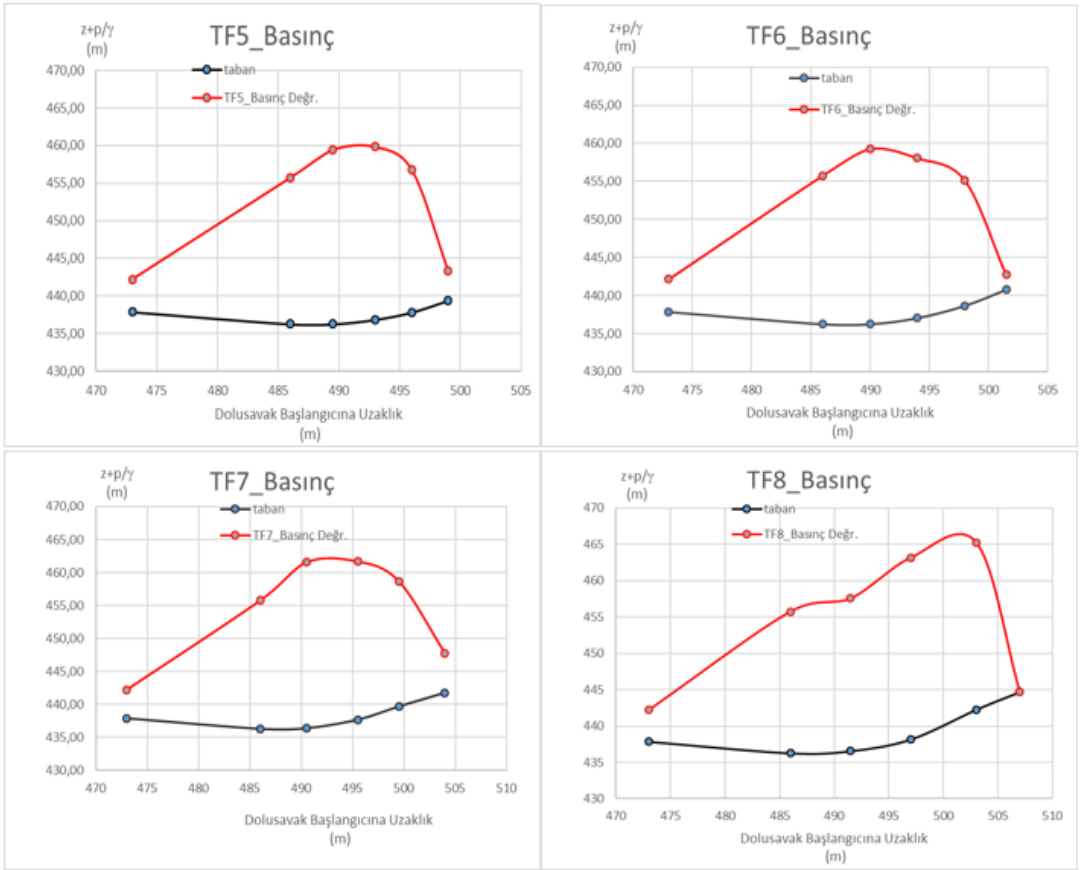

Şekil 4.172 Alternatif TF16 tasarımı kinetik enerji değişimi



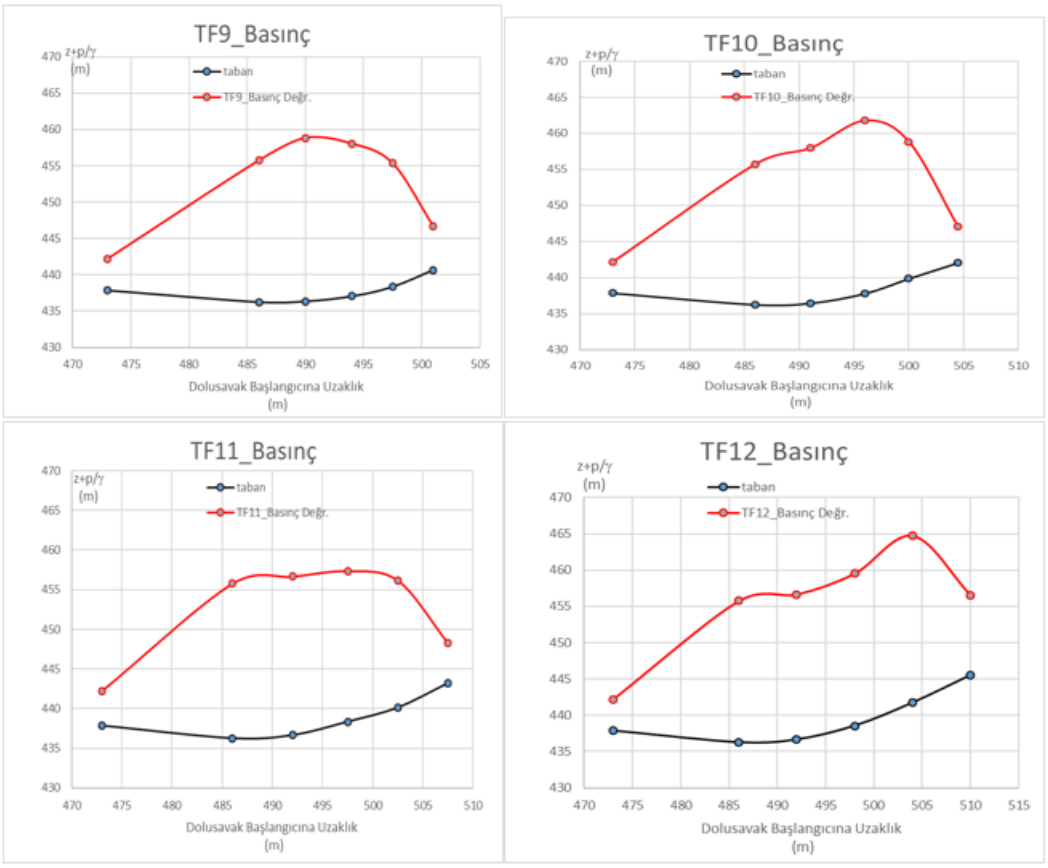

Şekil 4.173 Alternatif TF16 tasarımı eşik basınç değişimi



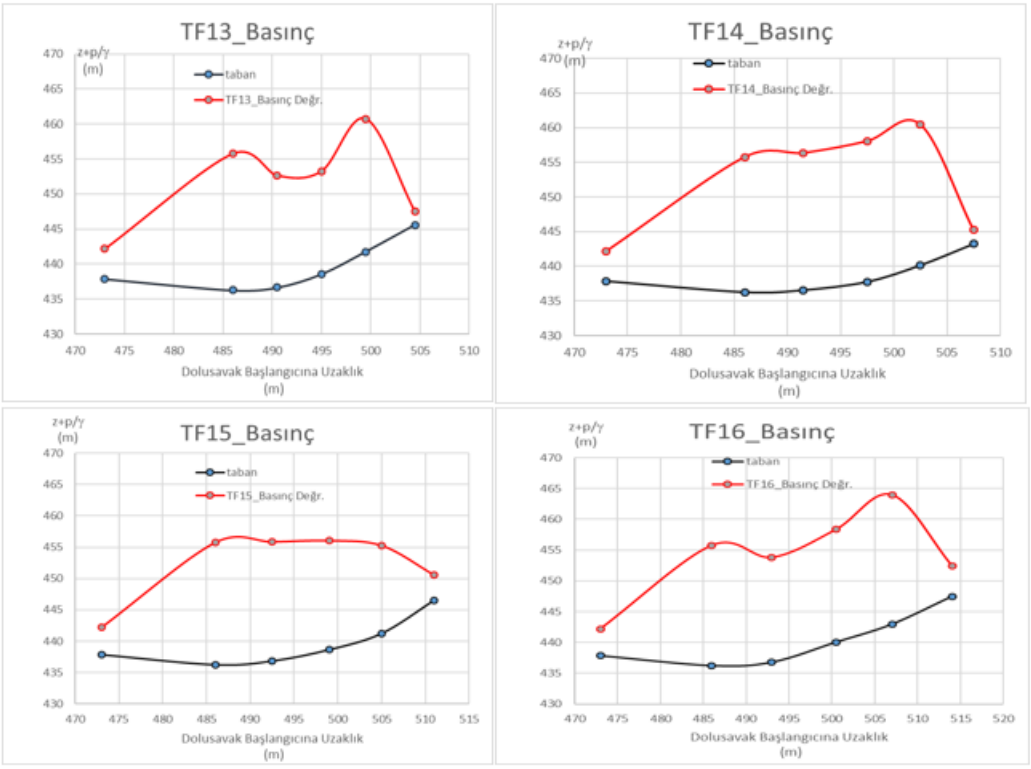

Şekil 4.174 R20 değerlerinde β27,5-β50 eşik basınç değişimi



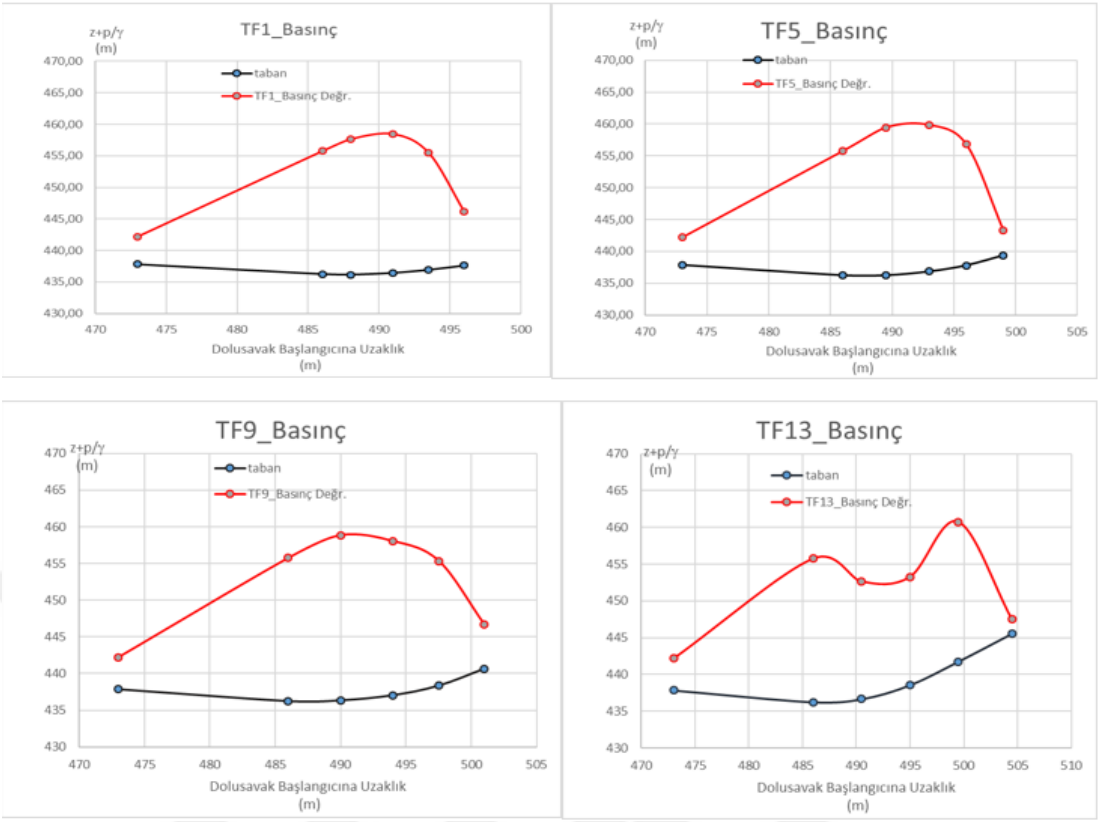

Şekil 4.175 R25 değerlerinde β27,5-β50 eşik basınç değişimi



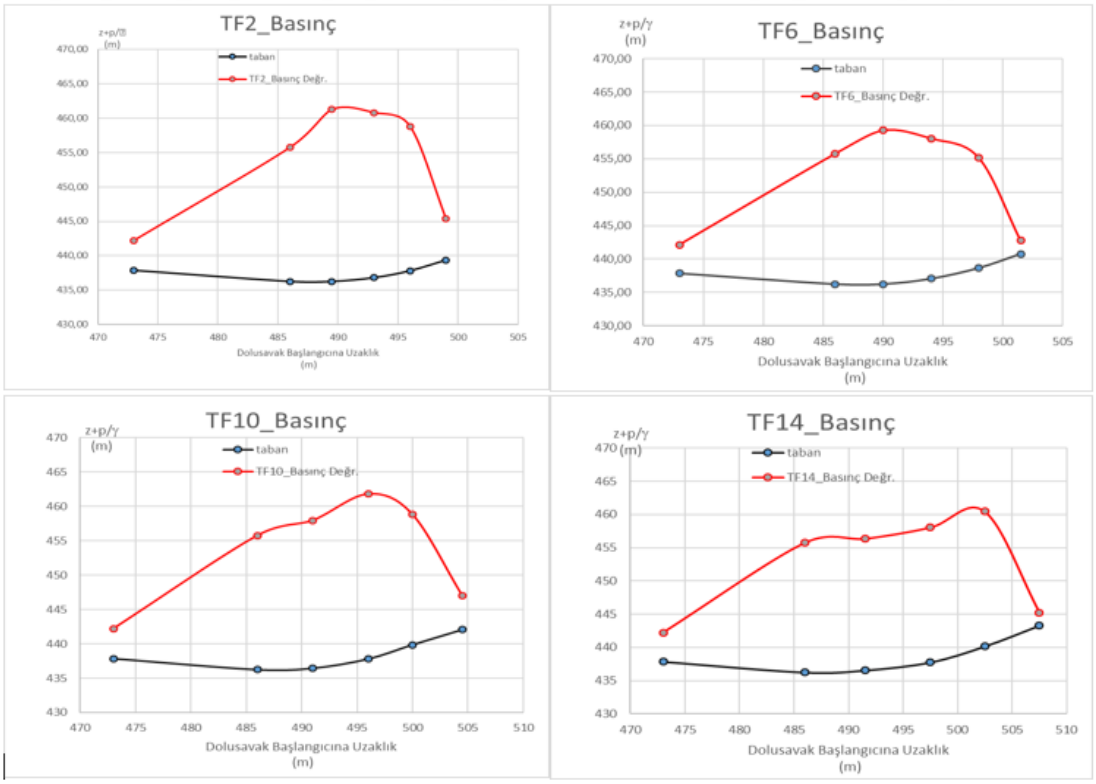

Şekil 4.176 R30 değerlerinde β27,5-β50 eşik basınç değişimi



