

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

**SERBEST YÜZEYLİ AKIMLARDA FARKLI TİP BLOKLARIN ENERJİ
SÖNÜMLEME VE HAVALANDIRMA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Mahmut AYDOĞDU

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ömerul Faruk DURSUN

MAYIS 2021

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

**SERBEST YÜZEYLİ AKIMLARDA FARKLI TİP BLOKLARIN ENERJİ
SÖNÜMLEME VE HAVALANDIRMA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

**Mahmut AYDOĞDU
23614210603**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ömerul Faruk DURSUN

Eş Danışman: Prof. Dr. Mehmet Cihan AYDIN

MAYIS 2021

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgemedi beni her konuda yönlendiren danışman hocalarım Sayın Doç. Dr. Ömerul Faruk Dursun ve Prof. Dr. Mehmet Cihan AYDIN'a,

Tez yazımım boyunca beni motive eden, bana destek olan arkadaşlarım Arş. Gör. Enes Gül, Dr. Öğr. Üyesi Müslüm Murat Maraş, Dr. Öğr. Üyesi Erkan Bahçe'ye,

Laboratuvar çalışmalarında bana destek veren değerli abim İlhami Baysal'a,

Deneylerim sırasında yardımlarını esirgemeyen kıymetli öğrencilerim Kaan Çetin, Utku Oben Kökçe, Gökhan Öztürk ve Alper Yeşil'e,

FBG-2018-1394 kodlu BAP Projesi kapsamında tezime destek olan İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne,

Bugünlere gelmem de büyük emekleri olan, hayatımın her anında bana destek olan, haklarını hiçbir zaman ödeyemeyeceğim kıymetli aileme,

Doktora eğitimim boyunca bütün sıkıntıları, yoğunluğumu ve stresimi anlayışla karşılayan ve sürekli yanımda olan sevgili eşime ve varlığı ile hayatıma anlam ve neşe katan çocuklarıma,

Şükranlarımı sunuyor, teşekkür ediyorum.

ONUR SÖZÜ

Doktora tezi olarak sunduğum “Serbest Yüzeyli Akımlarda Farklı Tip Blokların Enerji Sönümleme ve Havalandırma Etkisinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Mahmut AYDOĞDU



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	i
ONUR SÖZÜ	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
SEMBOLLER VE KISALTMALAR.....	viii
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	5
2.1 Enerji Kırıcı Şütler.....	5
2.2 Enerji Kırıcı Şütlerin Oksijen Transferine Etkisi	12
2.3 Enerji Kırıcı Yapı Tasarımında HAD (CFD) Kullanımı	19
3. MATERYAL VE YÖNTEM	28
3.1 Enerji Kırıcı Şütlere Ait Tasarım Kriterleri	28
3.1.1 Eşik kontrolü ile giriş.....	35
3.1.2 Kontrol dişi ile giriş	35
3.1.3 Kontrolsüz giriş.....	35
3.2 Enerji Kırıcı Şütlerde Hidrolik Sıçrama ve Enerji Sönümleme.....	37
3.3 Enerji Kırıcı Şütler İçin Oksijen Transfer Verimi	40
3.4 Boyut Analizi ve Ölçek Etkisi	44
3.5 Deney Düzeneği ve Hidrolik Şartların Oluşturulması.....	45
3.6 Sayısal Model	54
3.6.1 Akışkan hacmi yöntemi (Volume of fluid-VOF)	55
3.6.2 Türbülans modeli	57
3.6.3 Sayısal modelin çözüm ağı (mesh) yapısı.....	59
3.6.4 Çözüm bölgesi, sınır ve başlangıç koşulları	60
3.6.5 Model doğrulama için istatistiksel yöntemler.....	62
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	64
4.1 Enerji Sönümlemenin DeneySEL Olarak İncelenmesi	64
4.2 Oksijen Transfer Veriminin DeneySEL Olarak İncelenmesi	73
4.3 Blokların Enerji Sönümleme Performanslarının HAD Yöntemiyle İncelenmesi.....	81
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	114
KAYNAKLAR.....	117
ÖZGEÇMİŞ	123

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 : Kherbach ve diğ. (2017) ağ boyutunun maksimum hıza etkisi.	25
Çizelge 3.1 : Deney parametrelerinin özeti.....	50
Çizelge 3.2 : Sayısal çözüme ait mesh sayıları.	60
Çizelge 4.1 : Üç farklı açı değeri için maksimum dinamik basınç ve minimum statik basınç değerleri.	104



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 : Uygulamada kullanılan farklı EKŞ örnekleri (FEMA, 2010).	6
Şekil 2.2 : Seçilen en uygun enerji kırıcı bloklar. Akımı çarptırarak enerjisini kıran (a), Suyu ayırarak enerjisini kıran (b) (Kaya, 2003'ten değiştirilmiştir).	8
Şekil 2.3 : Deney düzeneği (Çakmak, 2005'ten değiştirilmiştir).	9
Şekil 2.4 : Enerji kırıcı blokların boyutları ve kanal içerisinde dizilim şekli (Wang ve diğ, 2017'den değiştirilmiştir).	12
Şekil 2.5: Gameson tarafından yapılan saha çalışması (Gameson, 1957).	13
Şekil 2.6 : Deney setinin şematığı (Khdhiri ve diğ, 2014'ten değiştirilmiştir).	17
Şekil 2.7 : Deneyde kullanılan basamak tipleri ve ölçüleri (Zhang ve Chanson, 2018).	18
Şekil 2.8: Analizde kullanılan ilk hesaplama alanı-durum 4 (Tabbara ve diğ, 2005'ten değiştirilmiştir).	21
Şekil 2.9 : Gerçek EKH ve blok boyutları (Varol, 2007).	22
Şekil 3.1 : Şüt kanalı uygulamalarında akımın hareketi (Baffled spillway, Maple River Dam Overflow Chute. Erişim: 27 Mayıs 2021).	29
Şekil 3.2 : Akımın yaklaşım kanalında kabul edilebilir derinlik ve hız değerleri (USB, 1987'den değiştirilmiştir).	30
Şekil 3.3 : Çok yüksek hızları düşük seviyeye getirmek için tasarlanan çöküntü havuzu şekli (UDFCD, 2008'den değiştirilmiştir).	31
Şekil 3.4 : USB tarafından oluşturulan EKŞ şematik gösterimi (USB, 1977'den değiştirilmiştir).	34
Şekil 3.5 : Akımın kanala giriş tipleri (a) eşik kontrolü ile giriş (b) kontrol dişi ile giriş (c) kontrolsüz giriş (Peterka, 1984'ten değiştirilmiştir).	36
Şekil 3.6 : Klasik dolusavak hidrolik sıçrama şeması (Enerji Kırıcı Yapılar, Erişim: 27 Mayıs 2021'den değiştirilmiştir).	38
Şekil 3.7 : Froude sayısına bağlı olarak özgül enerjinin değişimi (Peterka, 1978'den değiştirilmiştir).	40
Şekil 3.8 : Çift Film Teorisi (Hava-su gaz transferi) (Küçükali, 2006'dan değiştirilmiştir). ..	42
Şekil 3.9 : Şüt kanalı 5 mm kalınlığında Plexiglass taban kaplama.	46
Şekil 3.10 : Hazne tasarım modeli ve yapımı tamamlanmış hali.	47
Şekil 3.11 : a) Hazne-Sehpa Sistemi b) Deney setinin sistemin genel görünümü.	48
Şekil 3.12 : a) Deney düzeneğinin görüntüsü b) Deney setinin şematik gösterimi.	49
Şekil 3.13 : Deneylerde kullanılan blok boyutları.	51
Şekil 3.14 : a) Blokların plan görüntüsü b) Üretilen bloklar c) Kanal içi görüntüsü.	52
Şekil 3.15 : a) Akım hızı ölçer b) YSI Model DO 200 oksijenmetre c) Dijital limnometre. ...	52
Şekil 3.16 : a) Sayısal model görüntüsü b) Fiziksel model görüntüsü.	54

Şekil 3.17 : a) Mesh yapısı içinde tanımlanmak istenen akışların görünümü b) İki akışkanın VOF yöntemiyle tanımlanması (Waclawczyk ve Koronowicz, 2008'den değiştirilmiştir).....	56
Şekil 3.18 : Çözüm bölgesinin geometrisi ve sınır şartları.	61
Şekil 3.19 : a) Sayısal çözümde kalıntı terimlerinin zaman içinde değişimi b) İteratif yakınsama.	62
Şekil 4.1 : $\alpha = 10^\circ - 20^\circ$ için $\Delta E/E_1$ ve Fr değişimi.	64
Şekil 4.2 : $\alpha = 20^\circ$ açısı ve Fr= 0.64 için kanal içindeki akım durumları.....	65
Şekil 4.3 : $\alpha = 30^\circ - 40^\circ$ için $\Delta E/E_1$ ve Fr değişimi.	66
Şekil 4.4 : $\alpha = 40^\circ$ açısı ve Fr= 0.64 için kanal içindeki akım durumları.....	67
Şekil 4.5 : $\alpha = 50^\circ - 56^\circ$ için $\Delta E/E_1$ ve Fr değişimi.	68
Şekil 4.6 : $\alpha = 56^\circ$ açısı ve Fr= 0.64 için kanal içindeki akım durumları.....	69
Şekil 4.7 : Fr= 0.64-0.83 için $\Delta E/E_1$ ve α değişimi.	70
Şekil 4.8 : Fr= 0.89-0.90 için $\Delta E/E_1$ ve α değişimi.	71
Şekil 4.9 : Fr= 0.93-0.98 için $\Delta E/E_1$ ve α değişimi.	72
Şekil 4.10 : Mevcut çalışma ile literatür çalışmalarının karşılaştırılması a) Fr=0.64-0.83 için b) Fr=0.98 için.	73
Şekil 4.11 : Fr sayısına bağlı olarak OTV (E_{20}) değişimi.	75
Şekil 4.12 : Tip-1, Tip-3 ve Tip-6 bloklarının kullanıldığı deneylerden görüntüler ve akım çizgileri durumu.	76
Şekil 4.13 : Birim debiye göre α ve E_{20} değişimi.	78
Şekil 4.14 : Tip-2, Tip-4 ve Tip-5 bloklarının kullanıldığı deneylerden görüntüler ve akım çizgileri durumu.	79
Şekil 4.15 : Mevcut çalışma ile literatür çalışmalarının karşılaştırılması a): 20° , b): 30° , c): 40° , d): 50°	80
Şekil 4.16 : $\alpha = 10^\circ - 20^\circ$ için simüle edilen ve ölçülen rölatif enerji sönmleme karşılaştırılması.	82
Şekil 4.17 : $\alpha = 20^\circ$ ve Fr=0.98 için sayısal hacim oranı (<i>volume fraction</i>) görüntüleri.	83
Şekil 4.18 : $\alpha = 20^\circ$ şüt açısı için bloklara ve kanal tabanına etkiyen statik basınç değerleri. ..	84
Şekil 4.19 : $\alpha = 20^\circ$ şüt açısı için hız vektörlerinin büyüklükleri.	86
Şekil 4.20 : $\alpha = 30^\circ - 40^\circ$ için simüle edilen ve ölçülen rölatif enerji sönmleme karşılaştırılması.	88
Şekil 4.21 : $\alpha = 40^\circ$ ve Fr=0.98 için sayısal hacim oranı (<i>volume fraction</i>) görüntüleri.	89
Şekil 4.22: $\alpha = 40^\circ$ ve Fr=0.98 için bloklara ve kanal tabanına etkiyen statik basınç değerleri.	90
Şekil 4.23 : $\alpha = 40^\circ$ ve Fr=0.98 için hız vektörlerinin büyüklükleri.....	92
Şekil 4.24 : $\alpha = 50^\circ - 56^\circ$ için simüle edilen ve ölçülen rölatif enerji sönmleme karşılaştırılması.	94

Şekil 4.25: $\alpha=56^\circ$ ve $Fr=0.98$ için sayısal hacim oranı (<i>volume fraction</i>) görüntüleri.	95
Şekil 4.26 : $\alpha=56^\circ$ ve $Fr=0.98$ için bloklara ve kanal tabanına etkiyen statik basınç değerleri.	96
Şekil 4.27 : $\alpha=56^\circ$ ve $Fr=0.98$ için hız vektörlerinin büyüklükleri.....	99
Şekil 4.28 : Tüm blok tiplerinin sayısal ve deneysel sonuçları için rölatif enerji sönümlenmenin karşılaştırılması.	101
Şekil 4.29 : Bütün açılar için sağlama oranı ve d_o/H ilişkisi.....	101
Şekil 4.30 : $\alpha=10^\circ$ şüt açısı $x=0.2$ m’de $Fr=0.98$ için dinamik basınç değerlerinin kıyaslanması.	105
Şekil 4.31 : $\alpha=30^\circ$ şüt açısı $x=0.2$ m’de $Fr=0.98$ için dinamik basınç değerlerinin kıyaslanması.	108
Şekil 4.32 : $\alpha=50^\circ$ şüt açısı $x=0.2$ m’de $Fr=0.98$ için dinamik basınç değerlerinin kıyaslanması.	111

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

b_w	: Kanal çıkışındaki genişlik
μ	: Dinamik viskozite
H	: Blok yüksekliği
h_1	: Enerji kırıcı yapıdan önceki akım yüksekliği
T	: Sıcaklık
E	: Rölatif enerji miktarı
α	: Şüt Açısı
E_{20}	: 20 °C’ deki oksijen transfer verimi
Fr	: Froude sayısı
S_o	: Kanal eğimi
E_1	: Bloklardan önceki enerji yüksekliği
h_1	: Kanal eğimi öncesindeki su derinliği
V	: Kanala girişteki su hızı
E_2	: Çıkıştaki enerji yüksekliği
E_L	: Giriş ve çıkış enerjileri arasındaki fark
g	: Yerçekimi ivmesi
n	: Manning katsayısı
R	: Hidrolik yarıçap
K_{ent}	: Menfez giriş katsayısı
K_{ex}	: Menfez çıkış katsayısı
q	: Birim debi
R_H	: Hidrolik yarıçap
ρ	: Suyun yoğunluğu
h_c	: Kritik su derinliği
W	: Kaskad genişliği
Re	: Reynolds sayısı
H	: Toplam kaskad yüksekliği
Fr_1	: Memba kısmındaki Froude sayısı
Q	: Debi
l	: Basamak genişliği
V_{max}	: Maksimum hız
D_c, d_c	: Kritik derinlik
V_c	: Kritik hız

V_1	: Akımın kanala yaklaşım hızı
V_2	: Mansaptaki su hızı
S	: Şüt kanalı eğimi
h_g	: Eşik yüksekliği
h_1	: Şüt kanalı öncesindeki su derinliği
h_2	: Mansaptaki su derinliği
R_1	: Kanal girişindeki Reynolds sayısı
b	: Kanal genişliği
ν	: Kinematik viskozite
H_d	: Şüt kanalının mansap kotuna göre açığa bağlı yükseklik değeri
E_d	: Mansap topuğundan EKŞ tepesine kadar olan yükseklik
D_{gaz}	: Gazın moleküler difüzyon katsayısı
A	: Difüzyonun gerçekleştiği alan
K	: Kütle transfer katsayısı
K_L	: Sıvı ortamdaki kütle transfer katsayısı
K_g	: Gaz ortamdaki kütle transfer katsayısı
D_g	: 20 °C’de hava ortamındaki difüzyon katsayısı
D_L	: 20 °C’de sıvı ortamındaki difüzyon katsayısı
C_a	: Gazın havadaki derişimi
H	: Henry katsayısı
C_w	: Su içinde çözünmüş gazın derişimi
C_s	: Gazın sıvı içindeki doygunluk yüzdesi
V	: Transferin gerçekleştiği hacim değeri
r	: Oksijen eksiklik katsayısı
t_c	: Hava kabarcıklarının suda kalış süresi
E	: Havalandırma verimlilik katsayısı
C_u	: Membada çözünmüş oksijen konsantrasyonu
C_d	: Mansapta çözünmüş oksijen konsantrasyonu
P	: Atmosfer basıncı
P_w	: Buhar basıncı
r_{15}	: 15 °C sıcaklığındaki referans oksijen eksiklik katsayısı
r_T	: Çalışılan ortamdaki T °C sıcaklığındaki oksijen eksiklik katsayısı
T_w	: Deneyin gerçekleştirildiği ortamdaki su sıcaklığı
h_0	: Üst haznenin mansap kotuna göre yüksekliği
u	: Sıvı hız vektörü

F_x, F_y, F_z	: Sıvıya etki eden yüzey kuvvetleri
μ_{eff}	: Etkin viskozite
μ_t	: Türbülans viskozitesi
C_μ	: Türbülans modeli sabiti
η	: Türbülans kinetik enerjisinin üretimi ve kayıp oranının bir fonksiyonu
S	: Şekil değiştirme tensörü
R^2	: Belirginlik katsayısı
y_j	: Ölçülen değer
$\hat{y}_j$	: Tahmin edilen değer
m	: Ortalama değer
s	: Basamaklı dolusavak için basamak yüksekliği
ΔE	: Kanal giriş ve çıkışı arasındaki enerji sönümleme farkı
CFD	: Computational Fluid Dynamic
ÇO	: Çözülmüş oksijen
DAS	: Donor-Acceptor Scheme
DSJ	: Deflected Surface Jet
EKH	: Enerji Kırıcı Havuz
EKB	: Enerji Kırıcı Blok
EKŞ	: Enerji Kırıcı Şüt
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HDPE	: High Density Polyethylene
KOKH	: Kök Ortalama Kare Hatası
LES	: Large Eddy Simulation
NS	: Navier-Stokes
PE	: Performans Endeksi
PLC	: Programmable Logic Controller
RANS	: Reynolds-Averaged Navier-Stokes
RFJ	: Reattaching Wall Jet
RNG	: Renormalization Group
OMH	: Ortalama Mutlak Hata
OTV	: Oksijen Transfer Verimi
UDFCD	: Urban Drainage and Flood Control District
VOF	: Volume of Fluid

ÖZET

Doktora Tezi

SERBEST YÜZEYLİ AKIMLARDA FARKLI TİP BLOKLARIN ENERJİ SÖNÜMLEME VE HAVALANDIRMA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

MAHMUT AYDOĞDU

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

123+ XII sayfa

2021

Danışman: Doç. Dr. Ömerul Faruk DURSUN
Eş Danışman: Prof. Dr. Mehmet Cihan AYDIN

Açık kanalların güzergâh seçiminde en kısa yolun tercih edilmesi ekonomik çözüm sağlar. Kot farkının fazla olduğu bir açık kanal güzergâhında akımın aşırı derecede hız kazanması istenmez. Akımın artan hızını ve dolayısıyla kinetik enerjisini sönmölemek için ise, kanal tabanına belirli mesafelerde taban düşöleri veya enerji sönmöleyici bloklar yerleştirilir. Enerji kırıcı bloklar akımın enerjisini azaltır aynı zamanda akımı havalandırarak su içerisindeki zararlı gazların atmosfere, atmosferdeki oksijenin de su içerisine geçmesine imkân sağlar. Enerji kırıcı bloklar, nehir ıslah çalışmalarında, atık su sistemlerinde, yağmur suyu toplama kanallarında, tarımsal sulama sistemlerinde, eğimli şütlerde yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

Bu tez kapsamında, 6 farklı geometriye sahip yeni blok tiplerinin enerji sönmöleme ve oksijenlendirme etkileri incelenmiştir. 6 farklı şüt açısı ve 6 farklı birim debi değerine göre testler yapılmış ve sonuçlar kıyaslanmıştır. Enerji kırıcı blokların Oksijen Transfer Verimine (OTV) etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Ayrıca Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi kullanılarak blokların enerji sönmöle ve diğer akım özellikleri üç boyutlu sayısal modeller yardımıyla incelenmiştir. Yapılan analiz sonuçlarının deneysel verilerle uyumu, grafik ve sayısal simölasyonlarla tartışılmıştır. Blokların enerji sönmöleme miktarları ve OTV değerleri farklı şüt açıları ve birim debi değerleri için farklılıklar göstermiştir. Yüksek şüt açılarında Tip-1 ve Tip-6 blokları en iyi performansı göstermiştir. Bu tez ile önerilen blok tiplerinin genel anlamda iyi seviyede enerji sönmöleme ve oksijenlendirme performansına sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Enerji kırıcı blok, Enerji kırıcı şüt kanal, Oksijen transfer verimi, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği

ABSTRACT

PhD. Thesis

INVESTIGATION OF THE ENERGY DISSIPATION AND AERATION EFFECT OF DIFFERENT TYPES OF BAFFLE BLOCKS IN FREE SURFACE FLOWS

MAHMUT AYDOĞDU

Inonu University
Graduate School of Nature and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

123+XII page

2021

Supervisor: Doç. Dr. Ömerul Faruk DURSUN
Co Supervisor: Prof. Dr. Mehmet Cihan AYDIN

Selecting the shortest route of open channels provides an economical solution in water transport systems. In an open channel route where the elevation difference is high, extremely flow velocities are not desired. Drop structures or energy-dissipating blocks are placed at certain distances to the base of the channel to dissipate the velocity and thus the kinetic energy of the flow. Energy dissipater blocks reduce the energy of the flow and at the same time aerate the flow, allowing harmful gases in the water to pass into the atmosphere and oxygen in the atmosphere into the water. Energy dissipater blocks are widely used in river improvement works, waste water systems, rainwater collection channels, agricultural irrigation systems, inclined chutes.

In this thesis, the energy dissipation and oxygenation effects of new block types have six different geometries were experimentally and numerically investigated. Tests were carried out according to six different chute angles and six different discharge per unit channel width, and the results were compared and discussed. The effect of energy dissipater blocks on Oxygen Transfer Efficiency (OTE) was investigated experimentally. In addition, using the Computational Fluid Dynamics (CFD) method, the energy dissipating and other flow properties of the blocks were numerically-analyzed in 3D numerical domain. The compatibility of the results of the analysis with the experimental data was discussed with graphics and numerical simulations. The energy dissipation and OTE values of the blocks differed for different chute angles and unit flow discharges. Type-1 and Type-6 blocks showed the best performance at high chute angles. It was observed that the block types proposed in this thesis generally have good energy dissipation and oxygenation performance.

Keywords: Baffle block, Energy dissipating baffled chute, Oxygen transfer efficiency, Computational fluid dynamic

1. GİRİŞ

Geçmişten günümüze su yapıları içme, kullanma ve korunma amaçlı tesisler olarak inşa edilmektedir. Yüzeysel su kaynakları üzerine yapılan hidrolik tesisler doğal su dengesini bozmakta ve doğal denge kendini tekrar dengeye sokmak isterken bu tür tesislere zarar vermektedir. Bu yapılar genelde suyun önünde bir set vazifesi gördüğünden, mevcut enerjisini de arttırmaktadır. Biriken yüksek potansiyel enerji, büyük eğime sahip ya da ani düşümlü hidrolik sistemlerde yüksek hızların ve dolayısıyla yüksek kinetik enerjinin oluştuğu akımlara neden olmaktadır. Bu yüksek enerjili akımların kontrollü bir şekilde deşarj edilmesini sağlamak için de dolusavaklar, dipsavaklar, bağlama kapakları gibi farklı su yapıları inşa edilmektedir. Ancak su, bu yapılardan geçerken ve geçtikten sonra mansap tarafında sahip olduğu enerji ile oyulma, aşınma, kavitasyon ve hatta yapının tamamen yıkılmasına sebep olabilir. Deşarj sırasında böyle bir neticeyle karşılaşmamak için de, enerji kırıcı yapılar (EKY) tesis edilmektedir. EKY'ler, bir su yapısından yüksek hızla geçen akımın enerjisini kırarak su yapısına ve çevredeki yapılara zarar vermeden mansaba aktaran tesisler olarak tanımlanabilir. Etkili bir enerji kırıcı tesisin en önemli özelliği, yüksek hızlı akımı, su yapısına ve mansabındaki diğer tesislere zarar vermeden geçirebilmesidir.

Ayrıca açık kanallarda herhangi bir amaçla kullanım için iletilecek olan suyun, kaynağından başka bir bölgeye nakledilmesinde en kısa yolun tercih edilmesi ekonomik çözüm açısından çok önemlidir. Ancak suyun iletileceği bölge ile kaynak arasındaki kot farkı ve kanalın geçeceği arazinin topoğrafyası, iletimini daha da zor hale getirir. Kot farkının çok olması, kanal içerisinde akımın aşırı derecede hız kazanmasına sebep olur. Bu istenmeyen bir durumdur. Akımın hızlanması, suyun kinetik enerjisinin artmasına sebep olur. Artan kinetik enerji ise suyun ulaştığı bölgede erozyona sebep olur. Erozyon, birçok yerleşim alanına ve tarımsal alanlara zarar verebilir. Ayrıca yüksek hıza sahip akım kanal içerisinde istenmeyen oyulma ve aşınmalara da sebep olabilir. Akımın enerjisini sönmölemek için bazı su yapıları kullanılır. Öncelikle kanal tabanı belirli mesafelerde şüt kanalları aracılığıyla düşürülebilir. Şütlerin yeterli olmadığı durumlarda ise kanal tabanına enerji sönmöleyici bloklar kullanmak gerekebilir. Yapılan çalışmalarda enerji sönmöleme oranı EKY'ler ile %85'e kadar çıkabilmektedir (Yalçın, 1967). Maliyeti çok yüksek olan baraj yapılarının nasıl ki çok detaylı sorgulamalardan sonra projelendirilmesi gerekiyorsa, EKY'lerin de çeşitli kriterlere bağlı kalarak projelendirilmesi gerekir. Bir EKY'nin projelendirilmesinde topoğrafya, ana yapı, akım durumu ve ekonomik durum gibi faktörler

göz önünde bulundurulmalıdır. Bundan dolayı enerji kırıcı olarak planlanan bir yapının kesin projesine geçmeden önce bir model araştırması ile hidrolik açıdan davranışının incelenmesi gerekir.

Zamanla su yapılarının yapım şekli ve tasarım geometrileri değiştikçe, EKY'lerin de farklı türleri ortaya çıkmıştır. Enerji kırmada; suyun çarpma etkisinden, türbülans oluşturma, suda düzgün bir enerji dağıtımını meydana getirme veya su ile hava arasında sürtünmeyi sağlayan pek çok değişik tipte yapı tesis edilmektedir. Literatürde ve uygulamada, iki farklı tip enerji kırıcı yapı yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar, çarpma tipli enerji kırıcılar ile hidrolik sıçrama tipli enerji kırıcılarıdır (Aisenbrey, 1974). Özellikle günümüzde EKY'lerin düşüm kanalına yerleştirilen enerji kırıcı bloklar (EKB) çarpma tipli enerji sönümleyicilerin başında yer almaktadır. Bu bloklar, suyun çarpmasıyla akışı her yöne dağıtan birer engel vazifesi görür ve bu şekilde akımın enerjisini sönümlerler. EKB'lerin Peterka (1978) tarafından hazırlanan el kitapçığında, daha çok sulama amaçlı farklı kanal açılarında kullanıldığı görülmektedir. Şaşırtmalı enerji sönümleyici bu bloklar literatürde enerji kırıcı havuzlarda da kullanılırlar. Bir barajın dolusavağından, dipsavağından bırakılan, bağlamaların kapak altı akımlarında enerji sönümleme için tercih edilirler. Böylesi büyük su yapılarında, ortaya çıkan enerji de çok büyük olacağından, bu bloklar enerji kırıcı havuzlara (EKH) yerleştirilerek tedbir alınması gerekir. EKY'lerde temel amaç; akım içerisinde bir hidrolik sıçrama oluşturmaktır. Hidrolik sıçrama ile akım içerisinde yoğun çevrintiler oluşturularak akım çizgilerinin birbiri ile çarpışması ve akımın enerjisinin azaltılması mümkün olmaktadır. Kanal içerisine şaşırtmalı olarak yerleştirilen bu bloklar, nehir ıslahı çalışmalarında, atık su sistemlerinde, yağmur suyu toplama kanallarında, tarımsal sulama sistemlerinde, şütlerde enerji sönümlemek amacıyla kullanılmaktadırlar (Kaya ve Emiroğlu, 2010).

Açık kanallarda bu blokların enerji sönümleme etkisi dışında farklı amaçlarla kullanılması da literatürde güncelliğini korumaktadır. Şüt kanalı içerisine veya kaskadlara yerleştirilen şaşırtmalı bloklar, suyun enerjisini sönümlemenin yanında hidrolik sıçrama yoluyla su-hava yüzeyi arasında doğal yoldan oksijen geçişine de olanak sağlar. Akımın blok üstünden, blok aralarından ve blok etrafından geçişi sırasında bir taraftan türbülans gerilmeleri sayesinde kinetik enerji sönümlenirken, diğer taraftan da hava kabarcıkları suya geçer. Böylece kendi kendine suda oksijen konsantrasyonu artmış olur. Bu durum sudaki canlı yaşamı ve su kalitesi açısından oldukça kıymetlidir. Suyun kalitesini doğal yollardan korumaya ve arttırmaya yönelik literatürde birçok çalışma mevcuttur.

Literatürde ilk defa Gameson (1957) suyun doğal olarak havalandırma etkisini çalışmış ve birçok akarsudaki hidrolik yapılarda su içindeki çözünmüş oksijen konsantrasyonunun değişimini, çeşitli ölçümlerle araştırmıştır. Bu yapıları, serbest düşümlü savak, basamaklı savak, bent kapağı, eğimli kanal ve değirmen olarak gruplandırmıştır. Burada hidrolik yapıların, girişinde ve çıkışında çözünmüş oksijen konsantrasyonlarını ölçmüş ve bu yapıların suyun doğal olarak havalanmasını sağladığını saptayarak, akımın havalandırma verimliliğini hesaplayan ifadeler öne sürmüştür. Şaşırtmalı blokların veya herhangi bir su yapısının akımla sürekli temas halinde olmalarından dolayı, su iletiminde çok kısa mesafelerde bile oksijen konsantrasyonunu arttırdığını belirtmiştir. Dolusavakların mansap bölgesinde hidrolik sıçrama ile oksijen konsantrasyonu artarken, bu olay basamaklı dolusavaklarda ya da şaşırtmalı blokların olduğu kanallarda her bir basamak veya şaşırtmalı bloğa akım temas ettiğinde hava girişi gerçekleşir. Dolayısıyla basamak sayısı ve şaşırtmalı blok sayısı, geometrisi ve boyutları oksijen transferinde önemli birer parametre olarak karşımıza çıkmaktadır.

Her ne kadar bu tür yapılar baraj gibi çok büyük maliyetli tesisler olmasa da yapımları azımsanmayacak bir ekonomik varlığa bağlıdır. Dolayısıyla iyi bir planlama ve tasarımın yanında, tesisin verimliliğinin yapı inşaatına başlanmadan test edilmesi önem arz etmektedir. Fiziksel olarak gerçekleştirilen deneysel modellerin yanında, bunu sağlamanın diğer bir yolu ise günümüz bilgisayar yazılımlarından faydalanmaktır. İnşa edeceğimiz tesisin üç boyutlu sayısal modeller yardımıyla gerçek boyutlar ve sınır koşulları altında analize tabi tutulması tesis verimliliğini önceden test etme imkânı sağlayabilmektedir. Günümüzde, gerçek ve türbülanslı akışkanların temel bünye deklemlerini üç boyutlu olarak çeşitli sayısal tekniklerle çözerek simüle edebilen FLOW-3D ve ANSYS-Fluent gibi gelişmiş yazılım programları geliştirilmiştir. Bu tür yazılımlar sayesinde, çok fazlı akımlar bazı analitik ve yarı ampirik teknikler kullanarak incelenebilmektedir. Böylelikle büyük maliyetlere sahip tesislerin, yapım öncesi sayısal modellerle incelenmesi sağlanarak, optimum tasarımlar sağlanabilir.

Bu tez çalışmasında, eğimli şüt kanalları üzerine yerleştirilmiş farklı şekillerdeki şaşırtmalı EKB'lerin akımın enerjisini sönmüleme ve havalandırması üzerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan EKB'ler; hidrolik sıçrama olayını dengelemek, çarpma eylemiyle suyu dağıtmak ve türbülansı arttırarak enerji dağılımına yardımcı olmak için kanal tabanına yerleştirilmişlerdir. Kanal tabanına yerleştirilen bu bloklar literatürde daha önce kullanılmamış blok tipleridir. Geometri açısından tamamen

altı özgün blok tipi tasarlanmış olup bu tasarımlar ilk kez bu tezde kullanılmıştır. Öncelikle, altı farklı geometriye sahip blok tipinin, şüt kanalının farklı taban açılarında ve farklı debi değerlerindeki enerji kırma performansları araştırılmıştır. Daha sonra, farklı geometrideki blokların, farklı açılara sahip şüt kanal tabanı üzerinde ve farklı debilerdeki suyun oksijen transfer oranı üzerindeki etkisi ayrıca deneysel olarak incelenmiştir. Literatürde verilenlerden farklı şekillerde olan bu blokların suyun enerjisini kırmada etkili olabileceği kanal eğimleri araştırılmıştır.

Son olarak, bu tezde ANSYS-Fluent yazılımı yardımıyla fiziksel modeller sayısal modellere aktararak enerji kırıcılar üzerindeki akımın üç boyutlu hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) çalışmaları yürütülmüştür. Analiz sonuçları deneysel verilerle kıyaslanmış ve aradaki farklarla ilgili detaylı bir yorumlama yapılmıştır. Blok tiplerine ait sayısal simülasyon görüntüleri ve elde edilen değerler görsel olarak deney şartlarıyla da kıyaslanmıştır. İyi tasarlanmış bir model geometrisi, optimum mesh (ağ) sayısı, deney verileri ile aynı sınır şartların sisteme tanıtılması, elde edilen sayısal simülasyon sonuçlarının doğruluğunu da arttırmaktadır. Blokların oluşturduğu çok karmaşık akım ve türbülans etkileri uygun türbülans modeli seçilerek hızlı sonuç alınacağı da ayrıca görülmüştür. Böylece tasarlanmış olan bu farklı geometrideki blokların barajların EKH'lerinde, dolusavaklar ve dolusavakların mansap uç bölgesinde enerji sönmeme ve sudaki oksijen oranını doğal yoldan arttırma, sulama sistemleri ile yağmur suyu toplama kanallarındaki taşkın ve çevresel zararı önleme gibi birçok katkı sağlayacağı düşüncesi desteklenmiştir. Yine belirli bir akım problemine ait sorunların çözümünde HAD yöntemlerinin oldukça etkili olduğu görülmüştür.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1 Enerji Kırıcı Şütler

Önemli EKY'ler arasında yer alan, enerji kırıcı şütlerin (EKŞ) akımın enerjisini yeterince kıramaması durumunda kanal içerisinde oyulma, aşınma ve yapı yıkılması gibi büyük çaplı sorunları ortaya çıkarabilir. Bu tür sorunları engellemek ve enerjiyi azaltmak için basamak yapıları veya EKB'ler tesis edilir. Bu yapılar hidrolik sıçrama, türbülans, suyun yüksek bir kottan düşümü ve suyun basamaklı kanallarda akımı gibi parametreler göz önüne alınarak tesis edilir.

EKY'ler ile ilgili ilk çalışmayı USBR (United States Bureau of Reclamation) 1963 yılında üzerinde çalışmış, sonrasında ise Peterka 1978'de "Enerji Kırıcı Havuzların ve Enerji Dağıtıcıların Hidrolik Tasarımı" adlı kaynakta tasarım standartlarını yayınlamıştır. Bunun akabinde ise Aisenbrey ve diğ. (1978) "Küçük Kanal Yapıların Tasarımı" el kitabında birtakım standartlar yayınlamıştır. Her iki kaynakta da fiziksel model çalışması verileri kullanılarak ve mevcut birçok prototip yapının performansı gözlemlenerek geliştirilmiştir. EKŞ'ler akım enerjisini kendisine ya da bir başka yüzeye yönlendirerek kırmaya çalışan farklı tip, şekil ve eğimi ayarlanabilen yatay ve düşey panel ya da duvarlardan oluşurlar. EKB'ler kanalın uzunluğu boyunca akış hızını istenen seviyeye kadar düşürürler. EKŞ'ler hidrolik sıçramalı bir EKH istenmediği çıkış kanalı uygulamalarında, kot farkı değişiklikleri için güvenilir ve uygun maliyetli tasarımlar olarak kullanılabilirler. Ayrıca tarımsal alanlarda başarılı kullanımlarına ek olarak, EKŞ'lerin kentsel ve otoyol drenaj kanallarında kullanılabilir olduğu bildirilmiştir (Rhone, 1977; Thompson ve Kilgore, 2006).

EKB'ler farklı kanal açılarında ve dolusavaklarda da kullanılmaktadır. Şekil 2.1'de dolusavakta ve EKŞ'lerde kullanılan EKB örnekleri yer almaktadır. Yapı tasarımının seçimi EKŞ kanalına giren akım rejimine bağlı olarak önemli ölçüde farklılık gösterir. Akım rejimi aşağıdaki iki farklı durum için enerji sönümlemede değişkenlik göstermektedir.

- Kritikaltı akıma sahip yapılar genellikle enerjiyi dereceli (eğimli, meyilli) bir değişimle kırmak için kullanılır.

- Kritiküstü akıma sahip yapılar ise genellikle yüksek hızdaki akımın enerjisini çarpma yoluyla doğrudan kırmak amaçlı kullanılır, daha sonrasında ise kritikaltı hidrolik eğim kontrol yapısı kullanılır.

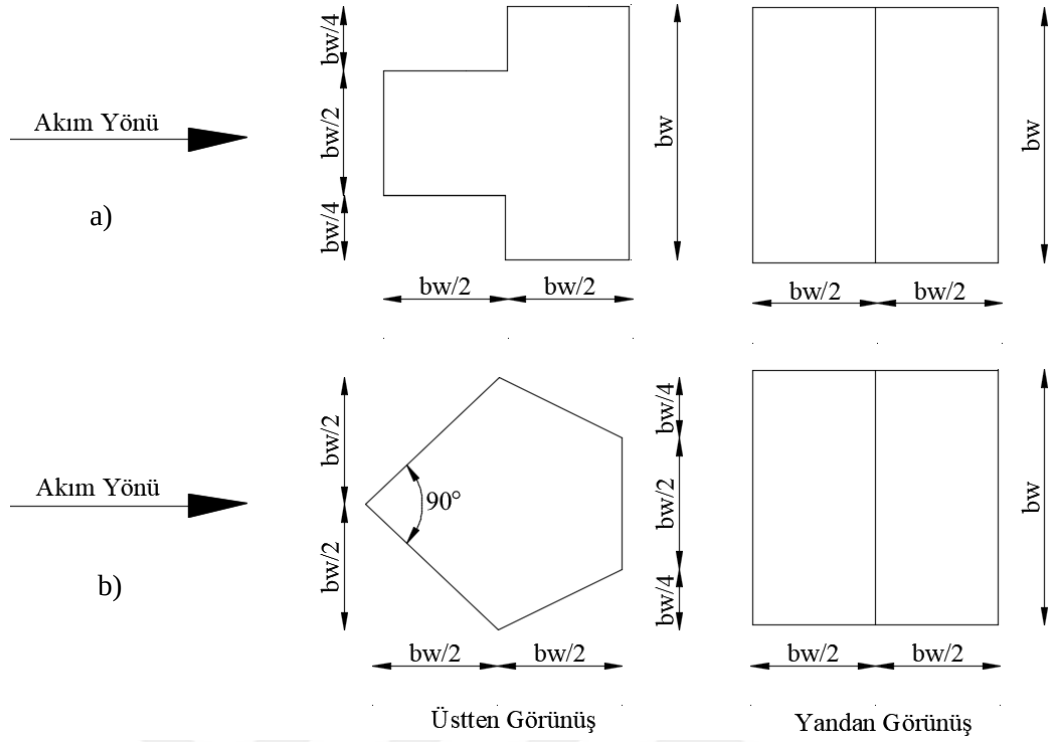


Şekil 2.1 : Uygulamada kullanılan farklı EKŞ örnekleri (FEMA, 2010).

USBR (1963)'e göre memba tarafından gelen akım aralıklı dizilmiş EKB'lerin birinci sırasına yönlendirilir. Birinci sıranın hemen mansabındaki ikinci sıraya geçen akım burada birinci sıra bloğun boşluk kısmına denk gelecek şekilde kaydırılmış blok sırası ile tekrar bölünür. Akım bu şekilde şütin mansabına varana kadar aynı şekilde şaşırtmalı dizilmiş blok sıralarıyla karşılaşır. Burada akım, şüt kanalının uzunluğu boyunca bloktan bloğa dağıtılarak mansap kısmına kadar devam eder. Bu dağıtma olayı enerjiyi kırdığı için mansapta kuyruk suyu yükselmesine bakılmaksızın suyun şütten çıkış hızı azalır.

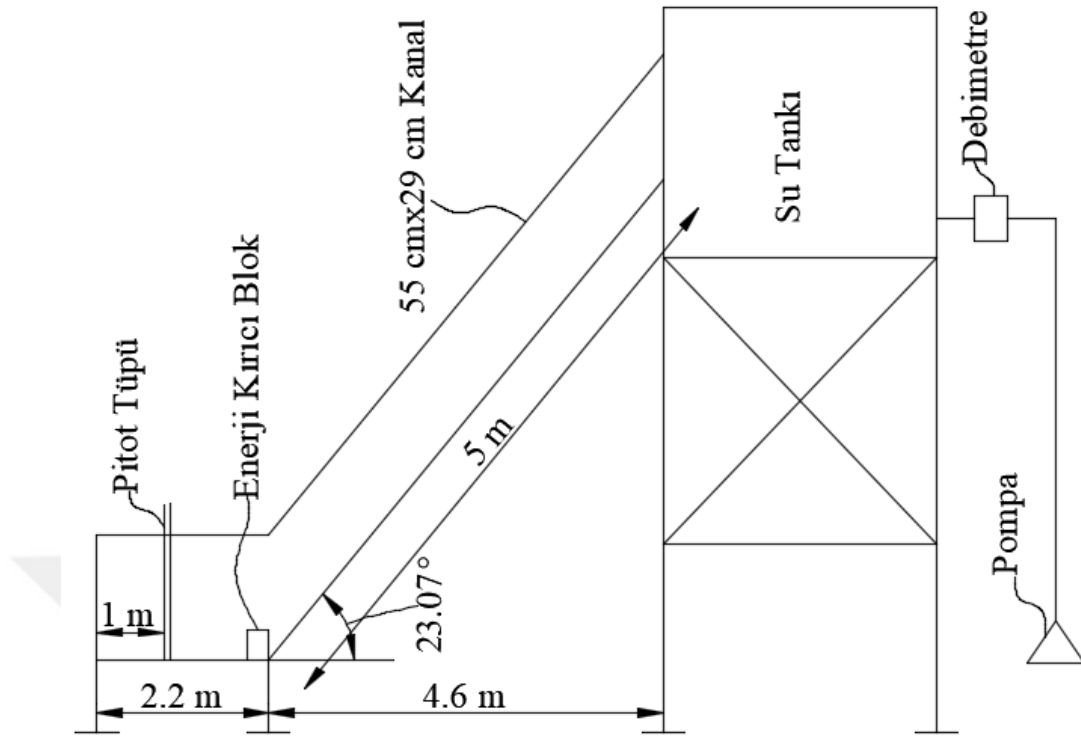
Dolayısıyla EKŞ'lerde belirli bir kuyruk suyu yükselmesine ihtiyaç olmadığından, kuyruk suyu yükselmesinin farklılık gösterdiği uygun bir potansiyel enerji kırıcı şeklinde çalışırlar.

Genel olarak, eğimli ya da düz bir yüzeye sahip EKŞ'ler ile ilgili çok sayıda çalışma literatüre kazandırılmıştır. Özdengiz (1973), su alınma yerine göre kötü düşük olan alanlara suyun, özellikle açık kanallarla en kısa yoldan iletimini güçleştiren en önemli hususun büyük akım hızından kaynaklı, yüksek kinetik enerjinin kanalda kuvvetli erozyona sebep olduğunu belirtmiştir. Bu koşullarda, yani çok eğimli kanallarda zararlı olabilecek büyük akım hızının kırılması için, uygulanması mümkün olan yöntemlerden birisinin, kanal tabanı genişliğinde taban üzerine inşa edilecek pürüzlülük blokları olduğunu açıklamıştır. Bu bloklar vasıtasıyla kanalda periyodik yüzeysel sıçrama oluşturulup fazla kinetik enerjinin sönmülmesi sağlanmıştır. Eloubaidy ve diğ. (1999) tarafından yapılan çalışmada boyut analizi tekniklerinden yararlanılarak, kavisli EKB'ler üzerindeki akışı tanımlayan bir formülasyon geliştirilmiştir. Farklı boyutlara, kavislere ve düzenlemelere sahip on dört kavisli blok modeli farklı akış koşulları altında test edilmiştir. Normal düz bloklara kıyasla kavisli EKB'ler ile EKH'nin hidrolik performansına ilişkin tüm akış koşulları için, kavisli blokların akışın aşırı kinetik enerjisini sönmülemde %3.2-%33.3 aralığında daha etkili olduğunu göstermişlerdir. Ek olarak, kavisli blokların hidrolik sıçramayı daha iyi stabil hale getirdiği de belirtilmiştir. Kaya (2003) yaptığı tez çalışmasında, kapak altı akımlarda enerjinin sönmülmesini araştırmıştır. Tüm deney setlerinde toplam EKB uzunluğu EKH genişliğinin %40'ı alınarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Yine Froude (Fr) sayısı 2.5 ile 4.5 arasında, memba su yüksekliği 0.10 ile 0.26 m arasında ve kapak açıklığı 0.04 m alınmıştır. Ayrıca akımla temas eden yüzey uzunlukları eşit olan farklı geometride 21 adet EKB tek sıra halinde kanal içerisine yerleştirilerek enerji sönmüleme oranları araştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre T ve beşgen şekilli blokların daha fazla enerji sönmülediği tespit edilmiştir. Ayrıca iki sıra halinde blok diziliminin, enerji sönmüleme etkisini görmek için T ve beşgen bloklar için deneyler gerçekleştirilmiştir. Ancak tek sıralı EKB'lerin daha fazla enerji kıldığı gözlenmiştir. Şekil 2.2'de ise Kaya (2003) tarafından belirlenen en uygun T ve beşgen bloklara ait boyutlar yer almaktadır.



Şekil 2.2 : Seçilen en uygun enerji kırıcı bloklar. Akımı çarpıtarak enerjisini kıran (a), Suyu ayırarak enerjisini kıran (b) (Kaya, 2003'ten değiştirilmiştir).

Çakmak (2005) tarafından yapılan tez çalışmasında EKH içerisinde 8 farklı tipte EKB kullanılarak, bu blokların etkisi test edilmiştir. Debi değeri olarak $0.01-0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ aralığında değerler kullanılmıştır. EKY'den önceki akım yükseklik değerleri çok küçük olduğu için EKB yüksekliği olarak, $0.03 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik debiye karşılık gelen EKY'den önceki akım yüksekliğini 2, 3 ve 4 katı alınarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Şüt kanalının yatayla yaptığı açı değeri 23.07° 'lik sabit açı değeridir. Araştırmacı EKB yüksekliğini değiştirerek enerji sönmüleme etkilerini araştırmayı amaçlamıştır. Şekil 2.3'te bu çalışmaya ait deney düzeneği görülmektedir. Yapılan deneyler sonucunda en iyi performansı sağlayan blok tipi Tip-1 olmuştur. Burada EKY'nin akım çıkışındaki uzunluğunun $1/3$ 'ü alınarak ($1/3b_w$) su giriş genişliği ve enerji kırıcı blok yüksekliği de enerji kırıcı yapıdan önceki akım yüksekliği değeri (h_1) alınarak elde edilmiştir.



Şekil 2.3 : Deney düzeneği (Çakmak, 2005'ten değiştirilmiştir).

Özbay (2008) akımla temas eden yüzey uzunlukları eşit blokları şüt kanalı içerisine şaşırtmalı olarak yerleştirmiş ve farklı geometriye sahip olan 4 çeşit blok kullanarak enerji sönümleme oranlarını incelemiştir. Burada basamaklı olan blok tipinin en fazla enerji sönümlediğini tespit etmiş, bloklu ve bloksuz şüt kanalları arasında enerji sönümleme oranlarının ise çok ciddi anlamda farklı çıktığını göstermiştir.

Dursun (2009) tarafından yapılan tez çalışmasında silindire sıkıştırılmış beton baraj dolusavaklarının basamaklı olarak inşa edilmesi durumunda, enerjinin %70-80 oranında klasik dolusavaklara göre sönümlenebileceği belirtilmiştir. Ayrıca eşikli basamaklı dolusavak türü ile ilgili sayısal ve deneysel bir çalışma yapmış ve farklı şüt açılarında eşikli ve eşiksiz basamaklı dolusavak enerji sönümleme oranlarını araştırmıştır.

Habibzadeh ve diğ. (2012) farklı Fr sayılarını kullanarak, bloklara ait batıklık durumlarını ve blok yeri ile ilgili düzenlemeleri de içeren kapsamlı batık hidrolik sıçrama şeklini incelemişlerdir. İki akış rejimi, DSJ (deflected surface jet) ve RWJ (reattaching wall jet) gözlenmiştir. Sonuçları yorumlamak ve her parametrenin etkisini incelemek için boyut

analizi kullanmışlardır. Belirli bir rejimin oluşumunun, blok şekline ve konumuna olduğu kadar Fr sayısına ve batma faktörüne de bağlı olduğu ifade edilmiştir. DSJ rejiminin, yön değiştiren jetin oluşumu ve su yüzeyine çarpması nedeniyle daha fazla enerji kırdığı bildirilmiştir. DSJ rejiminin, enerjiyi sönmülemde serbest hidrolik sıçrama kadar etkili olduğu belirtilmiştir. Ayrıca bu akış rejiminin RWJ rejimine kıyasla daha küçük bir ters akış bölgesine sahip olduğu bildirilmiştir. Her akış rejiminin olduğu batıklık faktörünün kritik değerlerini tahmin etmek için ampirik denklemler türetilmiştir. Yine kullanılan bloklarla birlikte batık hidrolik sıçramanın enerji sönmülemdeki verimliliği, batma faktörünün bir fonksiyonu olarak bloksuz durum da göz önüne alınarak karşılaştırılmıştır.

Mustaffa ve diğ. (2013) eğimli açık kanallardaki kritiküstü akımları kontrol etmek için hidrolik modeller önermişlerdir. EKB'leri kritiküstü akımları kritikaltı akışa dönüştürmek amacıyla 30 cm genişliğinde, 45 cm derinliğinde ve 10 m uzunluğunda bir kanala yerleştirmişlerdir. Deneylerde farklı şekil ve düzenlemelere sahip üç EKB tasarımı önerilmiştir. EKB'lerin kritiküstü akışı önemli ölçüde azalttığı, mansaba yaklaşan akım hızının yavaşladığı tespit edilmiştir. Tüm tasarımlar için enerji kayıpları da hesaplanmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır.