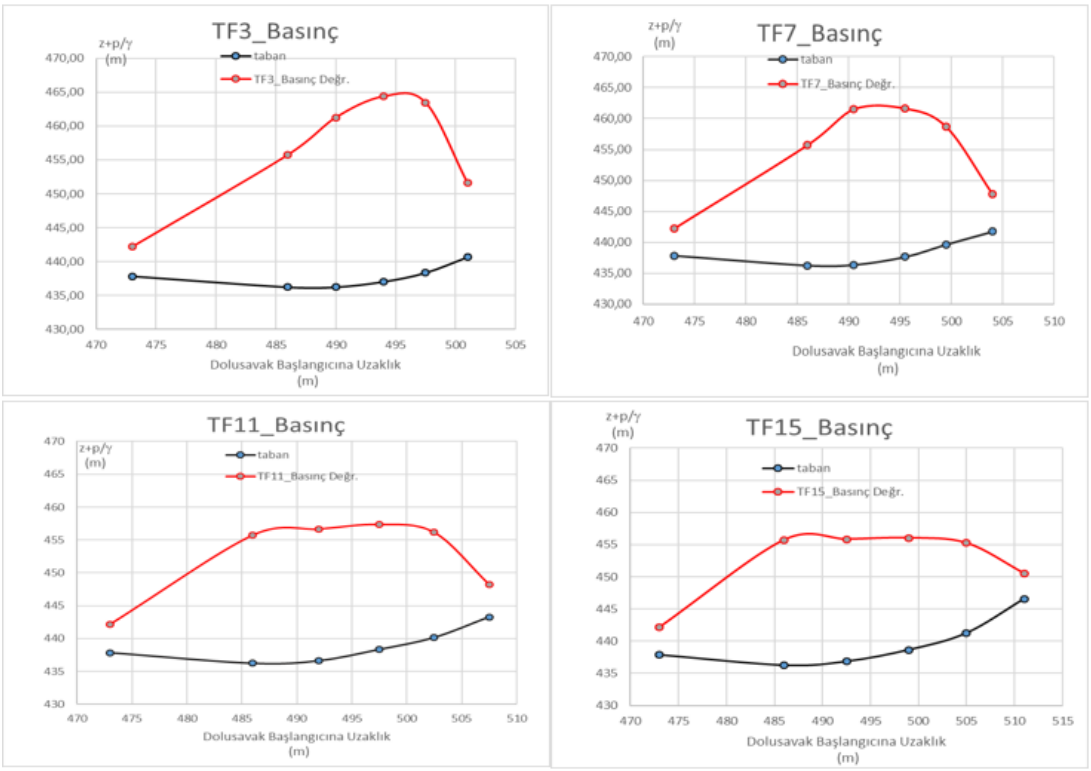

Şekil 4.177 R35 değerlerinde β27,5-β50 eşik basınç değişimi



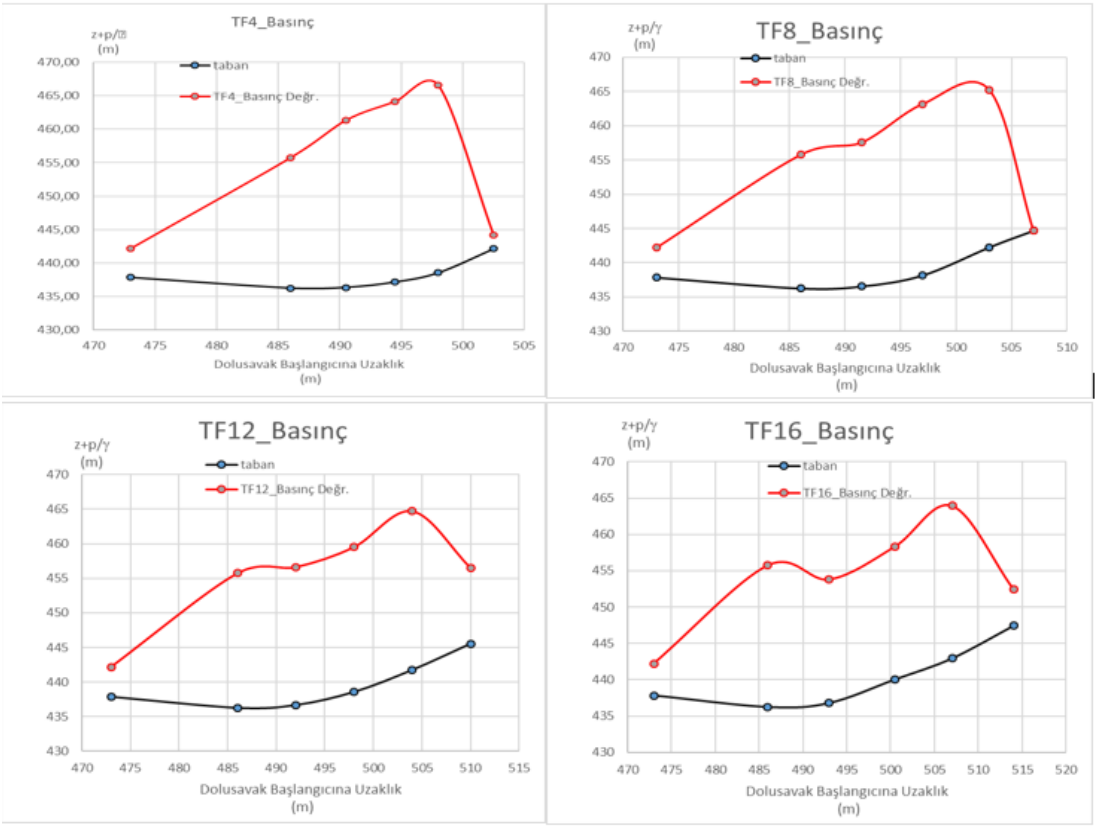

Şekil 4.178 β27,5 değerlerinde R20-R35 eşik basınç değişimi




Şekil 4.179 β35 değerlerinde R20-R35 eşik basınç değişimi




Şekil 4.180 β42,5 değerlerinde R20-R35 eşik basınç değişimi




Şekil 4.181 β50 değerlerinde R20-R35 eşik basınç değişimi

# 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlar, DSİ 1982 yılı Ilısu Barajı dolusavak fiziksel model raporlarının sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Yanı sıra mevcut barajımızın dolusavak boşaltım kanalı uç kısmına çevirmeli sıçratma eşiği olarak farklı deflektör ve yarıçaplara sahip 15 farklı yapı tasarlanmış olup bu tasarımların da sayısal analizi yapılarak gerek mevcut çalışmamız gerekse de literatürdeki çalışmalarda elde edilen sonuçlarla kıyaslanmıştır. Flow3D'nin kullanıldığı çalışmamızda ağ boyutlarının sonuçlara olan etkisi de göz önüne alınarak detaylı çalışma yapılmıştır. Analiz sonuçları dikkate alındığında fiziksel ve sayısal analizler arasındaki karşılaştırmada hidrolik karakteristiklere etki eden en güçlü hususun hava-su ilişkisi olduğu görülmüştür. Sayısal analizde kullanılan air entrainment modelinin dolusavak akışı üzerindeki hidrolik karakteristiklere etkimesi için enerji dengesinde güçlü değişimlere ihtiyaç duyması sayısal analiz yönteminin zayıf tarafını ortaya çıkarmıştır. Yine söz konusu her iki analiz yönteminde hidrolik karakteristiklere etkiyen diğer husus da ölçek konusudur. Açıklanan iki husus doğrultusunda sonuçlar aşağıya kısaca çıkarılmıştır. Buna göre;