Bütün deneyler $0 \leq Fr \leq 2$ aralığında ve blok yüksekliği sabit 5 cm alınarak gerçekleştirilmiştir. Kanal eğimi S_o değeri 1/90 alınmış ve bloklardan önceki enerji yüksekliği E_1 Denklem 2.1'deki gibi hesaplanmıştır.

$$E_1 = h_1 + \frac{V^2}{2g} \quad (2.1)$$

Burada h_1 (m) bloklar öncesindeki su derinliği, V (m/s) kanala girişteki su hızı ve g (m^2/s) yerçekimi ivmesidir. Çıkıştaki enerji yüksekliği E_2 olmak üzere E_L giriş ve çıkış enerjileri arasındaki fark Denklem 2.2'de verilmiştir.

$$E_L = E_1 - E_2 \quad (2.2)$$

Bu çalışmada bloklar bir menfez içerisine yerleştirildikleri için enerji kaybı üç bileşenden oluşur. Bu kayıplar sırayla; (i) giriş kaybı, (ii) sürtünme kaybı ve (iii) menfez çıkışındaki kayıplar olarak tanımlanır. Denklem 2.3'te bu kaybın hesap şekli verilmiştir.

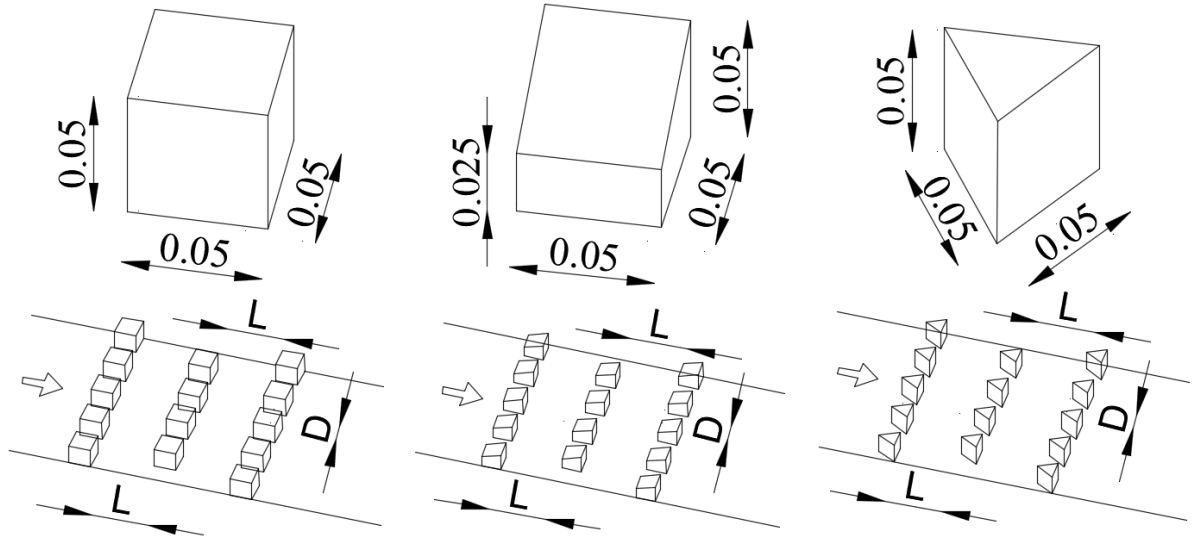
$$\Sigma H_L = K_{ent} \left(\frac{V^2}{2g} \right) + \left(\frac{n^2 V^2 L}{R^3} \right) + K_{ex} \left(\frac{V^2}{2g} \right) \quad (2.3)$$

Denklem 2.3'teki n Manning katsayısını, R hidrolik yarıçapı, K_{ent} ve K_{ex} sırasıyla menfez için giriş ve çıkış katsayısını ifade etmektedir.

Tiwaria ve diğ. (2015) ters T şeklindeki EKB’lerin yeni EKH tasarımındaki performansını test etmek için bir takım deneyler gerçekleştirmişlerdir. Deneyler 2.85 ve 3.85 olmak üzere iki Fr sayısı ve 10.8x6.3 cm boyutlarında boru çıkışı olan dikdörtgen şekilli bir boru sistemi ile EKH’ye su verilerek sağlanmıştır. Performans endeksi (PE) değeri aynı yatay düzleme sahip havuz içerisinde 4 adet ters T şekilli blok tipine göre değerlendirilmiştir. Yeni geliştirilen EKH modelinin, USBR VI EKH tipine göre daha etkin olduğu belirtilmiştir.

Kang (2017), yaptığı çalışma ile bir savağın mansabındaki oyulma problemini azaltmak için farklı geometride EKB’ler kullanmıştır. Yatay bir kanalda farklı geometriye sahip blokların akımı mansap kısmında dağıtma şekline bağlı olarak blokların oyulmayı önleme düzeyleri test edilmiştir. Kanal içerisine blok yerleştirilmiş hali ile blok yerleştirilmeyen durum için kanal çıkışında akım hızları ölçülmüştür. Beş farklı geometriye sahip blok tipi kendi içinde ayrıca kıyaslanmıştır. 0.140 ve 0.325 m³/s olmak üzere iki farklı debi değeri için deneyler gerçekleştirilmiştir. Beş blok tipinden dikdörtgenler prizması şeklindeki blok, diğerlerine göre akımı daha fazla dağıtmış ve oyulmayı engellemiştir. 0.140 m³/s’lik debi değeri için ortalama akım hızı, EKB tipi dikdörtgenler prizması olduğunda 0.63 m/s ile en küçük hız değeri ölçülmüşken, blok tipi silindir olduğunda maksimum hız değeri 1.18 m/s olarak ölçülmüştür. Bununla birlikte debi değerleri ve farklı savak şekillerinin kullanımı blok etkilerinin değişmesine neden olacağı belirtilmiştir.

Wang ve diğ. (2017) yaptıkları çalışma ile dağlık alanlardaki mimari yapılara heyelan ve moloz akımlarının etkisini azaltmak için EKB’ler kullanmışlardır. Bunun için 6 m uzunluğunda bir kanal içerisine 3 farklı geometride bloklar yerleştirilmiş ve blokların akım hızını azaltma ile enerji sönmleme durumları kıyaslanmıştır. Kullanılan bloklara ait ölçüler ve kanal içerisindeki dizilimleri Şekil 2.4’te verildiği gibidir. Yapılan deney sonuçlarına göre kanal tabanında blok olmadan ölçülen enerji sönmleme değeri, bloklu duruma göre %27.30 ila %39.32 daha az çıkmıştır. Akım kanalına verilen akışkan yoğunluğunun 1200 kg/m³’ten 2100 kg/m³’e değişiminde blokların hız oranını azaltma değeri %20 artış göstermiştir. Ayrıca hız azaltma oranları küp, trapez ve üçgen prizma şeklindeki blok tipleri için, akımın temas ettiği yüzey alanından (eşdeğer etki alanından) bağımsız olarak sırasıyla %25, %26.3 ve %23.5 çıkmıştır. Yine hız azaltma oranının, bitişik sıralar arasındaki boşlukla ters orantılı olduğu belirtilmiştir. Sıra aralığını 0.10 m’den 0.25 m’ye çıkarmak, ortalama hız azaltma oranında %22’lik bir kayıpla sonuçlandığı bildirilmiştir.



Şekil 2.4 : Enerji kırıcı blokların boyutları ve kanal içerisinde dizilim şekli (Wang ve diğ, 2017’den değiştirilmiştir).

Sıra aralığı 1.42 m’ye çıktığında hız azaltma oranının -%13’e düştüğü ve blokların akım hızını yavaşlatma yeteneklerini kaybetmeye başladığı da söylenmiştir. Yine bu çalışmanın deneysel sonuçlarına göre, yüksek düşümlü drenaj kanallarının tasarımı için bu EKB’lerin faydalı olacağı bildirilmiştir.

2.2 Enerji Kırıcı Şütlerin Oksijen Transferine Etkisi

Her geçen gün değişen dünyada, canlı yaşamı için temiz su daha da önem kazanmaktadır. Su kalitesini belirleyen parametreler arasında çözünmüş oksijen (ÇO) miktarı öne çıkmaktadır. Kirli olan sular, uzun bir kanaldan iletilip kendiliğinden havalandırılarak oksijeni arttırılabilir. Ancak temiz suya olan ihtiyacın giderek artması daha verimli düzenlemeler ve yapılar yapılmasını gerektirmektedir. Suların oksijenlendirilmesinde en ekonomik yöntem hidrolik yapıların kullanılmasıdır. Suyu oksijen kazandırmak için; hidrolik sıçrama havuzları yapmak, yüksek kottan suyu düşürmek, akımı yüzeyi pürüzlü ya da basamaklı bir kanaldan geçirmek veya kanal içerisine EKB’ler dizmek suretiyle hidrolik yapılar yapılmaktadır. Bu yapılar su ile kısa bir süre temas halinde olsalar bile, sudaki ÇO’yu istenilen seviyeye çıkarabilirler. Biyolojik canlı çeşitliliği ve doğal ekosistemi korumak için bu tür yapılar elzemdir. Genellikle kirli suların temizlenme süreci

çok karmaşıktır. Çünkü her farklı hidrolik yapı oksijen transfer mekanizmasını da değiştirmektedir.

Özellikle şüt kanalı içerisine veya kaskadlara yerleştirilen şaşırtmalı EKB'ler, suyun enerjisini sönümlemenin yanında hidrolik sıçrama yoluyla su-hava yüzeyi arasında doğal yoldan oksijen geçişine de olanak sağlar. Akımın blok üstünden, blok aralarından ve blok etrafından geçişi olurken bir taraftan da hava kabarcıkları suya geçer. Böylece kendi kendine suda oksijen konsantrasyonu artmış olur. Bu durum sudaki canlı yaşamı ve insanların temiz su ihtiyacı açısından oldukça kıymetlidir. Gameson (1957) ve Gameson ve diğ. (1958) suyun doğal olarak havalandırma etkisini literatürde ilk defa çalışmış ve birçok akarsudaki hidrolik yapılarda su içindeki ÇO konsantrasyonunun değişimini yaptığı ölçümlerle araştırmıştır. Bu yapıları, serbest düşümlü savak, basamaklı savak, bent kapağı, eğimli kanal ve değirmen olarak gruplandırmıştır. Burada hidrolik yapıların, girişinde ve çıkışında ÇO konsantrasyonlarını ölçmüş ve bu yapıların suyun doğal olarak havalanmasını sağladığını saptayarak, akımın havalandırma verimliliğini hesaplayan ifadeler öne sürmüştür. Şekil 2.5'te Gameson (1957) tarafından basamaklı savaklardaki havalandırma verimliliğinin araştırılması çalışması yer almaktadır. O zamandan beri, çok sayıda bilim insanı bu hidrolik yapılarla ilgili oksijen transferini incelemiştir. Tebbutt (1972), 4 L/s'nin altındaki debiler için laboratuvarında toplam yüksekliği 1.8 m ve maksimum 25 basamağı olan bir kaskad üzerinde ölçümler yapmıştır.



Şekil 2.5: Gameson tarafından yapılan saha çalışması (Gameson, 1957).

Essery ve diğ. (1978), 0.025 ve 0.5 m arasındaki basamak yükseklikleri ve 1.5 ila 22 L/s arasındaki debileri dikkate alarak, kademeli bir kanalda havalandırma verimliliğini tahmin

etmek için bir korelasyon önermiştir. Önerdiği korelasyonda viskozite ve uzunluk ihmal edilmiştir. Markosfky ve Kobus (1978), havadan suya oksijen transferini: suya hava girişi, havanın havalandırma bölgesinden taşınması, hava kabarcıkları içindeki oksijenin su içinde çözünmesi ile üç aşamadan oluştuğunu belirtmişlerdir. En son aşama su kalitesini belirleyen bir fonksiyondur. Dolayısıyla su kirliliğinin artması oksijenin su içindeki çözünme yüzdesinin azalması demektir. Wood (1991) tarafından yapılan çalışmada ise yüksek eğimli kanallarda daha çok hava girişiyle değişen akım karakteristikleri üzerine araştırmalar yapılmıştır. Kobus (1991) yaptığı çalışmalar ile doğal havalandırmayı sağlayan hidrodinamik etkenleri uzun ve kısa mesafede gerçekleşmesine göre sınıflandırmıştır. Kısa mesafede doğal havalandırmayı sağlayan hidrodinamik etkenler hidrolik sıçrama ve su düşümü yüksekliği iken; uzun mesafede doğal havalandırmayı sağlayan hidrodinamik etkenler ise yüksek eğimli ve basamaklı kanallardan ilerleyen serbest yüzeyli akımlar olarak gruplandırılmıştır. Chanson (1993) çalışmasında 7.5° ile 75° arasındaki eğimler için model ve prototipler üzerinde birtakım deneyler gerçekleştirmiştir. Dolusavak geometrisi ve debi değerlerinden çeşitli akım parametreleri, hava konsantrasyonu ve hız dağılımları hesaplanabileceğini belirtmiştir. Kayma gerilmesi, hava konsantrasyonu sınır tabakası ve kanal yüzeyinin yanındaki hız dağılımları arasındaki etkileşimlerin sürüklenme azaltma sürecini açıklayabileceğini, ancak kendiliğinden havalandırılmalı akışlardaki sürüklenme azaltma mekanizmalarının daha iyi anlaşılması için daha fazla deneysel çalışmanın gerekli olduğunu söylemiştir.

Gulliver ve Rindels (1993)'e göre çoğu hidrolik yapı oksijen transfer verimine (OTV) önemli ölçüde katkı sağlar. Çünkü akıma giren havanın burada daha küçük parçalara ayrılması ve bunun da yüzey alanını arttırarak OTV'ye olumlu katkı sağladığı düşünülmektedir. Burada kapsamlı olarak OTV ile kütle transferi denklemi arasında ilişkilendirme yapılmıştır. Ayrıca su sıcaklık değeri ve birim debi değerlerinin ölçümünün mutlaka yapılması gerektiği de belirtilmiştir. Doğru oksijen transferi için memba kısmında oksijen seviyesinin minimum ya da hiç oksijen olmaması gerektiği bildirilmiştir. Özellikle %95 güven aralığı değerinde bir transfer mekanizması oluşturmak için sudaki birim oksijen veriminin 0.1'den daha az bir değerde olması gerektiği belirtilmiştir.

Chanson (1995) yaptığı çalışmada, yüksek hızlı su akışlarında büyük miktarda hava kabarcıklarının sürüklendiğini ve tutulan hava kabarcıklarının türbülans ile etkileşime girdiğini belirtmiştir. Su yapılarında her bir geometrinin, türbülanslı bir kesme tabakası ve büyük hava kabarcığı içeriği ile yüksek hızda serbest yüzey akışı sergilediğini ve hava-su

karışımlarının homojen sıkıştırılabilir bir akışkan gibi davranacağını teyit etmiştir. Ayrıca, 37 m/s'ye kadar ortalama hızlara ve %70'e varan ortalama hava içeriğine sahip birkaç yeni deneysel araştırma raporu da sunmuştur.

Gulliver ve diğ. (1998), hidrolik yapıların oksijen transferi üzerine etkilerini tartışmışlardır. EKH şekline bağlı olarak oksijen transferi etkisinin çok değişkenlik gösterebildiğini belirtmişlerdir. Ayrıca literatürde tavsiye edilen iki boyutlu denklemlerin akım karmaşıklığından dolayı üç boyutlu sistemlere uygulanmasının zor olduğunu söylemişlerdir.

Watson ve diğ. (1998) yaptıkları çalışmalarda yüksek eğimli kanallarda etkili bir doğal havalandırma sağlanmadığını bildirmişlerdir. Toombes ve Chanson (2005) düşük kanal eğimli (yaklaşık %3.4 eğime sahip, basamak uzunluğu basamak yüksekliklerinden yaklaşık 17 kat daha büyük seçilmiştir) basamaklı bir kanalda ve 19 ila 300 L/s arasındaki yüksek debiler için OTV'yi incelemiştir. (Baylar ve Emiroğlu, 2003; Baylar ve diğ, 2006, 2007a, 2007b) basamaklı kaskadlar üzerinde çok sayıda su havalandırma deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Toplam yüksekliği 1.2 ile 2.5 m arasında ve maksimum basamak sayısı 50 olan basamaklı kaskadlar üzerinde yaptıkları deneylerde oksijenasyonu, 5 ila 50 L/s arasındaki debiler için birkaç ampirik korelasyonla karakterize etmişlerdir.

Küçükali (2006) yaptığı çalışma ile klasik hidrolik sıçramayla ilgili sistematik deneyler gerçekleştirmiştir. Burada havalandırma ile transfer olan oksijen miktarıyla, kırılan enerji miktarı arasında kuvvetli bir ilişki bulmuştur. Deneysel verilerin analizi sonucu, hidrolik sıçramayı havalandırma verimliliğinin, yük kaybının ve birim genişlikten geçen debinin fonksiyonu olarak tahmin eden bir formül geliştirmiştir.

EKY'ler arasında yer alan ve oksijen transfer mekanizması EKŞ'ler ile benzer olan basamaklı dolusavaklar ile ilgili çok sayıda oksijenasyon çalışması da literatürde mevcuttur. Basamaklı dolusavak, üzerindeki akımlara hem enerji sönmeme hem de serbest yüzeyli havalandırma imkânı sağlar. Ayrıca havalandırma esnasında akış yönünde akımın içerisinde hava ve su arasında güçlü enerji dağılımları ve karmaşık etkileşimler meydana gelir.

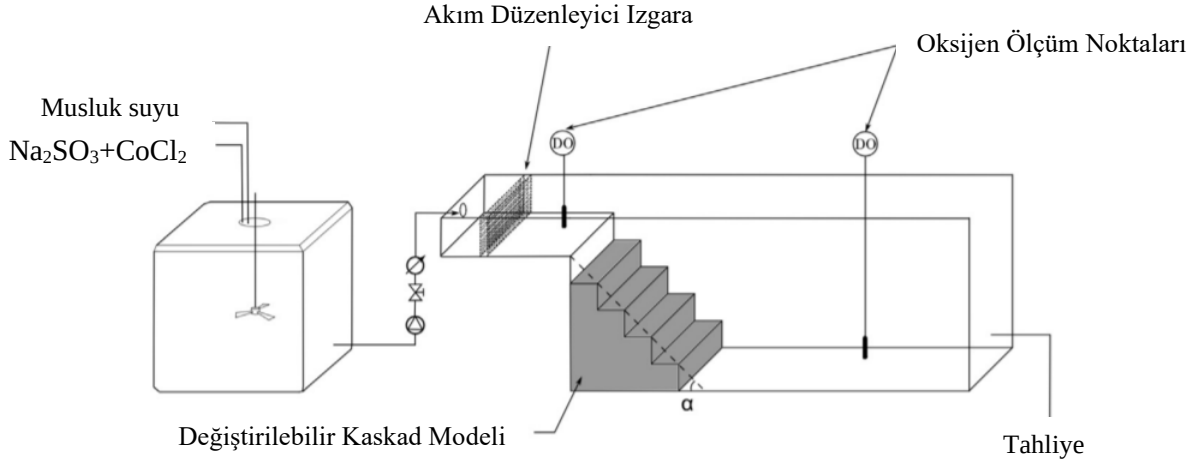
Gonzalez ve Chanson (2008) büyük Reynolds (Re) sayılarında çalışan büyük basamaklı bir kanalda deneyler gerçekleştirmişlerdir. Bazı deneyler için, basamak üzerindeki debiyi ve boşluk olan bölgelerdeki çevrinti arasında oluşan etkileşimleri arttırmak ve akımın türbülansını yönetmek için basamakların boşluklarına üçgen kanatlar yerleştirmişlerdir.

Elde edilen sonuçlar, bu kanatçıkların hem serbest akış hem de boşluk olan bölgedeki çevrinti akışlarında, hava-su akış özellikleri üzerinde güçlü bir etkisi olduğunu göstermiştir. Yüksek türbülanslı hava-su akışlarında bazı pasif türbülans etkilerinin oluşabileceğini de ortaya koymuşlardır.

Baylar ve diğ. (2010) yaptığı çalışmada hidrolik yapıları, yüksek düşülü enerjiye sahip sistemler ve serbest yüzey akışlı sistemler olarak iki gruba ayırmışlardır. Yüksek düşülü enerjiye sahip sistemler; dairesel ve venturi çıkış ağzı, venturi tüplü boru ve yüksek düşü enerjili kondüit iken serbest yüzey akış sistemleri; savak, kademeli kaskad ve serbest yüzeyli kondüitlerdir. Venturi tüplü borular, düşük hava/su akış oranına sahip olmalarına rağmen yüksek havalandırma verimliliği göstermişlerdir. Yüksek düşülü ve serbest yüzeyli kanallarda, doygunluk değerine yakın neredeyse tam oksijen transferi gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Kaya ve Emiroğlu (2010) enerji sönümlemeyle OTV arasında kuvvetli bir bağ olduğunu belirlemişlerdir. Basamaklı, kama, trapez ve T şeklindeki blokların oksijen verimi etkisini incelemiş ve ampirik bir formül geliştirmişlerdir.

Wu ve diğ. (2013) hava sürüklenmesi başlangıç noktası konumunun, enerji kırma oranı, kavitasyon hasar kontrolü, basamaklı dolusavak ve EKH için yan duvar yüksekliği tasarımlarını doğrudan etkilediğini ifade etmişlerdir. Bu çalışmada, dolusavaklardaki basamakları bir pürüzlü yüzeyi temsil ederek, basamaklı dolusavakların üzerindeki hava sürüklenmesinin başlangıç noktasının konumunu tahmin etmek için sınır tabakası teorisi kullanılmıştır. Fiziksel model deneylerine dayalı olarak, deneysel verilere kıyasla hatanın %1.6 olduğu bir nokta hariç, maksimum hatanın %1'den az olduğu deneysel bir formül sunulmuştur. Bu arada, basamaklı dolusavak için hava sürüklenmesinin başlangıç noktasının konumunun, düz yüzeyli dolusavaklara göre dolusavağın tepesine çok daha yakın olduğu gösterilmiştir.

Khdhiri ve diğ. (2014) tarafından basamaklı kaskadlar üzerinde OTV'yi incelemek ve havalandırma için bir korelasyon geliştirmek amacıyla 398 adet deney yapılmıştır. Deney setinin şematik gösterimi Şekil 2.6'da verildiği gibidir. Bu yeni ampirik bağıntı, bütün veri setleri kullanılarak; basamak yüksekliğinin 0.05 ile 0.254 m aralığında, kaskada ait toplam yükseklik 0.25 ile 2.5 m aralığında, birim debi değeri 0.28×10^{-3} ile $600 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ aralığında ve basamak sayısı 3 ile 25 aralığında seçilerek elde edilmiştir. Bu parametre aralıklarında, havalandırma verimliliği tahmini için standart sapmanın % 17'den az olduğu bulunmuştur.



Şekil 2.6 : Deney setinin şematiği (Khdhiri ve diğ, 2014'ten değiştirilmiştir).

L, M ve T sırasıyla uzunluk, kütle ve zamanın temel fiziksel boyutlarını simgeler. Dikkate alınan sekiz parametre üç boyutla ifade edilmiştir. Bu nedenle, basamaklı kaskad üzerindeki havalandırma verimliliğini modellemek için 5 boyutsuz sayının gerekli ve yeterli olduğu belirtilmiştir. Bunlar sırasıyla Re , H/h , h_c/H , h/l ve E_{20} sayılarıdır.

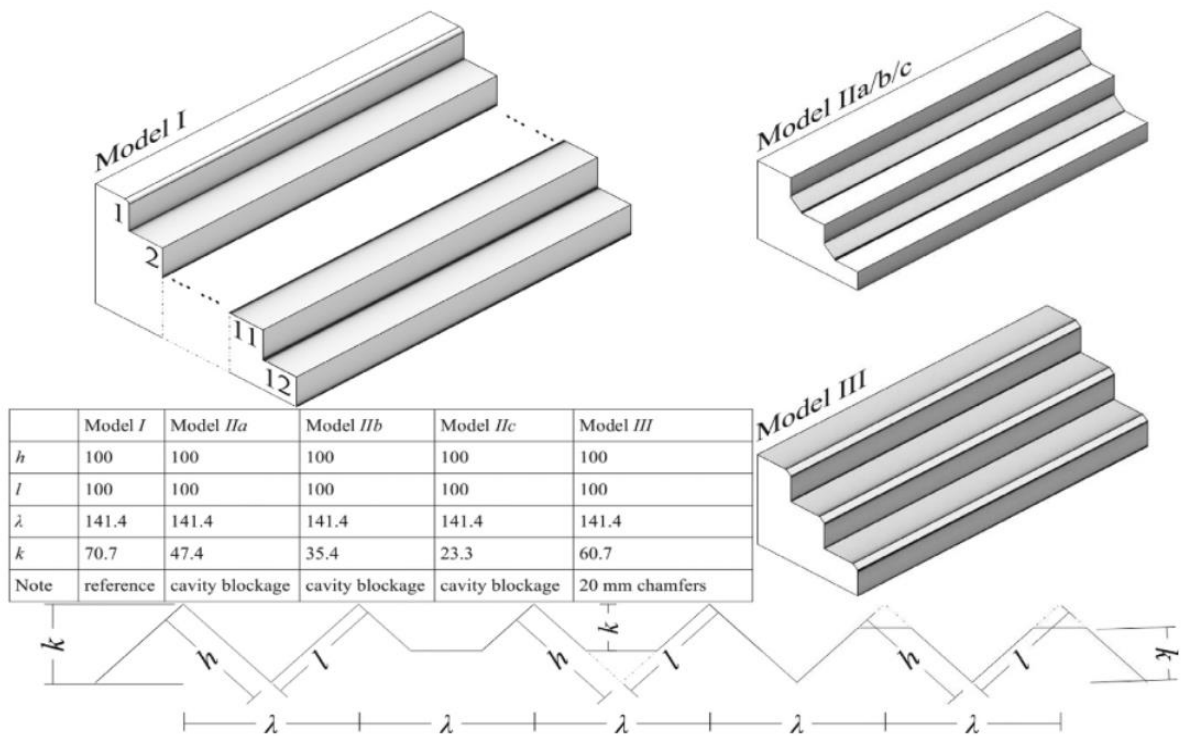
H/h oranı basamakların eşit yüksekliğe sahip olduğunda, kaskadların basamak etkisini temsil eder. h_c/H oranı kritik su derinliği ve toplam kaskad yüksekliği ile ilgilidir. Yerçekimi ve girişteki akış koşullarını temsil eder. h/l oranı, basamak geometrisinin havalandırma üzerindeki etkisini ifade eder. E_{20} ise 20 °C'de aktarılan oksijen miktarı ile transfer edilebilecek maksimum oksijen miktarı arasındaki orandır.

Bung ve Valero (2016) optik akış yönteminin havalandırılmış basamaklı dolusavak akımlarının uygulanmasına ilişkin ilk çalışmayı sunmuşlardır. Bu amaçla akım, yüksek hızlı bir kamera ile yakalanır ve senkronize bir LED ışık kaynağı ile aydınlatılır. Optik akışın tahmini için, görüntü filtreleme ile bir görüntü piramidine ait çoklu çözünürlük yaklaşımını birleştirilen temel bir Horn-Schunck yöntemi kullanılmış ve elde edilen akış hızları, deneysel olarak yapılan ölçümlerden elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır. Horn-Schunck yönteminin uygulanması, her piksel için hız bilgisine sahip yoğun şekilde doldurulmuş akım alanı veri setleri verir. Görüntü piramidi yaklaşımının, diğer görüntü işleme tekniklerine kıyasla doğruluk hassasiyetinin üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu da bulunmuştur.

Gerger ve diğ. (2017) yaptıkları çalışmada şaşırtmalı bir şekilde kanala yerleştirilmiş blokların OTV için 5 farklı algoritma kullanılarak çözüm gerçekleştirmişlerdir. Basamaklı,

kama şeklinde ve T şekilli blokların OTV değerlerinin daha iyi olduğu görülmüştür. Ashour ve diğ. (2014) sulama suyundaki ÇO seviyesini ve kalitesinin arttırmaya yönelik 14 tip kavisli blok kullanarak blok kavis etkisini incelemişlerdir. Raikar ve Kamatagi (2015) iki farklı savak türü ve hidrolik sıçramanın havalandırma verimliliğine etkisini incelemiştir. Üçgen savak türünün havalandırma verimliliği %19.48 iken dikdörtgen savağın havalandırma verimliliği %10.12 çıkmıştır. Ayrıca savakların, hidrolik sıçramaya göre oksijen veriminde daha etkili olduğu da yapılan deneylerle ispatlanmıştır.

Zhang ve Chanson (2018) sıçramalı akımın basamaklı şütler üzerinde üçgen basamaklar, kenarları pahlanmış basamaklar, kısmen tıkalı basamaklar kullanarak hava-su ara yüzey ilişkisini incelemişlerdir. Hava ve su arasındaki türbülanslı etkileşimler, bir çift uçlu faz algılama probu ve yan yana monte edilmiş bir basınç dönüştürücüsünden oluşan senkronize bir sistem kullanarak tespit edilmiştir. Düzgün üçgen basamaklarla karşılaştırıldığında, kenarı pahlanmış basamakların, hava sürüklenmesinde bir azalmaya ve basamak ucundan geçen izafi tabanın yanında ortalama hız gradyanında bir artışa neden olduğu bulunmuştur. Şekil 2.7’de deneylerde kullanılan basamaklara ait ölçüler ve çizimleri yer almaktadır.



Şekil 2.7 : Deneyde kullanılan basamak tipleri ve ölçüleri (Zhang ve Chanson, 2018).

Kramer ve diğ. (2019) lazer teknolojisini (LIDAR) kullanarak prototip basamaklı dolusavak ile havalandırma verimi deneyleri gerçekleştirmiştir. LIDAR'ın yüksek hızlı hava-su akışlarında uygunluğunu ve prototip ölçeğinde hidrolik olaylara gelecekte uygulama potansiyelini vurgulamıştır.

Bu tez çalışmasında, 6 farklı geometriye sahip enerji sönümleyici blok, birim debi, değişen açı ($10^\circ \leq \alpha \leq 56^\circ$) değerleri gibi parametreler kullanılarak ÇO miktarları ve enerji sönümleme etkileri belirlenmiştir. Bloksuz kanal için de ölçümler yapılmıştır. Böylece blokların etkisi daha net anlaşılmıştır. Çalışma neticesinde elde edilen sonuçlar grafikler halinde tartışılmıştır. 6 farklı tipteki EKB'nin oksijenlendirme ve enerji sönümleme performansları kıyaslanmıştır.

2.3 Enerji Kırıcı Yapı Tasarımında HAD (CFD) Kullanımı

HAD, bilgisayar simülasyonları kullanılarak akış süreçlerinin incelenmesinden oluşur (Veersteg ve Malalasekera, 1995). HAD ile akış çevresinin tamamını kapsayacak şekilde bir alan ağ gibi küçük parçalara (mesh=elemanlara) bölünerek olayların analizi gerçekleştirilir. Seçilen alan, sonlu sayıda elemana bölündüğünde, doğal akış bir takım temel denklemler seçilerek simülasyonu sağlanır. Çoğu HAD uygulaması, momentum, kütle ve enerjinin korunumu denklemlerinden formüle edilen momentum, ısı ve kütlenin taşınmasını içeren Navier-Stokes denklemleri ile çözülür. Bu korunum denklemleri daha sonra Taylor'un Seri Açılımları gibi yaklaşımlar kullanılarak cebirsel terimlerle ifade edilir. Bunlar, sayısal algoritmaları kullanarak her elemanı çözer. Böylece, her bir elemanın içindeki değişiklikler yakalanır ve seçilen alandaki hız ve basınç gibi değerler ayarlanan zaman aralığında hesaplanır. Navier-Stokes denklemleri doğrusal olmayan bir denklem sisteminden oluşur. Bu nedenle bunları tekrarlamalı (iterasyon) olarak çözmek için bir prosedür gereklidir. Bu, uygun bir tekrarlama algoritmasının seçilmesiyle gerçekleştirilir. Her tekrarlamalı adımda, tahmin edilen çözüm kesin çözüme daha yakın hale gelir. Tahmin edilen ve kesin çözüm arasındaki fark, artık olarak adlandırılır. Bu artık değer çözüm içerisinde çok küçük olacak şekilde seçilir. Böylece bu değere ulaştığında, çözümün yakınsadığı anlaşılmış olur. Yakınsamış çözüm ile gerçek çözüm arasındaki fark, modelleme hatası olarak adlandırılır (Torres Mansilla, 2018). Bütün bu aşamalar belirlenmiş bir akım alanının HAD sayesinde somut bir çözüme kavuşturulmasıdır. Problemin fiziği ve çözülmesi gereken bütün denklemler belirli zaman ve mekân açısından çözmek için gerekli olan tekrarlamalı algoritmalarla açıklanır. Her zaman çözüm sonucu

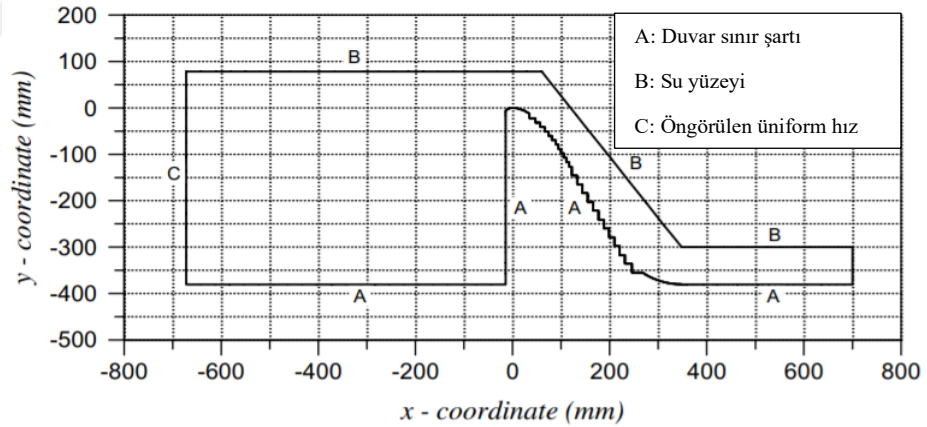
belirlenen sınır şartlara göre bir değere yakınsar. Simülasyon işlemi tamamlandıktan sonra sonuçlar görselleştirme uygulamasında tekrar değerlendirilir. Bunun için yüksek performansa sahip bilgisayar tercih edilmesi problemin çözümünü zaman olarak daha da kısa hale getirecektir. Hidrolik yapılar üzerindeki serbest yüzey akışları çok fazlı, üç boyutlu ve yüksek türbülanslıdır. Hem sayısal hem de fiziksel açıdan bu tür akışların karmaşıklığı göz önüne alındığında, bunları yeniden meydana getirmek için çok sayıda sayısal yaklaşım önerilmiştir (Van Wachem ve Almstedt, 2003). Şu anda hidrolik altyapı tasarımında olan diğer birçok disiplinin aksine, sayısal yöntemler standart uygulama değildir. Bununla birlikte, günümüzde sayısal yaklaşımlar, fiziksel modellere tamamlayıcı bir araç olarak giderek daha fazla durumda uygulanmaktadır. HAD yöntemini kullanarak serbest yüzey akışlarının modellenmesi, hidrolik, matematik ve bilgisayar bilimi dahil olmak üzere çeşitli mühendislik alanlarını kapsar. Ana karmaşıklık, akışkan konumunu belirlemek ve hareketini tanımlamak için özel yöntemler gerektiren farklı bir arayüzün varlığından kaynaklanır. Bu nedenle, bu akışları yeniden oluşturmaya çalışırken, doğruluk ve hesaplama maliyeti arasında uygun bir denge sağlarken, onları tanımlayan karmaşık denklemleri çözmek için uygun sayısal şemaları seçmek gerekir (Magoules, 2011). Serbest yüzey akışlarını yeniden üretmeye yönelik sayısal yaklaşımlar üç ana çerçeveye ayrılabilir. Bunlar Euler, Lagrangian ve Keyfi Lagrangian-Eulerian'dır (Soulaimani ve Saad, 1998). Dahası, arayüz modelleme, ön izleme ve ön yakalama olarak alt bölümlere ayrılabilir. Ön izleme tekniği ilk olarak Unverdi ve Tryggvason (1992) tarafından geliştirilmiştir. Burada serbest yüzey, Lagrange tarzında arayüz hareketiyle değişen bir ağ tarafından izlenmektedir. Bunun aksine, ön yakalama yöntemleri, tüm alanı kaplayan sabit bir ağ içinde tanımlanan belirli bir işlev aracılığıyla arayüzü simüle eder. Farklı çerçevelerin her birinin güçlü ve dezavantajları vardır, dolayısıyla simüle edilen sürecin doğasına göre en uygun yaklaşımın seçilmesi gerekir.

Literatürde serbest yüzeyli akımlar ve dikkate aldığımız EKY'ler ile ilgili, HAD yöntemi ile çözümü sağlanmış çok sayıda bilimsel çalışma mevcuttur.

Andre ve diğ. (2003) basamaklı kanallar üzerindeki havalandırılmış akımı temel olarak laboratuvar modelleri üzerinde çalışmışlardır. Sonuç olarak, elde edilen tasarım ilişkilerinin sınırlı bir uygulama alanı olduğu için, akımın daha genel bir tanımını önermek maksadıyla, iki boyutlu sayısal bir model geliştirilmiştir. Akışkan, farklı denklem grupları tarafından yönetilen bir hava-su karışımı olarak kabul edilmiştir. Ayrıca, hava konsantrasyonu için bir taşıma denklemi, akımın kendi kendine havalandırılmasını temsil

etmektedir. Düzensiz dikey hız dağılımı katsayısı, türbülanslı yapıları dolaylı olarak bütünleştirir. Bu çalışma, akım davranışının kısa bir açıklamasını, iki boyutlu model denklemlerini ve sayısal sonuçların, şüt açısı 30° olan basamaklı bir kanalda ölçülen akım özellikleriyle karşılaştırılmasını içermektedir.

Tabbara ve diğ. (2005) ADINA yazılımını kullanarak ogee profili olan basamaklı dolusavak üzerinde çalışmışlardır. Farklı basamak modellerini deneyerek basamaklı dolusavak üzerinde akımın karakteristik özelliklerini incelemişlerdir. Bu çözüm, su yüzeyinin belirlenmesini, köşe girdapları üzerinden sıçrama akışının gelişmesini ve enerji dağılımının belirlenmesini içeriyordu. Gerçek akış türbülanslı olduğundan, $k-\epsilon$ akış modeli kullanılmıştır. Burada ele alınan tüm durumlar için çözüm süreci iki aşamadan oluşuyordu: Şekil 2.8'deki su yüzeyinin sabit tutulduğu (sabit bir duvar koşulu öngörülerek) ve zamandan bağımsız geçici bir çözümün arandığı Faz-I ve Faz-I'deki düğüm sonuçlarının başlangıç koşulları olarak kullanıldığı ve su yüzeyinin serbest bir yüzey olarak işlem gördüğü Faz-II şeklindedir. Bu iki aşamalı yaklaşım, daha hızlı bir yakınsama oranı sağlamış ve özellikle kenarları serbest yüzey boyunca olan elemanlar için potansiyel elemanların örtüşmesini önlediği belirtilmiştir.



Şekil 2.8: Analizde kullanılan ilk hesaplama alanı-durum 4 (Tabbara ve diğ, 2005'ten değiştirilmiştir).

Aydın ve diğ. (2005) Kars Barajı yandan alıslı dolusavak teknesinde üç boyutlu analiz uygulaması ile Fluent yazılımında modellerini oluşturmuş ve elde ettikleri verilerle, hidrolik modelle elde edilen verileri karşılaştırmışlardır. Yapılan çalışmada sonuçları

Cheng ve diğ. (2006) tarafından basamaklı dolusavaklar üzerindeki hava-su iki fazlı akışının karmaşıklığından dolayı, akımın ana özelliklerini simüle etmek için ANSYS-Fluent yazılımının sonlu hacimli HAD modülü kullanılmıştır. RNG $k-\varepsilon$ türbülans modelini benimseyen hava-su iki fazlı akım için karışım akış modeli, PISO aritmetik tekniği ile basamaklı dolusavak üzerindeki akım alanını simüle etmek için kullanılmıştır. Sayısal sonuç, sürüklenen hava kabarcıkları ile sıçramalı akım rejimindeki boşluk kısımlarındaki devridaimi arasındaki etkileşim, hız dağılımı ve basamak yüzeyindeki basınç profilleri de dahil olmak üzere, bir deney mekanizmasının basamaklı bir dolusavak üzerindeki karmaşık akımı başarılı bir şekilde yeniden oluşturulmuştur. Sonuç olarak, basamaklı dolusavaklardaki enerji dağılımı hakkında ayrıntılı bilgiler elde edilmiştir.

[illegible]

22

Baylar ve diğ. (2008) çalışmasında, venturi tüplerinin hava enjeksiyon oranlarını HAD modellemesi kullanarak analiz etmişlerdir. Bu analizler, sonlu hacim metodunu kullanan Fluent 6.2 CFD paket programı ile yapılmıştır. Ölçülen ve Fluent 6.2 CFD paket programı kullanılarak hesaplanan hava enjeksiyon oranları arasında iyi bir uyum olduğu tespit edilmiştir. Böylece CFD (computational fluid dynamics-HAD) metodu, venturi tüplerin hava enjeksiyonunu maksimize eden optimum hava giriş delik çapını tahmin etmekte kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Aydın ve Öztürk (2009) dolusavak havalandırıcılarında hava sürüklenmesine ilişkin Fluent yazılımı kullanılarak elde edilen HAD modellemesinin sonuçları, fiziksel bir model çalışmasından elde edilen verilerle ve diğer araştırmacılar tarafından sunulan bazı deneysel denklemlerin ve prototip gözlemlerinin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. HAD analizlerinden elde edilen hava sürüklenme oranlarının, prototip verileri ve ampirik denklemlerden hesaplanan değerler ile makul uyum içinde olduğu ve önemli ölçek etkilerini içeren fiziksel model verilerinden daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışmadaki sayısal doğrulama prosedürü, HAD belirsizlik analizi için bir çerçeve sağlayan ASME (American Society of Mechanical Engineers- Amerikan Mekanik Mühendisleri Topluluğu) editoryal politika beyanına dayanmaktadır. Bu nedenle, HAD'in geçerliliği bu çalışma kapsamında tartışılmıştır.

Dursun (2009) tarafından yapılan çalışmada daha önce literatürde hiç kullanılmamış olan eşikli basamaklı dolusavak tipi ile ilgili sayısal ve deneysel bir çalışma yapmış ve farklı şüt açılarında eşikli ve eşiksiz basamaklı dolusavak enerji sönümleme oranlarını araştırmıştır.

Eghbalzadeh ve Javan (2012) Mixture (karışım) ve VOF (volume of fluid-akışkan hacmi) yöntemlerini kullanarak basamaklı dolusavaklarda sıçramalı akım durumu için su-hava karışımı sayısal olarak Fluent yazılımı kullanılarak araştırılmıştır. Serbest yüzey, hız bileşenleri ve sudaki hava konsantrasyonu ve suya hava girişi durumunun sayısal simülasyon sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Hızlı serbest yüzey havalandırmasının gözlemlendiği deneylerde, serbest yüzey havalandırmasının başlangıç noktasının mansap kısmında, serbest yüzeyin Mixture yöntemi ile daha iyi simüle edildiği bulunmuştur.

Aydın ve Emiroğlu (2013) yaptıkları çalışma ile yan savakların, sulama, arazi drenajı, kentsel kanalizasyon sistemleri, taşkın koruması ve akış yönlendirmede yaygın olarak

kullanıldığını belirtmişlerdir. Yan savakların hidrolik davranışının birçok araştırmacı tarafından büyük ilgi gördüğünü ve yapılan çalışmaların büyük bir kısmının dikdörtgen yan savakların fiziksel model testleri şeklinde olduğunu ifade etmişlerdir. Ancak yaptıkları çalışmada, düz bir kanal üzerinde yer alan labirent yan savağın deşarj kapasitesini belirlemek için HAD modellerini sayısal ortamda oluşturmuşlardır. HAD analizlerinden elde edilen deşarj performansları; Fr sayısı, boyutsuz sıçrama yüksekliği, boyutsuz savak genişliği ve savak açısı parametreleri için gözlemlenen sonuçlarla deneysel verileri karşılaştırmışlardır. Her iki yöntemden elde edilen sonuçların iyi bir uyum içinde olduğu belirtilmiştir.

Zhan ve diğ. (2016) basamaklı dolusavakların akım içerisine hava sürüklenme durumunu Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes/büyük girdap simülasyonu-large eddy simulation (RANS/LES) türbülans modelleri kullanılarak hava sürüklenmesini simüle etmek için VOF, Mixture ve Eulerian yöntemlerini kullanmışlardır. Serbest yüzey deformasyonu, hava hacmi oranı, basınç ve hız, üç farklı sayısal yöntem için karşılaştırılmıştır. Yalnızca Eulerian+RANS yöntemi, serbest yüzey havalandırmasını yakalayamamıştır. VOF+LES yöntemiyle tahmin edilen hava hacmi fraksiyonu deneysel ölçümle en iyi şekilde eşleşirken, Mixture+LES yöntemi hava sürüklenmesinin başlangıç noktasını daha doğru bir şekilde tahmin etmiştir.

Aydın ve Ulu (2017) çalışmalarında, farklı eşiklerin akış dinamiklerini nasıl etkileyeceğini araştırmışlardır. Çalışmada HAD yazılımını kullanarak, her bir eşik şekli için hız konturları ve hız büyüklüklerini incelemişlerdir. Hız büyüklükleri mansap bölgesinden 4 kesit alınarak karşılaştırılmıştır. Buna göre kanalın mansap kısmında bulunan eşiklerin, seçilen memba kotuna göre hız büyüklüğünü azalttığını belirtmişlerdir. Böylece, eşik kullanımlarının kanal tabanını yüksek akış hızlarından kaynaklanan kavitasyon ve oyulma hasarlarından koruyabileceği sonucuna varmışlardır.

Kherbache ve diğ. (2017) yaptığı çalışmada, basamaklı bir dolusavak üzerindeki su akışının sayısal bir çalışmasını gerçekleştirdiler. Bu akış, $k-\epsilon$ türbülans modeliyle ilişkili RANS denklemi ile tanımlanmıştır. Bu denklemler, sonlu hacim şemasına ve yapılandırılmamış bir ağı dayalı ticari bir yazılım kullanılarak çözülmüştür. Hava-su akışı, VOF ve çok fazlı yöntemler kullanılarak modellenmiştir. Akışın özellikleri, toplam basınç, hız profili vb. dahil olmak üzere incelenmiştir. Bu çalışmada hesaplama alanı dolusavağın tamamını (basamaklı dolusavak, yaklaşma kanalı ve yatay kanalı) içerir. Sayısal çözücü olarak basınç ve hız alanlarını birbirine bağlamak için PISO algoritması kullanılmıştır.

Denklemler Fluent yazılımı kullanılarak çözülmüş ve Gambit programı ile yapılan iki boyutlu dörtgen hücrelerden (65396 hücre ve 66885 düğüm) oluşan yapılandırılmamış bir ağ, karmaşık alana uyacak şekilde uygulanmıştır. Üniform olmayan ağ kullanılmıştır. Çözümlerin doğruluğunu sağlamak için ağ bağımlılık testleri yapılmıştır. Bu amaçla, sayısal simülasyon için altı farklı üniform olmayan (düzensiz) ağ 50540, 55674, 61700, 66885, 102800 ve 245347 kullanılmıştır. Maksimum hız değeri için sonuçlar Çizelge 2.1’de sunulmuştur. 66885’ten 245347’ye kadar bir ızgaranın (grid) iyileştirilmesinin maksimum hız açısından sonuçlar üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı ve bu iki ızgaranın maksimum hızları arasındaki farkın %2,5’ten az olduğu görülmüştür. Hem doğruluk hem de hesaplama süresi göz önüne alındığında, 66885 ızgara hesaplamalar için benimsenmiştir.

Çizelge 2.1 : Kherbach ve diğ. (2017) ağ boyutunun maksimum hıza etkisi.

Mesh (Ağ) Boyutu	V_{max} / ms^{-1}
50540	2.52
55674	2.47
61700	2.43
66885	2.40
102800	2.37
245347	2.34

Aydın ve Karaduman (2018) çalışmalarında 2 boyutlu HAD yöntemini kullanarak kapak altı batık akım durumunda bir platform mansabındaki oyulmaları incelemişlerdir. Sayısal analizin kalibrasyonu için literatürdeki bazı deney ve bağıntı sonuçlarını kullanmışlardır. Maksimum oyulmanın zamana göre üstel olarak değiştiğini ve boyutsuz oyulma-yığılma profilinin ise üçüncü derece polinoma uyduğunu tespit etmişlerdir. Deneysel verilere göre sayısal verilerde yaklaşık %5-10 sapma tespit etmişlerdir.

Aydın ve diğ. (2018) EKŞ’ler ile ilgili olarak sayısal bir çalışma yapmışlardır. Burada memba ve mansap noktalarındaki akım hızları, su derinlikleri ve enerji yükseklikleri, sayısal simülasyonlardan elde edilmiştir. Sayısal simülasyonlar RNG (Renormalized Group) türbülans model ile üç boyutlu olarak FLOW-3D yazılımı kullanılarak yürütülmüştür. Çözümler, yaklaşık olarak 5 saniye sonunda yakınsamasına rağmen tam kararlı akım hali elde etmek için 20 saniye boyunca devam ettirilmiştir. Sayısal sonuçların ağ hassasiyetini azaltmak için yaklaşık 1.250.000 yapısal hücre kullanılarak mesh olayı tamamlanmıştır. Elde edilen sayısal sonuçlara göre, dolusavak şüt kanalları üzerine

yerleştirilen enerji kırııcıların, akımın enerjisini yaklaşık olarak %70 oranında sönümlediğini belirtmişlerdir.

Brown ve Crowley (2018) Tip IX şüt savaklarında 50 yılı aşkın süredir çeşitli deneysel prosedürlere bağılı kalarak EKB tasarımı ile ilgili çalışıldığını belirtmişlerdir. Ancak yaptıkları bu çalışmada mevcut tasarım prosedürünü dikkate alarak tasarım metodolojisini ve fiziksel model temelini incelemek için Monte Carlo Simülasyonu ve HAD uygulamasını kullanmışlardır. Başlangıçta, kabul edilebilir tasarım yelpazesini keşfetmek amacıyla tasarım prosedürü bir Monte Carlo simülasyonu ile incelenmiştir. Daha sonra, CFD kullanılarak, mevcut tasarım prosedürü için kilit bir temel olan tam ölçekli prototip (Gila, Arizona ABD’de bulunan) fiziksel model sonuçları yeniden oluşturulmuştur. Çalışma, geniş bir yelpazede kabul edilebilir şüt tasarımlarının, mevcut tasarım prosedürünün izlenmesinden kaynaklanabileceğini, ancak bunlardan bazılarının diğerlerinden daha iyi olabileceğini ortaya koydu. Çalışma aynı zamanda mevcut tasarım metodolojisini revize etmek için ihtiyaç duyulan gelecekteki araştırma çabalarını da özetlemektedir.

Aydın ve diğ. (2019) tarafından yapılan çalışmada HAD yöntemini kullanılarak, dört faklı savak yan duvar açısına sahip trapez labirent savakların farklı hidrolik koşullar altında analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Burada incelenen modelin üç farklı savak yan duvar açısı ile 3 boyutlu sayısal modeli hazırlanmış ve uygun sınır şartları altında FLOW-3D yazılımı kullanılarak sayısal analizler yapılmıştır. HAD analizlerinde türbülanslı akım modeli ve VOF metodu kullanılmıştır. HAD tekniğı yardımıyla labirent savakların farklı akım koşullarındaki su yüzü ve hız profilleri elde edilerek sonuçlar doğrultusunda savağın hidrodinamik davranışı ortaya konulmuştur.