Sayısal analizde debi miktarı fiziksel model verilerinden %3.2 daha fazla tahmin edilmiş, bu tahminin literatür taramalarına uygun olduğu tespit edilmiştir. Debiye kıyasla yüksek ağ çözünürlüğüne ihtiyaç duyan basınç değerleri konusunda, sayısal analiz sonuçları ile fiziksel model sonuçlarının kritik noktalarda dahi birbiriyle uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Dolusavak boşaltım kanalında fiziksel modelde ölçeğin büyümesinin basınç değerleri üzerinde etkisinin olmadığı, aynı durumun sayısal analiz modellerinin farklı ölçekleri için de geçerli olduğu, air entrainment modelinin sayısal analizde çalıştırılmasıyla da dolusavak ogee eşiği, boşaltım kanalı ve sıçratma eşiğindeki basınç değerleri üzerinde pek bir etkisinin olmadığı, ancak sıçratma eşiği sonrasında kuyruk suyu kanalı tabanında %60'a varan oranda basınçlarda düşüşlerin meydana geldiği tespit edilmiştir. Sıçratma eşiğinde denenen tasarımlarda(Flip Bucket, Varyant-I, Varyant-II) kuyruk suyu kanalındaki taban basıncının en fazla olduğu tasarımın çevirmeli sıçratma eşiği, en az ise ikinci varyant olması hususlarının fiziksel model sonuçlarınca da tasdik edilmesi ilgili sayısal analiz yönteminin güçlü yanını ortaya çıkarmıştır.

Su yüzü profilleri ile ilgili olarak, fiziksel modellerde var olan akış üzerindeki hava-su ilişkisi de göz önüne alındığında fiziksel ve sayısal analiz sonuçlarının birbiriyle uyumlu olduğu, fiziksel modelde ölçeğin büyümesiyle boşaltım kanalı üzerindeki su seviyelerinde ortalama %12 oranında artışların gözlendiği, sayısal analizlerde ölçeğin küçülmesiyle boşaltım kanalı sonu ve eşik yapısında su seviyesinde beklenenin aksine artış, sıçratma eşiği sonrasında yine beklenenin aksine jet profil mesafelerinde düşüş gözlendiğinden su yüzü profilleri için sayısal analizlerde prototip ölçekte (1/1 ölçek) analiz yapılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Yine sayısal analizdeki 1/1 prototip ölçek sonuçlarına göre çevirmeli sıçratma eşiğinde elde edilen su seviyesinin fiziksel model 1/100 ölçek seviyesinden daha fazla çıkması ve jet profilinin de daha kısa mesafeye ulaşması, ölçek konusunun geometrinin eğri-kavisli kısımlardaki etkisini ön plana çıkarmıştır. Dolayısıyla fiziksel model çalışmalarında boşaltım kanalı sonundaki kavisli kısımlarda hidrolik karakteristiklerin daha sağlıklı elde edilebilmesi için model ölçek verisinin büyük tutulması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Air entrainment modelinin kullanılmasının varyantlarda ortalama %10 oranında, çevirmeli eşikte ise %5 oranında sıçrama mesafesinin kısalmasına neden olduğu dikkate alındığında sisteme sürüklenen havanın artması için jet profillerinin parçalanması gerektiği görülmektedir. Hız karakteristikleri konusunda fiziksel modellerde ölçeğin büyümesiyle hız artmışsa da bu artış oldukça sınırlı olmuştur. Sayısal analizlerde ölçeğin büyümesiyle hızlardaki artış fiziksel modele kıyasla daha fazla olsa da sayısal ve fiziksel modellerde kanal sonu ve sonrası gibi kritik kısımlarda dahi aradaki farkın %12-15 seviyesinde olması sayısal analizin hız karakteristiklerinin tespiti konusunda başarılı olduğunu ve hız değerlerinin de ölçekten pek etkilenmediğini göstermektedir. Boşaltım kanalında 1/30 ve 1/100 fiziksel modellerde hızlar arasında dikkate değer farkın olmaması su ve taban arasında oluşan gerilmelerin dolusavak gibi yapıların boşaltım kanallarında ihmal edilebileceğinin önceki çalışmalarca ifade edilmesi analiz sonuçları ile desteklenmiştir. Ayrıca air entrainment modelinin hızları azaltıcı yönündeki etkisi oldukça sınırlı olmuştur.

2010 yılı dolusavak revize tasarımda bulunan enerji kırıcı havuzun gerek jet profilleri sonrasında tabanda oluşacak basıncın sönümlenmesi konusu gerekse de havuzda oluşan dalga yüksekliklerini karşılayacak boyutlarda olması, yapılan revize projelendirme hususunun oldukça yerinde bir karar olduğunu göstermiştir. Bununla

birlikte enerji kırınımındaki etkili parametre olan jet profillerine etki eden hava sürüklenmesinin yanı sıra varyantlara kıyasla çevirmeli sıçratma eşiğine etki eden ölçek etkisi de dikkate alındığında Ilısu Barajı dolusavak yapısında enerji kırıcı olarak tercih edilen dişli sıçratma eşiği tasarımının da yine doğru tercih olduğuna işaret etmiştir. HAD yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen sayısal analiz sonuçlarının fiziksel model sonuçlarıyla uyumlu olması sadece sayısal analiz sürecinde yapılan çalışmalar ve yapılan doğru tercihler ile olmamış, yanı sıra analiz öncesi yapılan ve nispeten fazla zaman harcanan CAD modeli ve sair ölçüm datalarının da sağlam olarak inşa edildiğini göstermiştir. Dolayısıyla sayısal analiz öncesi yapılması gerekenlerin de çalışmanın önemli fraksiyonunu teşkil ettiği ortaya çıkmıştır.

Alternatif tasarımlarımızın sayısal analiz sonuçları ile önceki çalışmaların fiziksel model sonuçlarının uyumlu olduğu, alternatif tasarımlarda elde edilen sonuçlar dikkate alındığında enerji sönümlenmesindeki etkili hususun deflektör açısı olduğu, yarıçapın karakteristikler üzerinde deflektör açısı kadar net bir şekilde etkili olmadığı görüldüğünden etkili enerji kırınımı için tasarlanan yapıların akımı daha fazla havalandırmaya yönelik olması gerektiği değerlendirilmektedir. Gelinen noktada sayısal analiz yönteminde dinamik akış görüntülerinin elde edilmesi, yani farklı datalardaki ölçümlerden oluşan vaziyetin görüntüler sayesinde yorumlanması hususu ilgili konuya olan bakış açısının gelişmesine yol açmıştır.

## KAYNAKLAR


[1] Z. Şen, *Kur'an-ı Kerim ve Su Bilimi*. İstanbul: Su Vakfı Yayınları, pp. 1-30, 2006.

[2] N. Ağıralioğlu, *Baraj Planlama ve Tasarımı Cilt 1*. İstanbul: Su Vakfı Yayınları, pp. 11-22, 2007.

[3] R. M. Khatsuria, *Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators*. New York: CRC Press, pp. 293-385, 2005.

[4] United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, *Design of Small Dams*. Washington DC: Third Edition, pp. 353-381, 1987.

[5] D. Vischer ve P. Rutschmann, ‘‘Spillway facilities – Typology and General Safety Questions.’’ Proc. 16th ICOLD, San Francisco, pp. 371-381, June 1988.

[6] J. Gao, Z. P. Liu ve J. Guo, "Energy Dissipation and High Velocity Flow Dam Construction in China." *A Sixty-Year Review*, Jia Jinsheng, Ed. China: Water Power Press, pp. 1-33, 2014.

[7] N. Kaya, "Enerji Kırıcı Havuzlarda Farklı Tip Enerji Kırıcı Blokların Enerji Sönümleme Oranlarının İncelenmesi." Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 2003.

[8] C. Erkek ve N. Ağıralioğlu, *Su Kaynakları Mühendisliği*. İstanbul: Beta Basım, pp. 275-295, 2013.

[9] Q. Fan, "Technology improvements and management innovations in construction of Xiluodu hydropower station on Jinsha River." *Higher Education Press*, vol. 4, pp. 231–237, February 2017.

[10] P. J. Mason, "The choice of hydraulic energy dissipator for dam outlet works based on a survey of prototype usage." *Proc. Instn. Civil Engineers*, vol. 72, pp.209-219, May 1982.

[11] B. H. Rajan ve K. N. Rao, "Design of trajectory buckets." *Water and Energy İnternational*, vol. 37, pp. 63-76, January 1980.

[12] R. Steiner, V. Heller, W.H. Hager, ve H-E. Minor, "Deflector ski jump hydraulics." *J. Hydr. Engineering ASCE*, vol. 134, pp. 562-571, May 2007.

[13] D. L. Vischer ve W. H. Hager, *Dam Hydraulics*. Chichester: Wiley, pp. 155-185, 1998.

[14] R. Juon ve W. H. Hager, "Flip bucket without and with deflectors." *J. Hydraul. Engineering*, vol. 126, pp. 837–845, November 2000.

[15] V. Gümüş, O. Şimşek ve Ş. Bal, " Experimental and Numerical Modeling of Open Channel Flow in Various Cross-Section." *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, GU J Sci*, vol. 7, pp. 938-956, Kasım 2019.

[16] C. W. Hirt ve B. D. Nichols, “Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free Boundaries.” *Journal of computational physics*, vol. 39, pp. 201-225, January 1981.

[17] C. W, Hirt ve J. M. Sicilian, “A Porosity Technique for the Definition of Obstacles in Rectangular Cell Meshes.” Proc. Fourth International Conf. Ship Hydro., National Academic of Science, Washington DC, pp.1-19, September 1985.

[18] M. S. AKÖZ, O. Şimşek, N. G. Soydan, V. Gümüş ve M. S. Kırkgöz, "RSM Türbülans Modeli ile Enerji Kırıcı Yapı Üzerindeki Akımın Sayısal Modellenmesi," 4. Su Yapıları Sempozyumu, Antalya, Turkey, pp. 104-113, Mart 2015.

[19] M. C. Aydın, E. İkincioğulları ve M. E. Emiroğlu, “Şütlerdeki Enerji Kırıcı Blokların Akımın Hidrolik Karakteristikleri Üzerine Etkisinin Sayısal Analizi.” Uluslararası Su ve Çevre Kongresi, Bursa, pp. 9-15, Mart 2018.

[20] H. Babaali, A. Shamsai ve H. Vosoughifar, “Computational Modeling of the Hydraulic Jump in the Stilling Basin with Convergence Walls Using CFD Codes.” *Arab J Sci Eng,* vol. 40, pp. 381–395, January 2015.

[21] K. Büyüktaş, A. Tezcan, ve İ. Sajid, “Enerji kırıcı yapıların HAD yöntemi ile belirlenmesi.” *Batı Akdeniz Tarımsal Enstitüsü Derim Dergisi*, vol. 34, pp. 172-181, Haziran 2017.

[22] P. G. Chanel ve J. C. Doering, “An evaluation of computational fluid dynamics for spillway modelling.” Proc. 16th AMFC, pp. 1201-1206, January 2007.

[23] R. Daneshfaraz, A. Ghaderi, A. Akhtari ve S. D. Francesco, “On the Effect of Block Roughness in Ogee Spillways with Flip Buckets.” *Fluids,* vol. 5, pp. 1-18, April 2020.

[24] Ö. F. Dursun ve M. Öztürk, “Basamaklı Dolusavakların Akımın Enerjisini Sönümleme Özelliğinin Sayisal Analizi.” *Engineering Sciences*, vol. 4, pp. 165-174, March 2009.

[25] E. Pereira, “Modelação Numérica 3D De Escoamentos Em Superfície Livre Com Emulsionamento De Ar. Descarregador De Cheias Complementar Da Barragem De Salamonde.” Master’s Thesis, Tecnico Lisboa, Brasil, 2016.