Ghaderi ve diğ. (2020), yaptıkları çalışma ile yamuk kesitli üçgen labirent savakların geometrik parametrelerinin deşarj katsayısı, enerji kaybı ve mansap akış rejimi üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, labirent savak pozisyonunda iki farklı yönlenme dikkate alınarak deneysel ve sayısal araştırmalar yapmışlardır. Serbest akış yüzeyini simüle etmek için, akışkan hacmi VOF yöntemi ve RNG $k-\epsilon$ türbülans modeli FLOW-3D yazılımı aracılığıyla kullanılmıştır. Labirent savak üzerindeki (her iki yönde de) kararlı durum akışı simüle edilmiş ve deşarj katsayısı deneysel verilerle doğrulanmıştır. Sonuçlar, sayısal modelin deneysel sonuçlarla uyumlu olduğunu ve yüksek H/P değeri için düşen su jetlerinin çarpışması nedeniyle, yan duvar açısını azaltarak deşarj katsayısını azalttığını da vurgulamışlardır (H : hidrolik yük, P : savak yüksekliğı). Yamuk kesitli üçgen labirent

savakların üzerinden geçen akımın hidroliği, düşük deşarjda serbest akış koşullarına ve yüksek deşarjda batık akış koşullarına sahip olduğu belirtilmiştir. Yine yamuk kesitli üçgen labirent savakların, memba akışı nap yüklerinin çarpışması ve napların arkasında oluşturulan havuzdaki akım döngüsünün maksimum enerji miktarını dağıttığı belirtilmiştir. Ayrıca, yan duvar açısındaki ve savak yüksekliğindeki bir artışın, enerjinin azalmasına yol açacağı ifade edilmiştir.

Bu tez çalışmasında da hidrolik akışlar için literatürde önde gelen bir HAD yazılımı olan ANSYS-Fluent çözücüsü kullanılmıştır. Bunun için İnönü Üniversitesi bünyesinde yer alan ANSYS-Fluent Server ağı kullanılmıştır. Blok geometrileri 3 boyutlu olarak Solidworks programı aracılığıyla çizilmiş ve step dosyası olarak ANSYS-Fluent çözücüsüne tanıtılmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Enerji Kırıcı Şütlere Ait Tasarım Kriterleri

EKŞ'ler ile ilgili birçok kaynak literatürde mevcuttur. Günümüzde literatürde daha çok atıfta bulunulan ve kapsamlı bir şekilde hazırlanan kaynak, Islah Bürosunun Enerji Kırıcı Havuz ve Enerji Kırıcıların Hidrolik Tasarımı (USBR, 1984) adlı kaynağıdır. Bu kaynaktaki standartlara göre sahadaki bazı uygulamalar Şekil 3.1'de verildiği gibidir. Buna göre, memba tarafından gelen akım aralıklı dizilmiş EKB'lerin birinci sırasına yönlendirilir. Birinci sıranın hemen mansabındaki ikinci sıraya geçen akım burada birinci sıra bloğun boşluk kısmına denk gelecek şekilde kaydırılmış blok sırası ile tekrar bölünür. Akım bu şekilde şütün mansabına varana kadar aynı şekilde şaşırtmalı dizilmiş blok sıralarıyla karşılaşır. Burada akım şüt kanalının uzunluğu boyunca bloktan bloğa dağıtılarak mansap kısmına kadar devam eder. Bu dağıtma olayı enerjiyi kırdığı için mansapta kuyruk suyu yükselmesine bakılmaksızın suyun şütten çıkış hızı düşüktür. Dolayısıyla enerji kırıcı şütler belirli bir kuyruk suyu yükselmesi gerektirmediğinden, kuyruk suyu yükselmesinin farklılık gösterdiği uygun bir potansiyel enerji kırıcı seçeneği olmuşlardır. Faydalı bir enerji kırıcı şüt için aslında beş ya da altı sıra blok dizilimi sağlanarak havaya doymuş bir akım da elde edilebilir. Gelen akım hava ile aşırı doyurulursa, sadece birkaç sıra EKB doymuş su akımı sağlayacak şekilde akım enerjisini sönmüler. Yani gelen akımın içindeki hava oranı yetersizse, sadece birkaç sıra enerji kırıcı blok akımı havalandırır. Böylece akım havaya doymuş olur. Burada enerji kırıcı şütlerin birtakım avantajları vardır. Bunları şu şekilde sıralayabiliriz.

- Tasarımları kuyruk suyu yüksekliğinden veya mansap suyu anahtar eğrisinden bağımsızdır. Gelecekte oluşması öngörülen blokların aşınma durumu tasarıma dahil edilebilir.
- Basit ve kullanımı kolay bir tasarım seçeneği sunarlar.
- İyi bir tasarımla çok uzun süre etkili bir performans göstermeleri sağlanır.
- Suyu herhangi bir enerji harcamadan doğal yoldan havalandırmaları önemli özelliklerindendir.
- Bunların performansına bakıldığında, su içerisindeki katı madde ya da çöpler akım her bir blok sırasına çarparken blok önünde toplanır, membadan gelen ikinci bir akım olayı ile tekrar katı madde ve çöpler o bölgeden uzaklaşır.

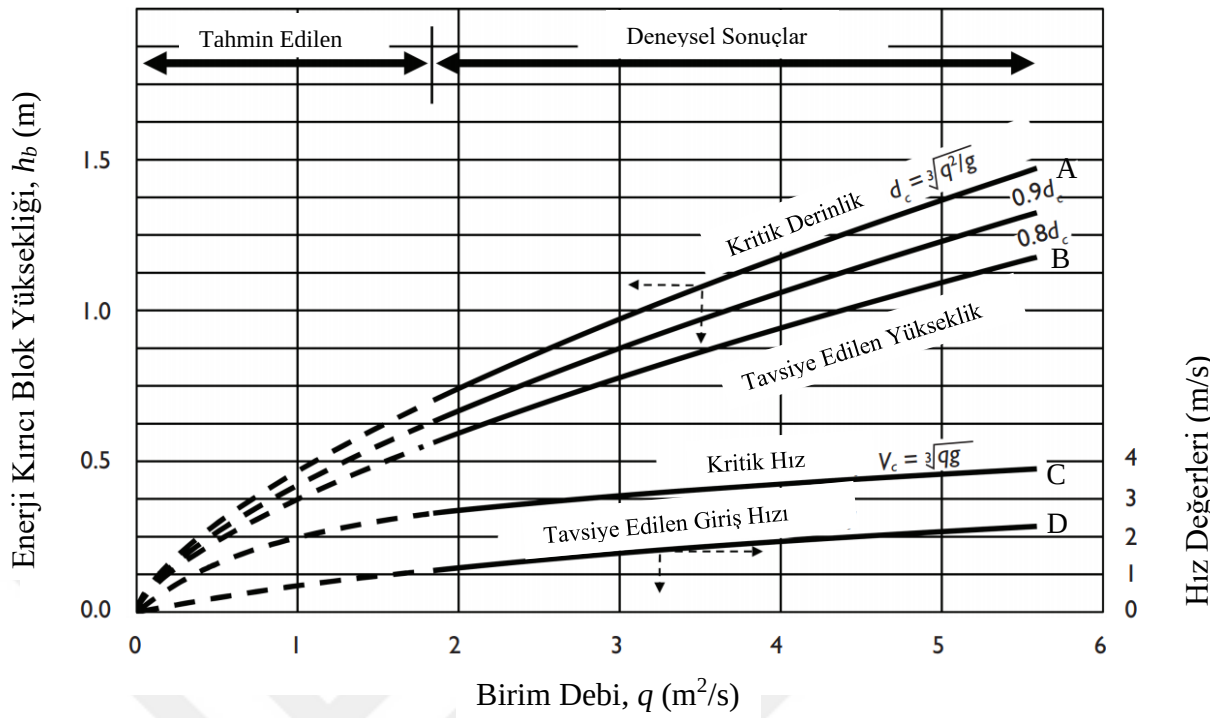


Şekil 3.1 : Şüt kanalı uygulamalarında akımın hareketi (Baffled spillway, Maple River Dam Overflow Chute. Erişim: 27 Mayıs 2021).

Genel olarak EKŞ'lerin dezavantajlarını ise şu şekilde sıralayabiliriz (FEMA, 2010).

- Model olarak test edilmedikçe her bir enerji kırıcı birim şüt genişliği için 1.70-2.27 m³/s debi aralığında sınırlıdır. Bu aralık dışında kalan durumlarda, yani yüksek debi değerleri için çok geniş yapı tasarımlarına yol açabilir.
- Yaklaşım kanalındaki akımın kritik altı akım olması gerekir. Ancak kritik altı akımı elde etmek için bazen memba kısmında ek bir enerji kırıcı yapı inşa edilmesi gerekebilir.
- Akışı kontrol edebilmek için en az dört sıra enerji kırıcı blok dizilimi gerekir.
- Su EKY uzunluğu boyunca, erozyondan korumayı sağlayan yan duvarların üzerinden sıçrayabilir.
- Tipik olarak 2:1 (yatayda 2 düşeyde 1) eğimle inşa edilirler.

Şüt kanalına yaklaşan akım, yanal olarak ve kritik hızın altında bir hızla sönümlenmelidir (Peterka, 1984). Daha çok uyulması gereken hız değerleri Şekil 3.2'de verilmiştir.

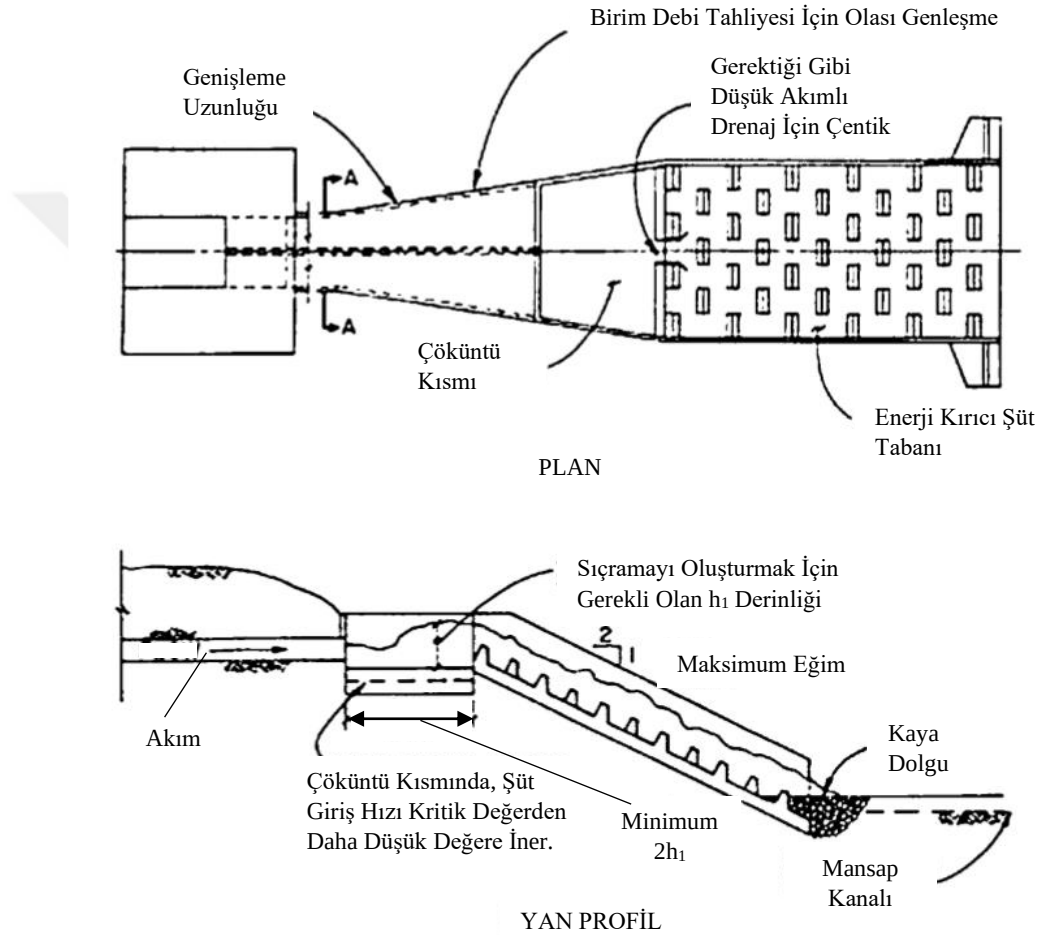


Şekil 3.2 : Akımın yaklaşım kanalında kabul edilebilir derinlik ve hız değerleri (USBR, 1987'den değiştirilmiştir).

Buna göre birim genişlik için $1.98 \text{ m}^3/\text{s}$ 'ye kadar olan birim debilerin yaklaşım hızı 2.44 m/s 'den az olamaz. Memba kısmındaki çöküntü havuzu daha yüksek hızları azaltabilir. Bir çöküntü havuzu temel olarak yaklaşma kanalından daha alçakta olan bir ani genişlemedir veya EKŞ'nin tersine suyu çevirir ve suyu yavaşlatır diyebiliriz. Girişteki akım kritiküstü bir akım ise bu çöküntü havuzu akımı kritik hızın altına düşürmek için bir EKH görevi görür. Kentsel Drenaj ve Taşkın Kontrol Bölgesi Drenaj Kriterleri Kılavuzu (UDFCD) (2008) teknik el kitabında çok yüksek hızları daha düşük seviyeye getirmek amaçlı çöküntü havuzu tasarım kriterleri yer almaktadır. Bu kriterler Şekil 3.3'te görüldüğü gibidir. Akım kritik hıza yakın ya da daha yüksek bir hızla EKŞ kanalına girdiğinde, ilk EKB sırası ile karşılaşır, yaklaşma alanında erozyon potansiyelini arttıran ve aşırı bir püskürtmeye uğrayan akım dikey bir sıçramaya uğrar (USBR, 1987). Yüksek yaklaşım hızları, enerji kırılması çok az olacak şekilde birinci ve ikinci blok sırası üzerinden atlayıp geçmesine neden olabilir.

Yapılan deneysel çalışmalarda yaklaşık olarak yedi sıra enerji kırıcı blok ile suyun havalandırma bakımından doygun hale gelebileceği bildirilmiştir. Yüksek oranda havalandırılmış suyun kanal dışına sıçraması nedeniyle şütteki erozyonu kontrol etmek

için kanal duvarları boyunca kaya dolgu yapılması tavsiye edilmiştir. EKŞ'ler genelde 2:1 eğimle inşa edilir veya şüt kanalının mansap kısmında tersine daha düz bir şekilde kanal uzatılabilir. 2:1 eğimden daha dik inşa edilecek yapılar önce model testlerine tabi tutulmalıdır. Çıkış kanalı altındaki düz yüzeyin derinliği çıkış kanalındaki oyulma ya da aşınmalara dayanıklı olarak inşa edilir. Şüt kanalı tahmini oyulma ve aşınmadan kaynaklanan hasarı önleyecek şekilde derinliği ayarlanmalıdır. Çıkış kanalı boyunca uzun süre oyulma ve aşınma potansiyelinin varlığı EKŞ'lerin tasarımında dikkate alınmalıdır.



Şekil 3.3 : Çok yüksek hızları düşük seviyeye getirmek için tasarlanan çöküntü havuzu şekli (UDFCD, 2008'den değiştirilmiştir).

Diğer bir husus ise EKŞ tasarımında birim debi değeridir. Burada birim debi deşarj olacak debinin kanal genişliğine bölünmesi ile elde edilir. Tipik bir EKŞ için tasarım debisi birim genişlik için $0.28-2.27 \text{ m}^3/\text{s}$ aralığında değişir. Peterka (1984) $4.25 \text{ m}^2/\text{s}$ birim debi değerine kadar etkili EKŞ'ler tasarlamıştır. USACE $25.49 \text{ m}^3/\text{s}$ debiye kadar enerjiyi düzgün bir şekilde kıran ve birim debi değeri $5.1 \text{ m}^2/\text{s}$ değeri için etkili özel tasarlanmış

EKŞ model testleri gerçekleştirmiştir (USACE, 1990). 2.27 m³/s'lik tasarım debisi veya 1:2 eğim ya da daha dik bir eğimli tasarım yapılacaksa öncelikle bunların fiziksel model deneylerinin yapılması önerilmiştir (USBR, 1987).

EKŞ tasarımında ilk dikkat edilmesi gereken EKŞ için maksimum tasarım debisini ve birim debisini belirlemektir. Tasarım için birim debi değeri Denklem 3.1 yardımıyla bulunur.

$$q=Q/W \quad (3.1)$$

Burada Q (m³/s); kanala verilecek toplam debi değerini, W (m); EKŞ'nin giriş genişliğini ve q (m²/s); birim debi değerini ifade etmektedir. USBR'nin önerilerinin temel alındığı model çalışmalar q 'nın değeri ne kadar düşük olursa, kanal çıkışındaki akış koşullarının daha az şiddetli olduğunu ve aşındırma potansiyelinin daha az olduğunu göstermiştir. Bu gözlemlerle bağlantılı olarak, USBR (1978) aşağıdaki genel yönergeleri sıralar (Peterka, 1978);

- $q \leq 5.6$ m²/s: kanal tabanında mansap kısmında aşınma ve oyulma havuzu şeklindeki oluşumlar için tolere edilebilen üst sınır değeridir.
- $q \leq 3.3$ m²/s: ölçülebilir fakat daha az şiddetli mansap oyulmaları ile sonuçlanan durumları belirtir.
- $q \leq 1.9$ m²/s: mansap kısmında normal akım koşulları ve minimum oyulma potansiyeli için sınır değeridir.

EKŞ'lerin mansap topuğunda kısmi oyulmalar meydana gelmesi yaygın olarak görülmektedir. USBR'nin yaptığı tasarımda şüt kanalının, mansaptaki alıcı kanalın altına kadar uzatılması gerektiği belirtilmiştir. Çünkü burada bir oyulmanın meydana gelebileceğini belirtmiş ve bu kısımda toprak veya taş dolgu (anroşman) yapılmasının gerekli olduğu vurgulanmıştır. Mansaptaki oyulma ile açığa çıkacak olan ilave bloklarla birleşim sağlandığında, bir aşınma engelleyici havuz meydana gelerek şüt kanalı sonundaki aşırı hızları da engellemiş olur. Dolayısıyla belirlenmiş olan tasarım debisiyle mansap kısmında olası bir aşınma ve oyulmanın yapıya zarar vermemesi için şüt kanalının, alıcı kanalın altına uzatılması gerektiği belirtilmiştir. Bu nedenle şüt kanalının dibine gömülmüş en az bir sıra ilave blok sırası önerilmiştir (Peterka, 1978).

Bir EKŞ kanalının genişliği memba ve mansap kısmının genişliğine de bağlı olabilir. Peterka (1978) tarafından yapılan büyük model çalışmaları sonucu, büyük birim debinin geçtiği bir kanalın, olası bir taşkın durumunda gelmesi beklenen maksimum debinin en

fazla üçte ikisini karşılayabildiği belirtilmiştir. Bu durum yine de iyi bir enerji sönümleme değerine ulaşıldığının kanıtıdır. Ayrıca dikkat edilmesi gereken diğer bir husus, şüt kanalının yan duvar yüksekliğinin beklenen maksimum debiyi sınırlayacak şekilde yüksekliğinin ayarlanmasıdır.

Şüt kanallarına giriş (yaklaşım) hızı mümkün olduğunca düşük olmalıdır. Debi değeri 1.95 m³/s'ye kadar olan akımlar için Şekil 3.2'deki D eğrisi kullanılabilir. Suyun kanala yaklaşım hızı için aşağıda verilen Denklem 3.2 kullanılabilir (USBR, 1987).

$$V_1 = \sqrt[3]{gq} - 5 \quad (3.2)$$

Burada V_1 (ft/s=0.3048 m/s); akımın kanala yaklaşım hızını, g (32.2 ft/s²); yerçekimi ivmesini ve q (ft³/s/ft, 1ft³/s=0.028 m³/s); birim tasarım debisini temsil etmektedir. Kritik hıza yakın ya da daha yüksek hızlara sahip akım EKB'lerin ilk sırasına çarptığında akım yukarı doğru sıçrar. EKŞ kanalına giren akım koşulları tatmin edici bir enerji sönümleme ve yapının göstereceği performans için çok önemlidir. Denklem 3.3'te uyulması gereken kritik hız değeri verilmiştir (USBR, 1987).

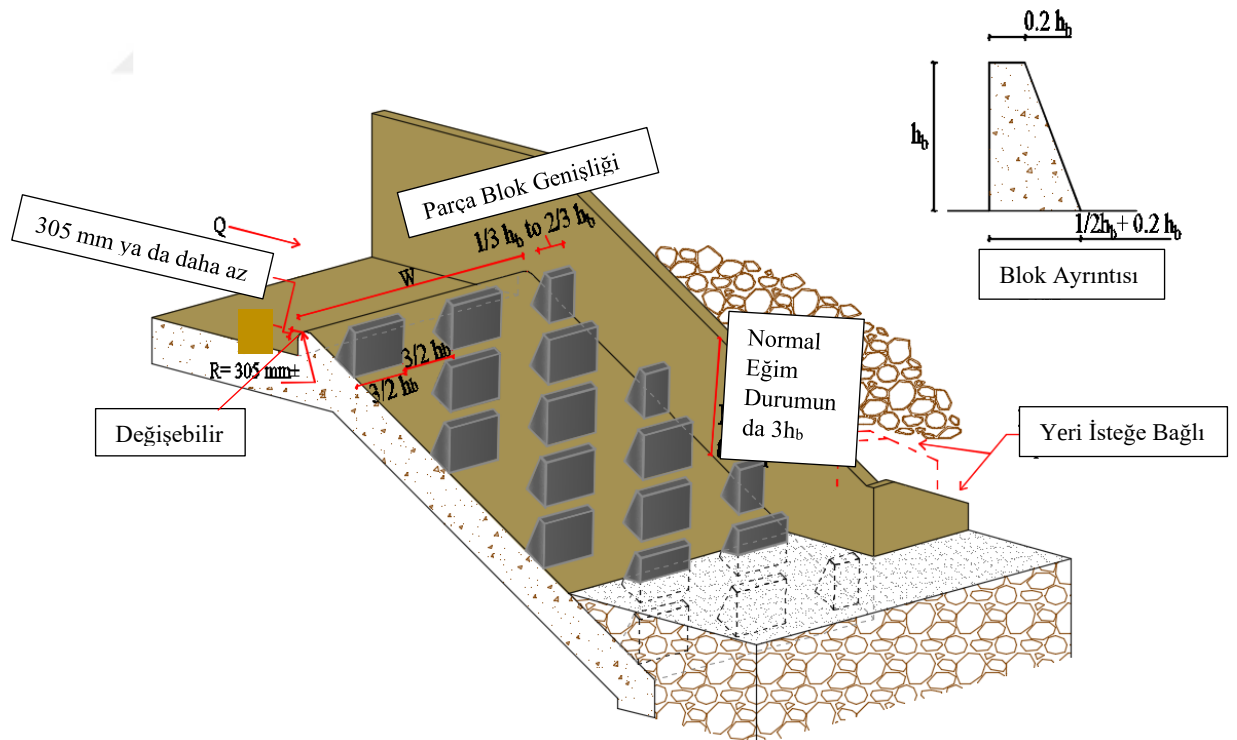
$$V_c = \sqrt[3]{gq} \quad (3.3)$$

Burada, V_c (m/s); kritik hızı, g (m/s²); yerçekimi ivmesini ve q (m²/s); birim tasarım debisini temsil etmektedir. İlk blok sırasının konumunu optimum olarak belirlemek için fiziksel model çalışmaları yapılmalıdır. Ancak yapılan çalışmalarda ilk blok sırasının kret yüksekliğinin en fazla 12 inch (30.48 cm) aşağısına yerleştirilebileceği belirtilmektedir. Bir sonraki blok sırası, iki blok sırası arası bir blok boşluk kalacak şekilde kademeli olarak inşa edilir. Ayrıca memba kısmında blokların durgun su yüzü profilini etkileyip etkilemediğine de bakılmalıdır. EKB yüksekliği (H), kritik derinliğin (d_c) 0.8 ile 0.9 katı arasında olmalıdır. Denklem 3.4'te kritik derinlik formülü verilmiştir (USBR, 1987).

$$d_c = \sqrt[3]{q^2/g} \quad (3.4)$$

Burada, d_c (m); kritik derinliği, g (m/s²); yerçekimi ivmesini ve q (m²/s); birim tasarım debisini temsil etmektedir. Ancak yüksekliğin yanı sıra, blok boyutları esnektir ve yapısal stabilitenin korunması koşuluyla değişebilir (Hayes, 1978). Yine Şekil 3.2'de de A eğrisinden blok yüksekliği belirlenebilir. Blok yüksekliğinin ve iki blok arası mesafenin eşit ve 1.5H kadar olması önerilmiştir. Ancak bu değerlerin H değerinden de az olmaması gerekir. Diğer boyutlar kritik olmamakla birlikte Şekil 3.4'te tavsiye edilen kriterler sunulmuştur (USBR, 1987). İki blok sırası ara mesafe H kadar olmalıdır. Şüt kanalının

eğimi için 2:1 (yatay:dikey) ya da daha düz olması önerilmiştir. Ancak kanal uzunluğu boyunca eğim ondalık formda olmak üzere, řařırtmalđ yerleştirilmiş olan blok sıraları ara mesafesi H/S ye eşit olmalıdır. Burada; S şt kanalının eğimini ifade eder. İlk blok sırası tepe yüksekliğinin en fazla 305 mm (12 in) altına yerleştirilmelidir. Bloklar tipik olarak memba tarafa bakan kısımları şt tabanına dik olarak inşa edilir. Dik yüzeyleri olan bu bloklar daha fazla sıçrama ve daha az oyulmaya neden olurlar. Su, řařırtmalđ bloklar arasından geçerken ilk aşamada düzenli bir akım olmaz. Ancak düzenli bir akım gözlemlemek için en az 4 blok sırasının olması gerekir. Aşınmaya karşı koruma sağlamak için en az bir sıra blok mansap kısmının altına gömülmelidir. Ayrıca gerektiğinde ek blok sıraları gömülebilir. şt duvarları blok yüksekliklerinin en az 3 katđ alınmalıdır. Bu yükseklik maksimum debiyi ve büyük sıçramaları karşılar. şt duvarının tüm sıçramaları karşılayacak şekilde inşa edilmesine gerek yoktur. şüt kanalı maksimum debiyi geçirecek yükseklikten daha az bir yükseklikte tasarlanmışsa buna göre duvar yüksekliği arttırılabilir. Akışın mansap kısmında erozyonu önlemek için dalgakıranlar (riprap) uygun boyutlarda tasarlanmalıdır (USBR, 1977). şekil 3.4'te USBR (1977) tarafından belirtilen kriterlere uygun şematik EKş görüntüsü yer almaktadır.



şekil 3.4 : USBR tarafından oluşturulan EKş şematik gösterimi (USBR, 1977'den değiştirilmiştir).

Ayrıca USBR (1977) tarafından sunulan tüm bu tasarım kriterleri için, sediment birikimi ve düzenli bakım durumu da dikkate alınmalıdır. Çünkü bu tür yapılarda suyun kanala giriş hızı çok düşük olduğu için katı madde birikmesine sebep olabilir. Bu EKY'ler için istenmeyen bir durumdur. Hatta bunu engellemek için kanal girişine yakın bir drenaj kanalı yapılarak suyun kanala girişinden önce kanala katı madde girişi engellenmiş olur.

EKŞ'ye akım girişi için çeşitli kriterlere dikkat edilmelidir. Memba tarafından kanala suyun uygun bir giriş hızı kazanabilmesi ve sıçramayı engellemek için çeşitli kontrol sistemleri tasarlanmıştır. Bunları; eşik kontrollü giriş, kontrol dişi ile giriş ve kontrolsüz giriş şeklinde sıralayabiliriz (Peterka, 1984).

3.1.1 Eşik kontrollü ile giriş

Suyun şüt kanalına girişinde oyulmayı en aza indirmek ve akım hızını azaltmak için kanal girişinden hemen önce eşik teşkil edilir. Bu eşik suyun ilk blok sırasına çarptıktan sonra yukarıya doğru geri tepmesinde kontrollü bir su yüzeyi sağlar. Giriş kısmında katı madde birikmesini engellemek için ise memba kısmında bir yarık oluşturulabilir. İyi bir drenaj işlemi için bu gereklidir. Aksi taktirde biriken katı madde üzerinden hızla geçen akım EKB'lere çarpmadan mansap tarafına geçmeye çalışacaktır. Giriş uzunluğu Şekil 3.5-a'da gösterildiği gibi en az $2h_1$ olmalıdır. Giriş zemini üzerindeki gerekli eşik yüksekliği, giriş ve yukarı akış kanalı arasındaki enerji dengesinden belirlenebilir. Burada h_1 giriş uzunluğuna varmadan önceki su derinliğidir (Peterka, 1984).

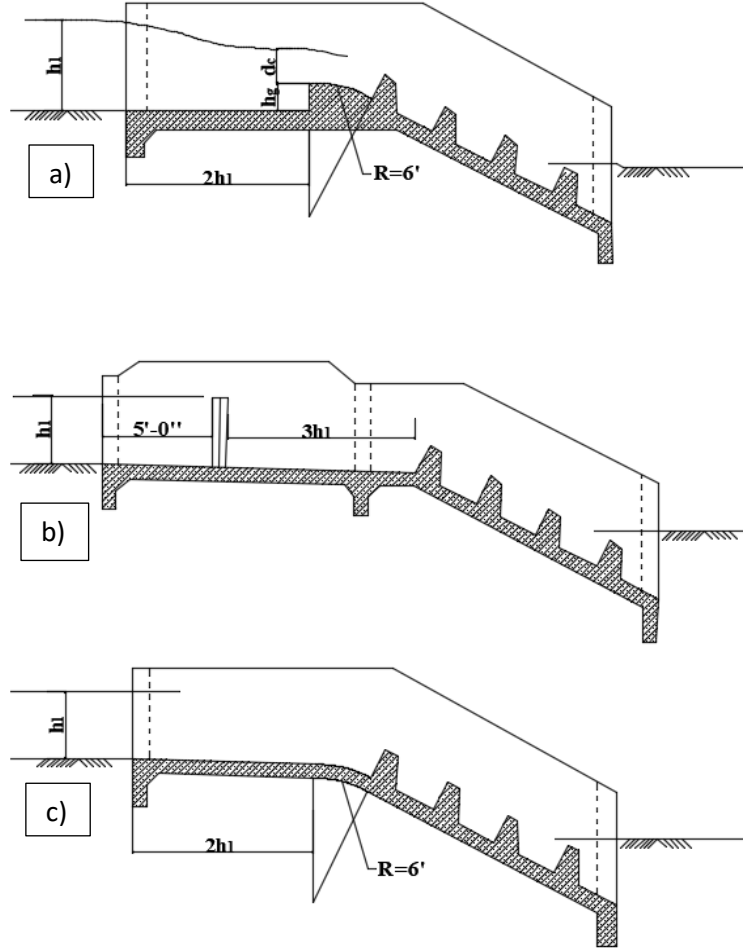
3.1.2 Kontrol dişi ile giriş

Şüt kanalına girişte su derinliğini kontrol etmek için genelde kullanılır. Kontrol dişi memba kısmında normal su derinliği ve su hızı sağlamak için tasarlanmışsa da, girişte akımın kendiliğinden hızlanmasına ve sıçramaya neden olur. Şekil 3.5-b'den de görüldüğü gibi dikdörtgen olan giriş bölümü kontrol dişinden 1.5 m daha geriden başlamalıdır. Ayrıca kontrol dişi ile eşik arasındaki mesafe, akımın tüm kanala daha iyi yayılması için memba tarafındaki su derinliğinin 3 katı olmalıdır (Peterka, 1984).

3.1.3 Kontrolsüz giriş

Akımın şüt kanalına girişinin en basit hali budur. Memba kısmında akım kontrolünün gerekmediği ve yüksek hızlara karşı erozyon probleminin en az olduğu ve zeminin daha

kararlı olduğu yerlerde tercih edilir. Şekil 3.5-c’den de görüldüğü gibi akım birinci sıradaki enerji kırıcı bloklara çarptığı zaman sıçramayı engellemek ya da en aza indirmek için kanal tabanına ters bir eğrilik verilebilir. Akımın az olduğu veya bir miktar sıçramaya izin verildiği durumda bu eğrilik verilmeyebilir (Peterka, 1987).



Şekil 3.5 : Akımın kanala giriş tipleri (a) eşik kontrolü ile giriş (b) kontrol dişi ile giriş (c) kontrolsüz giriş (Peterka, 1984’ten değiştirilmiştir).

Bu tez kapsamında kontrolsüz giriş şartlarına uygun olarak enerji sönümleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan kanal ve blok ölçüleri Peterka (1984) tarafından belirlenen tasarım kriterlerine uygun seçilmiştir. Blok yüksekliği kritik derinliğin 0.9 katı ($0.9d_c$) alınarak belirlenmiştir. İki blok sırası ara mesafe blok yüksekliği olan H değeri olarak belirlenmiştir. Tüm blokların yüksekliği birbirine eşit ve 5 cm olacak şekilde deneyler yapılmıştır. Blokların memba kısma bakan yüzeyleri şüt kanalına dik olarak yerleştirilmiştir. Kanal iç genişliği 40 cm olduğu için parça blok kullanımına gerek kalmamıştır. Bu durum literatürdeki tasarım kriterlerine uygundur. Kanal yan duvar

yüksekliği, blok yüksekliğinin 12 katı kadar alınarak yüksek debi değeri ve şüt açılarında, akımın kanal dışına sıçraması tamamen engellenmiştir. Yine belirlenen tasarım debisi literatüre uygun aralıkta seçilmiştir. 6 farklı debi değeri (5, 10, 15, 20, 25, 30 L/s), 6 farklı blok tipi ve bloksuz durum için deneyler gerçekleştirilmiştir. Şüt kanalı açısı için 6 farklı değer ($\alpha=10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$ ve 56°) dikkate alınmıştır. En yüksek açı değeri 4 m uzunluğunda kanalın, erişebileceği maksimum yükseklik değeri dikkate alınarak belirlenmiştir. Akımın şüt kanalına girmeden önceki kanal uzunluğu giriş su derinliğinin 2 katı ($2h_1$) olarak alınmıştır. Yine kanal girişinde bir ogee profili oluşturularak akımın şüt kanalına girişi literatüre uygun olarak sağlanmıştır. Toplam 252 adet deney sadece blokların enerji sönümleme değerlerini tespit etmek için yapılmıştır. Memba kısmında şüt kanalı girişinde akım hızı ve su derinliği değerleri ölçülmüştür. Aynı şekilde şüt kanalı mansabındaki kanal içinde, hidrolik sıçrama görülmeden önce hız ve derinlik değerleri ölçülmüştür. Burada enerji sönümleme durumu, ölçülen bu değerlere göre hesaplanmıştır. Memba kısmında şüt kanalı açısına bağlı olarak potansiyel enerji miktarı çok yüksek çıkmış ve rölatif enerji sönümleme durumu dikkate alınmıştır. Memba ve mansap kısımlarındaki enerji sönümleme değerlerinin farkı alınarak memba kısmındaki enerji sönümlemeye bölünmüş ve bu şekilde rölatif enerji sönümleme değerleri elde edilmiştir.

3.2 Enerji Kırıcı Şütlerde Hidrolik Sıçrama ve Enerji Sönümleme

Doğal bir mekanizmaya sahip hidrolik sıçrama, bir kanaldan serbest halde akan suyun enerjisini kırmak ve kanal mansabındaki oyulmayı engellemek için suni olarak da gerçekleştirilebilir. Açık kanal içinde herhangi bir engel olmadan meydana gelen hidrolik sıçrama uzunluğu ekonomik açıdan daha azdır. Akım kanalının memba kısmında yüksek aşındırıcı etkiye sahip bir akış oyulma potansiyeline sahiptir, ancak beton bir eşik ile bu potansiyel sınırlandırılır. Hidrolik sıçramaya sahip EKH'ler birbirinden farklı akım koşulları için bu sıçramayı belli bir yerde konumlandırmak, hidrolik sıçramayı oluşturmak ve ihtiva etmek için kullanılır. EKH'ler kritik hızdan daha hızlı akan suyu türbülans meydana getirerek veya içsel sürtünme kuvvetlerinin etkisiyle enerjinin sönümlendiği bir hidrolik sıçramaya zorlar. Eğimi dik olan bir kanaldaki kritiküstü akış daha az eğimle karşılaştığında kritik akıştan kritikaltı akışa geçmeye zorlanır ve hidrolik sıçrama meydana gelir. Hidrolik sıçrama gerçekleştiren EKH'ler tipik olarak dik bir eğimin altındaki yatay ve kademeli olarak eğimli yüzeylere yerleştirilirler. EKH'nin taban kotu farklı debi değerleri için sıçrama yüksekliği ve kuyruk suyu yüksekliğiyle uyumlu olarak seçilir. Şüt

Şekil 3.6’da klasik dolusavak hidrolik sıçrama şeması yer almaktadır. Hidrolik sıçramada akım derinliği ile enerji arasında kuvvetli bir ilişki vardır. Burada sıçrama şekli ve akım karakteristikleri Fr sayısı ile ifade edilir. Bu sayı kinetik akış faktörü (V_1^2/gh_1) ve kanalın memba kısmındaki su derinliği (h_1) ile ilişkilidir. Bundan dolayı Denklem 3.5’te Fr sayısı:

Klasik bir hidrolik sıçramanın memba ve mansabındaki akım derinlikleri sırasıyla h_1 ve h_2 , klasik *Belanger* denklemi ile geleneksel olarak, dikdörtgen bir kanaldaki kuvvet-momentum dengesine dayanan ve taban kesme kuvvetlerini ihmal eden Denklem 3.6 ile ilişkilidir.

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right] \quad (3.6)$$

Hager ve diğ. (1989), aşağıdaki denklemleri önermek için taban kesme kuvvetlerini temsil eden parametreleri ilişkilendirerek bir dizi deneyler yapmıştır.

$$\left(\frac{h_2}{h_1} \right)_s = H_0 \left[1 - 3.25 \left(\frac{h_1}{b} \right) \cdot \exp \left(\frac{F_1}{7} \right) \cdot \log (R_1)^{-3} \right] \quad (3.7)$$

$$H_0 = \left(\frac{h_2}{h_1} \right)_0 \left[1 - 0.7 (\log R_1)^{-2.5} \cdot \exp \left(\frac{F_1}{8} \right) \right] \quad (3.8)$$

Burada $\left(\frac{h_2}{h_1} \right)_s$ kesme kuvveti için, eşlenik derinlik oranı hesabı yaparken, eğer $\left(\frac{h_2}{h_1} \right)_0$ kesme kuvvetini hesaba katmazsak eşlenik derinlik oranı, Denklem 3.6'daki gibi olur.

Girişteki Re sayısı :

$$R_1 = Q/b\vartheta \quad (3.9)$$

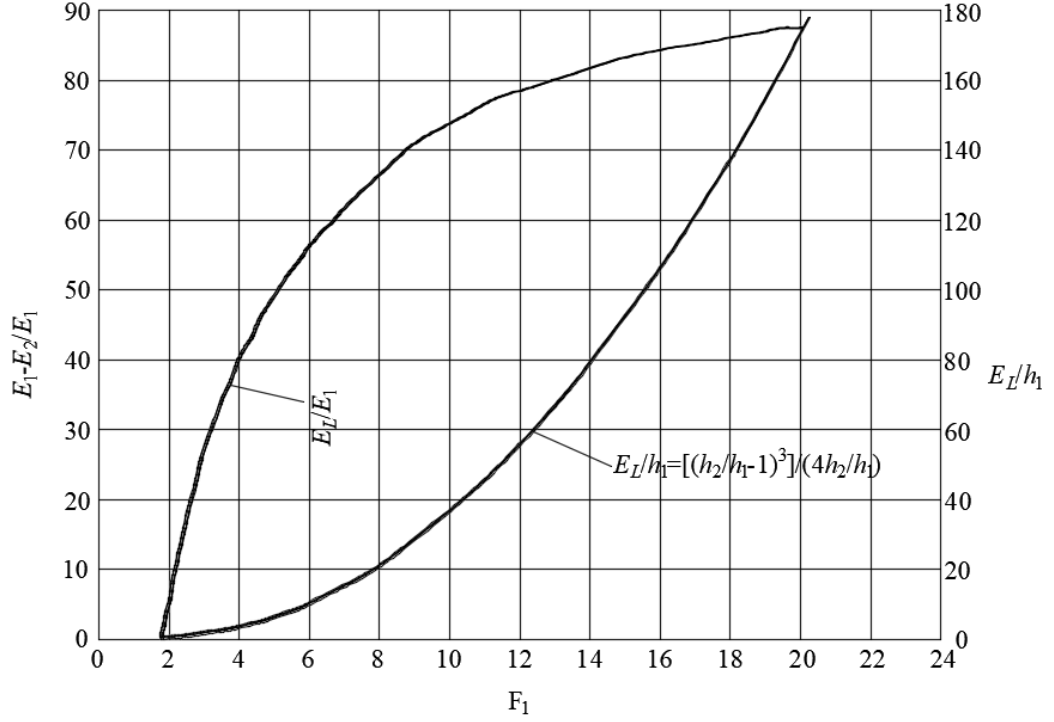
şeklindedir. Burada; Q debiyi, b kanal genişliğini ve ϑ kinematik viskoziteyi temsil etmektedir. $F_1 < 10$ ve $h_1/b < 0.1$ sağlanması durumunda, Denklem 3.6 ve 3.8 ile hesaplanan eşlenik derinlikleri arasındaki varyasyonun, birim genişlik başına debi değerinin $0.1 \text{ m}^2/\text{s}$ 'den daha büyük olduğunda önemsiz olduğunu ifade etmişlerdir (Hager ve diğ, 1989). Peterka (1978), USBR laboratuvarında hidrolik sıçramalardaki enerji kaybı ölçümlerini analiz etmiş ve hidrolik sıçrama öncesindeki F_1 'i referans alarak E_L/E_1 enerji kaybını gösteren bir grafik geliştirmişlerdir. Şekil 3.7'de bu grafik yer almaktadır.

Sıçrama sırasında enerji sönümleme hesabı, sönümlenebilecek enerjinin saptanması bakımından önemlidir. Eğimli bir kanal mansabında enerji kaybı bilindiği gibi aşağıda Denklem 3.10'daki gibi hesaplanabilir.

$$E_2 = h_2 + \frac{q^2}{2gh^2} \quad (3.10)$$

Denklem 3.10'da verilen h_2 mansap su derinliği, q kanal genişliğine bağlı olarak birim tasarım debisi ve g yerçekimi ivmesidir. Memba ve mansap noktaları arasındaki enerji sönümleme miktarı E_L Denklem 3.11'deki gibi ifade edilir.

$$E_L = E_1 - E_2 \quad (3.11)$$



Şekil 3.7 : Froude sayısına bağlı olarak özgül enerjinin değişimi (Peterka,1978'den değiştirilmiştir).

Burada; $E_1 = E_d + 1.5d_c$ şeklinde ifade edilir. E_d mansap topuğundan EKŞ tepesine kadar olan yükseklik değeridir ve d_c kritik derinlik Denklem 3.12'deki gibi hesaplanır.

$$d_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad (3.12)$$

EKŞ kanalı boyunca sönmölen enerji miktarı $\Delta E = E_L$ ise rölatif olarak enerji sönmöleme miktarı E_L / E_1 Denklem 3.13'teki gibi yazılır.

$$\frac{E_L}{E_1} = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \quad (3.13)$$

Bu tez kapsamında Denklem 3.5-3.13 aralığındaki denklemler dikkate alınarak enerji sönmöleme miktarları hesaplanmıştır.

3.3 Enerji Kırıcı Şütler İçin Oksijen Transfer Verimi

Su kalitesini belirleyen önemli parametrelerden biri sudaki çözünmüş oksijen miktarıdır. Suyu oksijen kazandırma miktarı ise suyun sıcaklığına, mevcut oksijen muhtevasına ve suyun kirlilik durumuna bağlı olarak değişir. Sıvı ortamın gaz ortam ile karşılaşması durumunda sıvıdan gaza veya gazdan sıvıya gaz molekölü geçişı olur. Bu durum denge

hali meydana gelene kadar devam eder. Denge halinde ise sıvının içerisindeki gaz konsantrasyonu doymuş hale gelmiştir. Suyun kendiliğinden havalandırılmasında Fick kanunu geçerlidir. Buna göre havadan suya doğru bir ara yüzey boyunca bir difüzyon gerçekleşir. Fick kanunu; bir ortamda konsantrasyon farkı varsa akım oluşacağını söyler (Rutherford, 1994). Bu ifade aşağıda verilmiştir.

$$\frac{dm}{dt} = -D_{gaz} A \frac{dC}{dx} \quad (3.14)$$

Burada; dm/dt transfer olan kütlenin birim zamandaki değişimini, D_{gaz} gazın moleküler difüzyon katsayısını, A difüzyonun gerçekleştiği alanı, dC/dx transfer olan gazın konsantrasyonun x doğrultusu boyunca değişimini göstermektedir. Eğer bu denklem sıvı içinde çözünen bir kimyasal için yazılacak olursa (Gulliver ve diğ. 1990):

$$\frac{dm}{dt} = -KA \left(\frac{C_a}{H} - C_w \right) \quad (3.15)$$

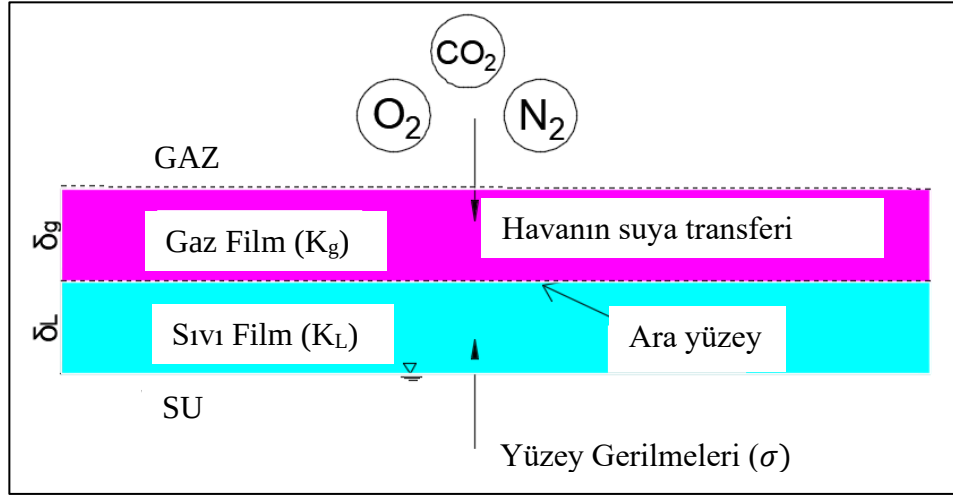
halini alır. Burada; K transferi gerçekleşen gazın kütle transfer katsayısını, C_a gazın havadaki derişimini, H Henry katsayısı, C_w gazın su içinde çözünmüş durumdaki derişimini göstermektedir. C_a değeri atmosfer basıncıyla ve transferi gerçekleşen gazın hava içindeki miktarıyla doğru orantılıdır. Henry katsayısı ise; çözücü, çözünen ve ortam sıcaklığının bir fonksiyonudur. Genelde sıcaklığın artışıyla Henry katsayısı artış gösterir (Reid ve diğ, 1987). Gazın sıvı içindeki doymuşluk yüzdesini veren ifade ise:

$$\frac{C_a}{H} = C_s \quad (3.16)$$

şeklinde yazılabilir. Kütle transfer işlemi gaz ile sıvının temas ettiği ara yüzeyin her iki tarafında bir film şeridi içerisinde gerçekleşir. Burada ara yüzeyin her iki tarafındaki direnci hesaba katmak için çift film teorisi kullanılır (Baylar, 2002). Şekil 3.8’de çift film teorisinin mekanizması ve grafiksel gösterimi yer almaktadır.

Kütle transfer katsayısı olan K , transferi gerçekleşen gazın difüzyon katsayısıyla doğru orantılıdır (Muntz ve Roberts, 1988). Kawase ve Moo-Young (1992), K_L katsayısının maddenin difüzyon katsayısının yanında, türbülans karışım mekanizmasının bir fonksiyonu olduğunu ileri sürmüştür. Gazın transferi hem gaz hem de sıvı ortamda gerçekleştiğinden (Şekil 3.8), K ifadesi aşağıda Denklem 3.17’deki gibi yazılabilir.

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_L} + \frac{1}{HK_g} \quad (3.17)$$



Şekil 3.8 : Çift Film Teorisi (Hava-su gaz transferi) (Küçükali, 2006’dan değiştirilmiştir).

Burada K_L sıvı ortamdaki (su), K_g ise gaz ortamdaki (hava) kütle transfer katsayısını gösterir. Denklem 3.17 ifadesindeki katsayıların tersi, gaz transferine karşı ortamların göstermiş olduğu direnci belirtir. Havanın oksijen transferine karşı göstermiş olduğu direnç, sıvı faza kıyasla çok küçüktür (Gulliver ve diğ, 1990). Oksijenin 20 °C’de hava ortamındaki difüzyon katsayısı $D_g = 2.18 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ iken, sıvı ortamındaki difüzyon katsayısı ise $D_L = 2.02 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ dir (Muntz ve Roberts, 1988).

Muntz ve Roberts (1988), kütle transfer katsayısının hesaplanabilmesi için, moleküler difüzyon katsayısının 0.5-0.7 arasındaki değerleri için üslerinin alınmasının uygun olacağını belirtmişlerdir. Burada, $K_L \ll HK_g$ olur. Gaz transferi sıvı fazın kontrolünde olduğundan, $K \cong K_L$ alınır. N_2 , CO_2 ve CH_4 , propan ve toksik gazları için de aynı kabul geçerlidir (Gulliver ve diğ, 1990).

Denklem 3.15’in her iki tarafı transferin gerçekleştiği V hacmine bölünerek, Denklem 3.16 ifadesi, Denklem 3.15 ifadesinde yerine konulduğunda:

$$\frac{dC}{dt} = -K_L a (C_s - C) \quad (3.18)$$

ifadesi elde edilir. Burada; a oksijen transferinin gerçekleştiği yüzey alanının hacmine olan oranıdır. Denklem 3.18, akım ortamında hava-su gaz transfer dinamiğini etkileyen bir hidrolik yapı boyunca (C_s değerinin değişmediği kabulü yapıp) integrali alınırsa:

$$-\int_u^d \frac{dC}{(C_s - C)} = \int_0^t K_L a dt \quad (3.19)$$

Bu ifadenin çözümü gerçekleştirildiğinde ise;

$$\frac{\ln C_S - C_U}{\ln C_S - C_D} = K_L a t \quad (3.20)$$

3.20 nolu denklemin her iki tarafını e tabanında yazarsak:

$$r = \frac{C_S - C_U}{C_S - C_D} = e^{K_L a t_c} \quad (3.21)$$

ifadesi elde edilir. Burada r oksijen eksiklik katsayısını, t_c ise hava kabarcıklarının suda kalış süresini ifade eder (Gameson, 1957). r , $0-\infty$ arasında değerler alır. Eğer ortamda, havadan suya oksijen transferi gerçekleşmemişse $r=1$ 'dir. r ile havalandırma verimliliği arasında doğru bir orantı vardır. Genelde doğal havalandırmayla ilgili yapılan çalışmalarda $r=1-3$ değerleri arasında değişim göstermektedir. Gameson (1957) akımın havalandırma performansının hesaplanmasını sağlayan bir denklem daha öne sürmüştür, bu ifade:

$$E = 1 - \frac{1}{r} = \frac{C_D - C_U}{C_S - C_U} \quad (3.22)$$

şeklinde. Burada, E havalandırma verimlilik katsayısını ifade etmektedir. E sayısı genellikle $0-1$ aralığında değişir. E 'nin 0 değeri ortamda hiç havalandırma olmadığını, 1 değeri ise hidrolik yapı çıkışında suyun tamamen oksijene doymun hale geldiğini gösterir. $E>1$ değeri ise mansaptaki suyun aşırı doymunluğa ulaştığını gösterir ($C_D > C_S$). Ayrıca C_U ve C_D sırasıyla memba mansaptaki ÇO konsantrasyonudur. C_U ve C_D değerleri deneysel olarak ölçülür. C_S değeri ise literatürde farklı denklemler kullanılarak veya tablolar yardımıyla elde edilir (White, 1979; Baylar, 2002). Atmosfer basıncı, sıcaklık ve buhar basıncı dikkate alınarak C_S değeri aşağıdaki ifade ile bulunabilir:

$$C_S = \frac{(510.2 - 0.45T)(P - P_w)}{T + 35} \quad (3.23)$$

Bu ifade de T sıcaklığı, P atmosfer basıncını ve P_w ise buhar basıncını ifade etmektedir. Sıcaklığın değişmesi akışkanın birçok değerini de beraberinde değiştirir. Özellikle sıcaklık değişimine bağlı olarak akışkanın özgül kütle, viskozite, yüzey gerilmesi değerleri ve kütle transfer katsayısı ile gazın su içindeki doymunluk değeri değişir. Bu durum doğrudan hava-su gaz transferini de etkiler. Doğal havalandırmayla ilgili yapılan çalışmaları karşılaştırabilmek için; E ve r katsayıları standart bir sıcaklık değerine dönüştürülmelidir. Bunun için genelde referans alınan su sıcaklık değeri 20°C 'dir.

Gameson ve diğ. (1958) farklı sıcaklık değerleri için savaklar üzerinde yaptıkları deneylerde, suyun sıcaklık artışına bağlı olarak havalandırma verimliliğinin arttığını tespit

etmişlerdir. Böylece kütle transfer katsayısının sıcaklık artışıyla paralel olarak arttığını da ispatlamışlardır. Ayrıca aşağıdaki ifadeyi öne sürmüşlerdir:

$$r_{15} = 1 + \frac{r_T - 1}{1 + 0,027(T_w - 15)} \quad (3.24)$$

Bu denklemde; r_{15} 15 °C sıcaklığındaki referans oksijen eksiklik katsayısı, r_T çalışılan ortamdaki T °C sıcaklığındaki oksijen eksiklik katsayısı, ve T_w deneyin gerçekleştirildiği ortamdaki su sıcaklığıdır. Gulliver ve diğ. (1990) tarafından yapılan çalışmada ise aşağıdaki gibi bir bağıntı öne sürülmüştür:

$$1 - E_{20} = (1 - E_T)^{1/f_T} \quad (3.25)$$

Burada, f_T sıcaklık düzeltme katsayısı olup, bu ifadenin çözümü aşağıda verildiği gibidir:

$$f_T = \left(\frac{T+273}{T_i+273}\right)^{1/2} \left(\frac{\mu_i}{\mu}\right)^{3/4} \left(\frac{\sigma_i}{\sigma}\right)^{3/5} \left(\frac{\rho_i}{\rho}\right)^{17/20} \quad (3.26)$$

Burada; i indisi referans sıcaklığında akışkanın özelliğini ifade etmektedir. 20 °C referans sıcaklığı için Denklem 3.26'yı çözecek olursak:

$$f_T = 1 + 0.02103(T_w - 20) + 8.261 \times 10^{-5}(T_w - 20)^2 \quad (3.27)$$

ifadesi elde edilir. Burada E_{20} , 20 °C referans sıcaklığı için havalandırma verimliliği değeridir.

Bu tez kapsamında Denklem 3.14-3.27 arasındaki denklemler kullanılarak blokların OTV değerlerini nasıl etkilediği gözlenmiştir.

3.4 Boyut Analizi ve Ölçek Etkisi

Tez kapsamında gerçekleştirilen deneylerin yorumlanması için boyut analizi gerçekleştirilmiştir. EKŞ'lerin mansabındaki enerji sönümlene miktarına etki eden parametreler aşağıda verilmiştir.

$$E_2 = f(E_1, V_1, \rho, V_2, h_0, H, h_1, d_c, \mu, q, g) \quad (3.27)$$

Burada E_1 memba kısmındaki enerji değerini, V_1 şüt kanalı girişindeki akım hızını, ρ akışkan yoğunluğu, V_2 şüt kanalı çıkışındaki hızı, h_0 üst haznenin mansap kotuna göre yüksekliği, H blok yüksekliğini, h_1 memba tarafındaki akım derinliğini, d_c kritik derinliği, μ dinamik viskoziteyi, q birim debiyi ve g yerçekimi ivmesini temsil etmektedir. Olaya etki eden parametrelere Buckingham II teoremi uygulanarak aşağıdaki denklemler elde

edilmiştir. Tekrarlayan (esas) değişkenler V_1 (m/s), ρ (kg/m³) ve d_c (m) seçilmiştir. 8 adet Π denklemi elde edilmiştir. Bu denklemlerin çözümü aşağıdaki gibidir.

$$\frac{E_2}{E_1} = f\left(\frac{E_1}{d_c}, \frac{V_2}{V_1}, \frac{h_0}{d_c}, \frac{H}{d_c}, \frac{h_1}{d_c}, \text{Re}, \text{Fr}, \frac{q}{V_1 d_c}\right) \quad (3.28)$$

Burada $\frac{E_2}{E_1}$ yerine $\frac{E_2 - E_1}{E_1}$ yazılabilir.

Ayrıca çalışmanın ikinci kısmında oksijen transfer verimi olan E_{20} değerine etki eden boyutsuz büyüklükler:

$$E_{20} = f\left(\frac{H}{d_c}, \text{Fr}\right) \quad (3.29)$$

olarak grafik çiziminde dikkate alınmıştır.

Ölçek etkisiyle ilgili olarak, Chanson (2009) tarafından yapılan çalışmada basamaklı dolusavak basamak yüksekliği 2 cm'den yüksek olması ve $\text{Re} > 2.5 \times 10^4$ şartının sağlanması gerektiği belirtilmiştir. Kobus (1984) ise yine basamak yüksekliği 2 cm'den fazla ve $\text{Re} > 1 \times 10^5$ Reynolds sayı koşulunun sağlanması gerektiğini bildirmiştir. Bu çalışmada elde edilen Re değerleri 1.22×10^5 ile 7.35×10^5 arasında değiştiği hesaplanmıştır. Her ne kadar büyük ölçekli kanal tasarımlarının, yüksek türbülans ve akış hızları nedeniyle ölçek etkileri olmadan tasarlanması zor ise de, yaptığımız bu çalışmada seçilen blok yüksekliği değerine ve 1.22×10^5 ile 7.35×10^5 aralığında Re sayısı değerlerine göre, bu çalışma için minimum ölçek etkisinin olduğu söylenebilir.

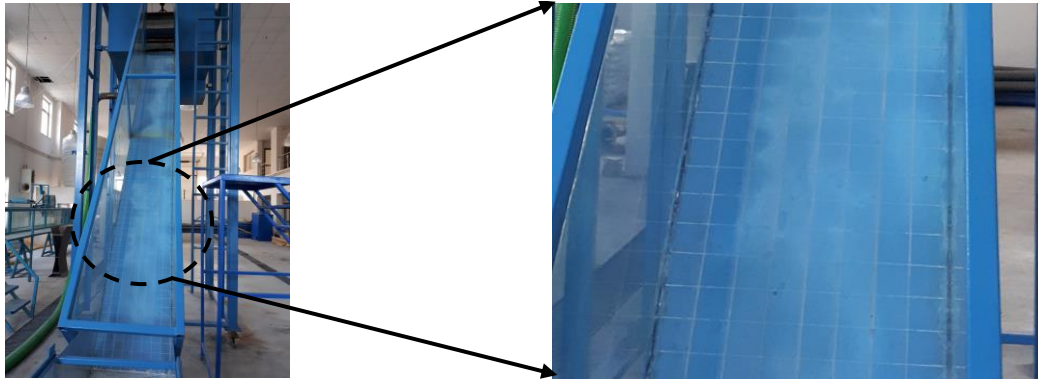
3.5 Deney Düzenegi ve Hidrolik Şartların Oluşturulması

Bu tez kapsamında bilimsel literatürün güncel bir konusu olan, üzerine farklı geometrilerde EKB yerleştirilmiş eğimli kanalda, diğer bir deyişle EKŞ'ler incelenmiştir. Yapılan çalışma üç aşamada tamamlanmıştır:

- İlk durumda geometrisi farklı olan 6 adet blok tipinin, kanalın farklı taban açılarında ve debilerde enerji kırma miktarları ölçülmüştür.
- İkinci olarak aynı blok tipleri ile sudaki oksijen transferini arttırmaya yönelik deneyler gerçekleştirilmiş ve gerekli ölçümler yapılmıştır.
- Son olarak seçilen blok tiplerinden bazılarına ait deneysel düzenekler sayısal ortamda modellenmiş ve ANSYS-Fluent yazılımında HAD yöntemiyle çeşitli analizler yapılmıştır. Analiz sonuçları deneysel verilerle kıyaslanmıştır.

Bu çalışmaya ait bütün deneyler İnönü Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Hidrolik Laboratuvarında yapıldı. Sayısal çözümler için ise yine İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi bünyesinde yer alan lisanslı ANSYS-Fluent yazılımı kullanılmıştır. Deney düzeneği olarak; blokların içine yerleştirilebildiği eğimi ayarlanabilir şüt kanalı, dikey olarak hareket ettirilebilen bir hazne ve bu hazneye su aktaran boru bağlantı sistemi kullanılmıştır. Kanalin boyutları 0.4 m genişlik, 0.6 m derinlik ve 4 m uzunluk şeklindedir. Kanal yan duvar yüksekliğinin 0.6 m alınma nedeni, özellikle bloklara çarpan suyun kanal dışına sıçramasını engellemektir. Kanal tabanı cam kullanılmadan tamamen sac olarak tasarlanmıştır. Sadece yan yüzeyler cam olacak şekilde ve bunun için 6 mm kalınlığında lamine cam kullanılmıştır. Lamine cam kullanılma sebebi ölçümler esnasında darbe ve çarpmalara karşı dayanıklılık ve daha net bir görüntü elde etmek içindir. Şüt kanalının eğimi ayarlanırken rahat hareket ettirebilmek için, alt kısmına 2 adet raylı sistem mekanizması kurulmuştur.

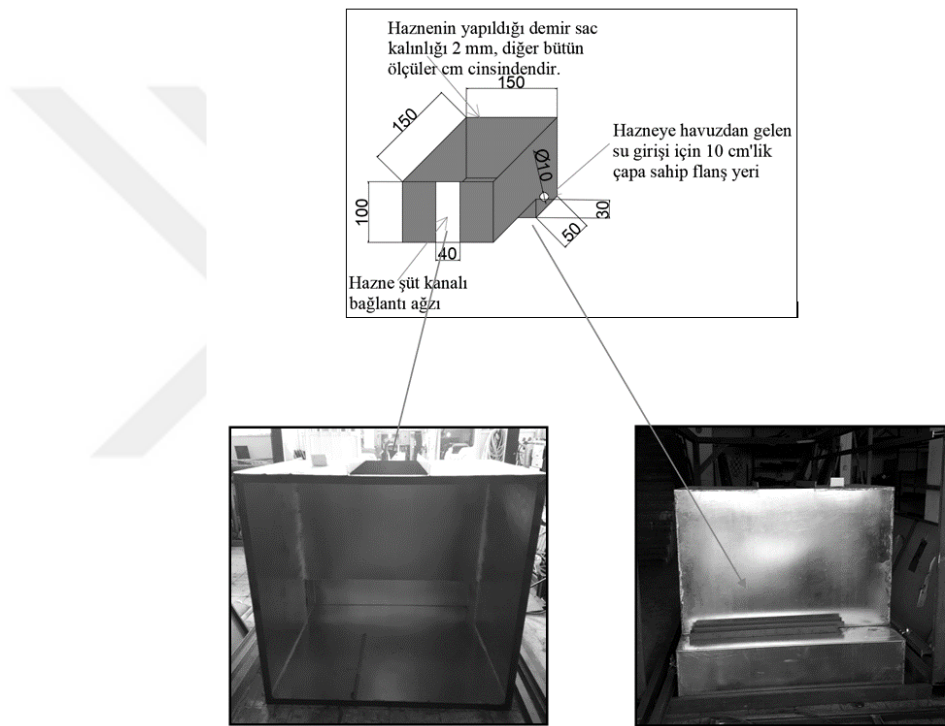
Ayrıca kanal taban sacına zarar vermemek ve blokları kanal içerisine daha rahat yapıştırıp sökebilmek için kanal iç genişliği kadar 4 m uzunluğunda, 5 mm kalınlığında esnek plexiglass malzemeden bir taban kaplaması yapılmıştır. Yine blokları kanal içerisine eşit mesafede ve daha rahat yerleştirebilmek için 5x5 cm şeklinde kanal uzunluğu boyunca bir ızgara şekli kaplamanın alt kısmına çizilmiştir. Böylece her bir bloğun yerleşiminde ve bloklar arası mesafede hata payı en aza indirgenmiştir. Şekil 3.9'da şüt kanalı genel görünümü ve kanal tabanına yapılan kaplamanın üstten görünüşü yer almaktadır.



Şekil 3.9 : Şüt kanalı 5 mm kalınlığında Plexiglass taban kaplama.

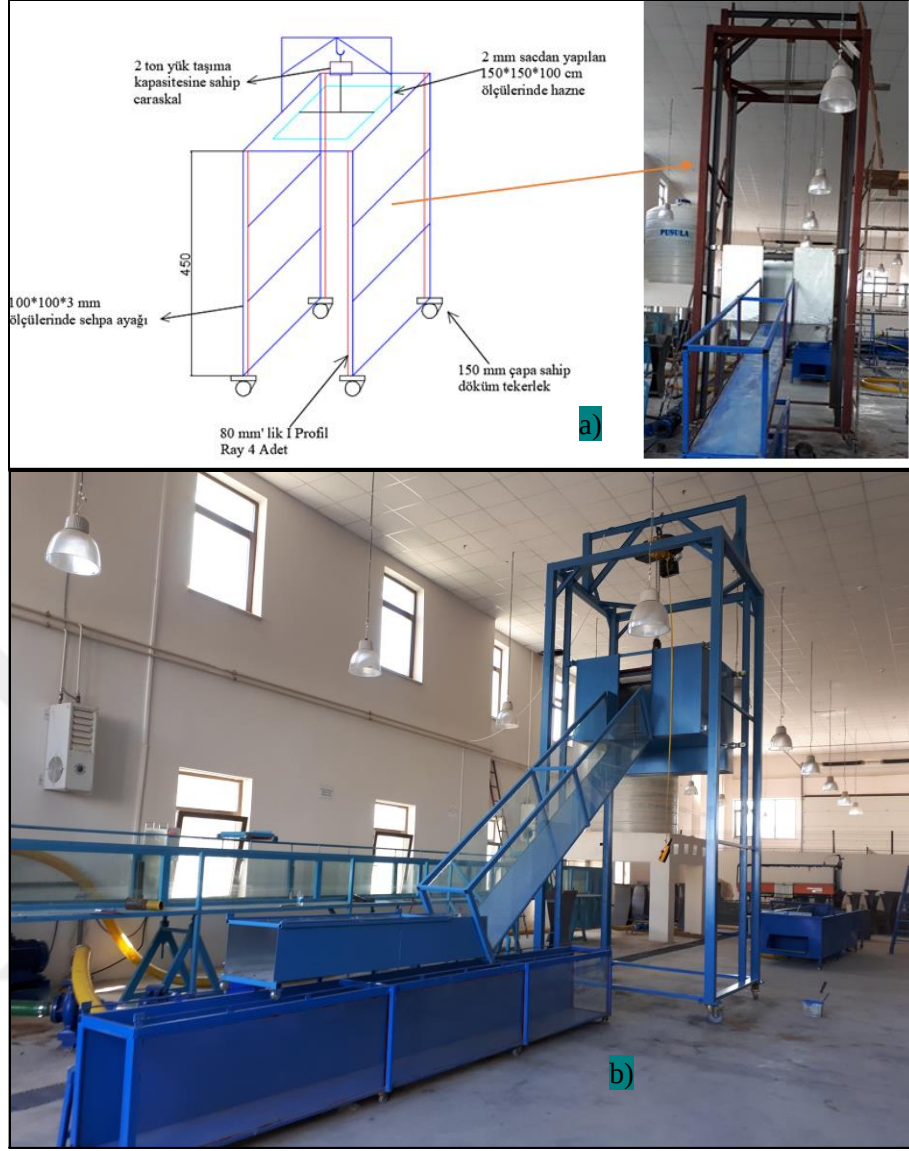
Şüt kanalının bağlı olduğu üst hazne düşey yönde 10° ile 56° arasında hareket edebilen 2 mm sacdan imal edilecek şekilde 150x150 cm boyutunda ve 1 m yüksekliğinde tasarlanmıştır. Ayrıca suyun hazneye giriş yaptığı kısımda 50x150 cm boyutunda 30 cm yüksekliğinde hazne taban sacı daha düşük yapılarak, suyun hazne içinde herhangi bir

çalkantı ve sıçramaya uğraması engellenmiştir. Şekil 3.10’da haznenin tasarım çizimi ve imal görüntüleri verilmiştir. Bu haznenin düşeyde hareketini sağlayabilmek için, 4.5 m yüksekliğinde zeminde hareket edebilen 4 ayaklı 100x100x3 mm’lik kutu profil kullanılarak ve 150 mm’lik çapa sahip 4 adet döküm tekerle hareketi sağlanabilen sehpa yapılmıştır. Ayrıca bu sehpa içerisinde haznenin iki yönlü (yukarı-aşağı) hareketini sağlayan 2 tonluk yük kapasiteli caraskal kullanılmıştır. Sehpa içerisinde 80 mm’lik I profilden ray döşenerek caraskal yardımı ile yerden 4.5 m yüksekliğe kadar hazne yukarı çıkmaktadır. Böylece hazne düşeyde bu caraskal sisteme bağlı olup sehpa içerisindeki hareketi bu raylar aracılığıyla sağlanmıştır.



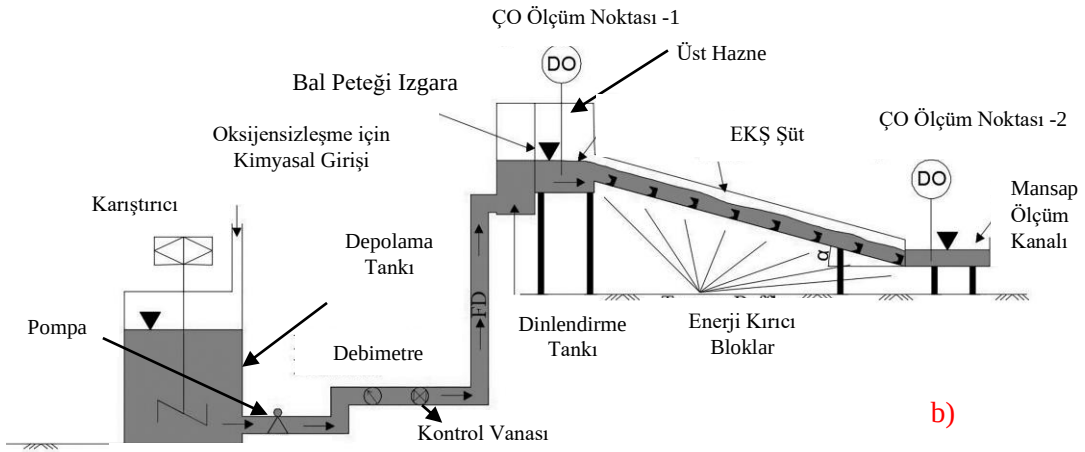
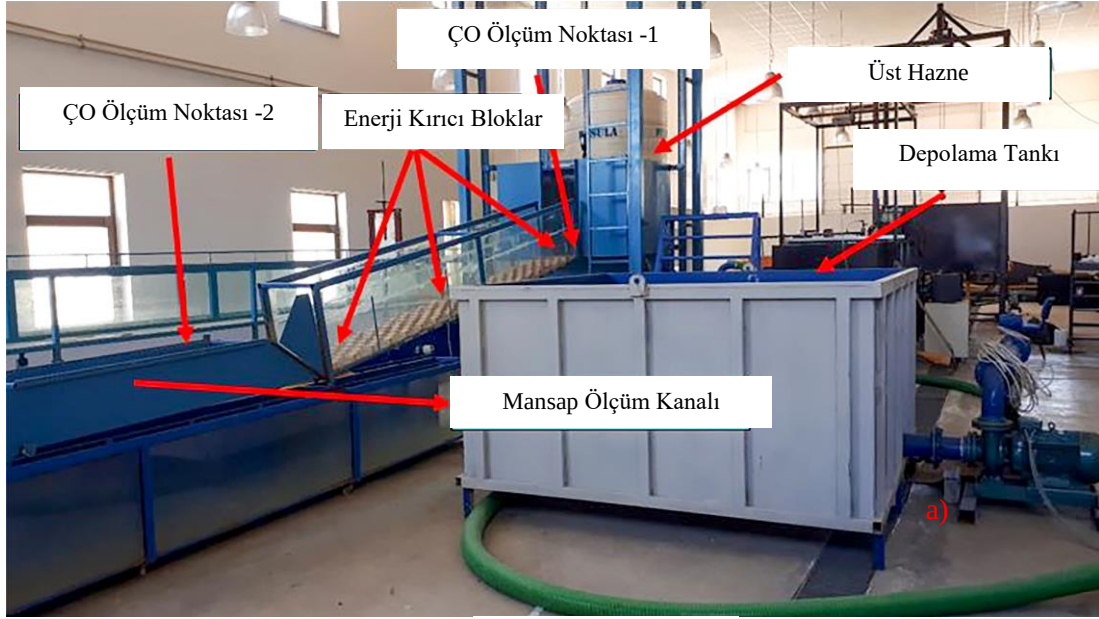
Şekil 3.10 : Hazne tasarım modeli ve yapımı tamamlanmış hali.

Deney düzeneğine su sağlamak için İnönü Üniversitesi Hidrolik Laboratuvarı’nda bulunan 1.2 m derinliğindeki havuzdan faydalanılmıştır. Deneylerde akımın devridaimini sağlayan 15 kW’lık bir santrifüj pompa kullanılmıştır. İki yönlü hareket eden hazne ile suyun alındığı havuz arasında bir adet vana, geçen akımın debisini ölçmek için bir adet debimetre ve 4” (inch) çapa sahip boru bağlantısı ayrıca kullanılmıştır. Böylece havuzdan pompa ile çekilen su 4.5 m yüksekliğindeki hazneye verilerek oradan da şüt kanalına geçişi sağlanmaktadır. Şekil 3.11’de caraskal ile hareketi sağlanan hazne-sehpa sistemi ve laboratuvar ortamında deneysel çalışmalara uygun hale getirilmiş sistem görülmektedir.



Şekil 3.11 : a) Hazne-Sehpa Sistemi b) Deney setinin sistemin genel görünümü.

Sudaki ÇO'nun sıfır olmasını sağlamak ve gerekli kimyasalları karıştırmak için ayrıca bir depolama tankı kullanılmıştır. Su, kimyasal karıştırma tankından (depolama tankı) bir üst hazneye (durulma tankına) pompalanmıştır. Üst hazne içerisinde bir akım düzenleyici yerleştirilerek, akımın daha düzgün olması sağlanmış ve bu akış düzensizliklerini azaltmıştır. Düzgün memba akışı sağlamak için şüt kanalının girişine bir ogee profili oluşturuldu. Şüt kanalından geçen akım, mansap kanalına yönlendirilmiştir. Şekil 3.12 ise ÇO ölçümü için kullanılan deney düzeneğinin görüntüsünü ve şematik çizimini göstermektedir.



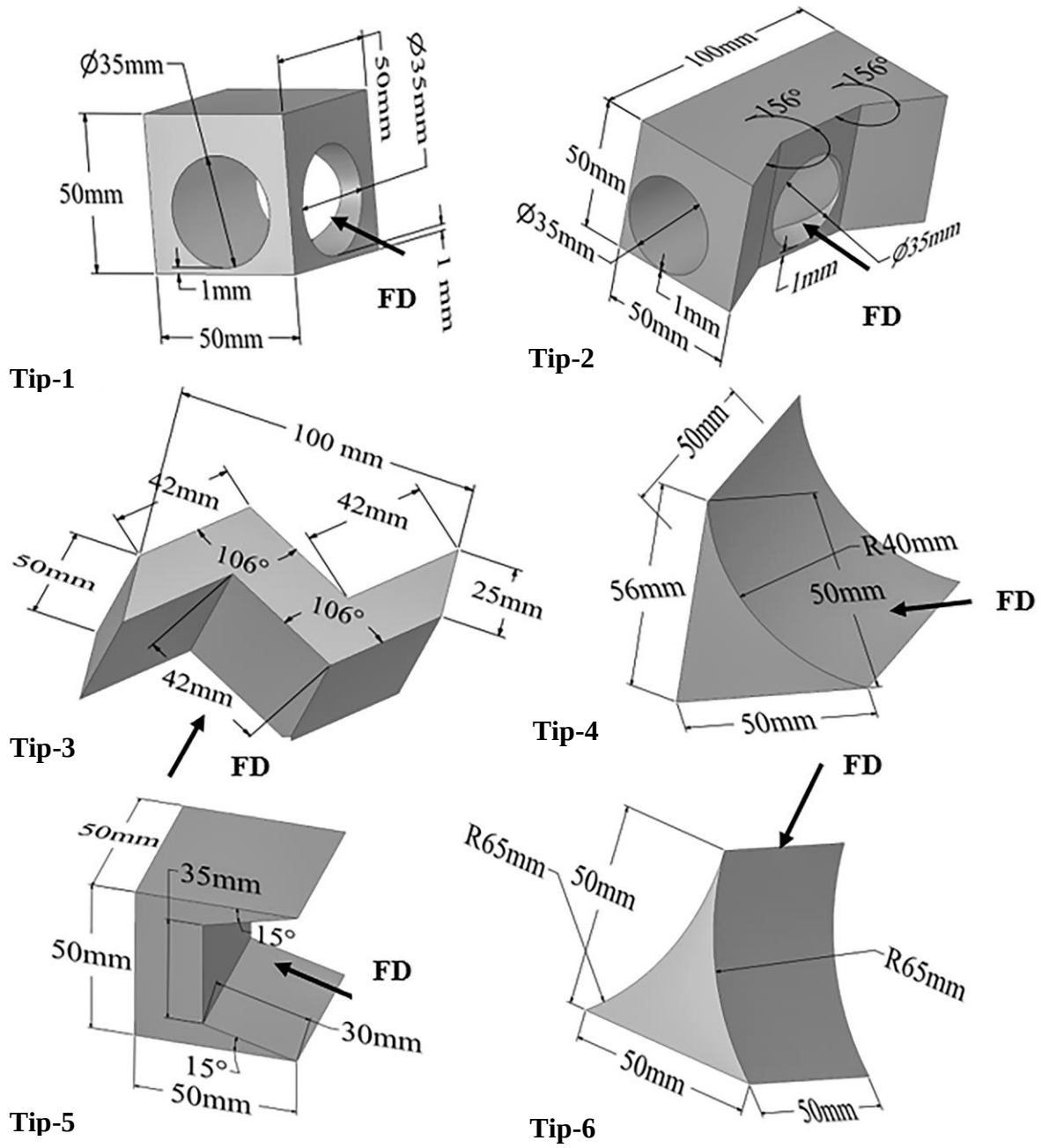
Şekil 3.12 : a) Deney düzeneğinin görüntüsü b) Deney setinin şematik gösterimi.

Tüm deneyler 12.5×10^{-3} - 75×10^{-3} m²/s birim debi aralığında yapılmıştır. Debi ölçümleri için ± 0.01 L/s hassasiyete sahip Arkon model elektromanyetik debimetre kullanılmıştır. ÇO ölçüm noktaları olarak şematik çizimde yer alan noktalar dikkate alınmıştır. Dikkate alınan hidrolik şartlarla ilgili diğer kısımlar Çizelge 3.1’de yer almaktadır. Deneylerde 6 farklı geometride EKB kullanılmıştır. Kurduğumuz deney sisteminde blok geometrilerinin enerji sönmleme ve havalandırma etkisini daha iyi görebilmek için daha önce literatürde bu amaçla hiç kullanılmamış 6 adet farklı geometri tasarlanmıştır. Blok tasarımları fiziksel modeller için önce AutoCAD ile ve daha sonra sayısal modelleme için ANSYS-Workbench yazılımları aracılığıyla yapılmıştır.

Çizelge 3.1 : Deney parametrelerinin özeti.

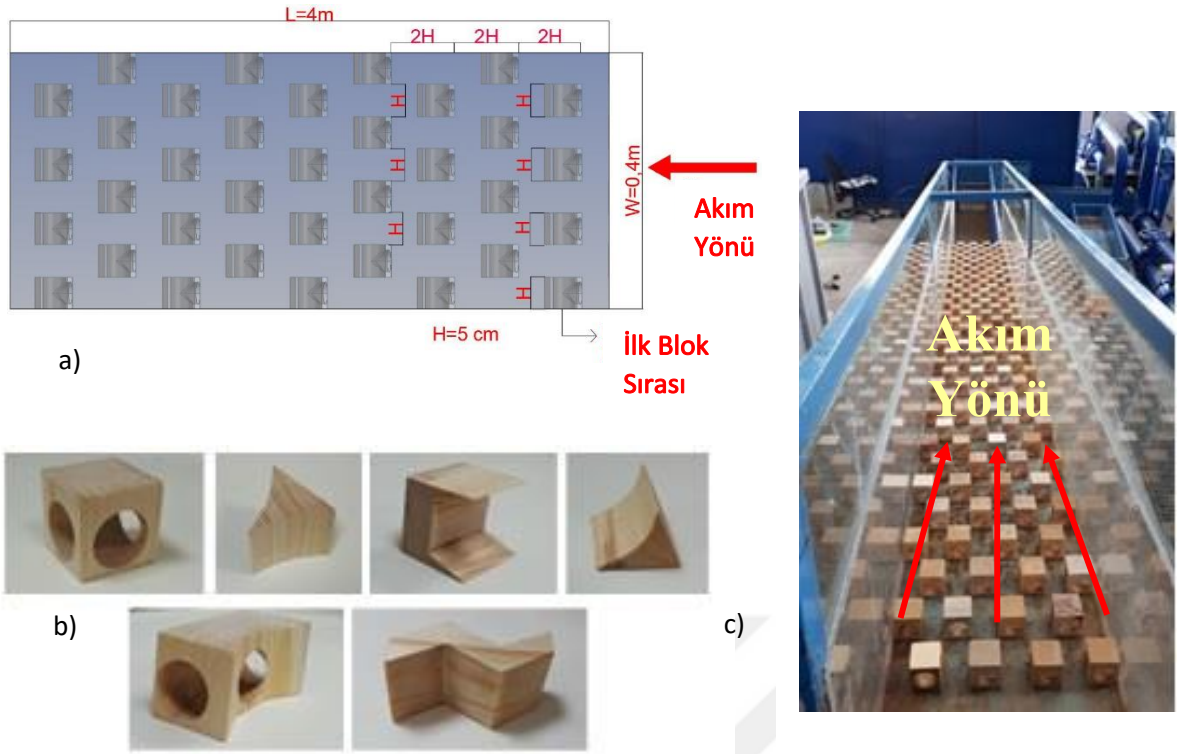
Blok Tipi	Şüt açısı α (derece)	q (m^2/s) $\times 10^{-3}$	Kanal girişi Fr sayısı	Blok yüksekliği H (cm)	Kanal girişi Re sayısı ($\times 10^5$)
Bloksuz	10-56	12.5-75	0.64-0.98	-	1.22-7.35
Tip-1	10-56	12.5-75	0.64-0.98	5	1.22-7.35
Tip-2	10-56	12.5-75	0.64-0.98	5	1.22-7.35
Tip-3	10-56	12.5-75	0.64-0.98	5	1.22-7.35
Tip-4	10-56	12.5-75	0.64-0.98	5	1.22-7.35
Tip-5	10-56	12.5-75	0.64-0.98	5	1.22-7.35
Tip-6	10-56	12.5-75	0.64-0.98	5	1.22-7.35

Dört blok tipinin (Tip-1, Tip-4, Tip-5, Tip-6) boyutları 5x5x5 cm sırasıyla yükseklik, genişlik ve derinlik olarak seçilmiştir. Diğer iki blok tipinin (Tip-2 ve Tip-3) boyutları 5x10x5 cm olarak seçilmiştir. Şekil 3.13'te 6 farklı blok tipinin şematik bir temsili ve üretimi yapılan halleri yer almaktadır. Bloklar su ile temas halinde olduğu akım yönleri de oklarla gösterilmiştir. Blokların tasarım aşamasından sonra hangi malzemenin blok yapımında kullanılacağına dair literatür taraması yapılmıştır. Literatürde bu tür blokların deneysel kullanımı için; ahşap, plexiglass, demir, pvc ve termoplastik gibi malzemelerin daha çok tercih edildiği görülmüştür. Bu çalışmada blok üretiminin daha ekonomik, hızlı bir üretim ve blok geometrisini daha rahat oluşturmak için ahşap malzeme kullanılması kararlaştırılmıştır. Ancak kullanılacak her malzemenin avantajları olduğu gibi dezavantajları da mevcuttur. Ahşap malzemenin dezavantajı ise bünyesine suyu alıp hacimce bir büyüme söz konusu olabileceğidir. Ahşap blokların su emmesini önlemek için, özellikle gemi ve yatların ahşap kısımlarını korumada kullanılan bir vernik türü kullanılmıştır. Ahşap blokların su yalıtımını test etmek için, deneylerden önce 24 saat süre ile tamamen su içerisinde batık halde bekletilerek suyu bünyesine alıp almadığı kontrol edilmiş ve uygulanan işlemin başarılı olduğu görülmüştür. Bu blokların uygulamadaki üretimlerinin bir kısmı ise HDPE (High Density Polyethylene-Yüksek Yoğunluklu Polietilen) ile yapılabilir. Ayrıca bloklar tasarım şekillerine göre fabrikalarda üretilebilir ve şüt betonundaki ankrajlarla kullanım yerlerine monte edilebilir. Yine uygulamada blokları beton olarak üretmek için farklı kalıp yöntemleri kullanılabilir. Mevcut çalışmanın blok şekline yakın geometride bir blok tipi Jangam ve diğ. (2017) çalışmasında kıyı koruma yapısı olarak kullanılmıştır. Yapılan bu çalışmanın da uygulama mühendisliği açısından faydalı olacağı düşünülmektedir.



Şekil 3.13 : Deneylerde kullanılan blok boyutları.

Üretilmiş bloklara ait tasarım, imalat ve deney kanalına uygulanmış görüntüleri ise Şekil 3.14’te verilmiştir. Tüm deneylerdeki su devridaimi PLC (Programmable Logic Controller) kontrollü pompa yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Debi kontrolü elektromanyetik debimetreden alınan sinyallerin PLC kontrol sistemine aktarılıp işlenmesi yardımıyla gerçekleştirilmiştir. PLC kontrol sistemi mobil veya bilgisayar yardımıyla kontrol edilebilmektedir. Her deney için debimetre ekranı ile PLC yazılımı ekranında yazılı debi değerleri kıyaslanmış ve doğrulanmıştır.



Şekil 3.14 : a) Blokların plan görüntüsü b) Üretilen bloklar c) Kanal içi görüntüsü.

Mansaptaki su derinliği manuel olarak dijital limnimetre yardımıyla ölçülmüştür. Akım hızı ölçümü için dijital göstergeli muline kullanılmıştır. Yine ÇO konsantrasyonu için YSI Model DO 200 oksijenmetre kullanılmıştır. Şekil 3.15'te deneylerde kullanılan akım hızı ölçer (MiniAir20), oksijenmetre ve dijital limnimetre görüntüleri yer almaktadır.



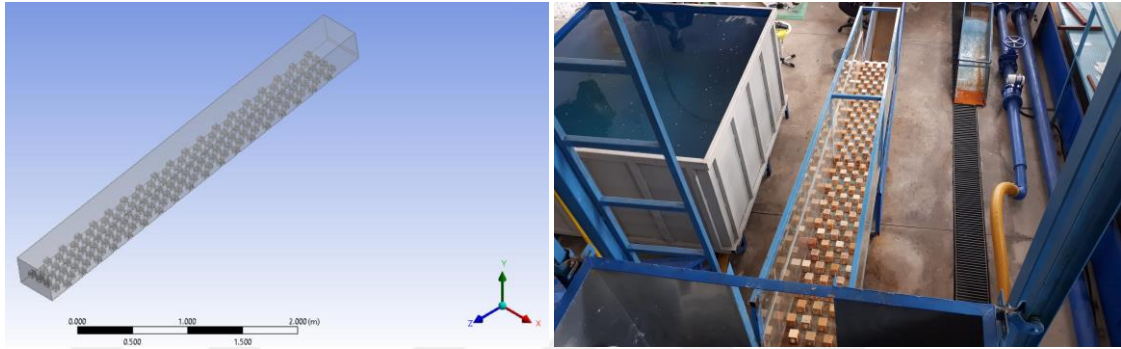
Şekil 3.15 : a) Akım hızı ölçer b) YSI Model DO 200 oksijenmetre c) Dijital limnimetre.

Tüm deneylerde 6 farklı açı ($\alpha = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$ ve 56°) kullanılarak, enerji sönümleme için 6 farklı blok tipi ve bloksuz durum dâhil olmak üzere 252 deney gerçekleştirilmiştir. Her deney seti 5, 10, 15, 20, 25, 30 L/s olmak üzere toplam 6 farklı debi değeri için yürütülmüştür. Şekil 3.12’de belirtilen noktalarda akım hızı, nap yüksekliği ve ÇO değerleri okunmuştur. Bu çalışmada ayrıca ÇO konsantrasyonunu doğru bir şekilde yapmak için, mevcut sete ilave olarak içerisinde oksijensizleştirmenin sağlandığı yeni bir depolama tankı da kullanılmıştır. Yine oksijen transferi için 6 farklı blok tipi ve bloksuz kanal durumları için toplam 252 test yapılmıştır. ÇO, 0 ila 20 ppm ölçüm aralığı, %0 ila %200 ÇO hava doygunluğu ve -6° ila 46°C sıcaklıkta ölçüm yapabilen bir ÇO ölçer kullanılarak ölçülmüştür. Her deney başlangıcında, oksijensizleştirme için depolama tankına sodyum sülfid (Na_2SO_3) ve kobalt klorür (CoCl_2) eklenerek karıştırılmıştır. Depolama tankındaki suyun oksijen içeriğini yaklaşık 0.5 mg/l’ye düşürmek için birçok test gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda sudaki kimyasalların reaksiyon süreleri bu şekilde belirlenmiştir. Teorik olarak, 1 g/m³ ÇO’nun ortadan kaldırılması için 7.9 g/m³ sodyum sülfid (Na_2SO_3) gereklidir. Deneylerde kullanılan musluk suyunun ÇO değerine göre yaklaşık Na_2SO_3 gereksinimleri belirlenerek (%10-20 fazlalık), CoCl_2 ’nin 3.3 g/m³’lük bir dozajda deoksijenasyon reaksiyonu için bir katalizör olarak kullanılması gerektiği anlaşılmıştır.

Bu çalışma için Baylar ve diğ. (2006) tarafından tavsiye edilen, 50 g/m³ Na_2SO_3 ’e 3.3 g/m³ CoCl_2 eklenerek karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Her 6 ölçüm için (5, 10, 15, 20, 25, 30 L/s), depolama tankı her seferinde doldurulmuş ve yaklaşık 6 m³ su kullanılmıştır. Deneylerde YSI Model DO 200 oksijenmetre kullanılmıştır. Oksijen ölçer kullanımından önce üreticinin kalibrasyon işlemlerine uygun olarak nemli havada günlük kalibre edilmiştir. Her ölçümden sonra, prob çalkalanmış ve üzerine yapışan hava kabarcıkları ortadan kaldırılmıştır. Ayrıca ölçümler sırasında prob su içerisinde yavaşça hareket ettirilerek hava kabarcıklarının yapışması engellenmiştir. Ayrıca doygunluk konsantrasyonları McGhee (1991) tarafından verilen tabloya göre belirlenmiştir. Tuzluluğun etkisini ortadan kaldırmak için yapılan testlerde musluk suyu kullanılmıştır. Deneyler sırasında, suya deoksijenasyon için uygulanan kimyasalların neden olduğu önemli bir kalıntı birikimi olmadığından emin olmak için su sürekli olarak izlenmiştir.

3.6 Sayısal Model

Deneyisel çalışmalara ek olarak , bu tez çalışması kapsamında 6 farklı geometride blok tipi ve bloksuz durum için EKŞ kanalındaki enerji sönümler HAD ile gerçek ölçekte analiz edilmiş ve sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. EKB'li kanalın sayısal ve fiziksel model görüntüleri Şekil 3.16'da verilmiştir.



Şekil 3.16 : a) Sayısal model görüntüsü b) Fiziksel model görüntüsü.

Sayısal çözüm için HAD çalışmalarında dünyada en çok tercih edilen gelişmiş bir yazılım olan ANSYS-Fluent yazılımı kullanılmıştır. Bu tür yazılımlar, akışkan davranışını modelleyebilmek için akışkanın temel kuramsal denklemlerinin yanında birtakım kabuller ve literatürde kabul görmüş ampirik yaklaşımlar kullanır. Bu denklem ve yaklaşımlar sonlu farklar, sonlu elemanlar ve sonlu hacimler gibi sayısal modellerin sayısal ayrıklaştırma yöntemleri yardımıyla çözülerek akışkan hareketleri belirlenmiş olur. Elde edilen veriler yazılım arayüzleri yardımıyla görselleştirilerek çıktıları kullanıcılar için daha rahat yorumlanabilir hale getirilir. HAD yöntemini kullanarak serbest yüzey akışlarının modellenmesi, hidrolik, matematik ve bilgisayar bilimi dahil olmak üzere çeşitli mühendislik alanlarını kapsar (Yeoh ve Tu, 2010). Ana karmaşıklık, akışkan konumunu belirlemek ve hareketini tanımlamak için özel yöntemler gerektiren farklı bir arayüzün varlığından kaynaklanır. Bu nedenle, bu akışları yeniden oluşturmaya çalıştığımızda, doğruluk ve hesaplama maliyeti arasında uygun bir denge sağlarken, onları tanımlayan karmaşık denklemleri çözmek için de uygun sayısal şemaları seçmek gerekir (Magoules, 2011). Serbest yüzey akışlarını yeniden üretmeye yönelik sayısal yaklaşımlardan biri Euler yaklaşımıdır. Euler çerçevesinde, akışkan süreçleri sabit bir ağ kullanılarak analiz edilir. Sıvı alanda meydana gelen değişiklikler, ağ (mesh) hücrelerinin her birinde yakalanır. Serbest yüzey akışlarının modellenmesinde, Euler yaklaşımları, serbest yüzeyin tam konumunu belirlemek için bir arayüz izleme veya bir arayüz yakalama şeması ile birlikte

uygulanır. Ön yakalama şemalarıyla birleştirilen Euler yöntemleri, fazlardan birinin varlığını ve yokluğunu belirlemek için yardımcı bir işlev tanımlayarak ara birimi konumlandırır.

3.6.1 Akışkan hacmi yöntemi (Volume of fluid-VOF)

Hidrolik açıdan serbest yüzeyli akışları modellemeye yönelik en iyi bilinen Euler yaklaşımlarından biri, Hirt ve Nichols (1981) tarafından geliştirilen Akışkan Hacmi (Volume of Fluid-VOF) yöntemidir. VOF yöntemi, iki akışkanı ayırt etmek için 0 ile 1 arasındaki değerlerle hacim fraksiyonu fonksiyonunu kullanır. Sıfır (0) değerine sahip hücreler, genellikle hava fazını temsil ederken, 1 değerine sahip hücreler ikinci fazı, yani su olarak temsil edilir. Arayüz, 0 ile 1 arasındaki değerlere sahip hücrelerle sınırlandırılır.

VOF, iki fazın (su ve hava) varlığını ve yokluğunu belirlemek için 0 ve 1 değerlerine sahip bir hacim fraksiyonu fonksiyonu α kullanılır. İki faz arasındaki arayüz, 0 ile 1 arasındaki fonksiyon değerlerine sahip hücrelerde bulunur. Serbest yüzeyin tam konumunu bulmak için, VOF yöntemi, arabirim yakalama algoritmalarını kullanarak Denklem 3.30'da tanımlanan hacim fraksiyonu fonksiyonu için bir taşınım denklemini çözer (Hirt ve Nichols, 1981).

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla(\alpha u) = 0 \quad (3.30)$$

u , α 'nın 0 ve 1'e eşit olduğu hücrelerde karşılık gelen fazın hızı olduğunda ve arayüzü içeren hücrelerde, ortalama hava-su hızına karşılık gelir.

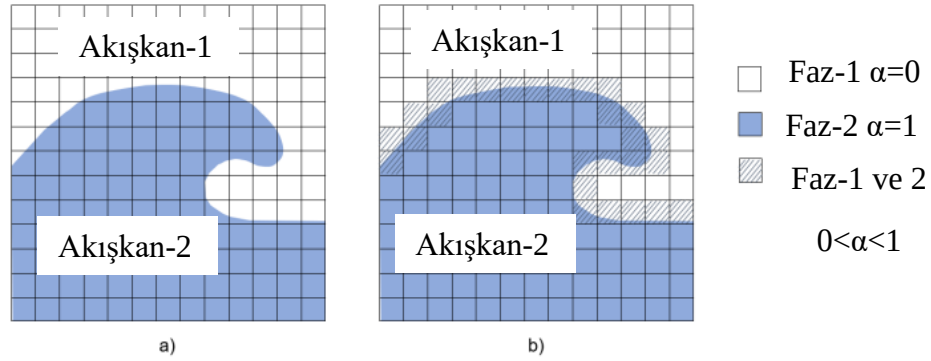
Bu taşınım denkleminin ayrıklaştırılmasındaki temel zorluklar, arayüzün yapay difüzyonunu azaltmak (yani keskin bir arayüz elde etmek) ve sınırlılığı sağlamaktır (yani, değişikliklerin monoton olduğu fiziksel değerleri) (Waclawczyk ve Koronowicz, 2008).

VOF yöntemi, iki faz için yalnızca bir dizi yapısal denklemi çözer. Ara yüzeydeki akışkan özelliklerinin değerleri, her hücredeki α değerine dayalı olarak su ve hava değerlerinin ağırlıklandırılmasıyla hesaplanır. Yoğunluk ve dinamik viskozite için bu, sırasıyla Denklem 3.31 ve Denklem 3.32'de verilmiştir (Waclawczyk ve Koronowicz, 2008).

$$\rho = \rho_w \alpha + \rho_a (1 - \alpha) \quad (3.31)$$

$$\mu = \mu_w \alpha + \mu_a (1 - \alpha) \quad (3.32)$$

w ve α alt simgeleri su ve hava anlamına gelmektedir. VOF yönteminde temsil edilen iki fazın ve ara yüzlerinin bir diyagramı Şekil 3.17’de gösterilmektedir.



Şekil 3.17 : a) Mesh yapısı içinde tanımlanmak istenen akışların görünümü b) İki akışkanın VOF yöntemiyle tanımlanması (Waclawczyk ve Koronowicz, 2008’den değiştirilmiştir).

Hirt ve Nichols (1981) çalışmasında VOF formülasyonu, verici-alıcı şemasına (donor-acceptor scheme-DAS) dayanır. Bu şemayı, mansaptaki akışkan hacmini yönlendirmek için bir akım dalgasının rüzgarın estiğı yöne doğru farklılaşmasının uygulanmasına benzetebiliriz, yani donör hücreden (akışkan hacminin mansaba taşıdığı hücre) alıcı hücre değerine (akışkan hacmini alan mansaptaki hücre) geçirir. Bu yaklaşım, hücre yüzeylerinden geçen sıvı miktarını hesaplamak için serbest yüzeyin yönünü dikkate alır ve genel sınırlılığı sağlar (0 ile 1 arasındaki hacim oranı). Bununla birlikte, yerel sınırlılığı garanti etmez (yani, α değerleri, bir kez tavsiye edildiğinde komşularına göre sınırlandırılmayabilir).

Sayısal model kurulumu ile ilgili akışkan hareketi denklemleri kütle, momentum ve enerjinin korunum yasalarından oluşur. Gerçek ve türbülanslı akımlar için momentum denklemleri, Navier-Stokes (NS) denklemleri olarak adlandırılan bir denklem sistemini oluşturur. NS denklemleri, sıvı ortamında bulunan genel bir kontrol hacmine uygulanır. Bu tezin odaklandığı hidrolik serbest yüzey akışlarının sabit sıcaklıkta olduğu varsayılır ve bu nedenle enerji denklemine gerek yoktur. Tipik hidrolik serbest yüzey akışlarında çözülen korunum denklem sistemi, kütle ve momentum koruma denklemlerinden oluşur.

Sıkıştırılabilir bir akışkanın süreklilik denklemi Denklem 3.33’te verildiğı gibidir,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3.33)$$

veya Denklem 3.34’teki gibi vektör gösterimiyle ifade edilebilir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \rho \mathbf{u} = 0 \quad (3.34)$$

Burada; $\mathbf{u}$ sıvı hız vektörü olduğunda: $\mathbf{u} = (u, v, w)$ ve ρ sıvı yoğunluğudur.

Hidrolik akış durumunda, su sıkıştırılamaz bir akışkan olarak kabul edilerek kütle korunum denklemi Denklem 3.35'teki gibi ifade edilebilir:

$$\nabla \mathbf{u} = 0 \quad (3.35)$$

Momentum korunum denklemi, bir akışkan parçacığının momentum değişim oranının parçacığının toplam kuvvetlerine eşit olduğunu belirten Newton'un ikinci yasasına dayanır. Viskoz gerilmelerin deformasyon hızlarıyla doğru orantılı bir ilişki sürdürdüğü bir Newtonian sıvıda (su gibi), viskoz gerilmeler doğrusal deformasyon ve hacimsel deformasyon oranları cinsinden yazılabilir. Momentum denklemlerinin x , y ve z bileşenleri, Denklem 3.36-3.38 aralığında belirtilen şekildedir.

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho F_x \quad (3.36)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho F_y \quad (3.37)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho F_z \quad (3.38)$$

Burada p basınç olduğunda, μ dinamik viskozitedir ve F_x , F_y ve F_z sıvıya etki eden yerçekimi ivmesinden oluşan yüzey kuvvetleridir. Denklem 3.36-3.38 aralığında verilen denklemleri Denklem 3.39'daki gibi vektörel şekilde yazabiliriz:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} \quad (3.39)$$

Burada; $\mathbf{g}$ yerçekimi ivme vektörüdür. Sol taraftaki ilk terim, zaman türevini ifade eder ve ikincisi, ön terimdir. Sağ tarafta, ilk terim basınç gradyanıdır, ikinci terim difüzyon terimidir ve son terim, bu durumda yerçekimi olan sıvı üzerine etki eden yüzey kuvvetlerini ifade eder.