[26] V. Gümüş, M. S. Aköz ve M. S. Kırkgöz , "Kapak Mansabında Batmış Hidrolik Sıçramanın Deneysel ve Sayısal Modellenmesi." *Teknik Dergi,* vol. 24, pp. 1-19, May 2013.

[27] D. Ho, B. Cooper, K. Riddette ve S. Donohoo, *Application of Numerical Modelling to Spillways in Australia, in Dams and Reservoirs, Societies and Environment in the 21st Century.* London: Taylor and Francis Group, pp. 951-959, 2006.

[28] V. Heller, W. H. Hager, ve H-E. Minor, "Ski jump hydraulics." *J. Hydraul. Eng.,* vol. 131, pp. 347–355, May 2005.

[29] D. T. Souders ve C. W. Hirt, "Modeling Roughness Effects in Open Channel Flows." *Flow Science Technical Note (FSI-02-TN60),* pp. 1-10, September 2002.

[30] C.W. Hirt, "Modeling Turbulent Entrainment of Air at a Free Surface." *Flow Science. Inc. FSI-03-TN61,* pp. 1-9, November 2003.

[31] M. Jorabloo, R. Maghshoodi ve H. Sarkardeh, "3D Simulation of Flow over Flip Buckets at Dams." *Journal of American Science*, vol. 7, pp. 931-936, January 2011.

[32] C. Kaplan, "Ilısu Barajı Dolusavak Havalandırıcısının Performans Değerlendirmesi." Yüksek Lisans Tezi, Bitlis Eren Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bitlis, 2018.

[33] K. Dae ve P. Jae. "Analysis of flow structure over ogee-spillway in consideration of scale and roughness effects by using CFD model." *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 9, pp. 161–169, March 2005.

[34] S. Khani, M. A. Moghadam, ve M. Nikookar, "Pressure Fluctuations Investigation on the Curve of Flip Buckets Using Analytical and Numerical Methods." *Comput Res Progr Appl Sci Eng,* vol. 3, pp. 165-171, March 2017.

[35] S. Eklund, "CFD modelling of ski-jump spillway in Stornnforsen." Master's Thesis, Royal Institue of Technology, Sweden, 2017.

[36] M. H. Chaudhry, *Open-Channel Flow*. New York: Springer, pp. 228-235, 2008.

[37] A. Lauria ve G. Alfonsi, "Numerical İnvestigation Of Ski Jump Hydraulics." *J. Hydraulic. Eng.,* vol. 146, pp. 1-8, April 2020.

[38] M. Öztürk ve C. Aydın, "Dolusavak Havalandırıcılarında Jet Uzunluğunun CFD Analiziyle Belirlenmesi." *Fırat Üniversitesi. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 20, pp. 157-164, Ekim 2008.

[39] B. M. Savage ve M. C. Johnson, "Flow over Ogee Spillway: Physical and Numerical Model Case Study." *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 127, pp: 640-649, August 2001.

[40] A. P. Singh, F. Bhat ve E.Gupta, 3D Spillway Simulations of Ratle HEP (J&K) for the Assessment of Design Alternatives to be Tested in Model Studies. https://www.flow3d.com/wp-content/uploads/ August 2014.

[41] R. Tian, J. Wu, Z. Xu ve F.Ma, "Jet Trajectory Of Flow-Separating Slot-Type Flip Bucket." *Water Supply*, vol. 20, pp. 65-72, February 2020.

[42] E. Usta, “Numerical Investigation of Hydraulic Characteristics of Lalaei Dam Spillway and Comparison with Physical Model Study.” PhD thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2014.

[43] D. Valero ve G. B. Rafael, “Calibration of an Air Entrainment Model for CFD Spillway Applications.” *Adv. Hydroinform*, vol. 38, pp. 571–582, September 2016.

[44] V. Heller, W. H. Hager ve H-E. Minor, “Hydraulics of ski jumps.” Proc. 32nd IAHR Congress, pp. 1–10, January 2007.

[45] Ş. Varol, “Düşüm Havuzlarına Yerleştirilen Farklı Tip Enerji Kırıcı Blokların Enerji Sönümleme Oranlarının Sayısal Analizi.” Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2007.

[46] C. Yavuz, “İmpact Assessment Of Water Jets From Flip Buckets.” PhD thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2014.

[47] C. Yavuz, “Energy Dıssıpatıon Scale For Dam Prototypes.” *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 16, pp. 105-116, Şubat 2022.

[48] M. Zhenwei, Z. Zhiyan ve Z. Tao, “Numerical Simulation Of 3-D Flow Field Of Spillway Based On VOF Method.” *SciVerse ScienceDirect, Procedia Engineering*, vol 28, pp. 808-812, January 2012.

[49] DSİ, “Ilısu Barajı ve HES İnşaatı Rehber Projeleri.” Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara, 2010.

[50] R. Alçay, A. Koç ve H. Yüceel, “Ilısu Barajı ve HES Projesi Dolusavak ve Beton Ağırlık Baraj İnşaatı Uygulama Raporu.” Dsi Ilısu Projesi 16. Bölge Müdürlüğü, Mardin, pp. 1-227, 2017.

[51] S. Okyay, “Ilısu Barajı Dolusavak Model Raporu, DSİ Genel Müdürlüğü, Araştırma ve Geliştirme Daire Başkanlığı.” Yayın no: Hİ-715, Model no: M-192, Ankara, pp. 110, 1982.

[52] Flow3D, “Flow3D User Manual, v11.2.” Flow Science Inc, 2014.

[53] S. Kocaman, “Baraj Yıkılması Probleminin Deneysel ve Teorik Olarak İncelenmesi.” Doktora tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2007.