3.6.2 Türbülans modeli

Simülasyonların çözümünde sıkıştırılamayan akışkanlar için kullanılan süreklilik denklemleri ile RANS denklemleri akışkanın hareketini tanımlamada temel bünye denklemleridir. Bu çalışmada iki denklemlilik k - ϵ türbülans kapatma modeli türbülans gerilmelerini hesaplamak için kullanılmıştır. Kullanılan bu kapatma modeli

parametrelendirmesi özellikle hidrolik kontrol yapıları açısından güvenilir bir akım türbülansının gözlemlenmesini sağlar (Aköz ve diğ, 2009). Renormalization Group (RNG) $k-\varepsilon$ modeli, ilk olarak Yakhot ve Orszag (1986) tarafından önerilen bir modeldir. RNG teorisi olarak adlandırılan istatistiksel bir tekniğe dayanmaktadır. Çeşitli geliştirmelerle Standart $k-\varepsilon$ modeliyle karşılaştırılabilir. Bu modelin, hızla gerilen akışların yanı sıra dönen akışlar için doğruluğu iyileştirdiği iddia edilmektedir. RNG $k-\varepsilon$ modelinde sabit değerlerden oluşan ve Standart $k-\varepsilon$ modelinde sunulan Prandtl sayıları analitik olarak türetilmiştir. Bu nedenle bunlar farklı değerlerle değiştirilir. Bu modelin temel bir özelliği, Standart modelin yalnızca yüksek Re sayılarına uygulanabilir olmasına ve düşük Re sayılı alanlarda özel işlem gerektirmesine rağmen, RNG modelinin düşük Re sayısına sahip alanları hesaba katan bir öge içermesidir. Bu, etkili bir viskozite terimi kullanılarak elde edilir. RNG $k-\varepsilon$ modeli için taşıma denklemleri Denklem 3.40 ve 3.41’de verilmiştir.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho k \mathbf{U}) = \nabla(a_k \mu_{eff} \nabla k) + \tau_{ij} S_{ij} - \rho \varepsilon \quad (3.40)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho \varepsilon \mathbf{U}) = \nabla(a_\varepsilon \mu_{eff} \nabla \varepsilon) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} S_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.41)$$

μ_{eff} etkin viskozitedir ve Denklem 3.42’deki gibi hesaplanır.

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (3.42)$$

Türbülans viskozitesi olan μ_t aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.43)$$

Burada, C_μ türbülans modeli sabitidir.

RNG türbülans modeli türbülans kinetik enerji (k) ve türbülans kinetik enerjinin yayılım oranı (ε) denklemini doğrudan çözerek süreklilik ve momentum denkleminin kapatılmasını yani çözümünü sağlamaktadır. RNG $k-\varepsilon$ türbülans modeli Yakhot ve diğ. (1992) tarafından düşünülmüş ve geliştirilmiş yine iki denklemlili bir model olup esas itibarıyla NS denklemlerinden renormalization group teorisi kullanılarak elde edilmiştir. Bu modelde k ve ε için transport denklemleri Denklem 3.44 ve 3.45’teki gibi vektörel şekle ilave olarak daha açık bir şekilde yazılabilir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (3.44)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R \quad (3.45)$$

RNG k - ε modelinin Standart k - ε modeline göre en büyük farkı, ε denklemine ilave olarak gelen R terimidir. Bu terim,

$$R = \frac{c_\mu \rho \eta^3 \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0}\right) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{1}{k} \quad (3.46)$$

olarak hesaplanır. Bu ifade Denklem 3.45'te yerine yazılırsa türbülans kinetik enerjisi kayıp oranı ε denklemi şu şekilde ifade edilir:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon_i u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon}^* \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.47)$$

Denklem 3.47'deki $C_{2\varepsilon}^*$ terimi aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$C_{2\varepsilon}^* = C_{2\varepsilon} + \frac{c_\mu \eta^3 \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0}\right)}{1 + \beta \eta^3} \quad (3.48)$$

Burada; η türbülans kinetik enerjisinin üretimi ve kayıp oranının bir fonksiyonu olup şekil değiştirme tensörü S parametresini içermektedir. Bu ilave terim, Standart k - ε türbülans modelinde olmayan, yüksek kayma oranları ve akım çizgisi eğriliklerini göz önüne alması açısından önemlidir. Bu çalışmamız için model sabitleri $C_\mu=0.0845$; $a_k= a_\varepsilon=1.39$; $C_{1\varepsilon}=1.42$ ve $C_{2\varepsilon}=1.68$ olarak dikkate alınmıştır.

3.6.3 Sayısal modelin çözüm ağı (mesh) yapısı

Akışkan akımları ile su yapılarının etkileşime girdiği durumlarda, hesaplama ağı yapısının hassas sonuçlar elde etmede büyük ölçüde etkili olduğu bilinmektedir. Bu çalışmadaki çözüme uygun hesaplama ağının tasarımında, önceden edinilen deneyimlere göre, hız gradyanı ve su yüzü profilindeki değişimlerin artış gösterdiği yerlerdeki ağ yapısı sıklaştırılmış ve büyüme oranına bağlı olarak ağ sıklığı üst sınıra doğru azalmıştır. Burada blok tipine ve bloksuz duruma göre 7 farklı hesaplama ağı (mesh) kullanılmıştır. Çizelge 3.2'de bu tez kapsamında her blok tipi için kullanılan eleman sayıları, ortalama çarpıklık değeri ve ortalama diklik değeri verilmiştir. Çizelge 3.2'den de görüleceği üzere, blok sayılarının fazlalığı nedeniyle modeldeki detayların çokluğu, akımın yüksek türbülans ve etkileşiminden dolayı özellikle EKB'lere yakın kısımlarda yüksek çözünürlüklü ağ gereksinimi oluşmuştur. Bu durum çözüm süresini çok fazla arttıracığından hızlı ve optimum çözüm elde etmek için mesh sayısının belirlenmesinden sonra modelin ortalama “Skewness” ve “Orthogonal Quality” değerlerine bakılmıştır.

Çizelge 3.2 : Sayısal çözüme ait mesh sayıları.

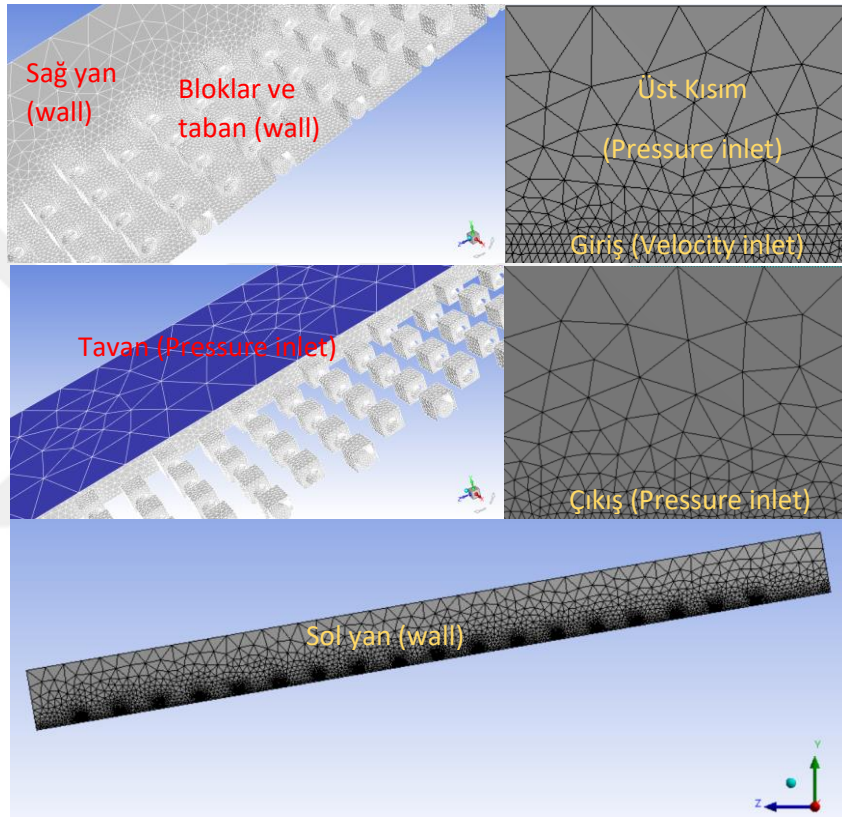
Blok Tipi	Eleman Sayısı	Ortalama Çarpıklık Değeri	Ortalama Diklik Değeri
Bloksuz	353717-751911	0.217-0.245	0.751-0.782
Tip-1	1250080-1794470	0.249-0.254	0.744-0.748
Tip-2	1247810-1770057	0.228-0.250	0.747-0.770
Tip-3	691512-1169141	0.217-0.234	0.764-0.781
Tip-4	657355-996403	0.217-0.232	0.766-0.781
Tip-5	814430-1285409	0.218-0.252	0.746-0.779
Tip-6	1438181-2547012	0.239-0.285	0.713-0.759

Sayısal çözümlerde bu iki parametre 0 ile 1 arasında değerler alır. Ancak çarpıklık (*Skewness*) değeri 1'e yaklaştıkça sayısal çözüm kalitesi düşerken, diklik kalite değeri (*Orthogonal Quality*) değeri 0'a yaklaştıkça çözüm kalitesi düşer. Çizelge 3.2'de görüleceği gibi ortalama çarpıklık değerleri yaklaşık 0.20 ile 0.30, ortalama diklik değerleri ise 0.70 ile 0.80 aralığında kalmaktadır ki bu değerler ortalama mesh kalitesinin oldukça iyi olduğunu göstermektedir. Ayrıca bu çalışma kapsamında kullanılan mesh geometrileri *Tetrahedron* şeklinde seçilmiştir. Bloklar arasında en yüksek mesh sayıları Tip-6 blok için elde edilirken, en düşük mesh sayıları Tip-4 için elde edilmiştir. Minimum mesh sayısı ise genel çözümler arasında bloksuz durum için elde edilmiştir.

3.6.4 Çözüm bölgesi, sınır ve başlangıç koşulları

Serbest yüzeyli EKŞ açık kanal akımlarının sayısal modellenmesinde kullanılan çözüm bölgesinin geometrisi ve sınır şartları Şekil 3.18'de görülmektedir. x , y , z koordinat sisteminin orijini, çözüm bölgesinin sol alt köşesi olarak alınmıştır. Çözüm bölgesinin üst sınırı, memba su seviyesinin 0.6 m üstünde, alt sınırı ise kanal tabanından geçmektedir. Üst sınır bölgesinin seçilen bu değeri sayısal simülasyondaki maksimum su derinliğinin yaklaşık olarak 6 katıdır. Bu değer, akım alanı üst bölgesindeki sınır koşullarının, simüle edilen su akışından etkilenmesini engellemiştir. Çözüm bölgesinin giriş sınırı olan şüt kanalı girişinde, farklı yüksekliklerde su fazı için hız girişi (*velocity inlet*) yüzeyleri tanımlanmıştır. Böylece her bir farklı su derinliği ve su hızı için (farklı Fr sayılarında) istenilen su debileri elde edilmiştir. Verilen su yüksekliğinin üzerindeki yüzeyler ise atmosfer girişi (*pressure inlet*) olarak tanımlanmıştır. Burada akımın kanala girişteki u_1 hızı deneylerde ölçülen değerlerle eşit alınmıştır. Yine düşey hız bileşeni sıfır ($u_2=0$) alınmıştır. Ayrıca kanal sonu mansap kısmında akım tamamen geliştikçe basınç dağılımının hidrostatik olduğu varsayılmıştır. Dolayısıyla kanal sonundaki serbest

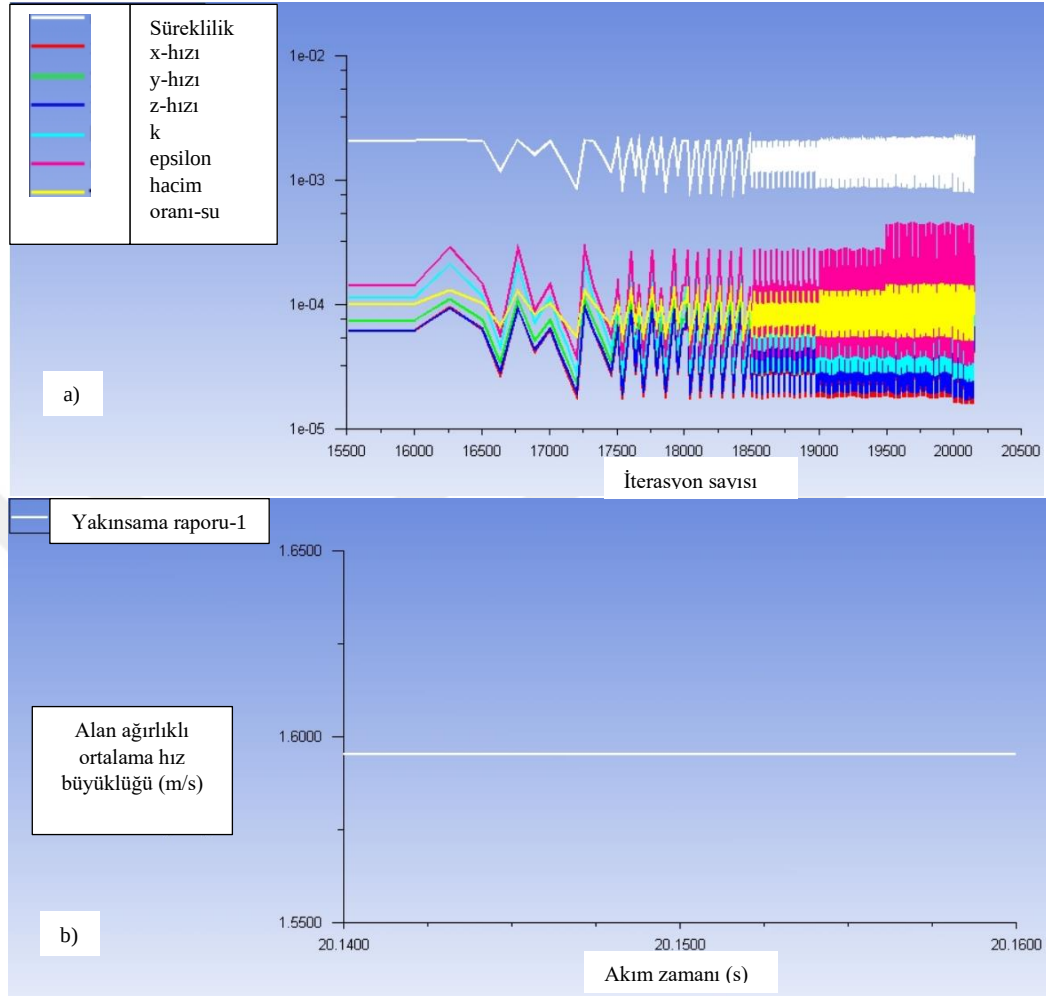
dökülme kesiti olan çıkış sınırında ve çözüm bölgesinin üst sınırında ise basınç şartı olarak $p=0$ değeri kullanılmıştır. Kanal yan duvarları ve taban sınırında sıfır-hız sınır şartı (*no-slip*), yani $u_1 = u_2 = 0$ kabulü yapılmış ve duvar olarak tanımlanmıştır. Akıma etki eden duvar pürüzlülüğü için duvar pürüzlülük değeri taban ve alt sınır kısmında 0.001 m olarak modellenmiştir. Deneysel ölçümlerde kanal yan duvarları sacdan ve taban plexiglass malzemeden yapıldığı için bu pürüzlülük değeri dikkate alınmıştır. Daha önce yapılan deneysel ve sayısal karşılaştırmalarda da pürüzlülük değeri olarak bu değer dikkate alınmıştır (Ohtsu ve diğ, 1999; Zare ve Baddour, 2007; Zare ve Doering, 2011).



Şekil 3.18 : Çözüm bölgesinin geometrisi ve sınır şartları.

Bu tez kapsamında sayısal çözümler için Fluent'te çözücü olarak PISO kullanılmıştır. Sayısal çözümde akımın kararlılığını sağlamak için tüm sayısal simülasyonlarda türbülans kinetik enerji değeri maksimum 0.8 alınarak kontrol edilmiştir. Yerçekimi ivmesi $g=9.81 \text{ m/s}^2$ olarak alınmıştır. Yine gerçek ortamda fiziksel çevreyi saran bir hava kütlesi olduğundan ortam yoğunluğu olarak havanın yoğunluğu alınmıştır ($\rho_a=1.225 \text{ kg/m}^3$). Modelin 40 saniye boyunca çözümü yapılarak stabil olması sağlanmış ve 20 saniye daha çözüm yaptırılarak bu 20 saniye süresince alınan mansap akım hızları ve basınç değerlerinin ortalamaları alınmıştır.

Şekil 3.19’da sayısal çözüm sırasında elde edilen, iteratif yakınsama ve kalıntı terimlerinin zaman içindeki değişimleri görülmektedir.



Şekil 3.19 : a) Sayısal çözümde kalıntı terimlerinin zaman içinde değişimi b) İteratif yakınsama.

3.6.5 Model doğrulama için istatistiksel yöntemler

Bu tez çalışması kapsamında oluşturduğumuz modeller bazı istatistikler parametreler kullanılarak kıyaslanmıştır. Bu parametreler, belirginlik katsayısı (R^2), kök ortalama kare hatası (KOKH) ve ortalama mutlak hatası (OMH) Denklem 3.49-3.51 arasında verilmiştir.

$$R = \frac{\sum_{j=1}^n (y_j - y_{j,m}) (\hat{y}_j - \hat{y}_{j,m})}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (y_j - y_{j,m})^2 \sum_{j=1}^n (\hat{y}_j - \hat{y}_{j,m})^2}} \quad (3.49)$$

$$KOKH = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_j - \hat{y}_j)^2} \quad (3.50)$$

$$OMH = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |y_j - \hat{y}_j|$$

(3.51)

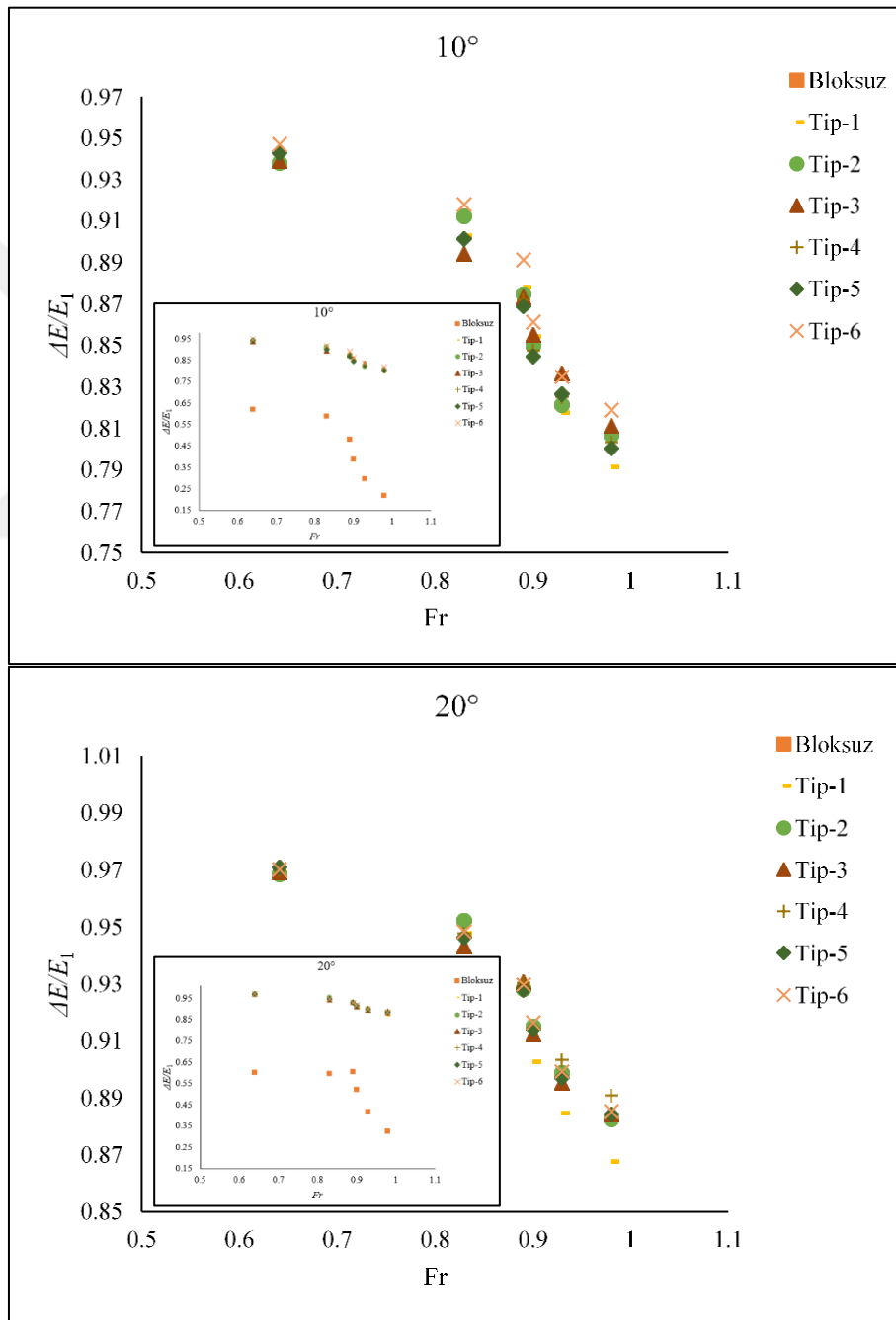
Burada y_j =ölçülen değeri, $\hat{y}_j$ =tahmin edilen değeri and m alt indisi ortalama değeri gösterir. Belirginlik katsayısı (R^2) 0 ile 1 değeri arasında değerler alır. R^2 1 değerine yakınsadığında, model mükemmele yaklaşır. KOKH ve MOH değeri 0 ile ∞ arasında değerler alır. Her ikisi de 0 değerine yakınsadıkça model mükemmele yaklaşır.



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Enerji Sönümlemenin Deneysel Olarak İncelenmesi

Bu bölümde EKŞ kanallarında 6 farklı geometriye sahip blok tipi ve bloksuz durum için enerji sönümleme performansları boyutsuz büyüklüklerle karşılaştırmalı olarak sunulmuş ve tartışılmıştır. Şekil 4.1, 4.3 ve 4.5'te rölatif enerji sönümleme miktarlarının Denklem 3.5-3.13 aralığındaki denklemler dikkate alınarak ($\Delta E/E_1$) ile Fr ile değişimleri verilmiştir.



Şekil 4.1 : $\alpha = 10^\circ - 20^\circ$ için $\Delta E/E_1$ ve Fr değişimi.

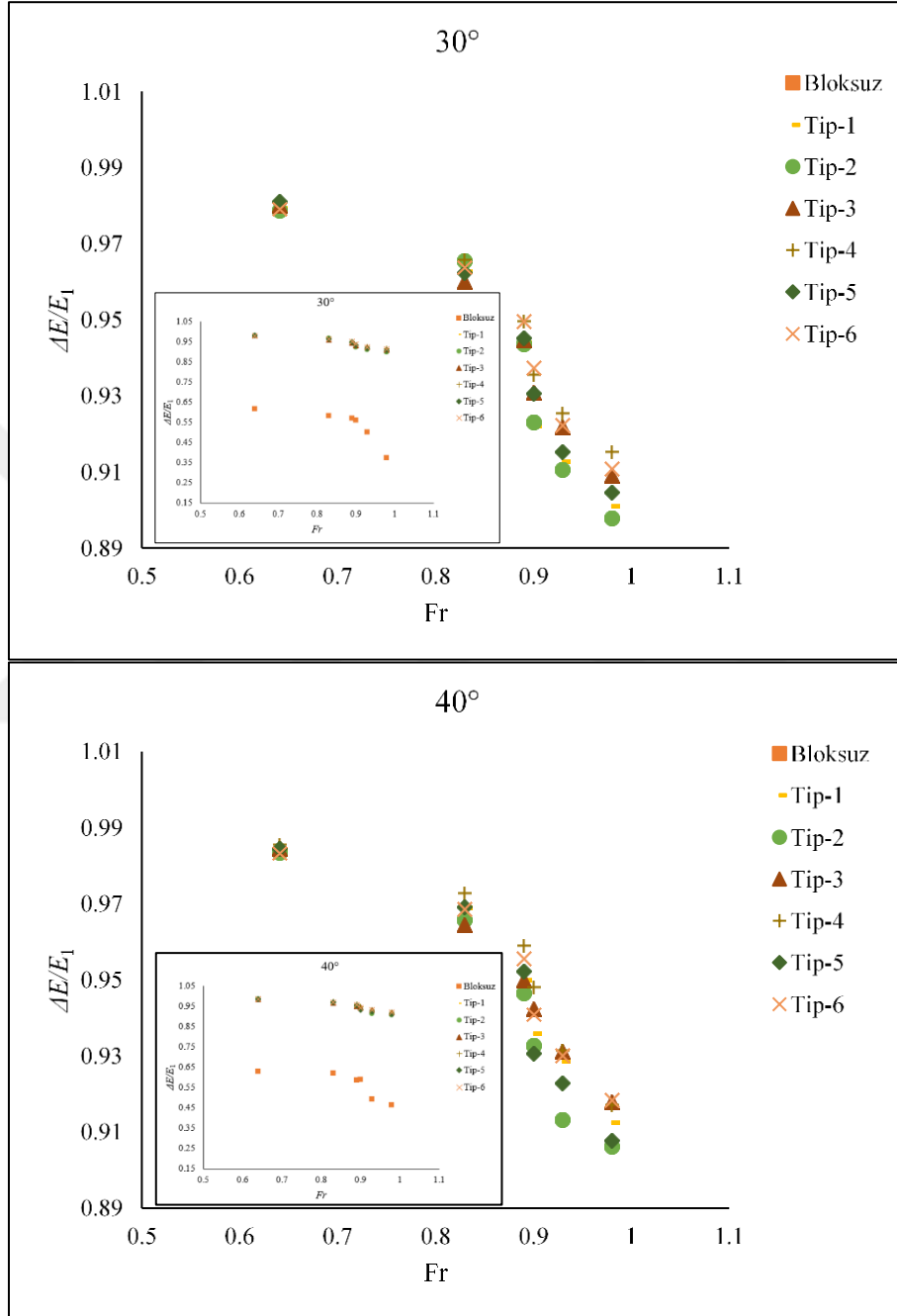
Şekil 4.1’de şüt kanalının $\alpha = 10^\circ$ - 20° açılarında tüm blok tipleri ve bloksuz durum için, Fr sayısının artmasına bağlı olarak rölatif enerji sönümlenme miktarının azaldığı görülmektedir. Bloksuz şüt için yapılan deneylerden elde edilen değerleri analiz edebilmek amacıyla, grafik üzerinde daha küçük ölçekte bir grafik verilmiştir. Burada kanal girişindeki Fr değerleri $Q=5-30$ L/s’lik debi aralığındaki değerlere göre belirlenmiştir. Blok tiplerini kendi içinde kıyasladığımızda, $\alpha=10^\circ$ için en fazla enerji sönümleyen Tip-6 blok türü iken, en az enerji sönümlenme Tip-4 blok için elde edilmiştir. Ancak genel olarak bu açı değeri için sönümlenen enerji miktarları birbirine yakındır. Yine $\alpha=20^\circ$ için ise en fazla enerji sönümlenme değeri Tip-2 için elde edilirken, Tip-3 için daha az bir değer elde edilmiştir. Her iki açı değerine baktığımızda bloksuz durum minimum enerji sönümlenmenin görüldüğü durumdur. Bu iki açı değerinden büyük olanına ait deney fotoğrafları minimum Fr sayısı için EKŞ kanalı içindeki akım görüntüleri Şekil 4.2’de verildiği gibidir.



Şekil 4.2 : $\alpha=20^\circ$ açı ve $Fr= 0.64$ için kanal içindeki akım durumları.

Şekil 4.3’te şüt kanalının $\alpha = 30^\circ$ - 40° eğim aralığında 6 farklı blok tipi ve bloksuz durum için, Fr sayısının artmasına bağlı olarak rölatif enerji sönümlenme miktarının azaldığı görülmektedir. Daha düşük eğimli grafiklerle (Şekil 4.1) karşılaştırıldığında bu grafiklerde

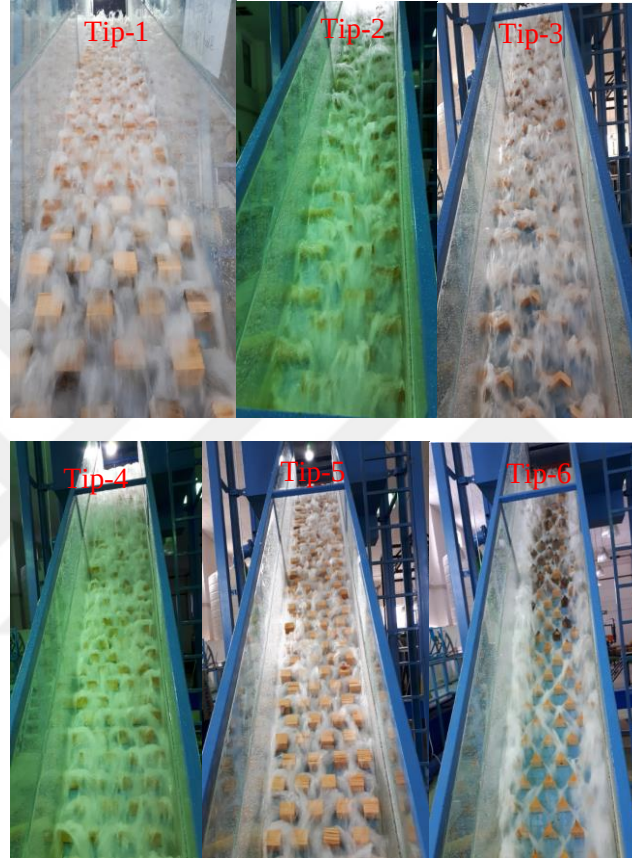
küçük Fr sayılarında blok şekillerinin enerji sönümleme üzerinde belirgin bir etkisi olmazken yüksek Fr sayılarında bu farkın belirginleşmeye başladığı görülmektedir. Yüksek Fr sayılarında enerji sönümlemenin daha önemli olacağı düşünüldüğünde, blok tiplerinin etkisi ve önemi de ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.3 : $\alpha = 30^\circ - 40^\circ$ için $\Delta E/E_1$ ve Fr değişimi.

Blok tiplerini kendi içinde kıyasladığımızda $\alpha = 30^\circ$ için Tip-4, Tip-5 ve Tip-6 blokları daha fazla enerji sönümlemişlerdir. Bu açı değeri için Fr sayısı arttıkça en az etkili olan blok tipi

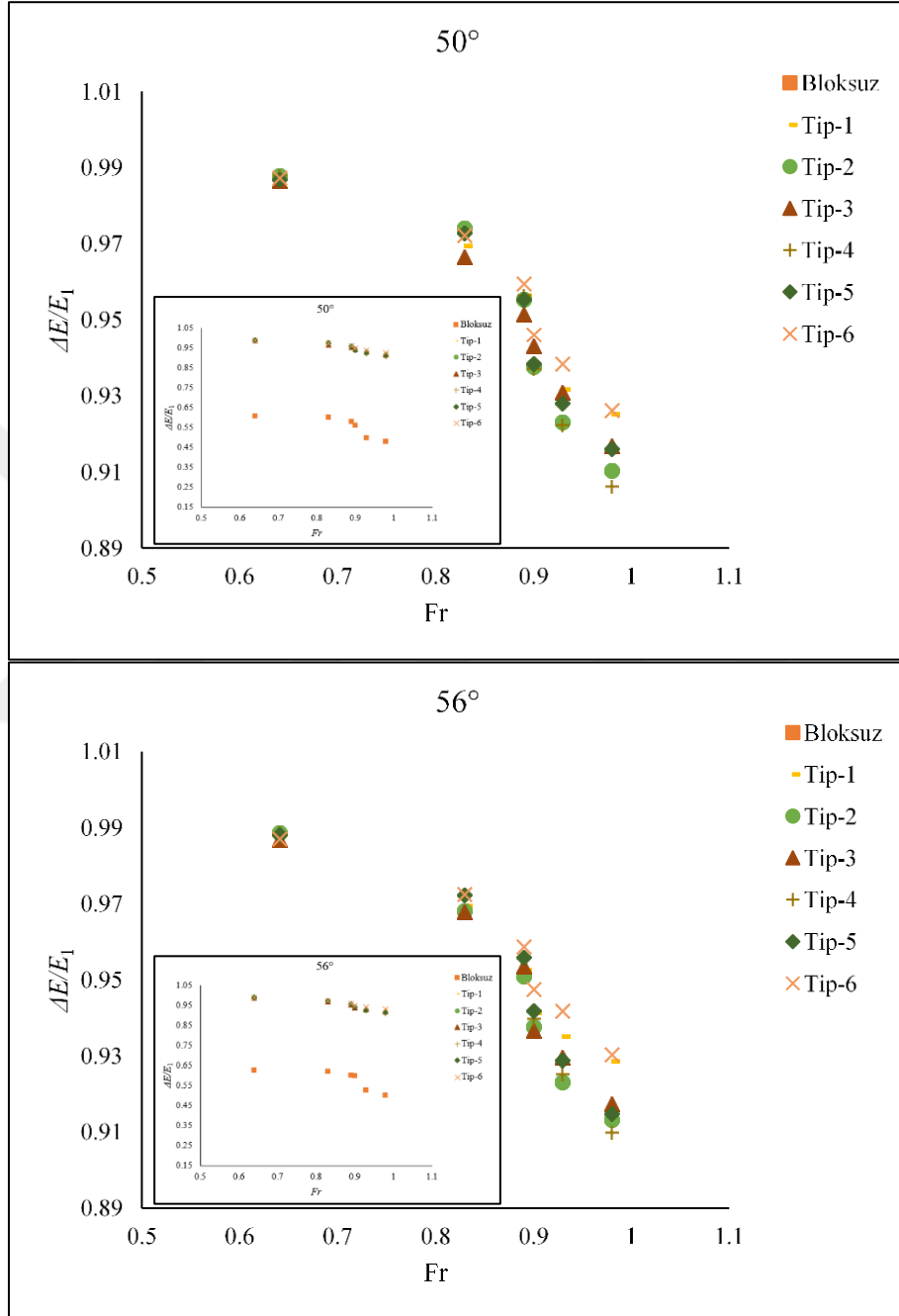
Tip-2 olarak belirlenmiştir. $\alpha=40^\circ$ için ise Tip-3, Tip-4 ve Tip-6 blok tiplerinin daha etkili olduğu söylenebilir. Genel olarak bütün blok tipleri en düşük Fr değerleri için en iyi enerji sönümleme etkisi göstermişlerdir. Her iki açı değeri için bloksuz durum, minimum enerji sönümlemenin görüldüğü durumdur. Bu iki açı değerinden büyük olanına ait deney fotoğrafları minimum Fr sayısı için EKŞ kanalı içindeki akım görüntüleri Şekil 4.4'te verildiği gibidir.



Şekil 4.4 : $\alpha=40^\circ$ açı ve $Fr= 0.64$ için kanal içindeki akım durumları.

Benzer şekilde, Şekil 4.5'te daha büyük eğim açıları $\alpha=50^\circ$ - 56° için 6 farklı blok tipi ve bloksuz durumda, Fr sayısının artmasına bağlı olarak rölatif enerji sönümleme miktarının azaldığı görülmektedir. Blok tiplerini kendi içinde kıyasladığımızda $\alpha=50^\circ$ için Tip-1 ve Tip-6 blokları daha fazla enerji sönümlemişlerdir. Bu açı değeri için Fr sayısı arttıkça en az etkili olan blok tipleri Tip-2 ve Tip-4 olarak belirlenmiştir. $\alpha=56^\circ$ için ise Tip-1 ve Tip-6 bloklarının daha etkili olduğu söylenebilir. Genel olarak bütün blok tipleri en düşük Fr değerleri için en iyi enerji sönümleme etkisi göstermişlerdir. Fakat yüksek Fr sayılarında ise blok tipleri arasındaki sönümleme farkı daha belirgindir. Bu iki açı değerinden büyük olanına ait deney fotoğrafları minimum Fr sayısı için EKŞ kanalı içindeki akım görüntüleri Şekil 4.6'da verildiği gibidir. Burada dikkat çeken Tip-6 blok hemen hemen bütün açı

değerlerinde maksimum etkiyi göstermiştir. Blok yapısı incelendiğinde, akımı iki parçaya ayırarak yandaki bloktan gelen yine ikiye ayrılmış akımla çarpıtılarak sönümlenme gerçekleşmiştir. Yani akım bu şekilde çok fazla olan enerjiyi çarpma ve oluşan türbülansla azaltma eğilimi göstermiştir.



Şekil 4.5 : $\alpha = 50^\circ - 56^\circ$ için $\Delta E/E_1$ ve Fr değişimi.

Bütün açı değerlerine göre bloklar kıyaslandığında dik şüt açısı ($\alpha = 50^\circ - 56^\circ$) değerleri için Tip-1 ve Tip-6 blok tiplerinden birinin kullanımı daha faydalı olabilir. Orta düzey şüt

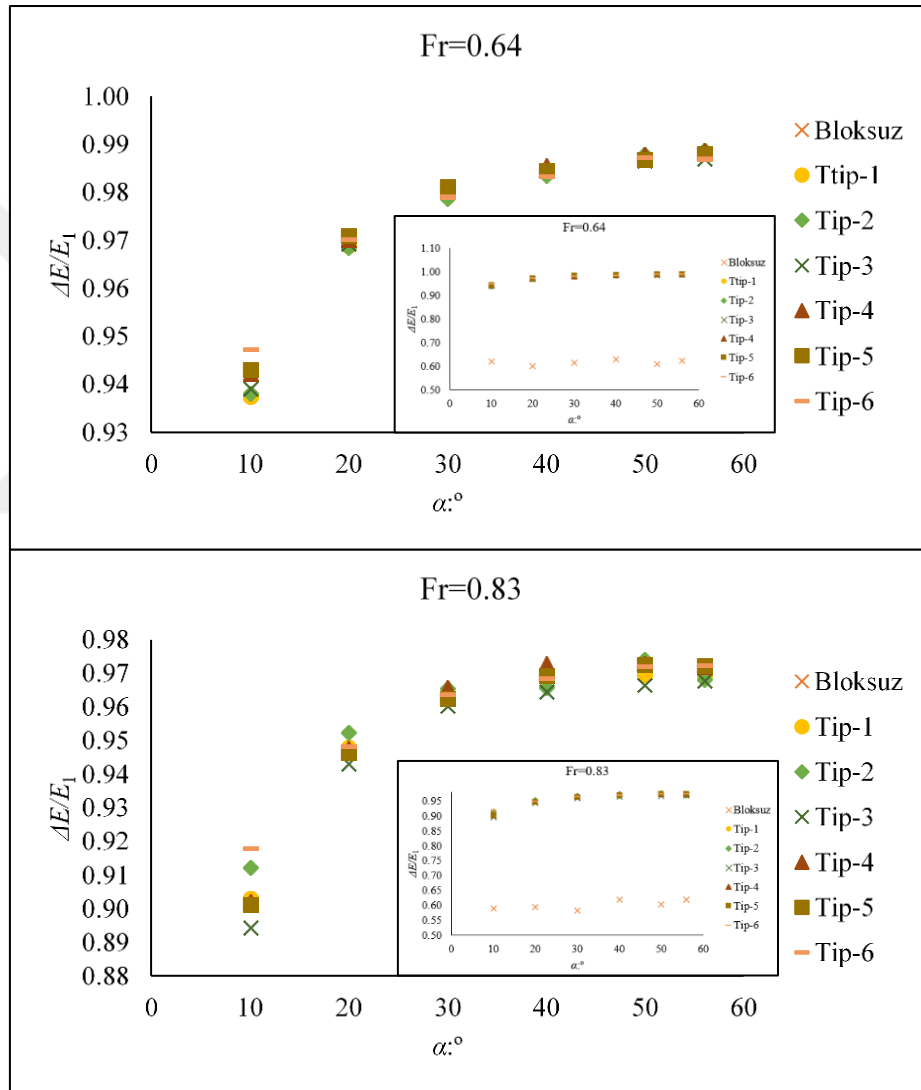
açıları için ($\alpha=30^\circ-40^\circ$) Tip-3, Tip-4, Tip-5 veya Tip-6 blok tiplerinden herhangi biri tercih edilebilir. Daha yumuşak şüt açıları ($\alpha=10^\circ-20^\circ$) için ise Tip-6 ve Tip-2 blok tiplerinden birinin kullanımı tavsiye edilebilir. Görüleceği gibi blok tipleri arasından bütün açı değerleri için Tip-6 blok tavsiye edilebilir. Tip-6'nın sönümlediği enerji miktarı bakımından diğer blok tipleri içinden etkili olduğu söylenebilir.



Şekil 4.6 : $\alpha=56^\circ$ açı ve $Fr=0.64$ için kanal içindeki akım durumları.

Şekil 4.7-4.9 arasındaki grafiklerde her bir Fr sayısı için, farklı EKB durumlarında rölatif enerji sönümleme oranının şüt eğim açısıyla değişimleri sunulmuştur. Yine her bir grafiğin içerisine bloksuz ve bloklu şüt kanallarındaki enerji sönümleme farkını göstermek için ayrı bir grafik yerleştirilmiştir. Grafiklere genel olarak bakıldığında, rölatif enerji sönümleme oranının şüt açısıyla gittikçe azalan bir artış hızıyla arttığı ve bu artışın yaklaşık olarak maksimum %90-99 seviyeleri arasında durduğu görülmektedir. Yine bu grafiklerde de düşük açılarda ve düşük enerji seviyelerinde blok tipinin enerji sönümleme üzerindeki etkisinin daha belirgin olduğu görülmektedir. Yüksek eğimlerde bu fark belirgin değildir. Bunun sebebi düşük eğimlerde ve düşük akım derinliklerinde (yüksek Fr sayılarında) akımın blok şeklini daha iyi hissetmesi olarak yorumlanabilir.

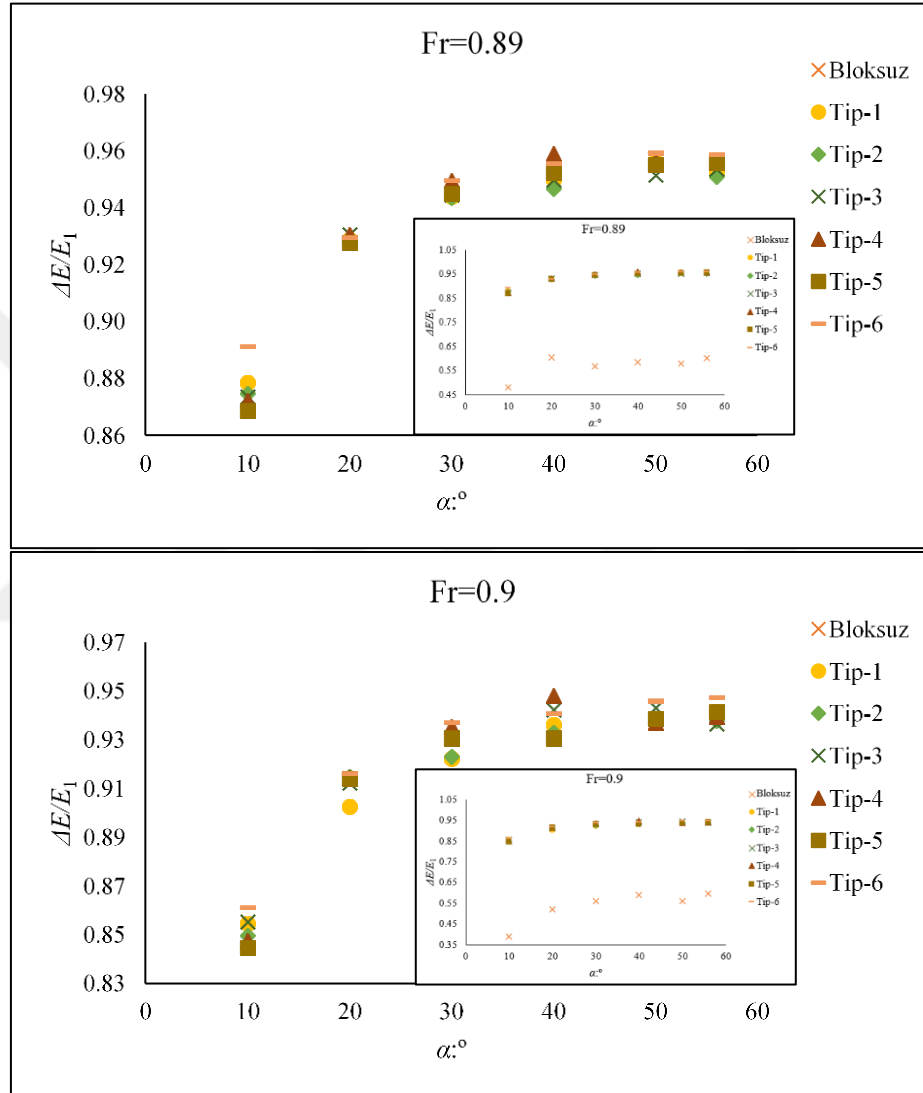
Herbir grafik ayrıntılı olarak değerlendirildiğinde; $Fr=0.64$ için, açı değeri arttıkça rölatif enerji sönümlleme değeri de bütün blok tipleri için artmıştır. Ancak $\alpha=10^\circ$ 'de Tip-6; $\alpha=20^\circ$ - 30° 'de Tip-5 ve $\alpha=40^\circ$ - 56° 'de ise Tip-4 blok tiplerinin az da olsa diğer blok tiplerine göre daha etkili olduğu söylenebilir. $Fr=0.83$ için, yine açı değeri arttıkça rölatif enerji sönümlleme değeri de bütün blok tipleri için artmıştır. Ancak $\alpha=10^\circ$ 'de Tip-6; $\alpha=20^\circ$ 'de Tip-2; $\alpha=30^\circ$ - 40° 'de Tip-4 ve $\alpha=50^\circ$ - 56° için Tip-5 ve Tip-6 blok tiplerinin daha etkili olduğu söylenebilir. Genel anlamda minimum açı değeri için en az enerji sönümlenirken, maksimum açı değeri için en fazla enerjinin sönümlendiği söylenebilir.



Şekil 4.7 : $Fr= 0.64$ - 0.83 için $\Delta E/E_1$ ve α değişimi.

EKŞ kanalında $Fr= 0.89$ - 0.90 için rölatif enerji sönümlleme ($\Delta E/E_1$) ve açı (α) değişimi Şekil 4.8'de verilmiştir. $Fr=0.89$ için, açı değeri arttıkça rölatif enerji sönümlleme değeri de bütün blok tipleri için artmıştır. Ancak $\alpha=10^\circ$ 'de Tip-6; $\alpha=20^\circ$ 'de Tip-3 ve Tip-4;

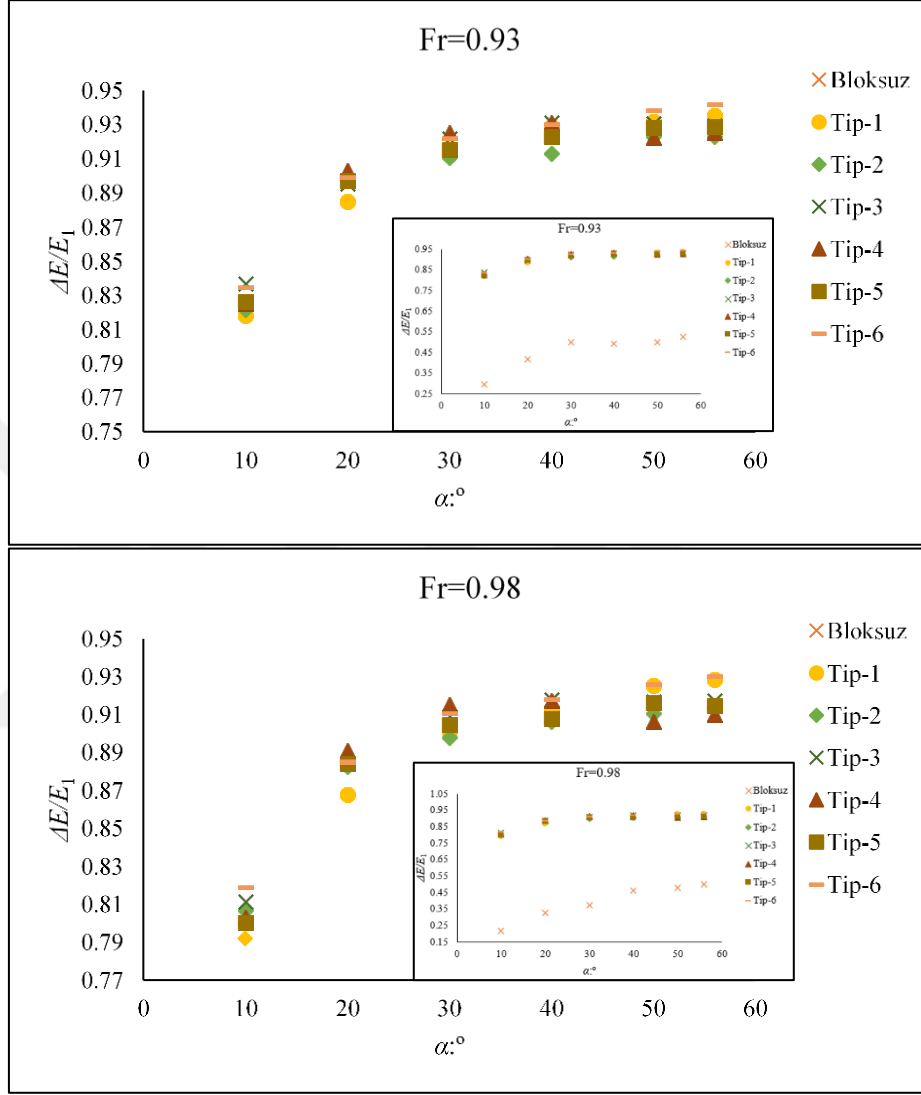
$\alpha=30^\circ$ 'de Tip-4 ve Tip-6; $\alpha=40^\circ$ 'de Tip-4 ve $\alpha=50^\circ$ - 56° 'de ise Tip-6 bloğun az da olsa diğer blok tiplerine göre daha etkili olduğu söylenebilir. $Fr=0.90$ için yine aç değeri arttıkça rlatif enerji snömleme değeri de bütün blok tipleri için artmıştır. Ancak $\alpha=10^\circ$ - 30° 'de Tip-6; $\alpha=40^\circ$ 'de Tip-4 ve $\alpha=50^\circ$ - 56° için yine Tip-6 blok tipinin daha etkili olduğu söylenebilir. Genel anlamda minimum aç değeri için en az enerji snömlenirken, maksimum aç değeri için en fazla enerjinin snömlendiği söylenebilir.



Şekil 4.8 : $Fr= 0.89$ - 0.90 için $\Delta E/E_1$ ve α değışimi.