[54] E. Demiröz, “Ilısu Barajı Dolusavak Boşaltım Kanalı Havalandırması Model Çalışma Raporu.” DSİ Genel Müdürlüğü, Araştırma ve Geliştirme Daire Başkanlığı, Yayın no: Hİ-719, Model no: M-194, Ankara, pp. 1- 39, 1982.

[55] V. T. Chow, *Open Channel Hydraulic*. New York: McGraw-Hill, pp. 1-728, 1959.

[56] Y. Yüksel, *Akışkanlar Mekaniği ve Hidrolik*. Kırklareli: Beta Basım, pp. 1-1003, 2000.

[57] E. Ikinciogullari, M. E. Emiroglu ve M. C. Aydin, "Comparison of Scour Properties of Classical and Trapezoidal Labyrinth Weirs." *Arab J Sci Eng.* Vol 47, pp. 4023–4040, May 2022.

[58] V. Yakhot, S. A. Orszag, S. Thangam, T. B. Gatski ve C. G. Speziale, "Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique." *Physics of Fluids A Fluid Dynamics*, vol. 4, pp. 1-12, July 1992.

[59] ANSYS-Fluent 12.0, "*Fluent Theory Guide."* Ansys Inc. 2009.

[60] S. Akman, "Konvansiyonel İçmesuyu Arıtma Tesisleri İçin Tasarım ve Norm Rehberi." 1.Uluslararası İçmesuyu ve Atıksu Sempozyumu, Afyonkarahisar, pp. 1-12, Aralık 2018.

# ÖZGEÇMİŞ

## Kişisel Bilgiler

| | |
|---|---|
| Soyad, Ad | Selman Oğraş |
| Web sayfası (Research Gate, Academia, vs.) | |

## Eğitim Bilgileri

| Derece | Kurum | Mezuniyet Yılı |
|---|---|---|
| Doktora | Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği ABD | 2023 |
| Yüksek Lisans | Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Hidrolik ve Su Kaynakları Müh. ABD | 2018 |
| Lisans | Fırat Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü | 2010 |
| Lise | Yunus Emre Lisesi | 2004 |

## İş Deneyimi

| Dönem (Yıl) | Şirket, Kurum | Görev |
|---|---|---|
| 2010-2011 | Yapı Denetim Şirketi | Yrd Kontrol Müh. |
| 2011-2012 | Demir İnşaat | Saha Mühendisi |
| 2012-2013 | Yapı Denetim Şirketi | Yrd Kontrol Müh. |
| 2013-devam… | DSİ | İnşaat Mühendisi |

## Yabancı Dil

İngilizce

## Yayınlar

1. S. Oğraş ve F. Önen, " Dicle Nehri'nin taşkın analizinin HEC-RAS programı ile Yapılması", DÜMF Mühendislik Dergisi 10:3 (2019).
2. S. Oğraş ve F. Önen, " Flood Analysis with HEC-RAS: A Case Study of Tigris River", Hindawi, Advances in Civil Engineering, Volume 2020, Article ID 6131982, 13 pages.
3. S. Oğraş ve F. Önen , "Barajların deşarj yapılarındaki akış karakteristikleri ve enerji kırıcı yapıların etkinliğinin sayısal analizi", Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, c. 13, sayı. 4, ss. 741-762, Ara. 2022.
4.

**DİCLE ÜNİVERSİTESİ**
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**
**TEZ BENZERLİK BİLDİRİMİ FORMU**

| | | | |
|---|---|---|---|
| Öğrencinin Adı, Soyadı | Selman Oğraş | | |
| Öğrenci No | 18806503 | | |
| Ana Bilim Dalı | İnşaat Mühendisliği | | |
| Program Türü | Proje ☐ | Yüksek Lisans ☐ | Doktora ☒ |
| Tez Danışmanı (Ünvanı, Adı, Soyadı) | Prof. Dr. Fevzi ÖNEN | | |
| (Varsa) II. Tez Danışmanı (Ünvanı, Adı, Soyadı) | | | |
| Tez Başlığı | Baraj Dolusavak Yapılarında Akış Karakteristiklerinin Fiziksel ve Sayısal Analizi | | |
| **RAPOR BİLGİLERİ** | | | |
| Raporlama Aşaması | Tez Savunma Sınavı sonrası | | |
| Sayfa Sayısı | 216 | | |
| Raporlama Tarihi | 23.01.2023 | | |
| Benzerlik Oranı (%) | 24 | | |

Yukarıda bilgileri verilen tez çalışmamın toplam 216 sayfalık kısmına ilişkin, 23.01.2023 tarihinde tez danışmanım tarafından TURNİTİN isimli intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan intihal raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 24 olarak tespit edilmiştir.

Uygulanan filtrelemeler:

☐Başlangıç Bölümleri (Kabul ve Onay sayfası, Teşekkür sayfası, Özet/Abstract) hariç

☐Kaynaklar hariç

☐Alıntılar hariç/dâhil

☒Diğer (Her şey dahil)

Tezimin benzerlik oranı, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İntihal Raporu Uygulama Esaslarında belirtilen üst sınır benzerlik oranını aşmamaktadır. Benzerlik oranım üst sınır benzerlik oranının altında olsa dahi aksinin tespit edilmesi durumunda her türlü yasal sorumluğu kabul ettiğimi ve hukuki sonuçlarına razı olduğumu bildirir,
gereğini arz ederim.

**Öğrencinin** Adı, Soyadı: Selman OĞRAŞ
Tarih:31.01.2023
İmza:

| | |
|---|---|
| **Danışman** Adı, Soyadı: Prof. Dr. Fevzi Önen<br>Tarih:31.01.2023 | İmza: |
| **Ana Bilim Dalı Başkanı** Adı, Soyadı: Prof. Dr. Z. Fuat Toprak<br>Tarih:31.01.2023 | İmza: |