EKŞ kanalında $Fr= 0.93$ - 0.98 için rlatif enerji snömleme ($\Delta E/E_1$) ve aç (α) değışimi Şekil 4.9'da verilmiştir. $Fr=0.93$ için, aç değeri arttıkça rlatif enerji snömleme değeri de bütün blok tipleri için artmıştır. Ancak $\alpha=10^\circ$ 'de Tip-3; $\alpha=20^\circ$ - 30° 'de Tip-4 ve $\alpha=50^\circ$ - 56° 'de ise Tip-6 blok tipinin az da olsa diğer blok tiplerine göre daha etkili olduğu söylenebilir. $Fr=0.98$ için yine aç değeri arttıkça rlatif enerji snömleme değeri de bütün

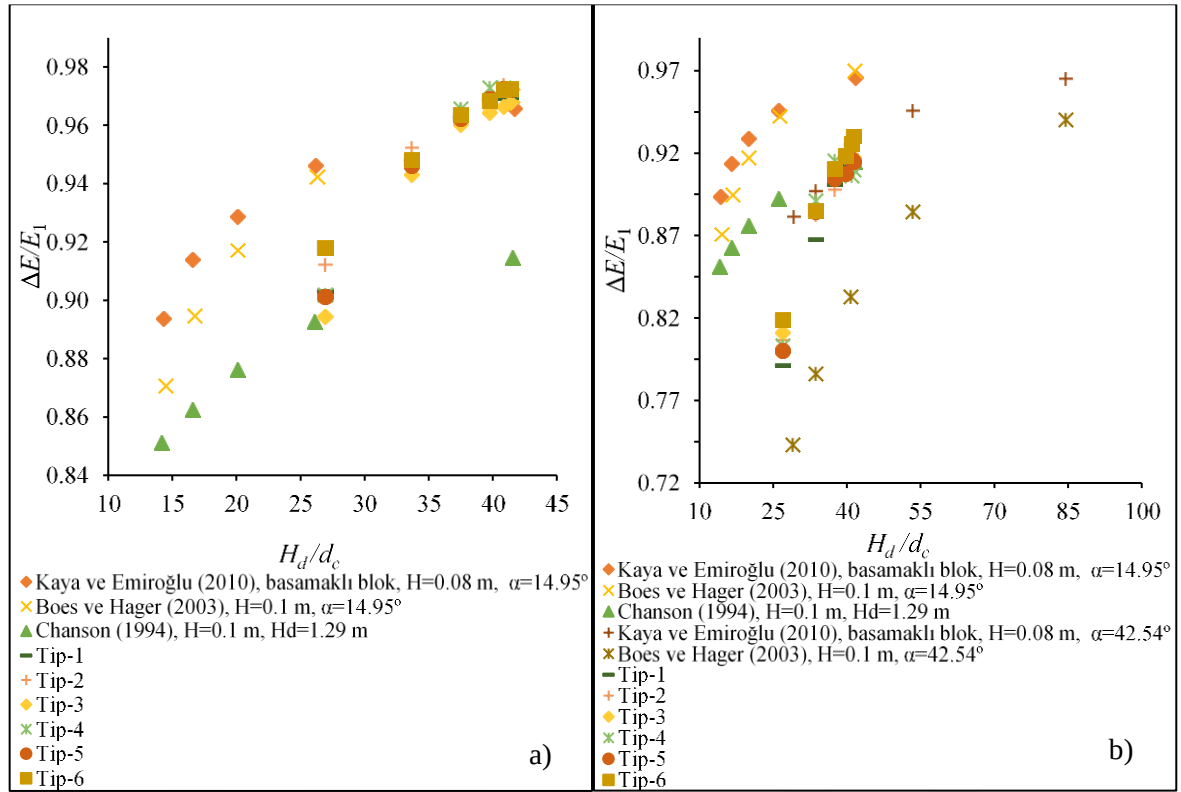
blok tipleri için artmıştır. Ancak $\alpha=10^\circ$ 'de Tip-6; $\alpha=20^\circ - 30^\circ$ 'de Tip-4; $\alpha=40^\circ$ 'de Tip-3 ve Tip-6 ve $\alpha=50^\circ - 56^\circ$ için ise Tip-1 ve Tip-6 blok tiplerinin daha etkili olduğu söylenebilir. Genel anlamda minimum açı değeri için en az enerji sönümlenirken, maksimum açı değeri için en fazla enerjinin sönümlendiği söylenebilir.



Şekil 4.9 : $Fr = 0.93-0.98$ için $\Delta E/E_1$ ve α değişimi.

Bu çalışmada elde edilen enerji sönümleme sonuçları, Şekil 4.10 (a-b)'de literatürdeki çalışmalardan elde edilen verilerle kıyaslanmıştır. Literatürdeki diğer çalışmalarla daha doğru bir karşılaştırma yapabilmek için blok yükseklik değerleri bizim çalışmamıza yakın olan çalışmalar seçilmiştir. Yine benzer akış senaryoları için şüt açıları birbirine yakın olacak şekilde seçilmiştir. Yapılan karşılaştırmada, Şekil 4.10 (a)'da gösterildiği gibi düşük $Fr=0.64-0.83$ sayılarında H_d/d_c 'nin düşük değerleri için literatüre göre blokların etkisi daha az olurken, yüksek H_d/d_c değerlerinde blok etkisi daha fazla görülmüş ve

sönümlenen enerji miktarlarına bakıldığında (Chanson, 1994; Boes ve Hager, 2003; Kaya ve Emiroğlu, 2010) çalışmalarından daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4.10 : Mevcut çalışma ile literatür çalışmalarının karşılaştırılması a) $Fr=0.64-0.83$ için b) $Fr=0.98$ için.

Şekil 4.10 (b)'de ise bizim çalışmamızın maksimum $Fr=0.98$ sayısı için H_d/d_c 'nin artmasına bağlı olarak enerji sönümleme miktarı artış göstermiştir. Ancak genel olarak literatüre göre blokların enerji sönümleme etkisi ortalama düzeyde kaldığı söylenebilir. Burada yüksek H_d/d_c değerlerinde blok etkisi Boes ve Hager (2003) çalışmasına göre daha fazla hissedilmiş ve sönümlenen enerji miktarları daha fazla olmuştur. Yine yüksek açılar değerlerinde Kaya ve Emiroğlu (2010) çalışmasına çok yakın enerji sönümleme değerleri elde edilmiştir. Ayrıca düşük açı değerlerinde (Chanson, 1994; Kaya ve Emiroğlu, 2010) çalışmalarına göre bizim çalışmamızda daha düşük enerji sönümleme değerleri edilmiştir.

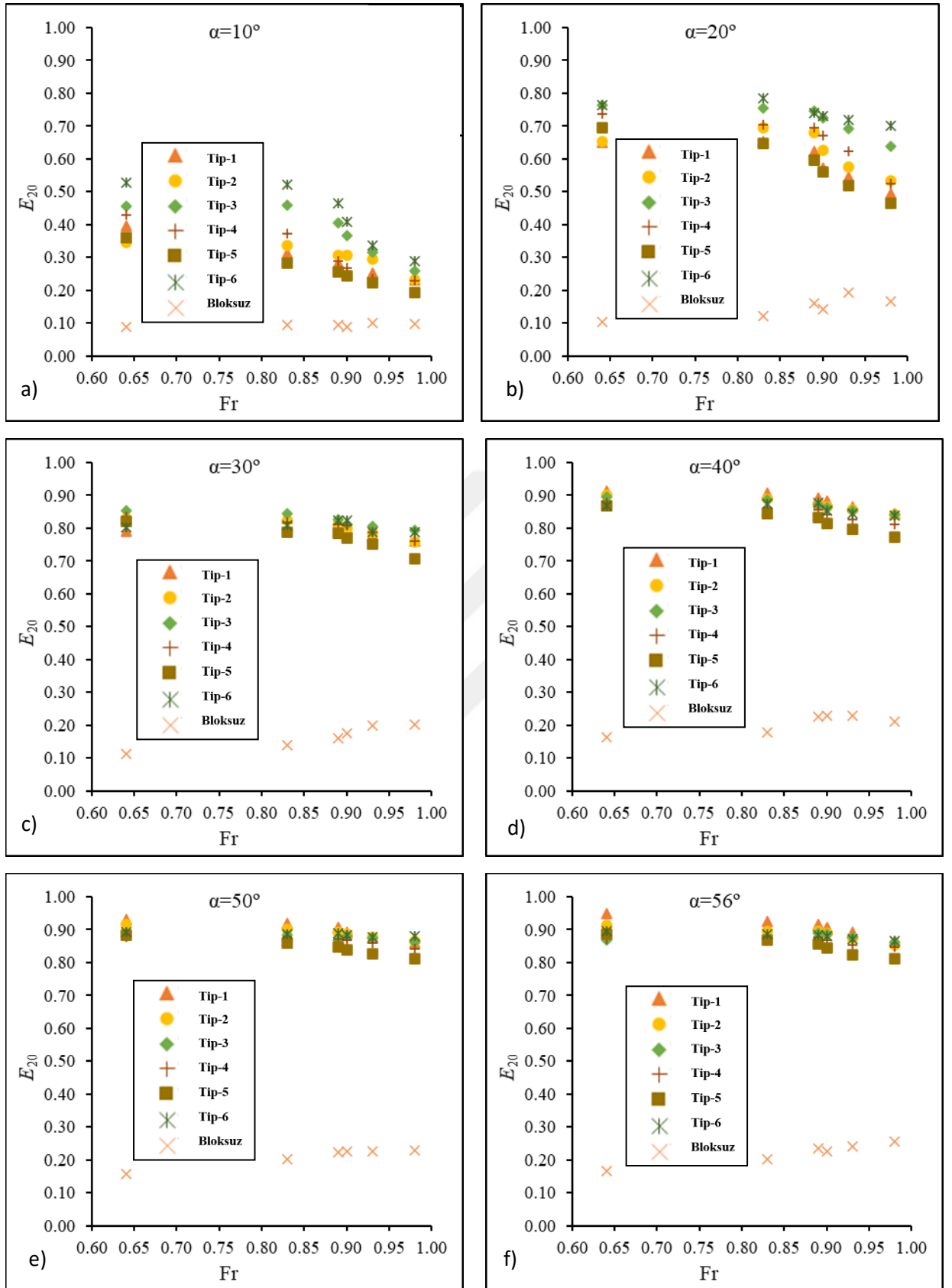
4.2 Oksijen Transfer Veriminin Deneysel Olarak İncelenmesi

Bu bölümde, EKŞ kanallarında enerji kırıcı blokların oksijen transferi verimlerini değerlendirebilmek için deneysel çalışmalardan elde edilen oksijen ölçümleri kullanılarak

bir takım boyutsuz grafikler çizdirilmiş ve yorumlanmıştır. Bu amaçla, 6 farklı geometriye sahip blok tipi ve bloksuz durum için OTV boyutsuz parametre Fr sayısı ve Denklem 3.14-3.27 arasındaki denklemler kullanılarak hesaplanan E_{20} değerleri, farklı açılar değerlerine göre karşılaştırılmıştır. Fr sayısı, şütün girişinden alınan ortalama hız ve derinlik değerleri kullanılarak hesaplandı. Diğer bir deyişle, şüt kanalı girişinde memba Fr sayıları kullanılmıştır. Sonuçlar Şekil 4.11 (a-f)'de grafik olarak verilmiştir. Bu grafiklerde Fr sayısı arttıkça OTV'nin azaldığı görülmektedir. Bununla birlikte, Fr sayısı arttıkça blok tipinin OTV üzerinde etkisi daha belirgin hale gelmektedir. Bloksuz kanalla karşılaştırıldığında ise EKB'lerin OTV üzerinde oldukça belirgin fark oluşturduğu görülmektedir. Sabit bir kanal genişliğinde geçen birim debinin ve kanal eğiminin artması; oksijen transferi olacak su miktarının ve su hızının artmasına neden olur. Su bloklara çarpma etkisiyle türbülanslı dalgalanmalar ve çalkantılar meydana gelir ve dolayısıyla oksijen verimi artar. Bu deneysel çalışmada blokların geometrik şekillerinden dolayı şüt kanalının hemen girişinden itibaren OTV'nin artmaya başladığı gözlenmiştir. Bu yüzden EKŞ boyunca OTV'nin meydana geldiği gözlenmiştir. Deney sırasında kanal içerisinden çekilen fotoğraflar bunun görsel delilidir (Şekil 4.12, 4.14). Dolayısıyla kanalın tepe kısmında oksijen sürüklenme noktalarına ait mesafeler ölçülmemiştir.

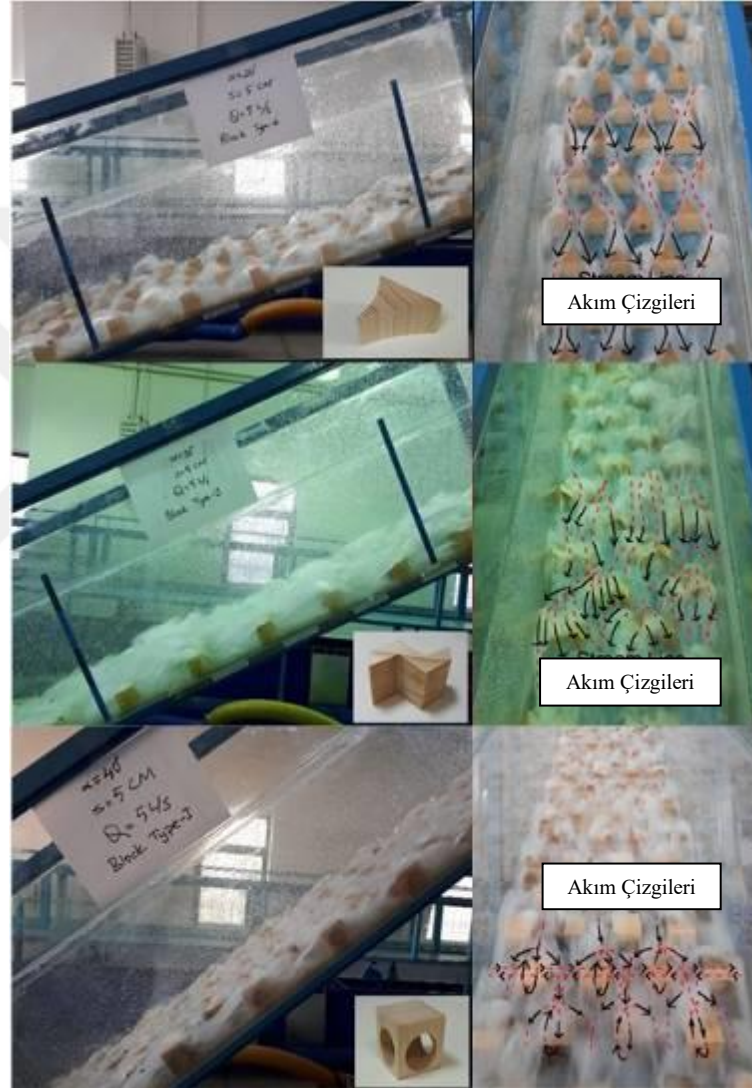
Şekil 4.11 (a-c) incelendiğinde $\alpha=10^\circ$ ve 20° için en yüksek OTV değerleri Tip-6 blok için elde edilmiştir. Bu blok tipinin akımı iki parçaya ayırarak türbülans ve çalkantıları arttırdığı ve böylece oksijenlendirme verimini arttırdığı düşünülmektedir. Ayrıca bu iki açı değeri için blokların OTV etkisi daha belirgindir. Yani diğer açı değerlerine kıyasla blokların transfer ettiği oksijen değerleri birbirlerinden çok farklı çıkmıştır. Örneğin, Tip-6 bloğun OTV değeri, minimum OTV değeri elde edilen Tip-5 bloğa göre %30'lara kadar daha fazla olduğu söylenebilir. $\alpha=30^\circ$ için ise en iyi OTV değerini Tip-3 blok sağlamıştır. Bunun sebebi ise, bloğun geometrisi suyun çarptığı yüzeyde çok fazla sıçrama ve bir sonraki blok sırasına akımı parçalayarak ilettiği için oksijen verimi doğal olarak artış göstermektedir. Ayrıca $\alpha=30^\circ$ şüt açısı için OTV değerleri bütün blok tipleri için birbirine yakın çıkmıştır.

Şekil 4.11 (d-f) incelendiğinde en yüksek verim Tip-1 blok için $\alpha=40^\circ$, $\alpha=50^\circ$ ve $\alpha=56^\circ$ de elde edilmiştir. Tip-1 blok, geometrisi gereği dar bir kesit içerisine giren suyu hem geri döndürerek hem de iki kola ayırarak yandaki bloktan gelen suyla çarpmasını sağlamaktadır. Akım burada kısa süreliğine de olsa basınçlı bir boru akımına dönüşmektedir. Bu durum kütle transferi için gerekli olan yüzey alanını artırır. Dolayısıyla



Şekil 4.11 : Fr sayısına bağlı olarak OTV (E_{20}) değişimi.

atmosferden havanın alındığı hızlı bir oksijen transferi gerçekleşir. Yine akım bloktan çıkarken yandaki bloktan gelen akımla hızlı bir şekilde çarpışarak havadan absorbe edilen oksijeni hızlıca transfer etmiş olur. Bunu hidrolik yapılarda bir düşü yüksekliği kazandırılmış olan suyu, mansaptaki su yüzeyine çarptırma mekanizması olarak benzeştirebiliriz. Bu durumda da benzer oksijen transferi gerçekleşir. Bloklar arasında diğerlerine göre daha az etkili olanın ise Tip-5 blok olduğu görülmektedir. Bu blok tipi düşük şüt açılarında ($\alpha=10^{\circ}$ - 30°) da minimum OTV sağlamıştır.



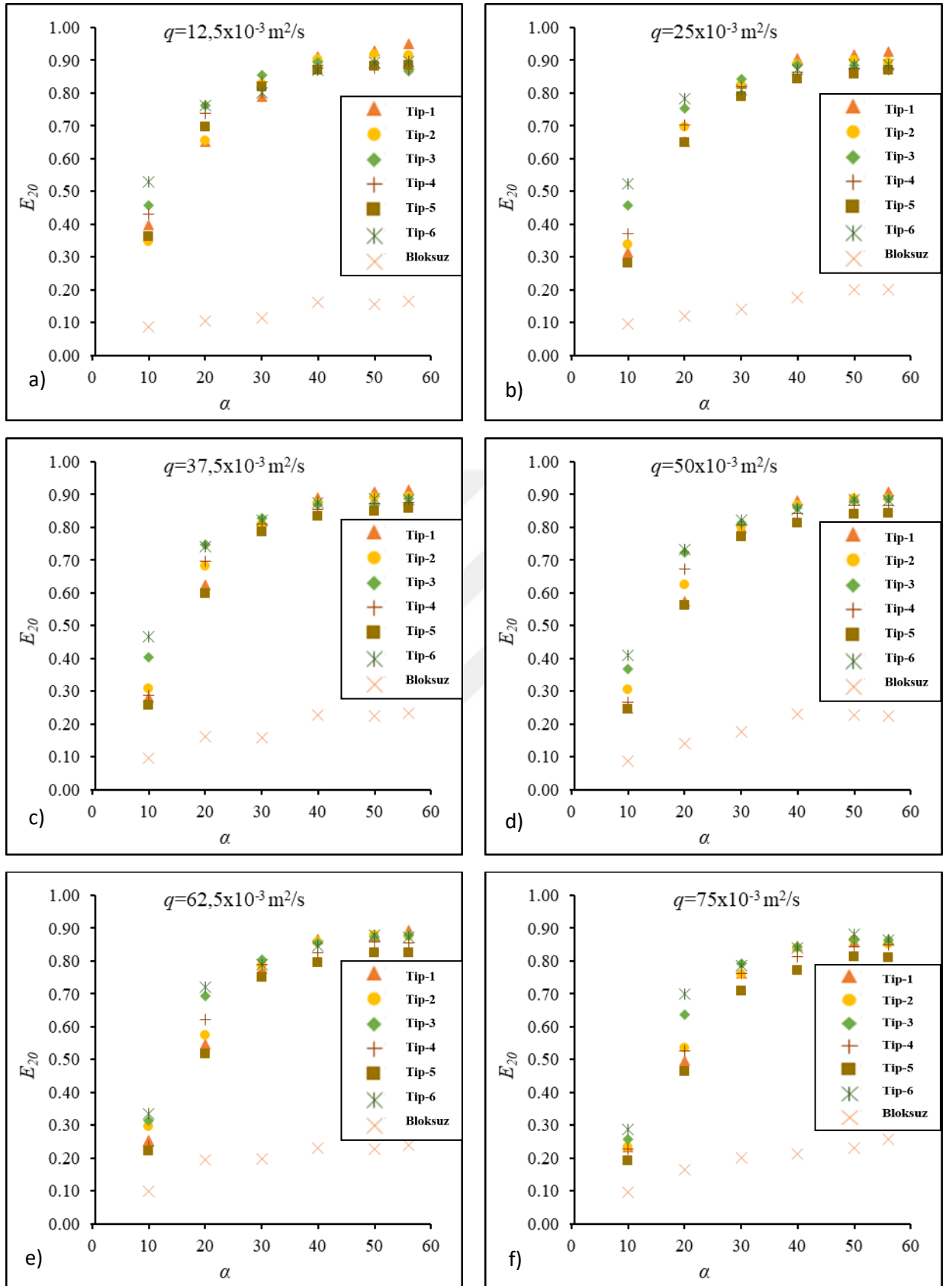
Şekil 4.12 : Tip-1, Tip-3 ve Tip-6 bloklarının kullanıldığı deneylerden görüntüler ve akım çizgileri durumu.

Yüksek şüt açılarında ($\alpha=40^{\circ}$ - 56°) OTV değerini arttırmasına rağmen bloklar arasında daha az etkili olan blok tipi olduğu söylenebilir. Tip-5 blok trapez bir kesite sahip olması nedeniyle, akımın çok fazla sıçramasına ve blok üzerinden kolayca geçmesine neden

olmaktadır. Bu durumda blok batık akım içerisinde kaldığı için diğer blok tiplerine göre daha az OTV sağladığı düşünülmektedir. Şekil 4.12’de deney sırasında elde edilen görüntülerde olduğu gibi, çok fazla kaotik bir akım ve güçlü köpüklenme meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca akım çizgileri bu görüntüler üzerinde çizilerek, akımın kanal içerisinde bloklar tarafından nasıl yönlendirildiği de daha belirgin olarak ortaya çıkmıştır.

Yine Şekil 4.11’de görüldüğü gibi bloksuz kanal durumu için ise Fr sayısı arttıkça OTV değeri çok fazla değişmemektedir. Ancak içinde blok olan bütün kanal ölçümlerinde OTV değerleri yüksek çıkmış ve Fr sayısı arttıkça OTV değerlerinde azalma eğilimi görülmüştür. Bunun nedeni farklı açılar değerlerinde blokların içinden, etrafından ve üzerinden geçen akım karakteristiklerinin değişken olması olabilir. Blok geometrisi ve birim debi değerleri de önemli faktörlerdir. Bütün bu parametreler akım içerisine giren hava kabarcıklarını etkiler. Daha önce yapılmış olan basamaklı dolusavak çalışmalarıyla da bu durum örtüşmektedir (Boes ve Hager, 2003; Gonzalez ve Chanson, 2008; Bung ve Valero, 2016; Zhang ve Chanson, 2018).

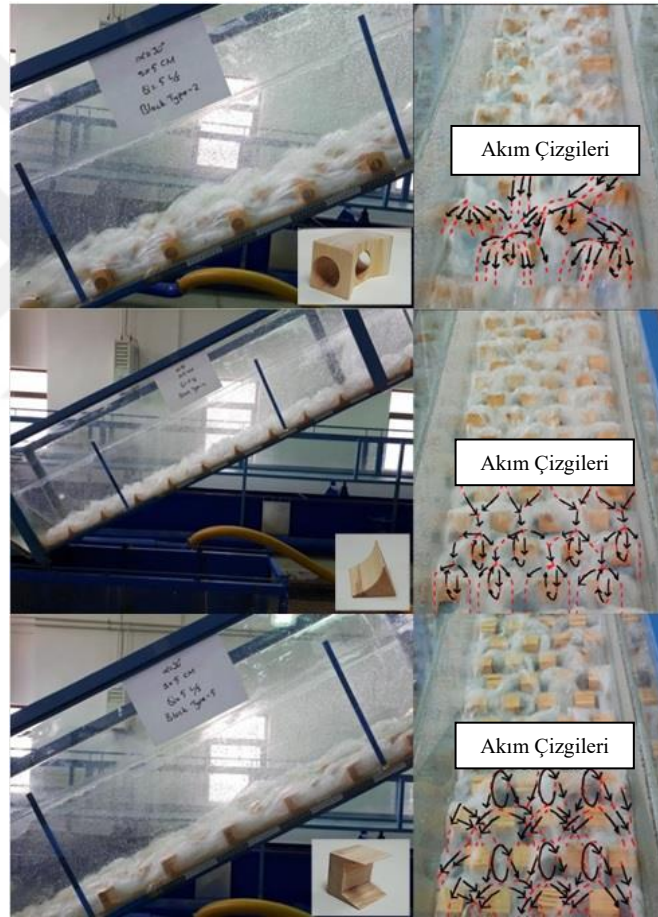
EKB’lerin OTV üzerine etkisini daha iyi gözlemlemek amacıyla Şekil 4.13 (a-f)’de, farklı birim debiler için EKB durumlarına göre ve E_{20} değerlerinin kanal açısı α ile değişimleri çizdirilmiştir. En yüksek açı değeri $\alpha=56^\circ$ için en fazla OTV değeri Tip-1 blok için yaklaşık %95 olarak ölçülmüştür. Aynı zamanda bu blok tipi diğer blok tiplerine göre yüksek açılarda ($40^\circ \leq \alpha \leq 56^\circ$) en fazla OTV sağlayan blok tipidir. $\alpha=30^\circ$ için bütün blok tiplerinde OTV değerleri birbirine çok yakın çıkmıştır. Yani blok geometrisinin şekil açısından bu açı değerinde çok fazla etkili olmadığını söyleyebiliriz. OTV’nin yüzde olarak en fazla arttığı açı değeri ise $\alpha=20^\circ$ ’dir. Çünkü $\alpha=10^\circ$ için elde edilen değerlerle $\alpha=20^\circ$ için elde edilen değerler arasında ciddi bir artış söz konusudur. Tip-3 blok için bu değer $\alpha=10^\circ$ ’den $\alpha=20^\circ$ ’ye OTV artış yüzdesi 75×10^{-3} m²/s birim debide %40’a yakın bir artış göstermiştir. Diğer blok tiplerinden; $12,5 \times 10^{-3}$ m²/s birim debide $\alpha=10^\circ$ ’den $\alpha=20^\circ$ ’ye Tip-2 için %30’dan daha fazla artış görülmüştür. $37,5 \times 10^{-3}$ m²/s birim debide Tip-5 blok için %35’e yakın değer elde edilmiştir. 50×10^{-3} m²/s ve $62,5 \times 10^{-3}$ m²/s birim debi değerleri için $\alpha=10^\circ$ ’den $\alpha=20^\circ$ ’ye yine Tip-5 blok daha fazla OTV değeri sağlamıştır. Tip-2, Tip-3, Tip-5 ve Tip-6 blokları için ise 75×10^{-3} m²/s birim debide $\alpha=10^\circ$ ’den $\alpha=56^\circ$ ’ye %60’a yakın değer artışı elde edilmiştir. Yüksek şüt açılarında Tip-6 blokta da Tip-1’e yakın yüksek OTV değerleri elde edilmiştir. Özellikle $\alpha=50^\circ$ - 56° aralığında ve 75×10^{-3} m²/s birim debide Tip-6 bloğun etkili olduğu söylenebilir. Geometrisi gereği akımı iki kısma parçalayarak bir sonraki blok sırasına aktaran bu blok enerji sönmeme miktarını ve



Şekil 4.13 : Birim debiye göre α ve E_{20} değişimi.

dolayısıyla OTV değerini de arttırmıştır. Bloksuz kanal için, birim debi değeri arttıkça havalandırma verimi çok az da olsa artmıştır. Bu durumun nedeni, belli bir kanal kesitinden geçen debinin artması havalanmış olan su miktarının da kısmen artmasına neden olmuştur. Elde edilen bu sonuçlar farklı blok şekillerinin farklı birim debilerde aynı etkiyi göstermediğini kanıtlar. Aynı zamanda saha uygulamalarında, birim debi değeri ve açığa bağlı blok tipini seçimine de önemli katkı sağlayabileceği düşünülmektedir.

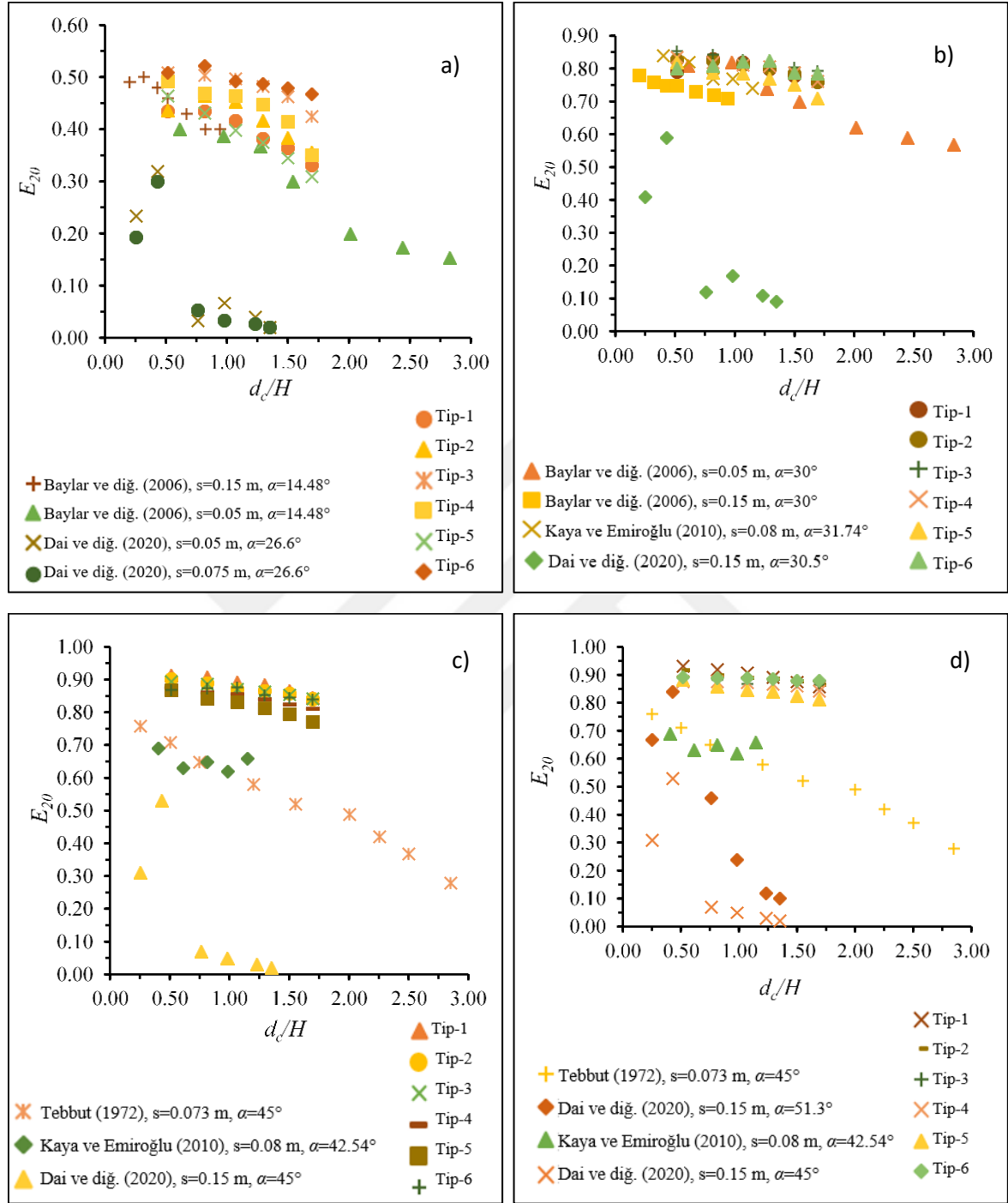
Şekil 4.14'te ise Tip-2, Tip-4 ve Tip-5 bloklarına ait akım görüntüleri de verilmiştir. Burada farklı geometrideki blok tiplerine göre farklı akım çizgileri çizilmiştir. Dolayısıyla blokların etrafındaki türbülansların ve akış yönlerinin birbiri ile aynı olmadığı görülmüştür.



Şekil 4.14 : Tip-2, Tip-4 ve Tip-5 bloklarının kullanıldığı deneylerden görüntüler ve akım çizgileri durumu.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, ayrıca literatürdeki çalışmalardan elde edilen verilerle Şekil 4.15 (a-d)'de kıyaslanmıştır. Literatürdeki diğer çalışmalarla daha doğru bir

karşılaştırma yapabilmek için, blok yükseklik değerleri tezdeki değerlere eşit olan çalışmalar seçilmiştir. Yine benzer akış senaryoları için şüt açıları eşit olarak seçilmiştir.



Şekil 4.15 : Mevcut çalışma ile literatür çalışmalarının karşılaştırılması a): 20° , b): 30° , c): 40° , d): 50° .

Yapılan karşılaştırmada, Şekil 4.15 (a)'da gösterildiği gibi şüt açısı $\alpha=20^\circ$ olduğunda, OTV değerleri $s=H=0.15$ m için Baylar ve diğ. (2006) tarafından yapılan çalışmaya çok yakın değerler elde edilmiştir. $s=H=0.05$ m için ise; hem Dai ve diğ. (2020) hem de Baylar ve

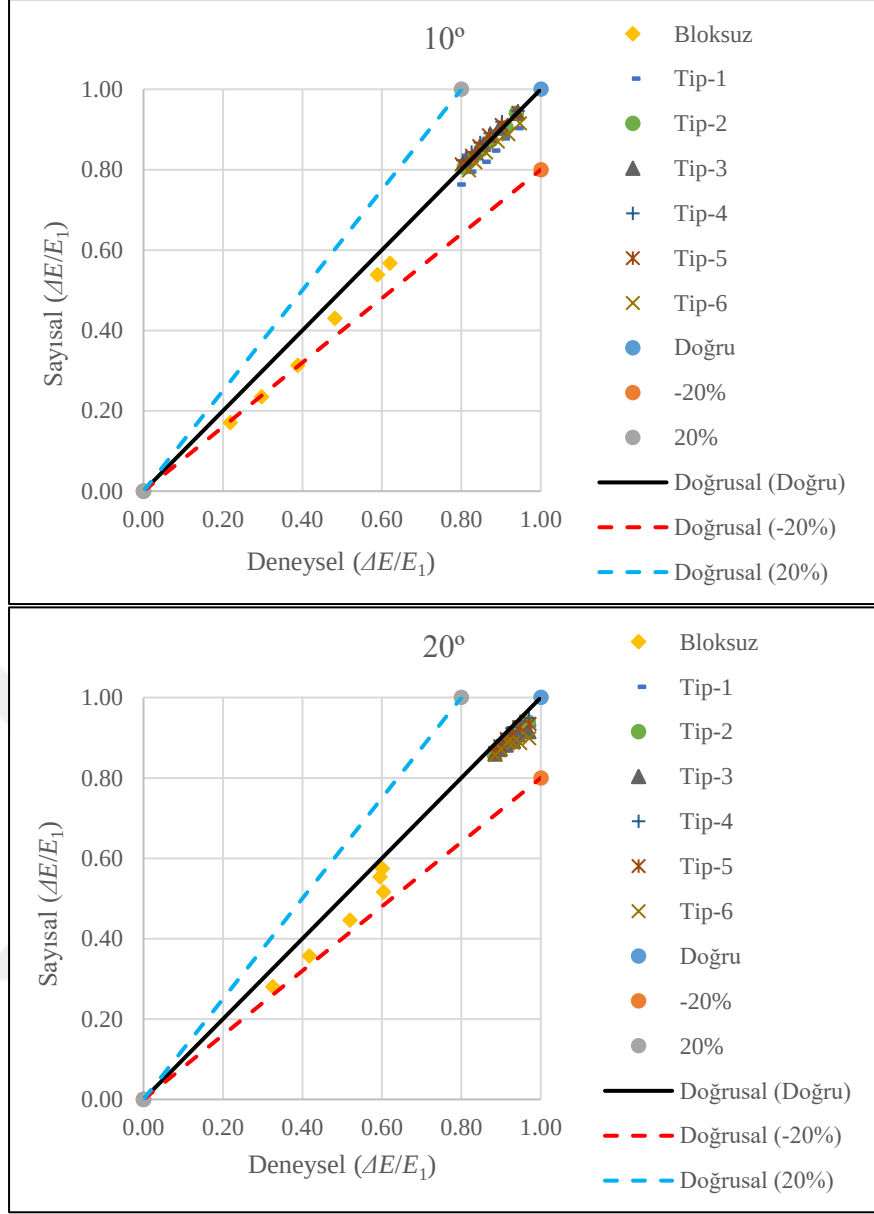
diğ. (2006) çalışmalarından daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Şüt açısı $\alpha=30^\circ$ iken Şekil 4.15 (b)'de, mevcut çalışmanın Tip-1, Tip-3, Tip-4 ve Tip-6 blok tipleri başta olmak üzere, bütün blok tipleri için daha iyi OTV sağladığı görülmektedir. Burada birbirine çok yakın açılı değeri, basamak ve blok yüksekliği değerleri seçilerek daha doğru bir kıyaslama yapılmıştır. Gözlenmiş olan E_{20} değerleri literatürdeki çalışmaların bazılarında daha iyi sonuçlar vermiştir (Baylar ve diğ, 2006; Kaya ve Emiroğlu, 2010; Dai ve diğ, 2020). Mevcut çalışmanın Kaya ve Emiroğlu (2010) tarafından yapılan çalışma ile tamamen uyumlu olduğu söylenebilir.

Şekil 4.15 (c)'de, $\alpha=40^\circ$ şüt açısı için Tebbutt (1972), Kaya ve Emiroğlu (2010), Dai ve diğ. (2020) ile mevcut çalışmamız karşılaştırılmıştır. Bütün blok tipleri için neredeyse yüksek verim elde edildiği söylenebilir. Burada farklı blok ve basamak yüksekliğine sahip çalışmaların, bizim çalışmamızdan biraz farklı sonuçları olmuştur. Bunun sebebi başta şüt açısı olmak üzere, basamak ya da blok yüksekliği farklılığından kaynaklandığı söylenebilir. Şekil 4.15 (d)'de ise $\alpha=50^\circ$ şüt açısı için literatürde daha önce yapılmış benzer çalışmalar mevcut çalışma ile kıyaslama için dikkate alınmıştır. Literatürdeki basamak yüksekliği ve şüt eğimi mevcut çalışmamızdan daha yüksek olmasına rağmen, çalışmamız daha fazla oksijen verimi sağlamıştır (Tebbutt, 1972; Kaya ve Emiroğlu, 2010; Dai ve diğ, 2020). Bu açı değerindeki çalışmalar diğer çalışmalardan daha iyi sonuçlar vermiştir. Mevcut çalışmanın E_{20} değerleri diğerlerine göre daha yüksek çıkmıştır. Deneysel çalışmalar aşamasında, bu tezin önerdiği blokların akış üzerinde güçlü türbülans, çalkantı ve oksijenlendirme etkileri meydana getirdiğini gözlemlediğimiz söylenebilir. Bu bloklar daha güçlü türbülans ve hava-su etkileşimi sağladıkları için, daha yüksek OTV sonuçları elde edilmesi bu şekilde açıklanabilir.

Saha uygulamalarında en ekonomik ve verimli hidrolik yapı tipinin seçimi çok önemlidir. Aynı eğime sahip yapılardan hangisinin tercih edilmesi gerektiği; OTV değeri, basamak veya blok yüksekliği değerleri ve blok geometrisini oluşturma maliyeti değerlerine bakılarak karar verilebilir.

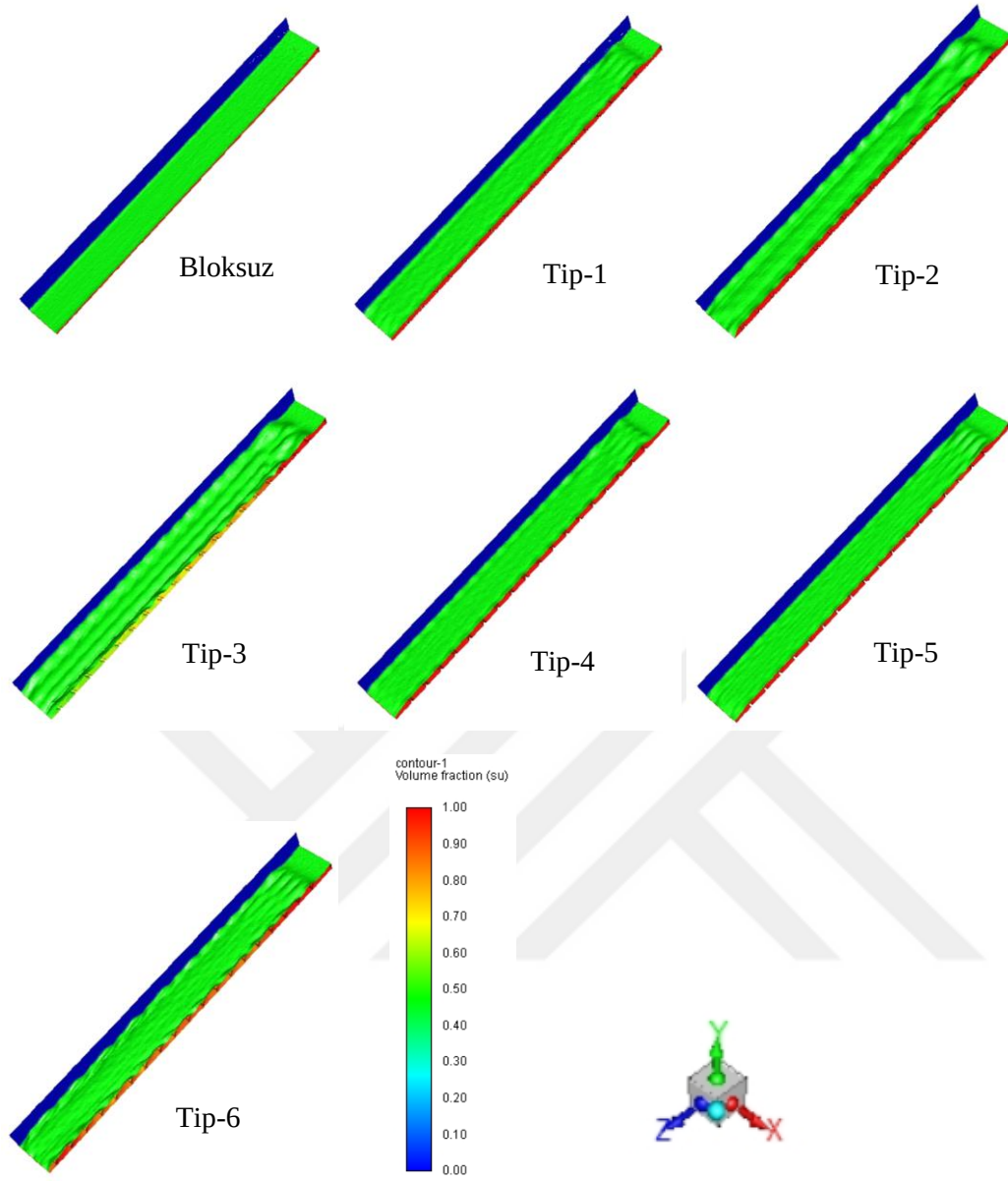
4.3 Blokların Enerji Sönümleme Performanslarının HAD Yöntemiyle İncelenmesi

Tezin bu bölümünde EKŞ kanallarında kullanılan 6 farklı blok tipi ve bloksuz durum için ANSYS-Fluent yazılımı ile sayısal model sonuçları elde edilmiş ve deneysel verilerle kıyaslaması yapılmıştır. Şekil 4.16'da $\alpha=10^\circ$ - 20° için sayısal ve deneysel modellerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.



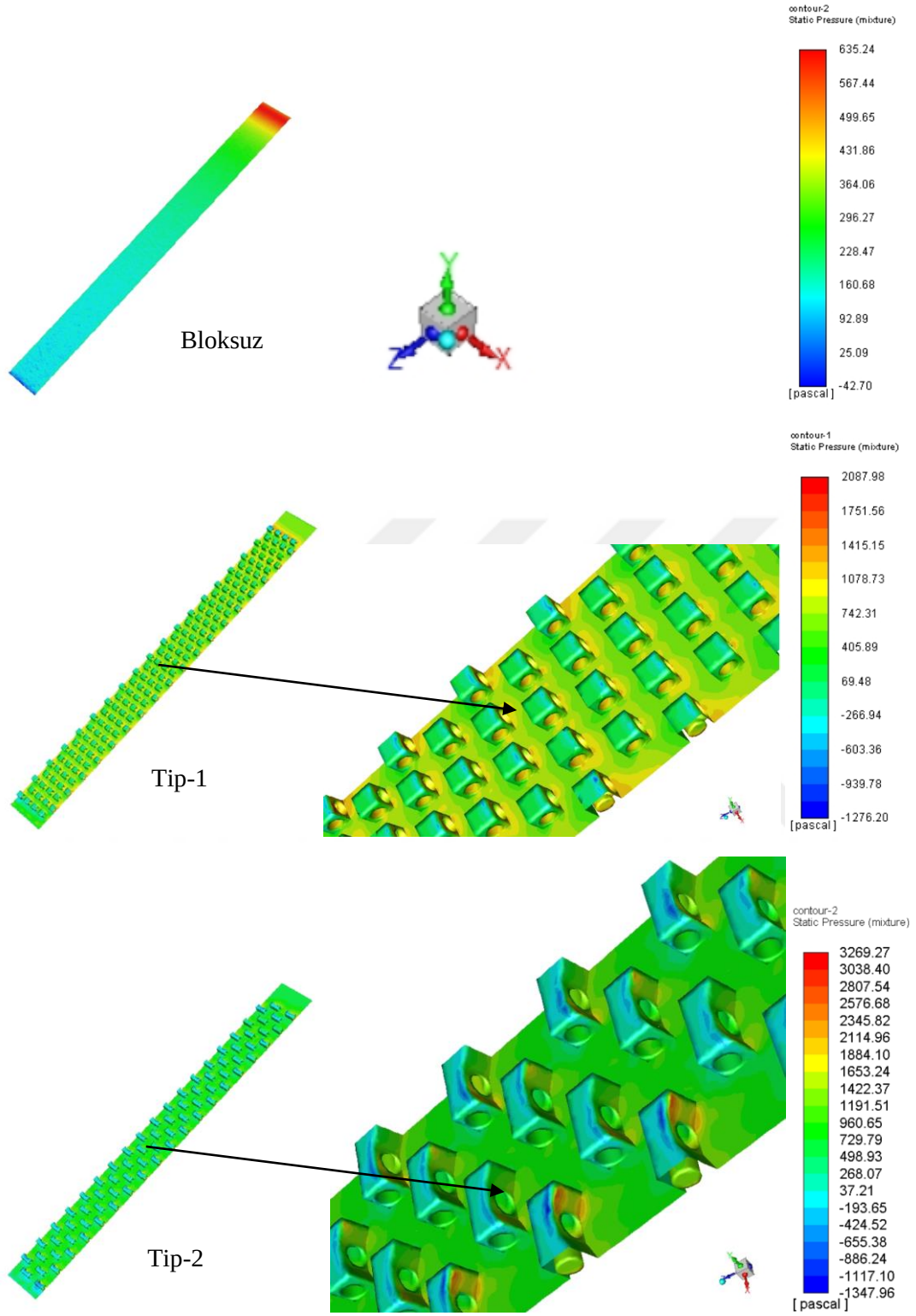
Şekil 4.16 : $\alpha=10^\circ$ - 20° için simüle edilen ve ölçülen rölatif enerji sönümleme karşılaştırılması.

Şekil 4.16’da görüleceği üzere sayısal ve deneysel veriler birbiriyle iyi bir uyum içindedir. 45° doğrusuna $\alpha=10^\circ$ açıda $\alpha=20^\circ$ ’ye göre daha fazla yakınsama olmuştur. $\alpha=20^\circ$ şüt açısı değeri için bloksuz durum ve bütün blok tiplerine ait sayısal hacim oranı (*volume fraction*) görüntüleri Şekil 4.17’de verildiği gibidir. Burada hava-su yüzeyi ayırım sınırı için *Iso-surface* değeri 0.5 alınmıştır.

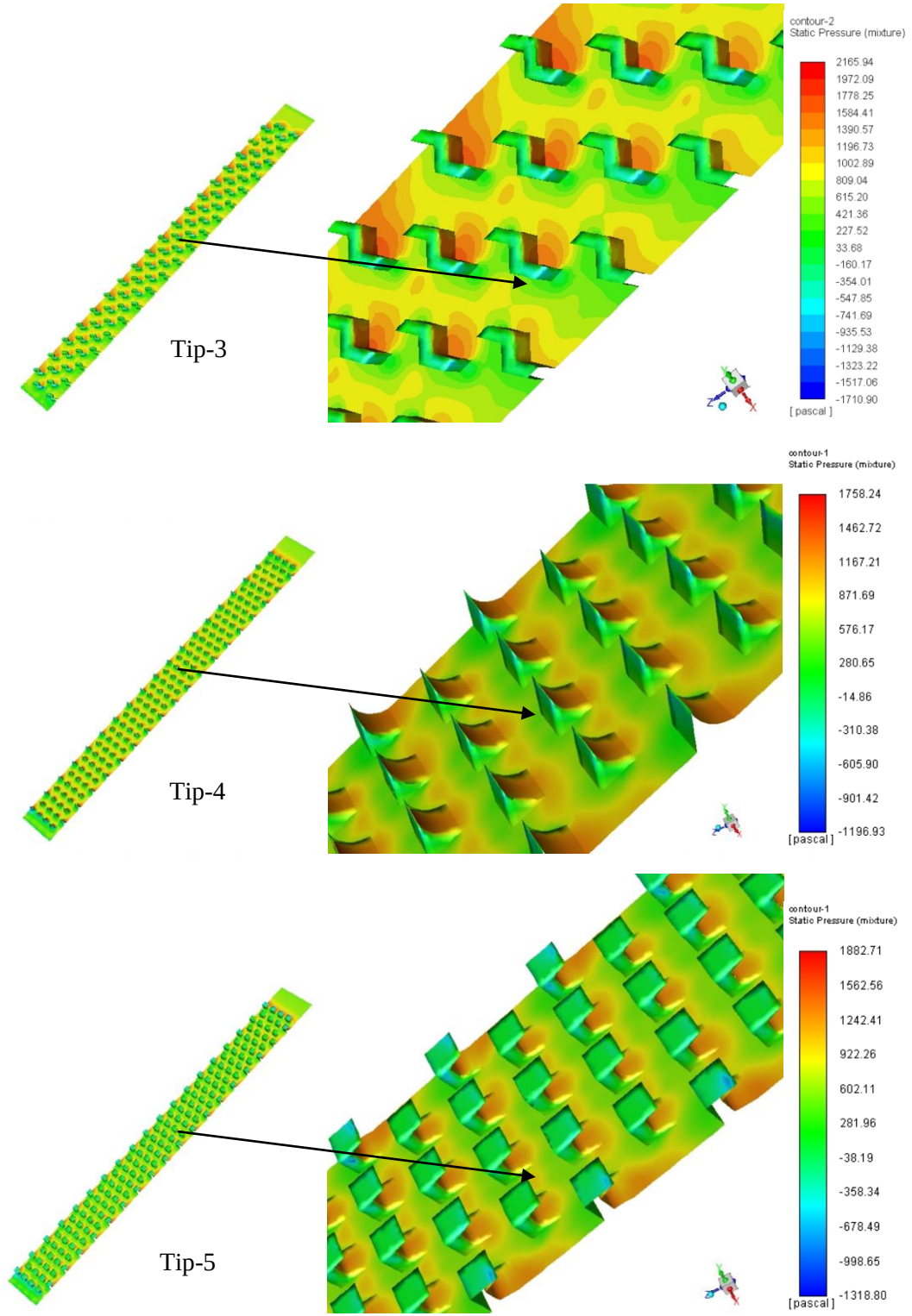


Şekil 4.17 : $\alpha=20^\circ$ ve $Fr=0.98$ için sayısal hacim oranı (*volume fraction*) görüntüleri.

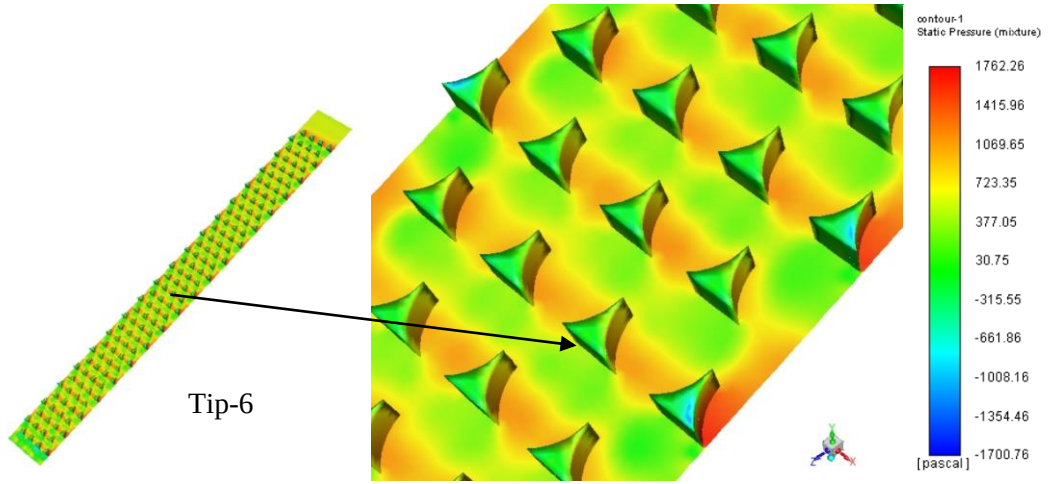
Yine $\alpha=20^\circ$ açısı için bloklara ve kanal tabanına etkiyen statik basınç değerlerine ait sayısal çözüm görüntüleri Şekil 4.18’de verilmiştir. Burada negatif basınçların olduğu kısımlar ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.18 : $\alpha=20^\circ$ şüt açısı için bloklara ve kanal tabanına etkiyen statik basınç değerleri.

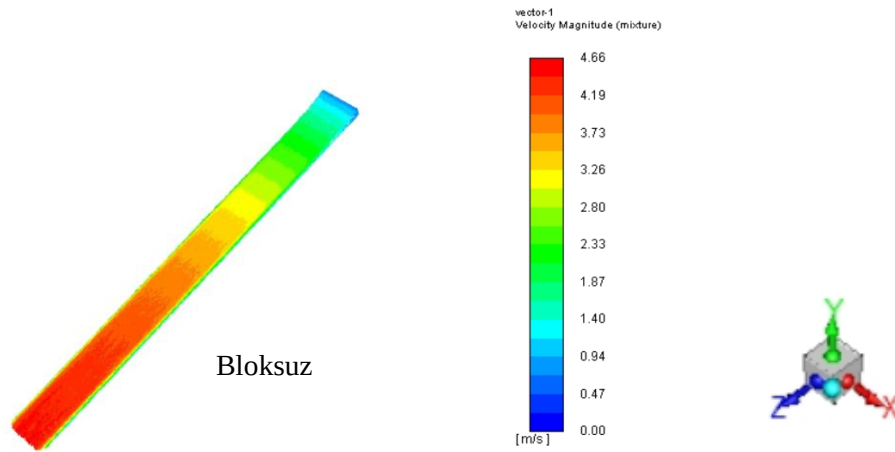


Şekil 4.18 (devam) : $\alpha=20^\circ$ şüt açısı için bloklara ve kanal tabanına etkiyen statik basınç değerleri.



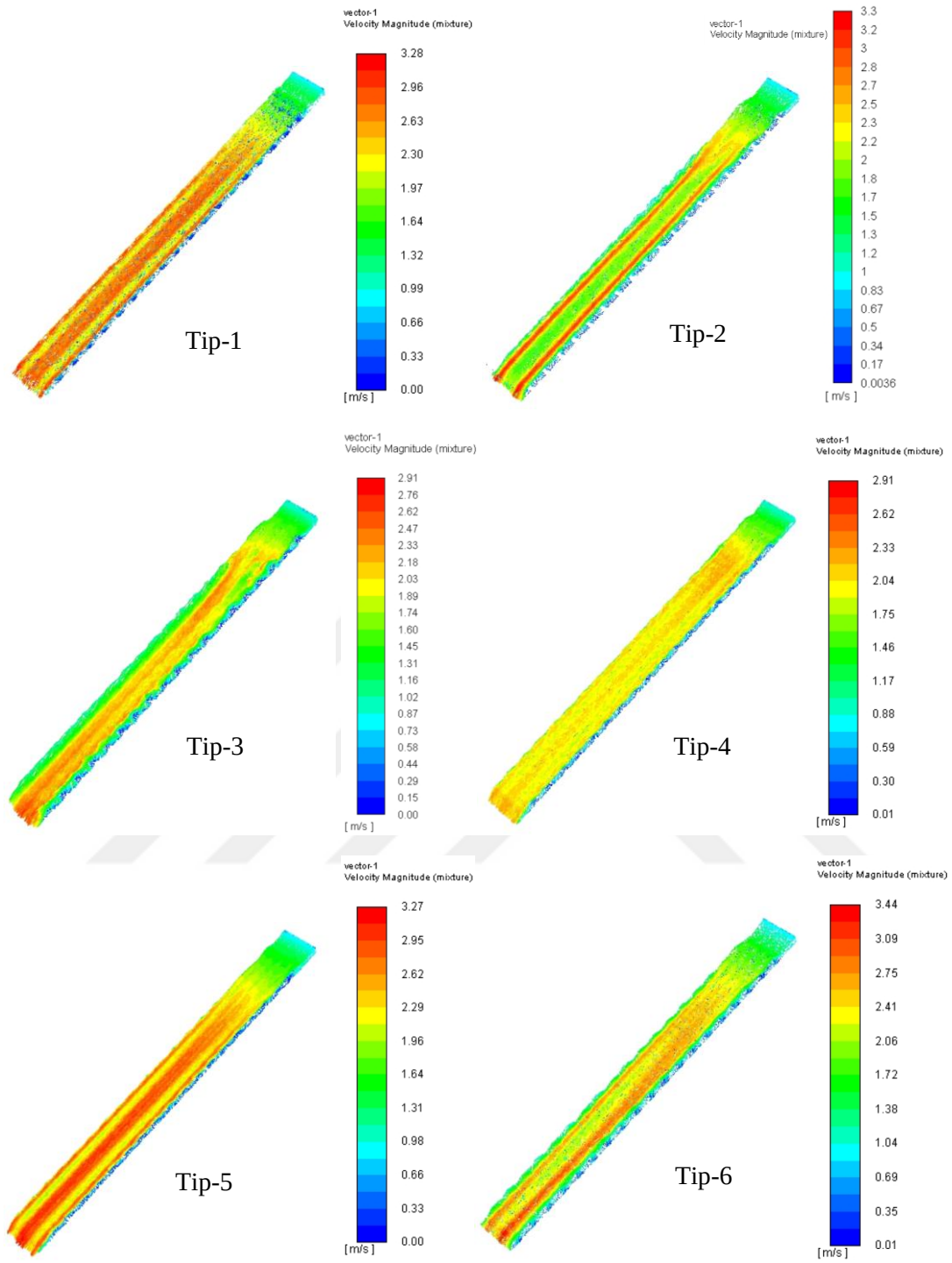
Şekil 4.18 (devam) : $\alpha=20^\circ$ şüt açısı için bloklara ve kanal tabanına etkiyen statik basınç değerleri.

Şekil 4.18’de negatif basınç değerleri en düşük Tip-3 blok tipi için ölçülmüştür. Bu negatif basınç bölgeleri özellikle yüksek hızlarda kavitasyon olayına ve bunun sonucunda ise bloklar üzerinde aşınma oluşturabilmesi yüzünden önemlidir. Sayısal çözüme ait bir diğer görüntü ise hız vektörlerinin olduğu Şekil 4.19’da ise maksimum ve minimum hız değerleri ölçülmüştür.



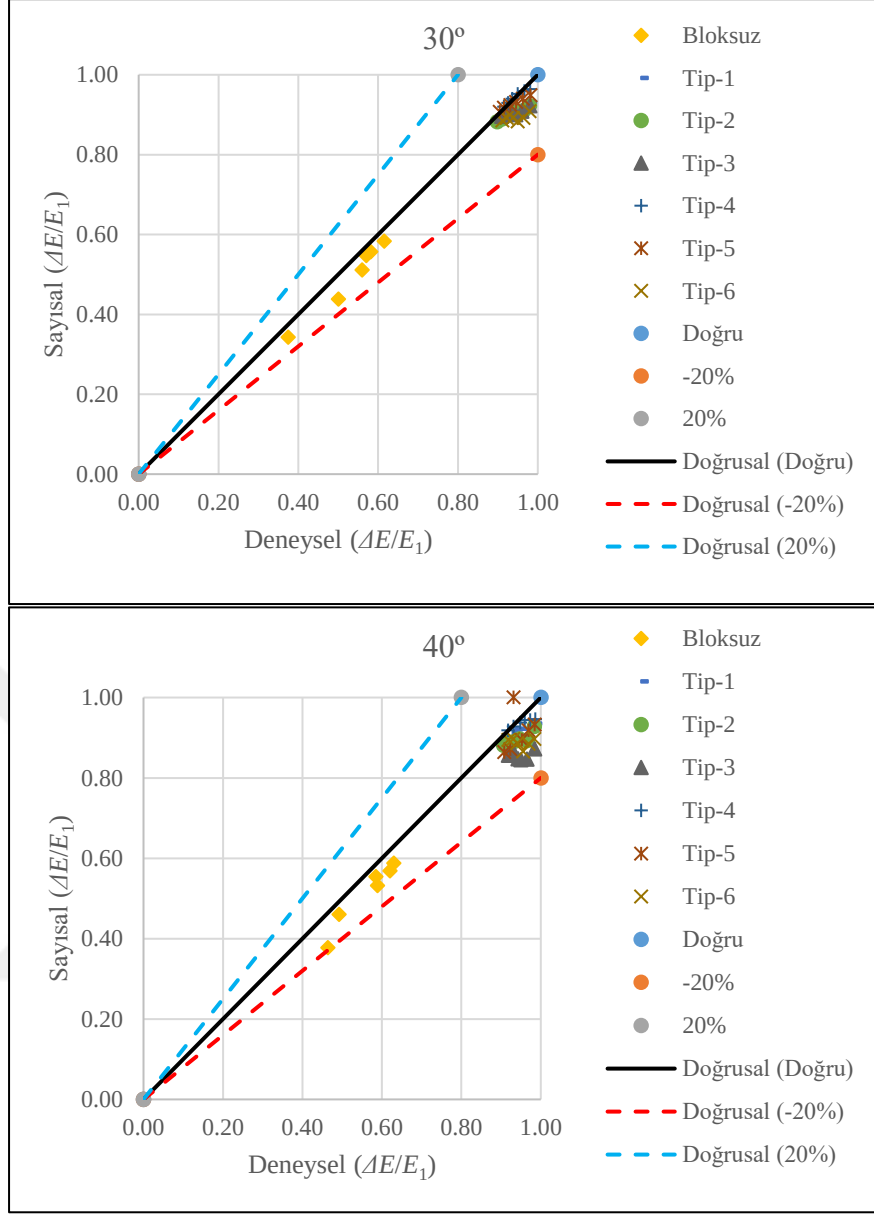
Şekil 4.19 : $\alpha=20^\circ$ şüt açısı için hız vektörlerinin büyüklükleri.

Şekil 4.19’a göre maksimum hız bloksuz kanal için elde edilirken minimum hız değerleri ise Tip-3 ve Tip-4 blok tipleri için elde edilmiştir. Bu hız durumları aynı zamanda blokların enerji sönmleme performanslarını da işaret etmektedir.



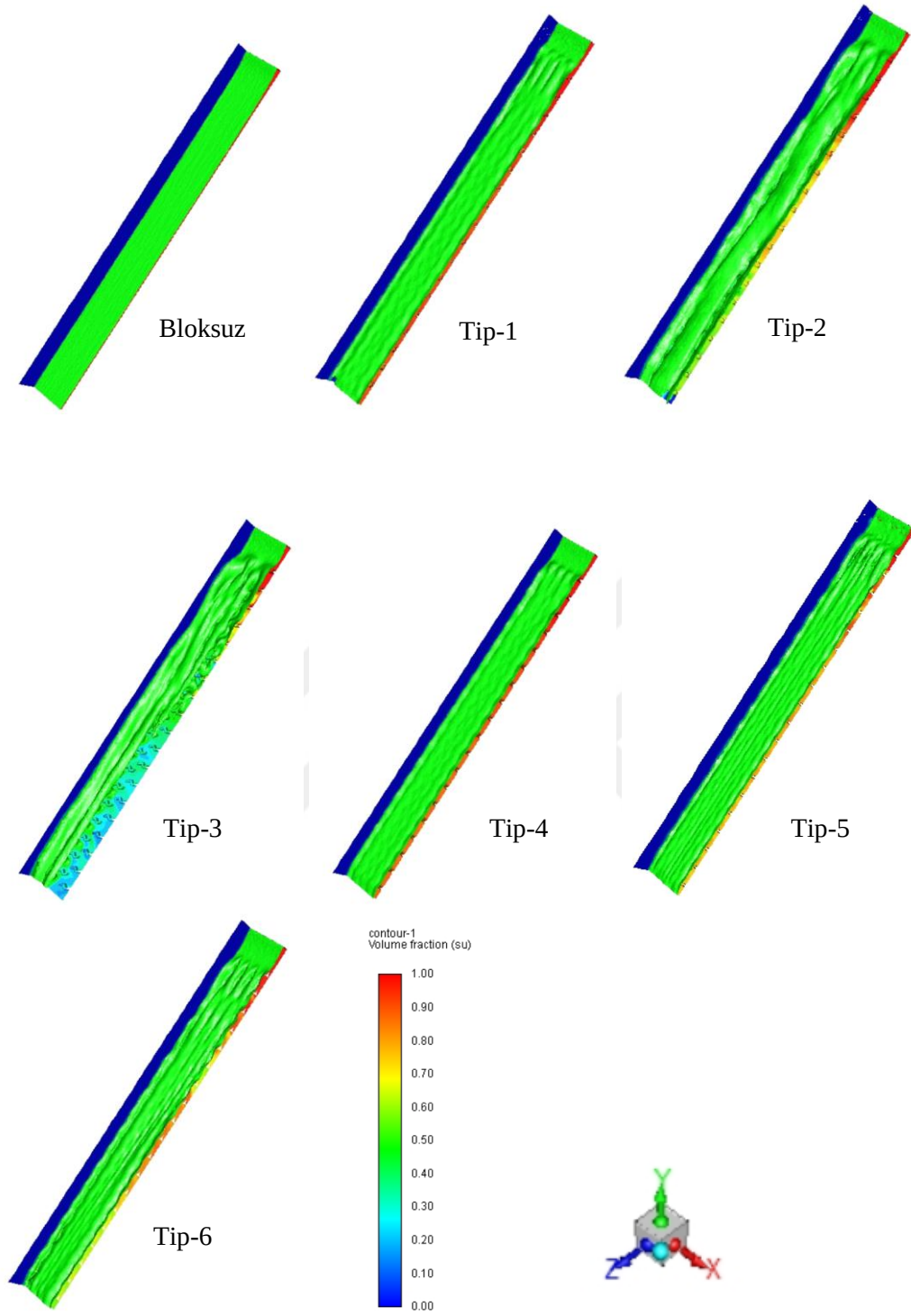
Şekil 4.19 (devam) : $\alpha=20^\circ$ şüt açısı için hız vektörlerinin büyüklükleri.

Şekil 4.20’de şüt açısına bağlı olarak ölçülen ve simüle edilen rölatif enerji sönümleme garfikleri $\alpha=30^\circ$ - 40° için verilmiştir. Şekil 4.20’ye baktığımızda ölçülen ve simüle edilen değerler birbirine çok yakın çıkmıştır. 45° doğrusuna $\alpha=30^\circ$ açıda $\alpha=40^\circ$ ’ye göre daha fazla yakınsama olmuştur.



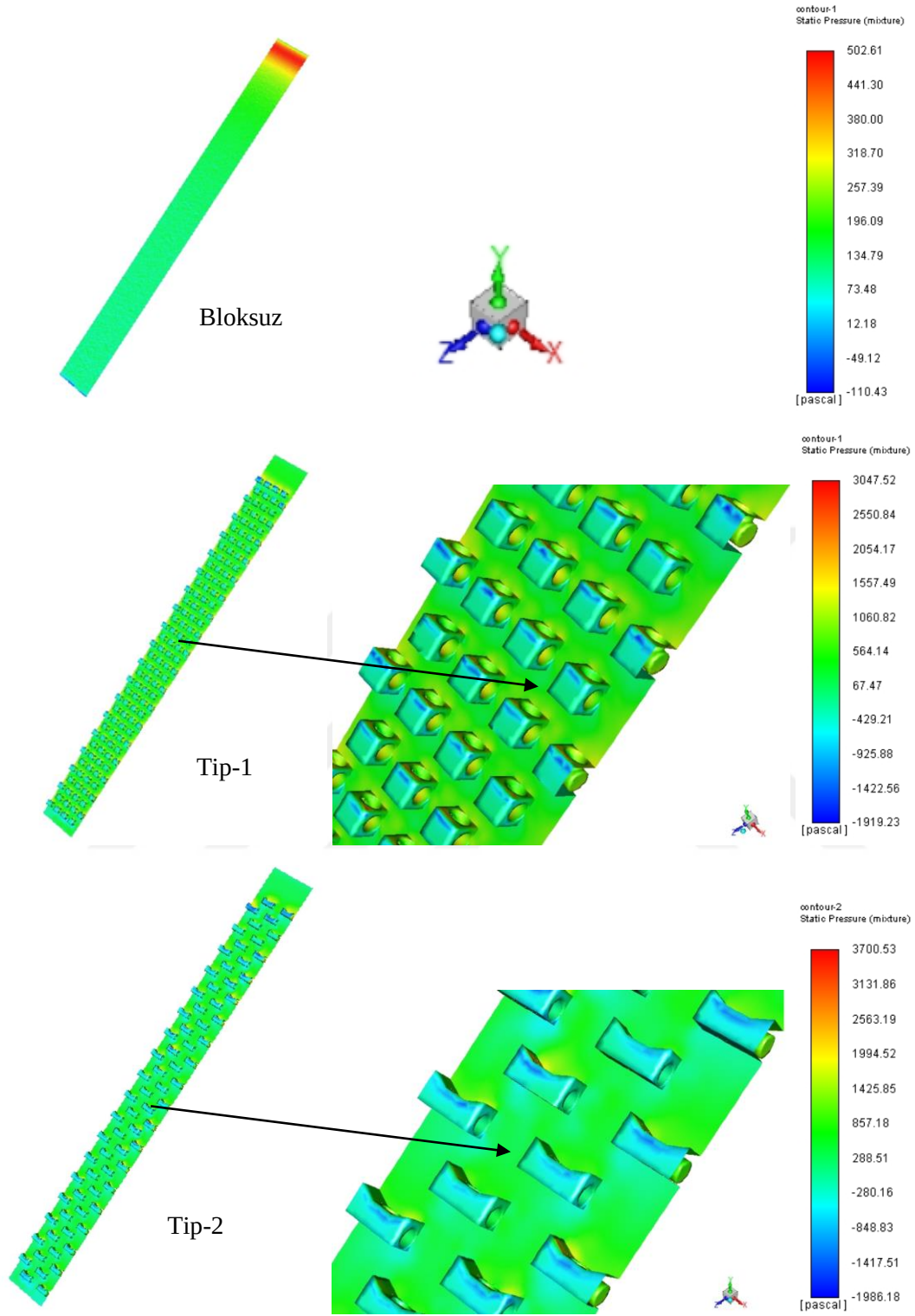
Şekil 4.20 : $\alpha=30^\circ - 40^\circ$ için simüle edilen ve ölçülen rölatif enerji sönümleme karşılaştırılması.

$\alpha=40^\circ$ şüt açısı değeri için bloksuz durum ve bütün blok tiplerine ait sayısal hacim oranı (*volume fraction*) görüntüleri Şekil 4.21’de verildiği gibidir. Burada hava-su yüzeyi ayırım sınırı için *Iso-surface* değeri 0.5 alınmıştır. Burada blok tipleri arasında sadece Tip-3 blok için akım yüzeyi düzgün elde edilememiştir. Bunun da sebepleri arasında başta blok geometrisi ve aşırı türbülans ile hava karışımını modellemedeki sayısal güçlükler olduğu söylenebilir.

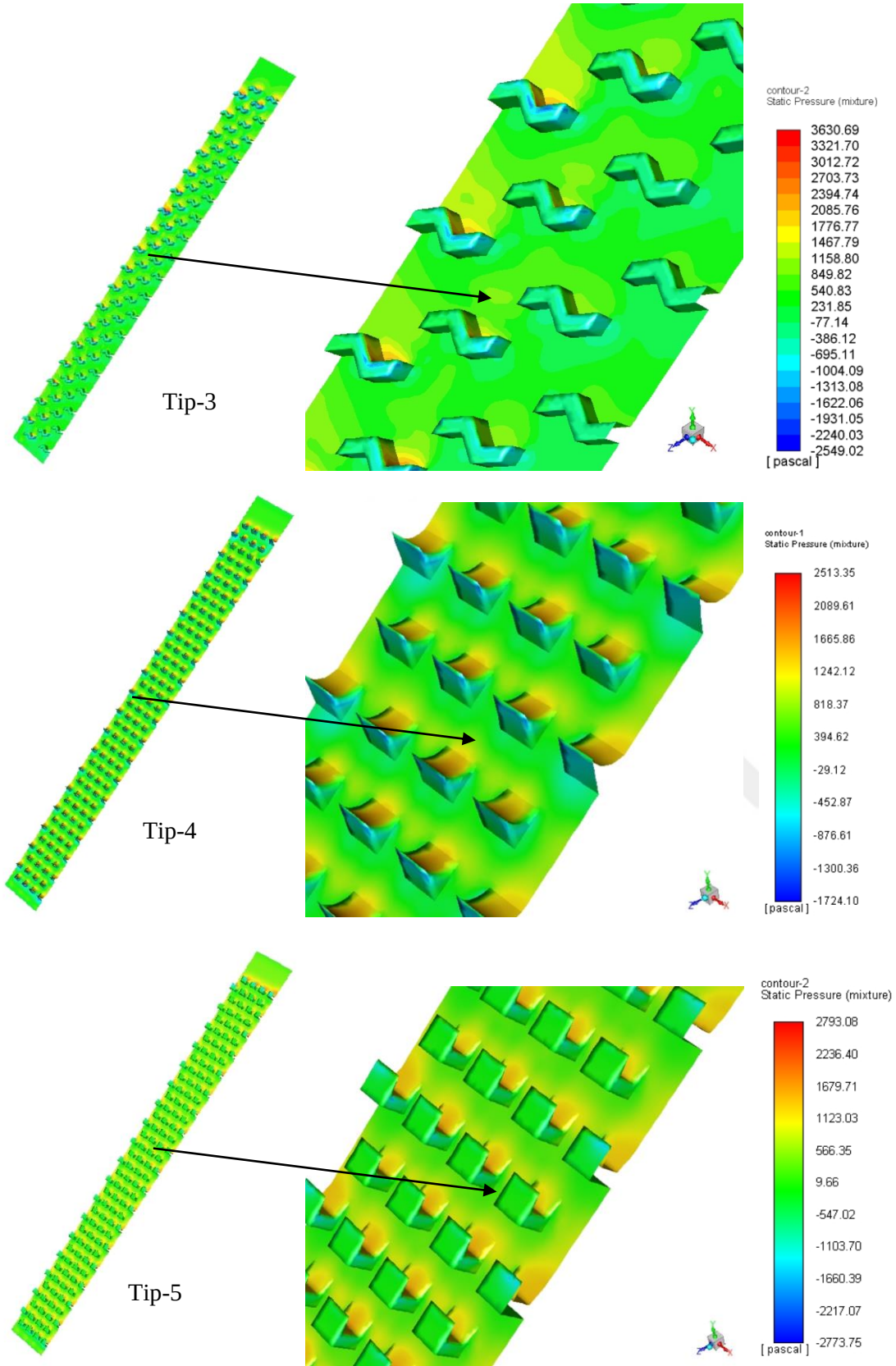


Şekil 4.21 : $\alpha=40^\circ$ ve $Fr=0.98$ için sayısal hacim oranı (*volume fraction*) görüntüleri.

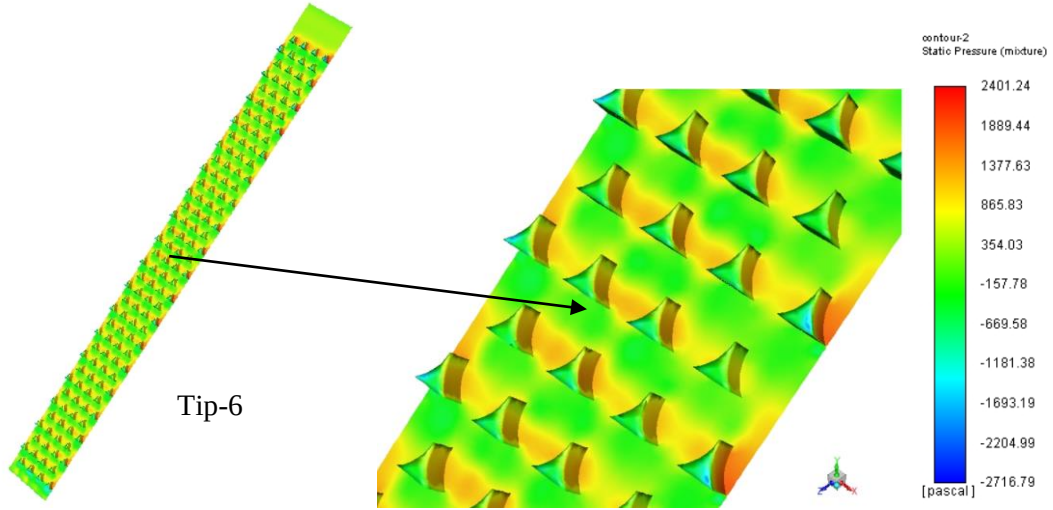
Yine $\alpha=40^\circ$ açısı için bloklara ve kanal tabanına etkiyen statik basınç değerlerine ait sayısal çözüm görüntüleri Şekil 4.22’de verilmiştir. Burada negatif basınçların oluştuğu kısımlar ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.22: $\alpha=40^\circ$ ve $Fr=0.98$ için bloklara ve kanal tabanına etkiyen statik basınç değerleri.

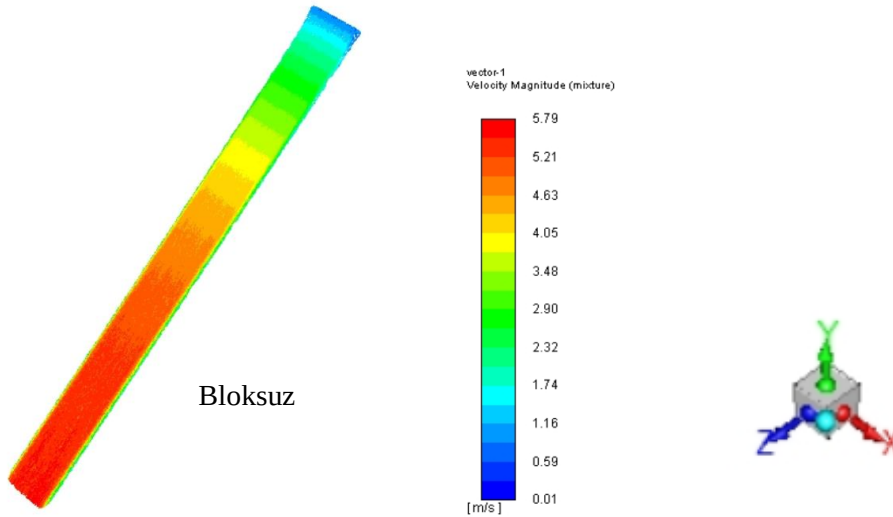


Şekil 4.22 (devam) : $\alpha=40^\circ$ ve $Fr=0.98$ için bloklara ve kanal tabanına etkiyen statik basınç değerleri.



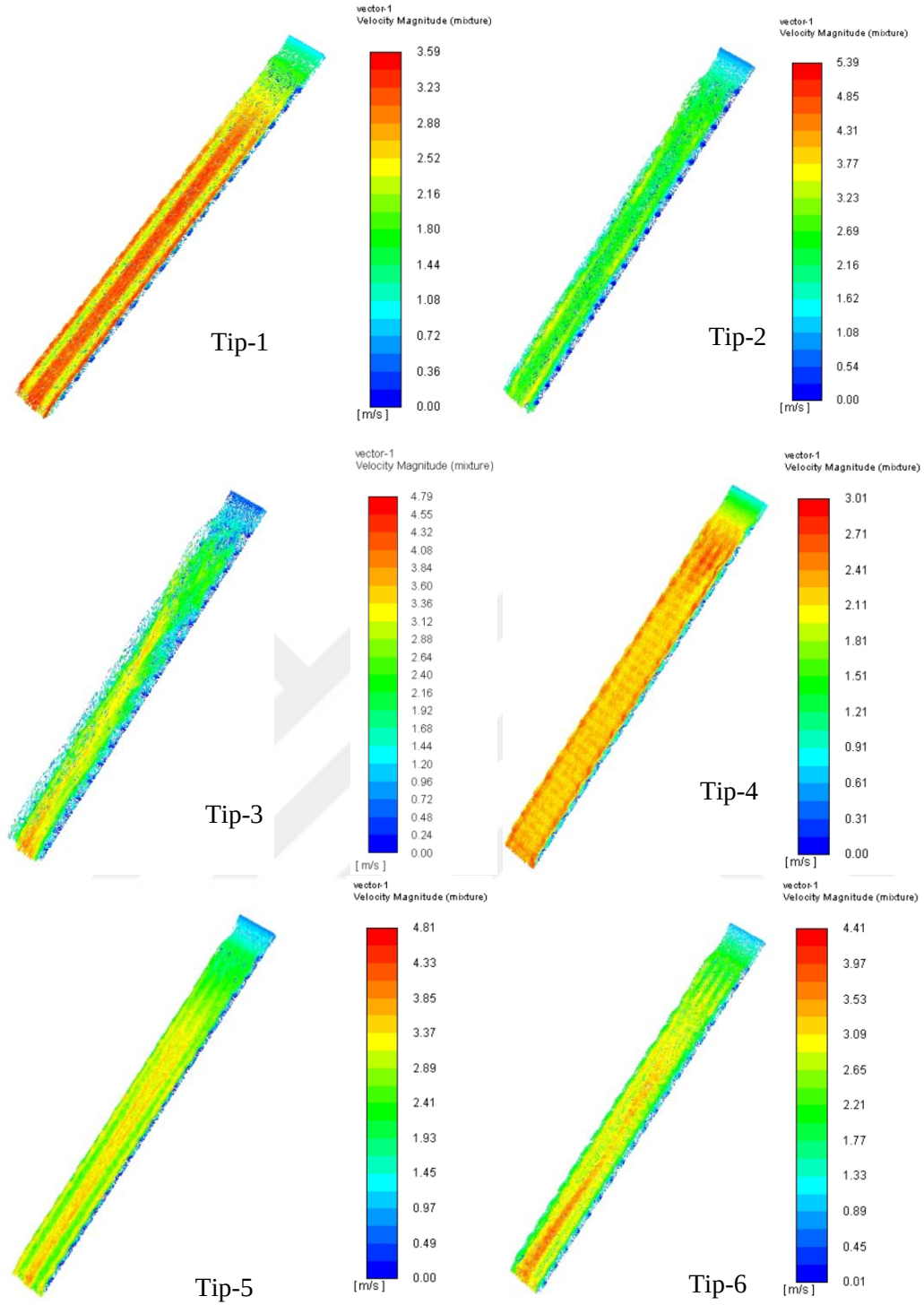
Şekil 4.22 (devam) : $\alpha=40^\circ$ ve $Fr=0.98$ için bloklara ve kanal tabanına etkiyen statik basınç değerleri.

Şekil 4.22’de negatif basınç değerleri en düşük Tip-5 blok tipi için ölçülmüştür. Bloklar üzerinde negatif basınç değerlerinin oluşması bloğun aşınmasına neden olacaktır. Sayısal çözüme ait bir diğer görüntü ise hız vektörlerinin olduğu Şekil 4.23’te ise maksimum ve minimum hız değerleri ölçülmüştür.



Şekil 4.23 : $\alpha=40^\circ$ ve $Fr=0.98$ için hız vektörlerinin büyüklükleri.

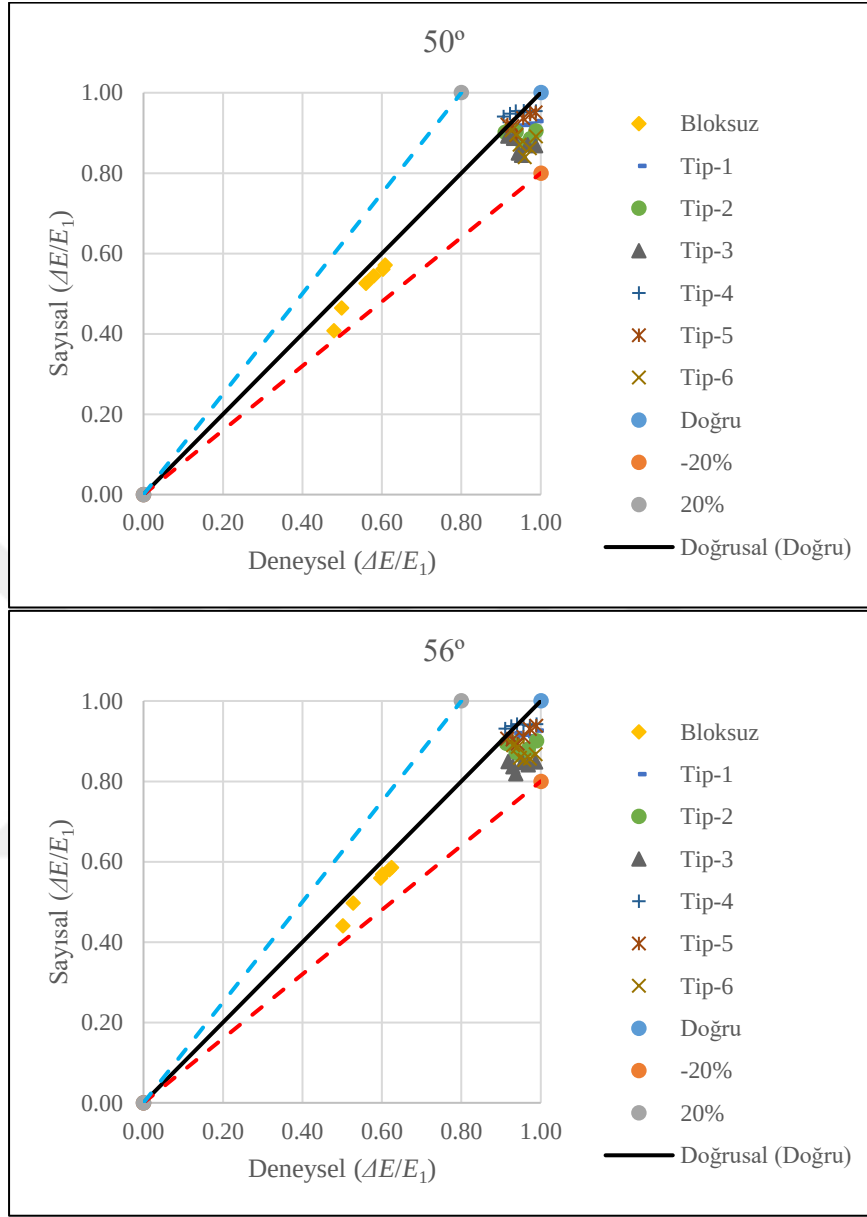
Şekil 4.23’e göre maksimum hız bloksuz kanal için elde edilirken minimum hız değerleri ise Tip-1 ve Tip-4 blok tipleri için elde edilmiştir.



Şekil 4.23 (devam) : $\alpha=40^\circ$ ve $Fr= 0.98$ için hız vektörlerinin büyüklükleri.

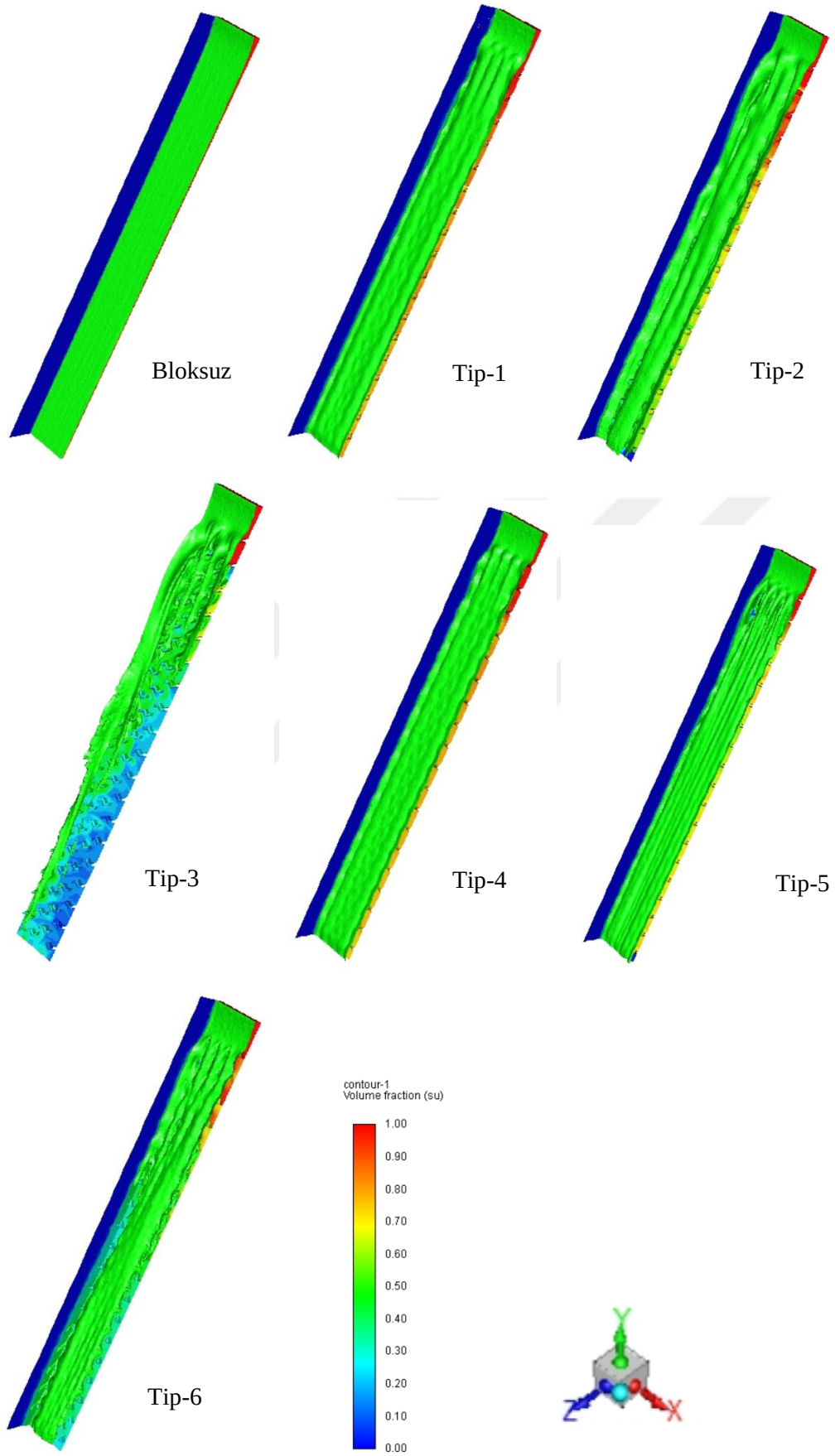
Şekil 4.24'te $\alpha=50^\circ$ - 56° için sayısal ve deneysel modellerden elde edilen rölatif enerji sönümlleme oranları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil 4.24'e bakıldığında deneysel

ve sayısal sonuçların çok yakın olduğu görülmektedir. 45° doğrusuna $\alpha=50^\circ$ açıda $\alpha=56^\circ$ 'ye göre daha fazla yakınsama olmuştur.



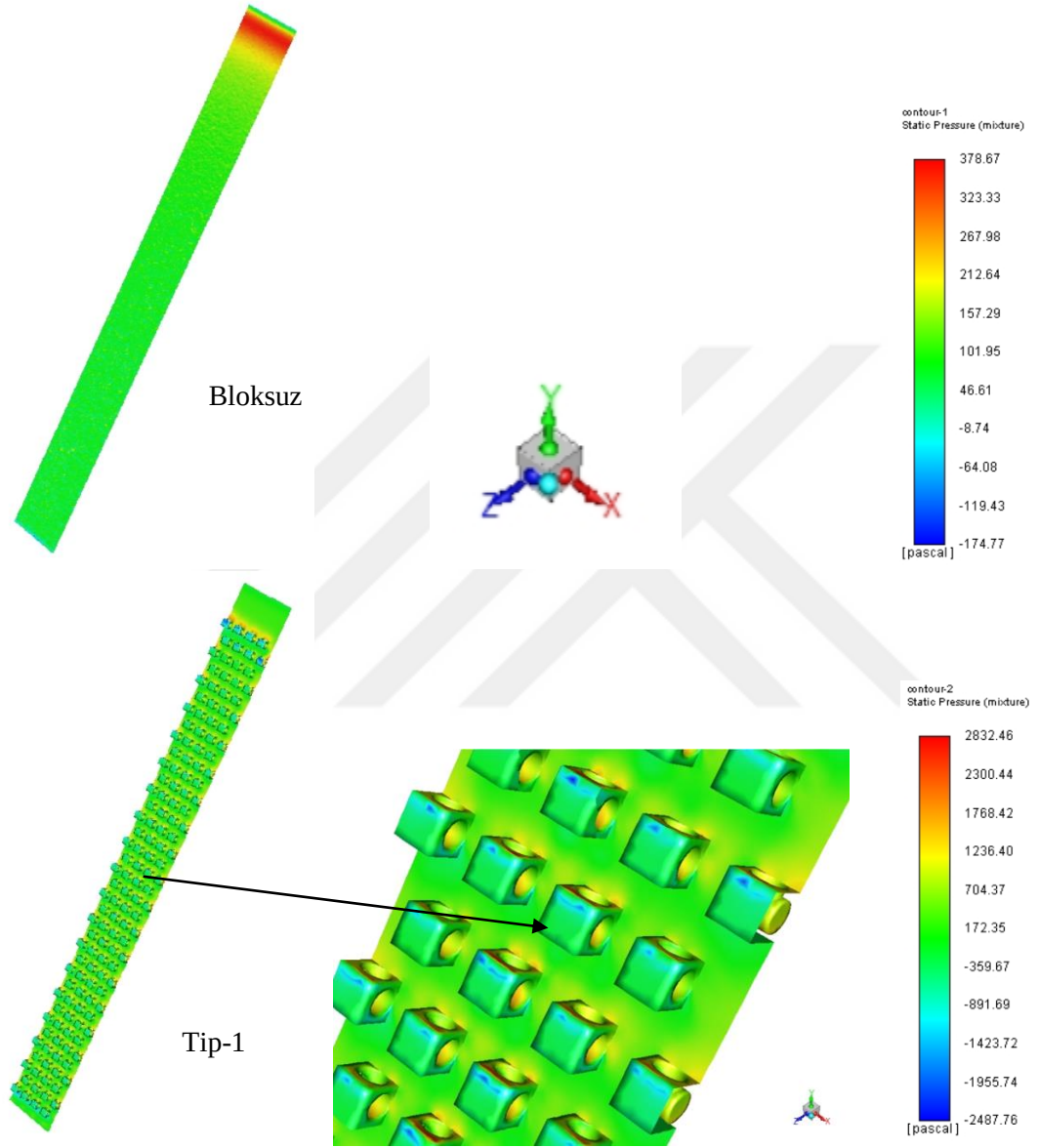
Şekil 4.24 : $\alpha=50^\circ$ - 56° için simüle edilen ve ölçülen rölatif enerji sönümleme karşılaştırılması.

$\alpha=56^\circ$ şüt açısı değeri için bloksuz durum ve bütün blok tiplerine ait sayısal hacim oranı (*volume fraction*) görüntüleri Şekil 4.25'te verildiği gibidir. Burada hava-su yüzeyi ayırım sınırı için *Iso-surface* değeri 0.5 alınmıştır. Burada blok tipleri arasından sadece Tip-3 blok için su yüzeyi çok çalkantılı ve hava karışımı fazla olduğundan akım yüzeyi düzgün elde edilememiştir.

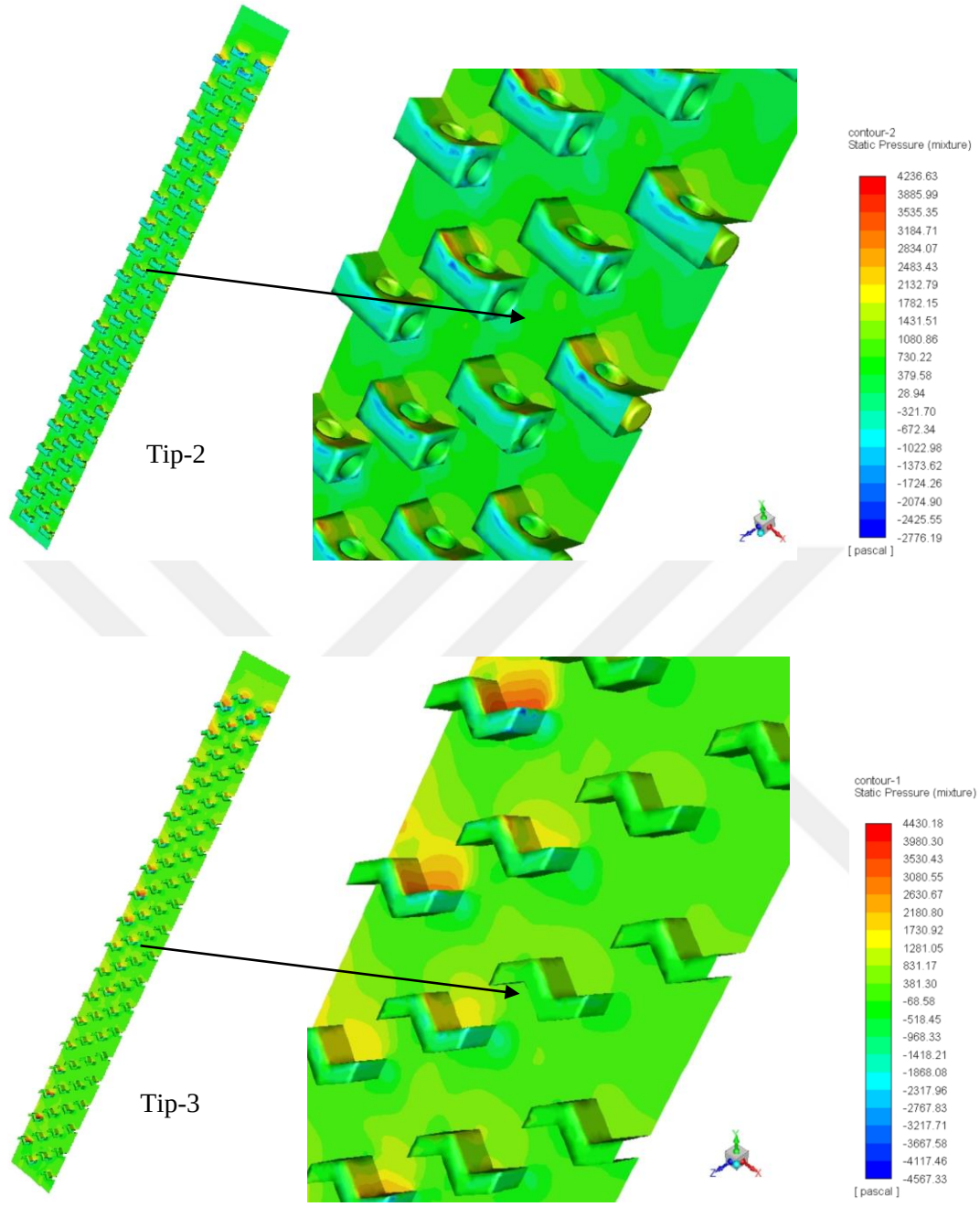


Şekil 4.25: $\alpha=56^\circ$ ve $Fr=0.98$ için sayısal hacim oranı (volume fraction) görüntüleri.

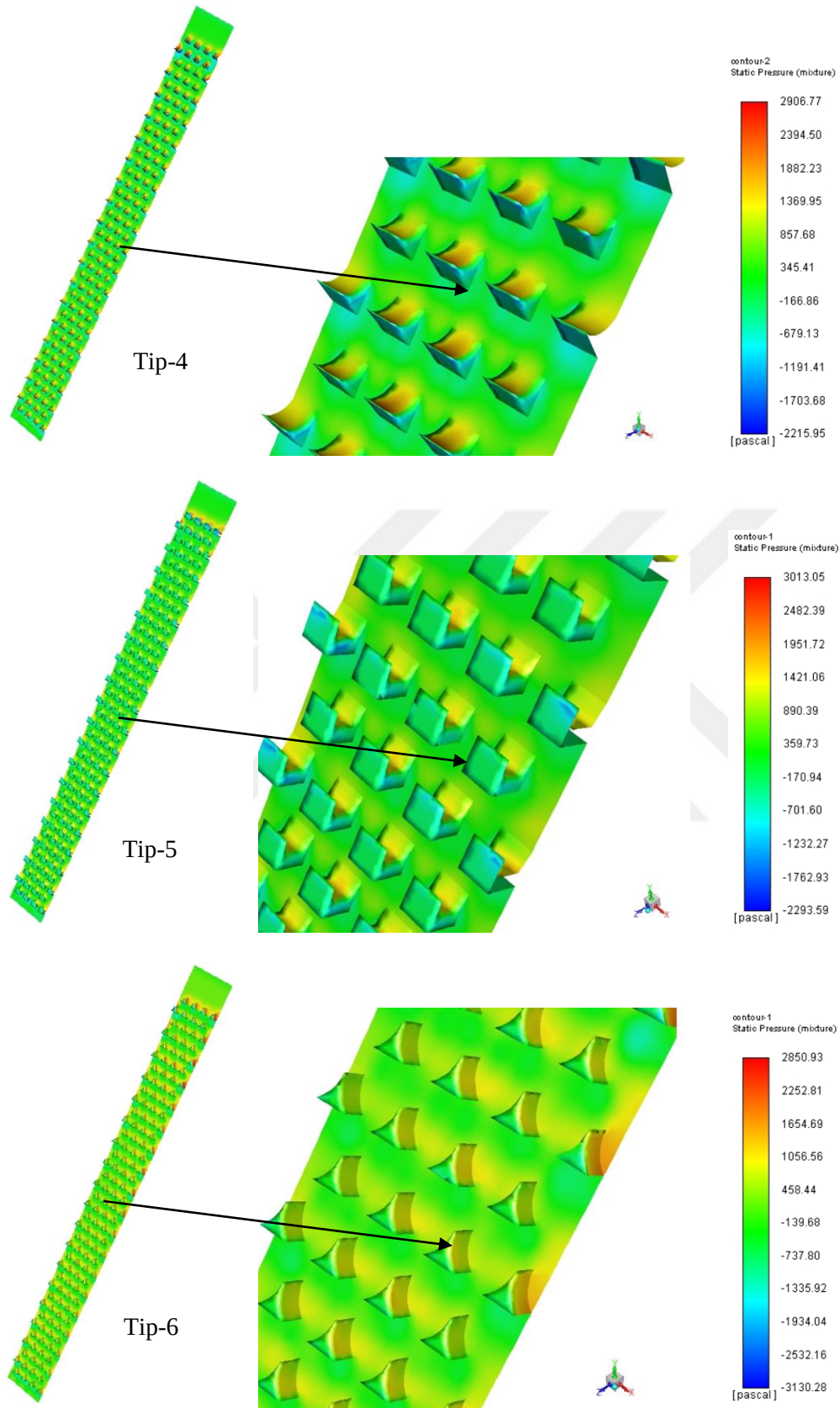
Yine $\alpha=56^\circ$ aç ı değ eri iç in bloklara ve kanal taban ına etkiyen statik basınç değ erlerine ait say ısal ç özü m gö rünt üleri Ş ekil 4.26'da verilmiştir. Burada negatif basınç lar ın oluştuğ u kısımlar ayrıntılı olarak gö sterilmiştir.



Ş ekil 4.26 : $\alpha=56^\circ$ ve $Fr=0.98$ iç in bloklara ve kanal taban ına etkiyen statik basınç değ erleri.

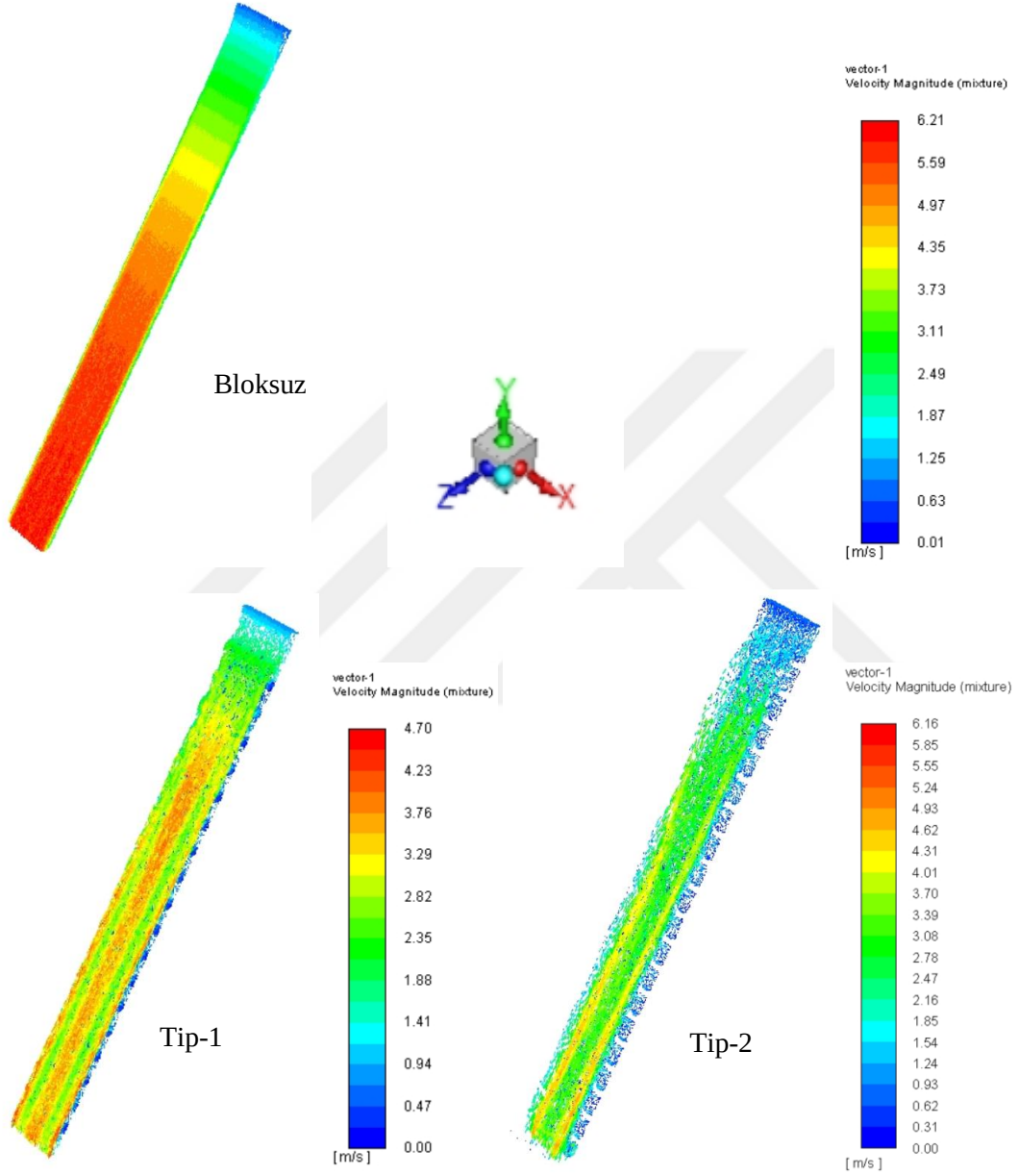


Şekil 4.26 (devam) : $\alpha=56^\circ$ ve $Fr=0.98$ için bloklara ve kanal tabanına etkiyen statik basınç değerleri.

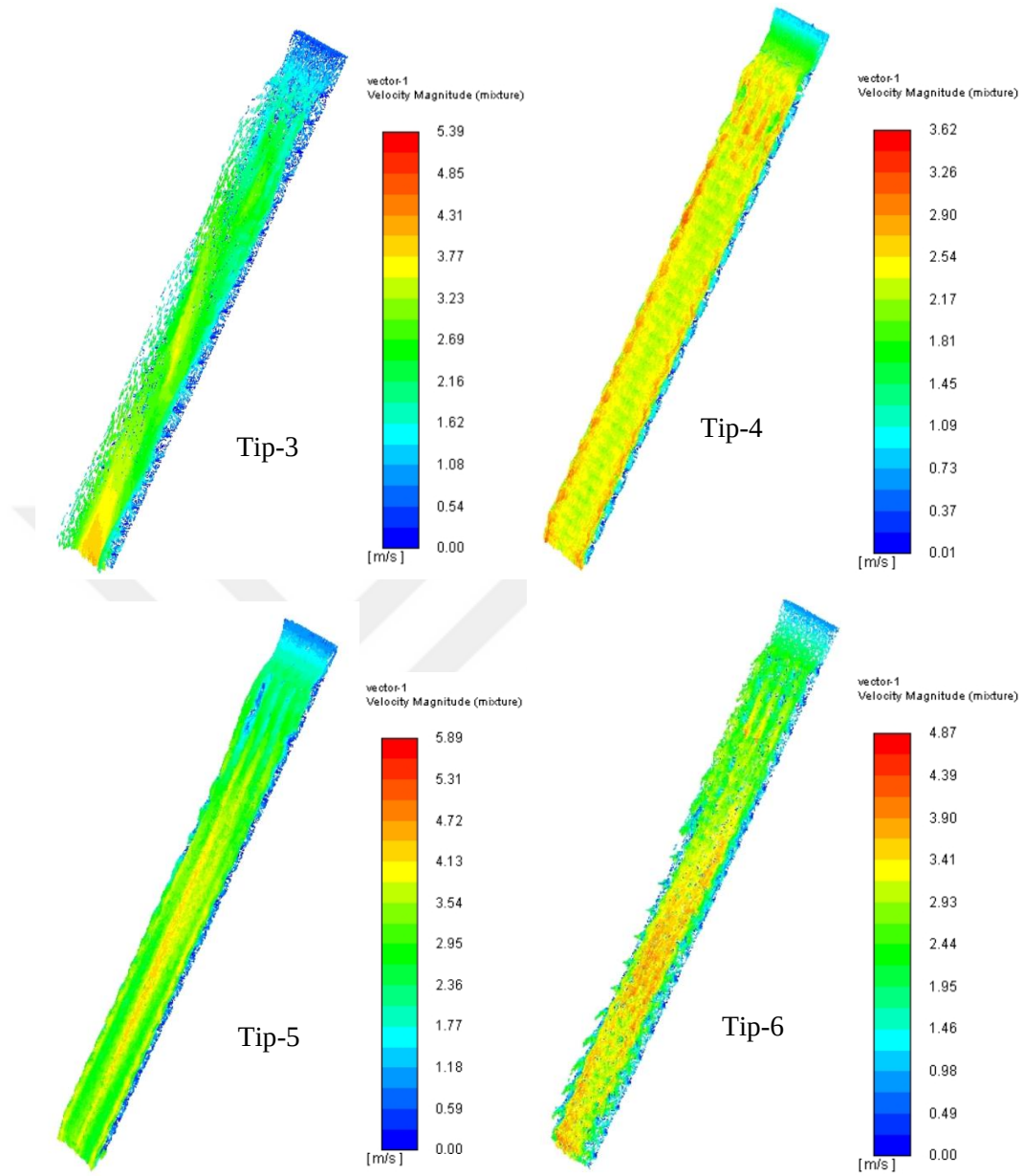


Şekil 4.26 (devam) : $\alpha=56^\circ$ ve $Fr=0.98$ için bloklara ve kanal tabanına etkiyen statik basınç değerleri.

Şekil 4.26’da negatif basınç değerleri en düşük Tip-3 blok tipi için ölçülmüştür. Negatif basınç değerinin etkisi için bloklar üzerindeki negatif değerler daha önce de belirtildiği gibi kavitasyon hasarına sebep olabilir. Sayısal çözüme ait bir diğer görüntü ise hız vektörlerinin olduğu Şekil 4.27’de ise maksimum ve minimum hız değerleri ölçülmüştür.



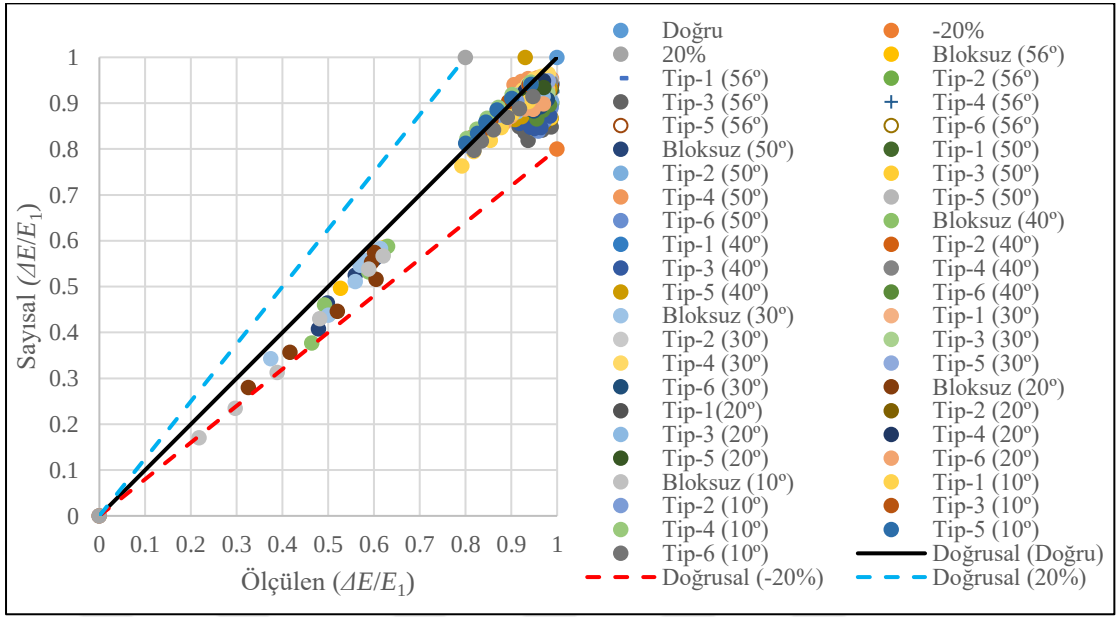
Şekil 4.27 : $\alpha=56^\circ$ ve $Fr=0.98$ için hız vektörlerinin büyüklükleri.



Şekil 4.27 (devam) : $\alpha=56^\circ$ ve $Fr=0.98$ için hız vektörlerinin büyüklükleri.

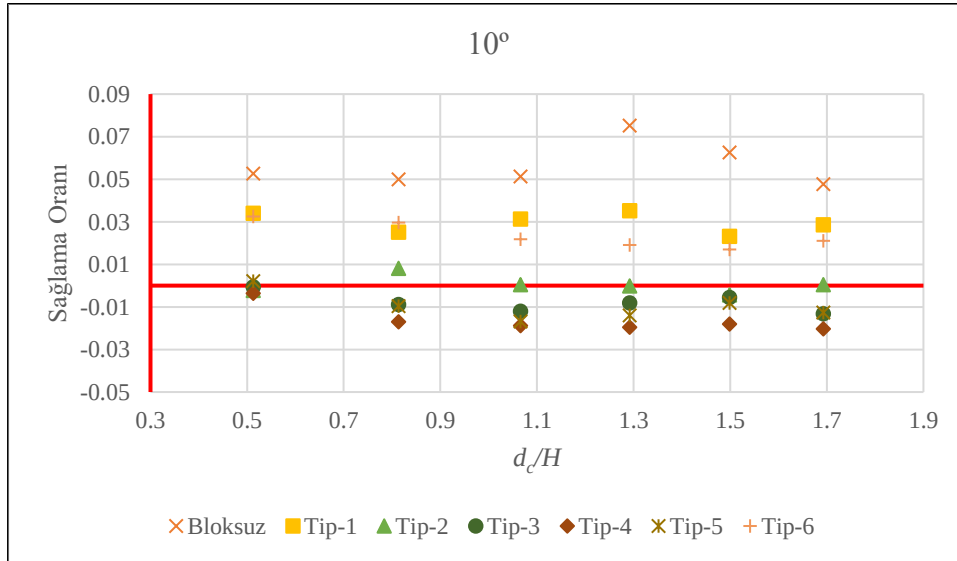
Şekil 4.27'ye göre maksimum hız bloksuz kanal için elde edilirken minimum hız değerleri ise Tip-1 ve Tip-4 blokları için elde edilmiştir.

Blok tipleri ile ilgili bütün değerlerin hem sayısal, hem de deneysel sonuçları Şekil 4.28'de verildiği gibidir. Burada tüm değerler $\pm\%20$ aralığında kaldığı için sonuçların doğruluğu da test edilmiş olur.

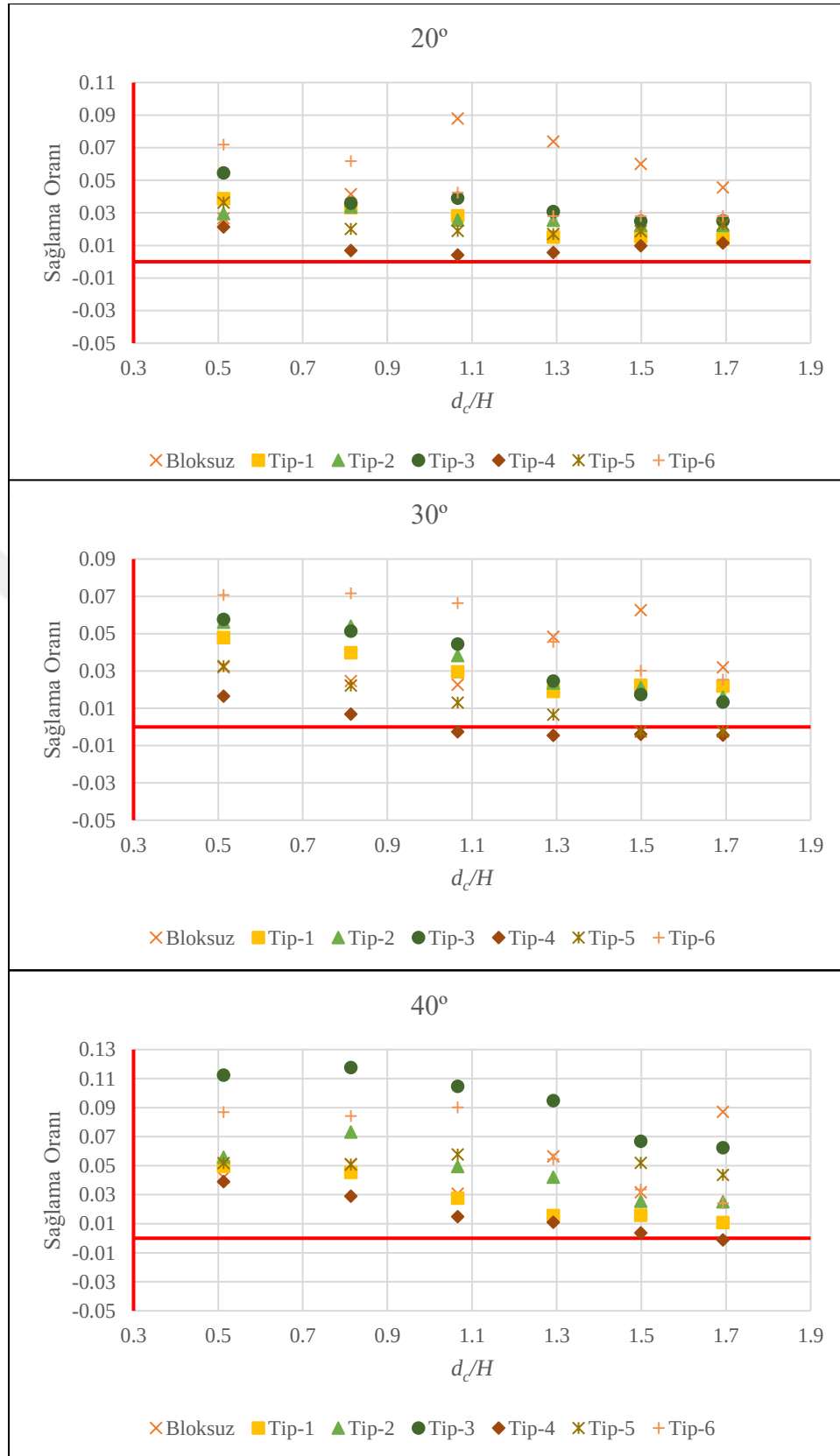


Şekil 4.28 : Tüm blok tiplerinin sayısal ve deneysel sonuçları için rölâtif enerji sönümlemenin karşılaştırılması.

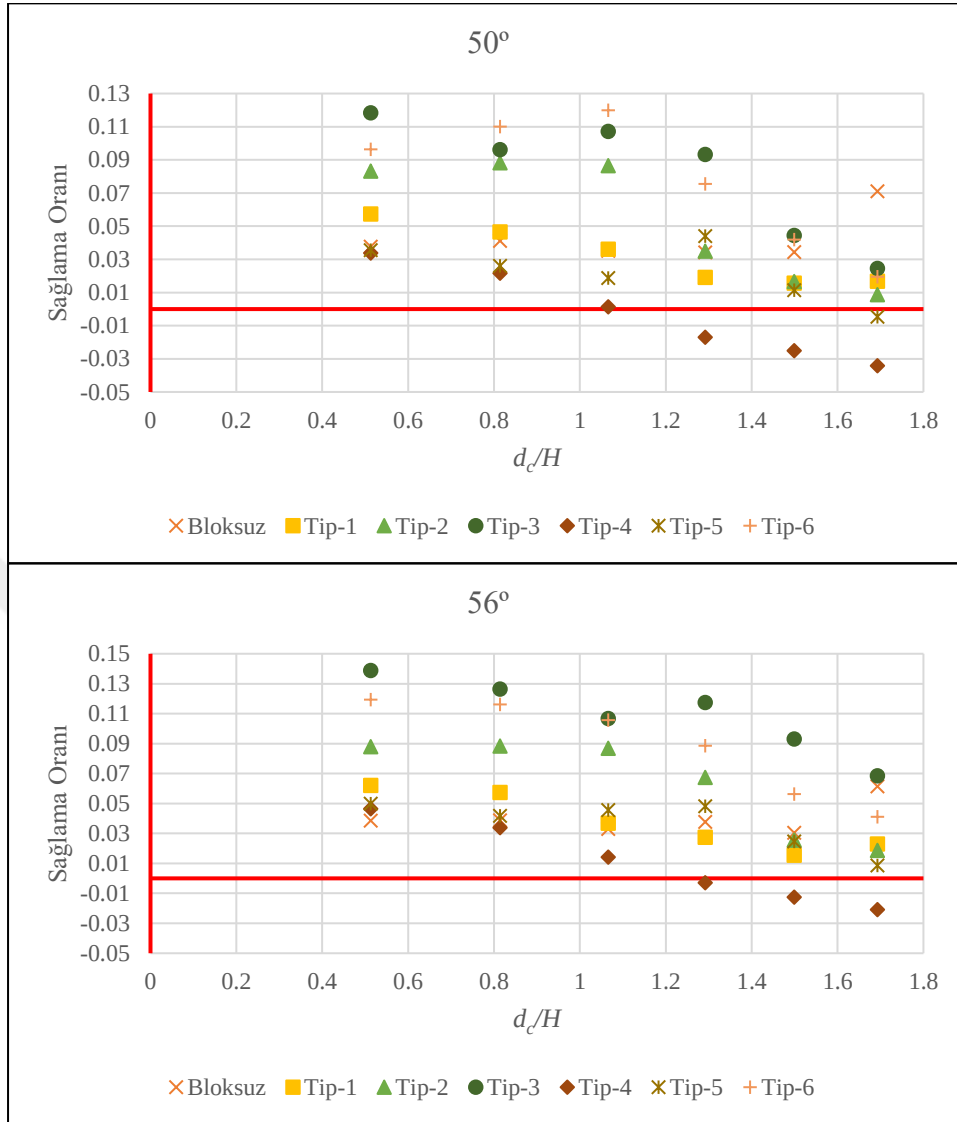
Bu çalışmada ayrıca bir diğer kıyaslama olarak sayısal ve deneysel rölâtif enerji sönümleme farkının, d_c/H boyutsuz parametresine göre değişimi de şüt açılarına göre karşılaştırılmıştır. Şekil 4.29’da 6 farklı açı değeri için bu kıyaslama verilmiştir. Burada sağlama oranı deneysel olarak hesaplanan rölâtif enerji sönümleme miktarı ile aynı çalışmanın sayısal kısmından elde edilen rölâtif enerji sönümleme miktarının farkıdır.



Şekil 4.29 : Bütün açı değerleri için sağlama oranı ve d_c/H ilişkisi.



Şekil 4.29 (devam) : Bütün açI değerleri için sağlama oranı ve d_c/H ilişkisi.



Şekil 4.29 (devam) : Bütün açı değerleri için sağlama oranı ve d_c/H ilişkisi.

Şekil 4.29'e göre düşük açı değerlerinde sayısal ve deneysel rölatif enerji sönümleme farkı azdır. Açı değeri arttıkça aradaki farkta artmıştır. Tip-4 blok tipi için $\alpha=20^\circ$ - 56° aralığında en iyi sayısal ve deneysel benzeşim elde edilmiştir denilebilir. $\alpha=10^\circ$ için ise daha iyi model benzeşimi sağlayan Tip-2, Tip-3 ve Tip-5 blok tipleridir. Tip-1 blok ise bütün açı değerleri için ortalama aynı benzeşimi sağlamıştır.

Tez kapsamında, akımın bloklar üzerinde hidrodinamik açıdan etkisini daha iyi belirlemek amacıyla maksimum dinamik basınç değerleri ve minimum statik basınç değerleri kendi içinde kıyaslanmıştır. Elde edilen değerler Çizelge 4.1'de sunulmuştur. Ayrıca kanal orta

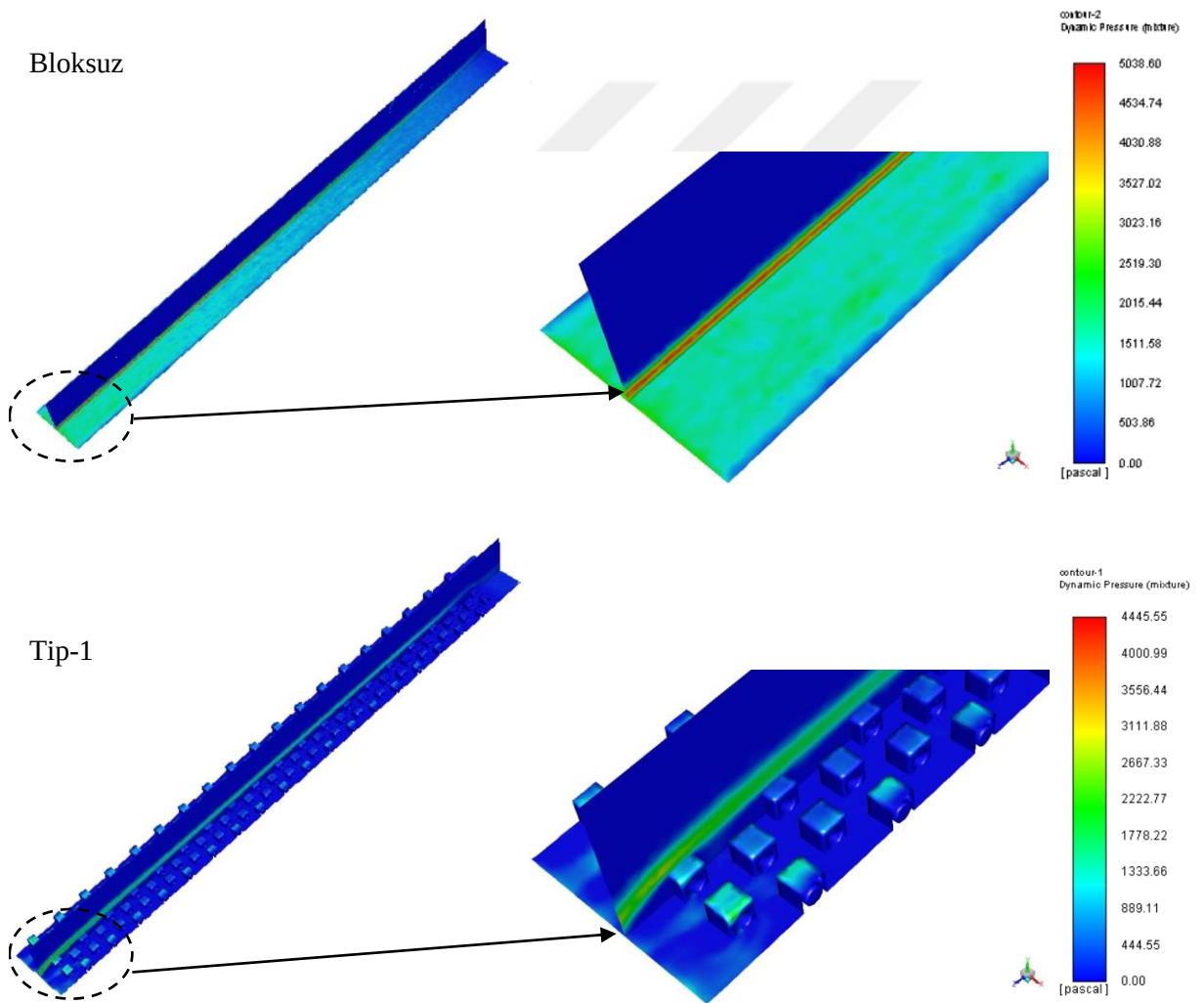
ekseninde, maksimum debi değeri $Q=30$ L/s ve $\alpha=10^\circ$, 30° ve 50° şüt açılarına ait sayısal simülasyon görüntüleri ile de bu durum desteklenmiştir.

Çizelge 4.1 : Üç farklı açı değeri için maksimum dinamik basınç ve minimum statik basınç değerleri.

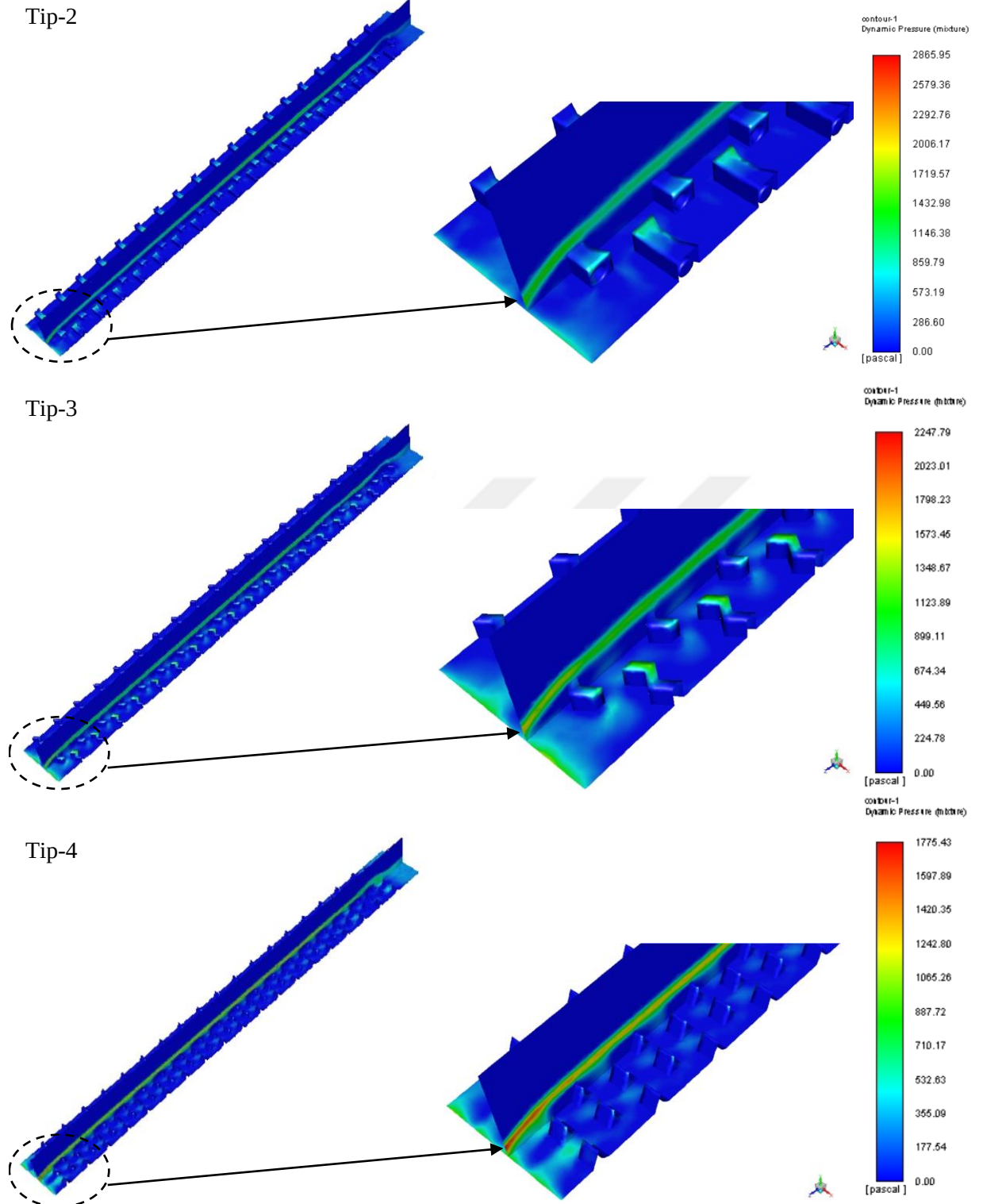
Blok Tipi	Şüt açısı α (derece)	Maksimum Dinamik Basınç Değerleri (Pa)	Minimum Statik Basınç Değerleri (Pa)
Bloksuz	10-30-50	5038.06~ 11528.01 ~11014.7	-59.17~-693.55~-136.49
Tip-1	10-30-50	4445.55~3424.97~4010.47	-1251.52 ~-1491.56~-2339.36
Tip-2	10-30-50	2865.95~3764.43~5418.59	-792.97~-2175.49~-3079.22
Tip-3	10-30-50	2247.79~3573.69~ 5706.57	-1161.41~- 2307.08 ~-3298.95
Tip-4	10-30-50	1775.43 ~2390.21~3190.65	-787.58~-1376.23~-2114.52
Tip-5	10-30-50	3250.66~4314.96~4922.78	-909.63~-1854.15~-2160.96
Tip-6	10-30-50	2516.51~3637.04~4382.20	-953.57~-2133.12~- 3402.05

Çizelge 4.1 incelendiğinde maksimum dinamik basınç değeri $\alpha=30^\circ$ şüt açısında bloksuz durum için elde edilmiştir. Bloksuz durumun diğer iki açı değeri için de, bloklı durumlara göre daha yüksek değerler elde edilmiştir. Genel olarak bütün blok tipleri için şüt açısı değeri arttıkça, maksimum dinamik basınç değerleri de artmıştır diyebiliriz. Blok tiplerini kendi içinde kıyasladığımızda en az maksimum dinamik basınç değeri Tip-4 blok için $\alpha=10^\circ$ şüt açısında elde edilmiştir. Burada blok geometrisinin bu değer üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir. Çünkü Tip-4 blok kavisli geometrisi gereği akımın yumuşak bir şekilde bloğa temasını sağlamakta ve bir sonraki blok sırasına geçişi kolaylaştırmaktadır. Böylece akım etkisiyle blok çok fazla zorlanmadan enerji sönmlemeyi sağlamaktadır. En fazla maksimum dinamik basınç değeri Tip-3 blok için $\alpha=50^\circ$ şüt açısında elde edilmiştir. Yine blok geometrisi dikkate alındığında Tip-3 blokta akımın temas halinde olduğu yüzeyler boşluksuz ve dikdörtgen yüzey alanına sahiptir. Dolayısıyla akımın çarptığı yüzey alanı büyüdükçe bloğa daha fazla dinamik yük gelecektir. Bu da bloğun yerinden sökülmesine ve parçalanmasına neden olabilir. Minimum statik basınç değerlerini kıyasladığımızda bloksuz durum için en yüksek değerler elde edilmiştir. Genel olarak bütün blok tipleri için şüt açısı değeri arttıkça, minimum statik basınç değerleri de azalmıştır diyebiliriz. Blok tiplerini kendi içinde kıyasladığımızda $\alpha=10^\circ$ şüt açısında Tip-1 blok için minimum değer elde edilmiştir. Diğer blok tiplerine kıyasla bu blok geometrisi, boşluklu, keskin ve daha ince kenar yüzeylere sahip olduğundan akımın bloğa etkisinin daha fazla olduğu söylenebilir. $\alpha=30^\circ$ şüt açısında Tip-3 blok için minimum statik basınç değeri elde edilmiştir. Blok geometrisi ve debi değeri dikkate alındığında akım daha geniş bir yüzeye çarptığından bloklarla teması artmış ve dolayısıyla daha düşük statik basınç değeri elde edilmesine neden olmuştur. $\alpha=50^\circ$ şüt açısında ise Tip-6 blok için minimum

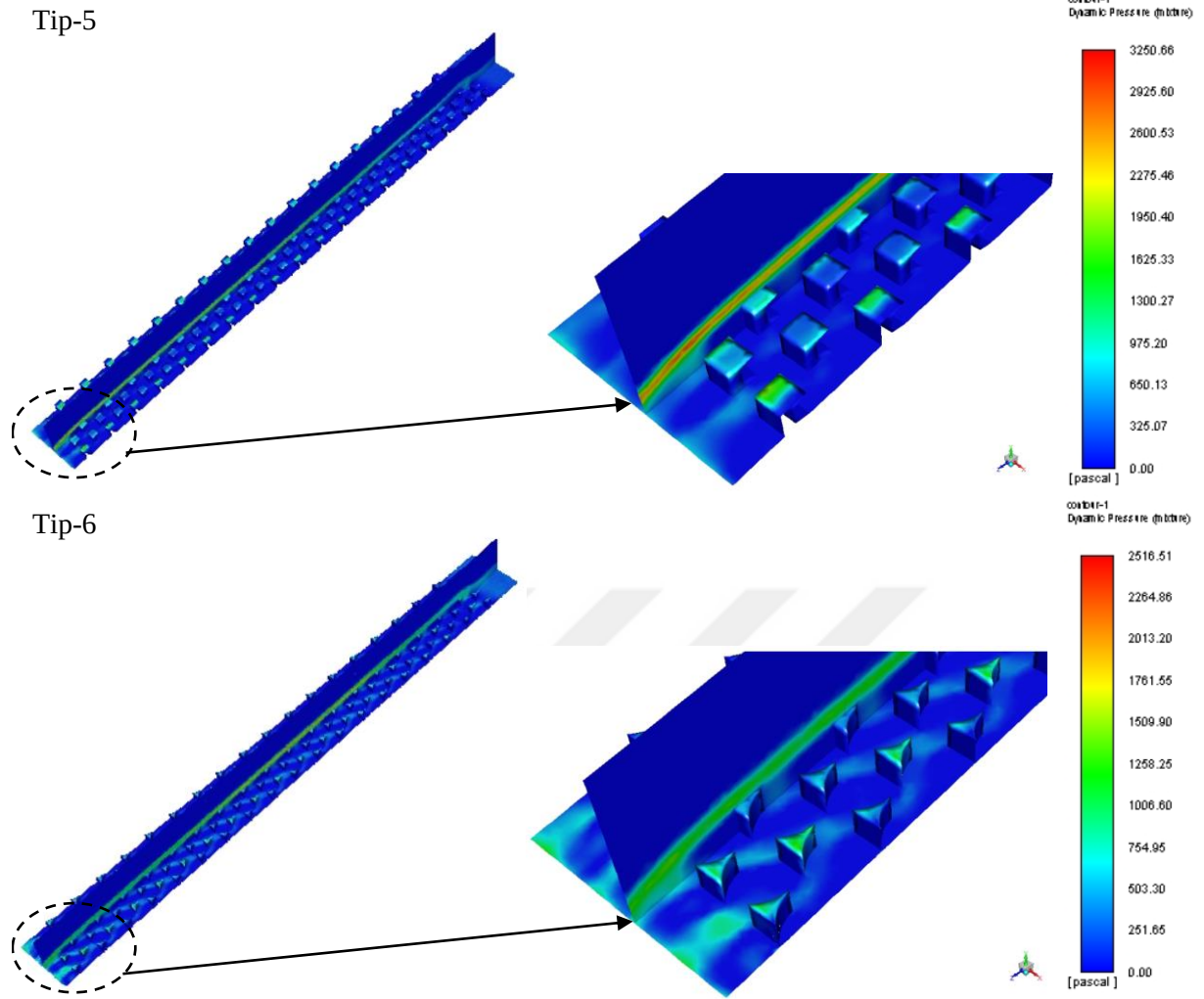
değer elde edilmiştir. Bu durum blok ucunun keskin bir geometriye sahip olması ve açısı değerinin yüksek olması akımın bloğa etkisini arttırmıştır şeklinde yorumlanabilir. Blok tipleri arasından $\alpha=10^\circ$ - 30° - 50° şüt açılarında Tip-4 blok için en yüksek minimum statik basınç değerleri görülmüştür. Dolayısıyla bu blok tipi en az etkiye maruz kalmış diyebiliriz. Blok üzerindeki dinamik basınç etkisini daha iyi gözlemlemek için sayısal simülasyon görüntüleri de elde edilmiştir. Şekil 4.30'da bloksuz durum ve 6 farklı blok geometrisi kullanılarak kanal orta ekseninde $x=0.2$ m'de tanımlanan planda, $\alpha=10^\circ$ şüt açısında ve $Fr=0.98$ için elde edilen görüntüler verilmiştir.



Şekil 4.30 : $\alpha=10^\circ$ şüt açısı $x=0.2$ m'de $Fr=0.98$ için dinamik basınç değerlerinin kıyaslanması.



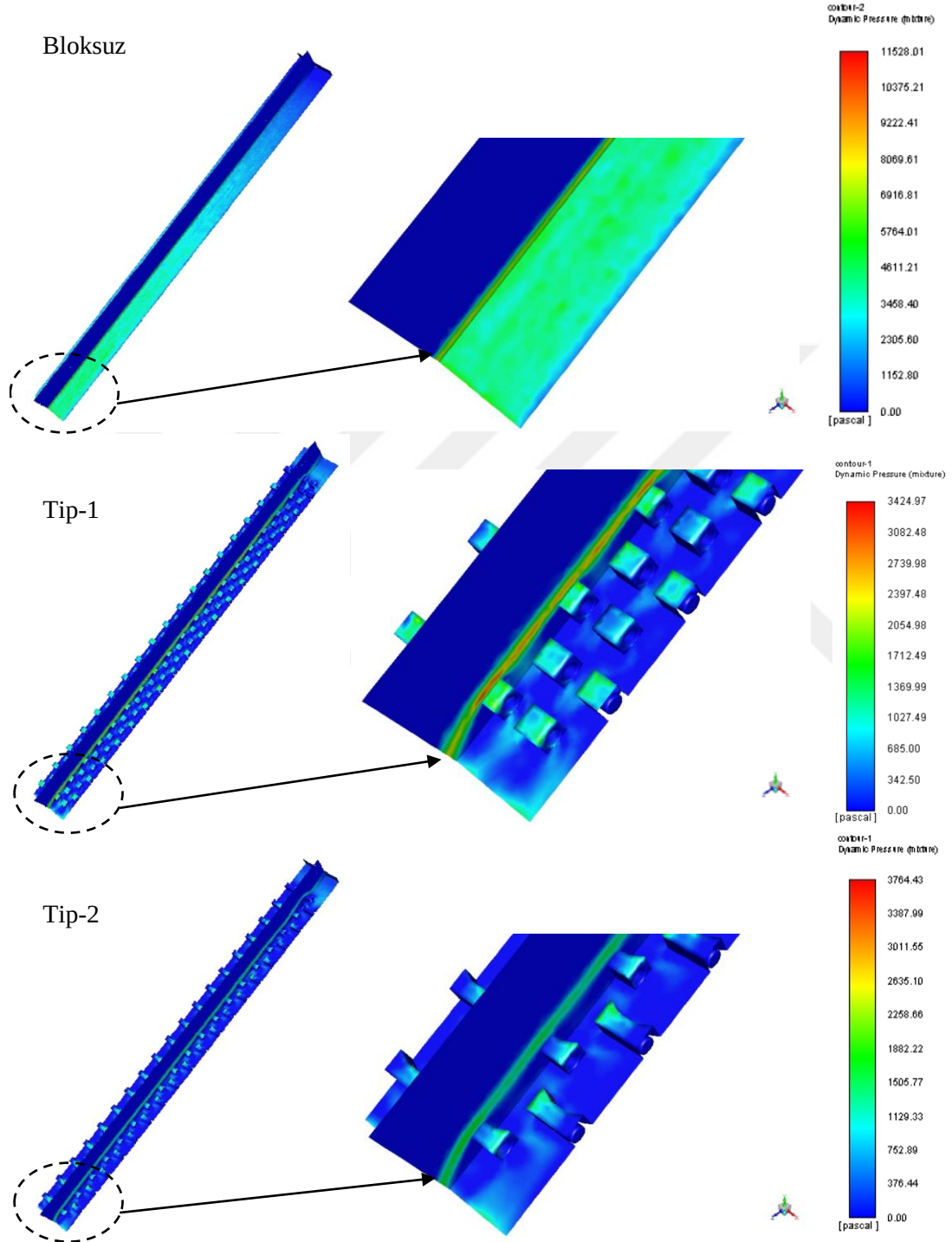
Şekil 4.30 (devam) : $\alpha=10^\circ$ şüt açısı $x=0.2$ m'de $Fr=0.98$ için dinamik basınç değerlerinin kıyaslanması.



Şekil 4.30 (devam) : $\alpha=10^\circ$ şüt açısı $x=0.2$ m’de $Fr=0.98$ için dinamik basınç değerlerinin kıyaslanması.

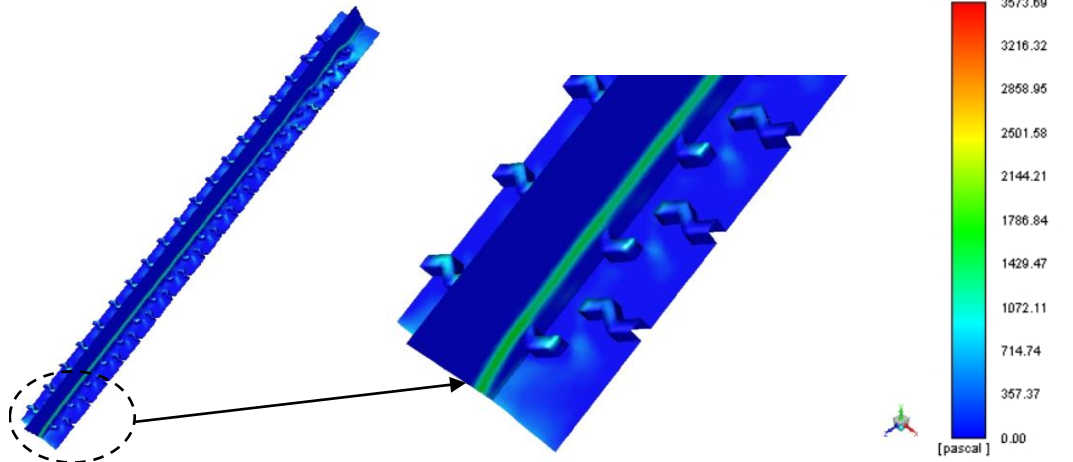
Şekil 4.30 incelendiğinde kanal orta ekseninde blokları kesen bir plan üzerinde dinamik basınç etkileri görülmektedir. Bloksuz durum için en yüksek dinamik basınç değeri elde edilirken, Tip-4 blok için en düşük değerler elde edilmiştir. Tip-4 bloğu sırasıyla takip eden Tip-3, Tip-6, Tip-2, Tip-5 ve Tip-1 bloklarıdır. Açıya ve blok geometrisine göre değişkenlik gösteren bu durum, bloğun ne kadar zorlandığının da bir göstergesidir. Mühendislik uygulamalarında en uygun blok tipi, hangi açı değeri, optimum enerji sönümleme ve bloğa etkiyen dinamik basınç değerini tayin etme sıkıntısı bu tür sayısal çözümlerle giderilebilir. Çalışmamızın hassas bir noktası olarak bütün çözümler için kanal girişindeki maksimum $Fr=0.98$ sayısının tercih edilmesi blokların en gayrı müsait durumdaki etkilenme düzeyini ölçmeye yarayacaktır.

Şekil 4.31’de bloksuz durum ve 6 farklı blok geometrisi kullanılarak kanal orta ekseninde $x=0.2$ m’de tanımlanan planda, $\alpha=30^\circ$ şüt açısında ve $Fr=0.98$ için elde edilen görüntüler yer almaktadır.

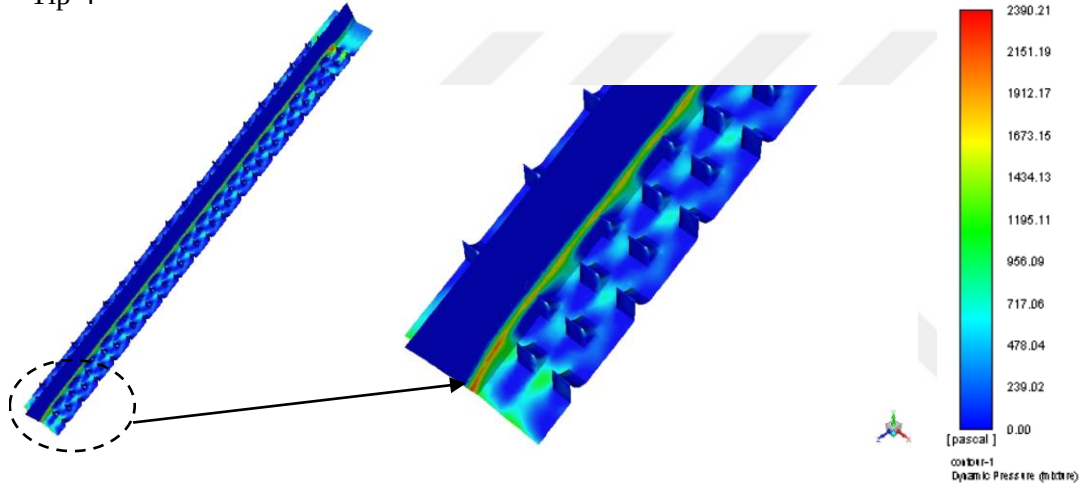


Şekil 4.31 : $\alpha=30^\circ$ şüt açısı $x=0.2$ m’de $Fr=0.98$ için dinamik basınç değerlerinin kıyaslanması.

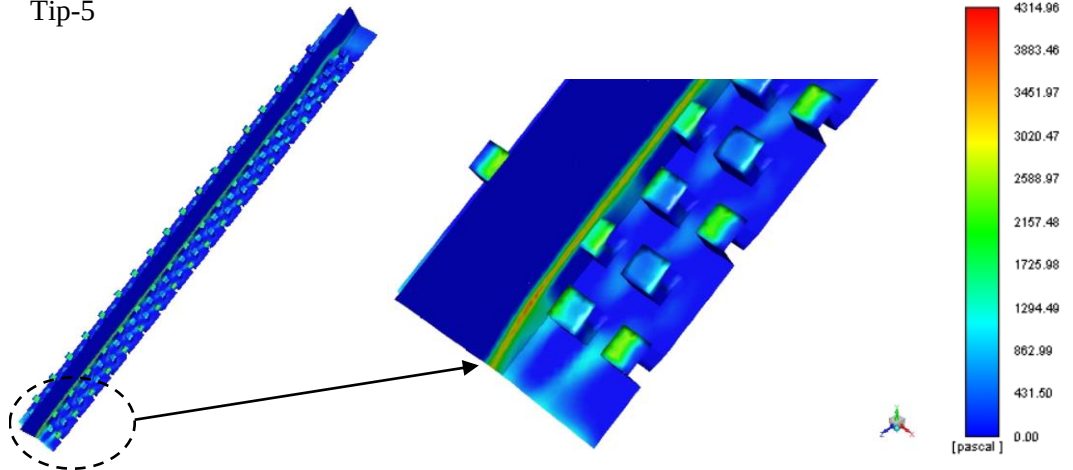
Tip-3



Tip-4

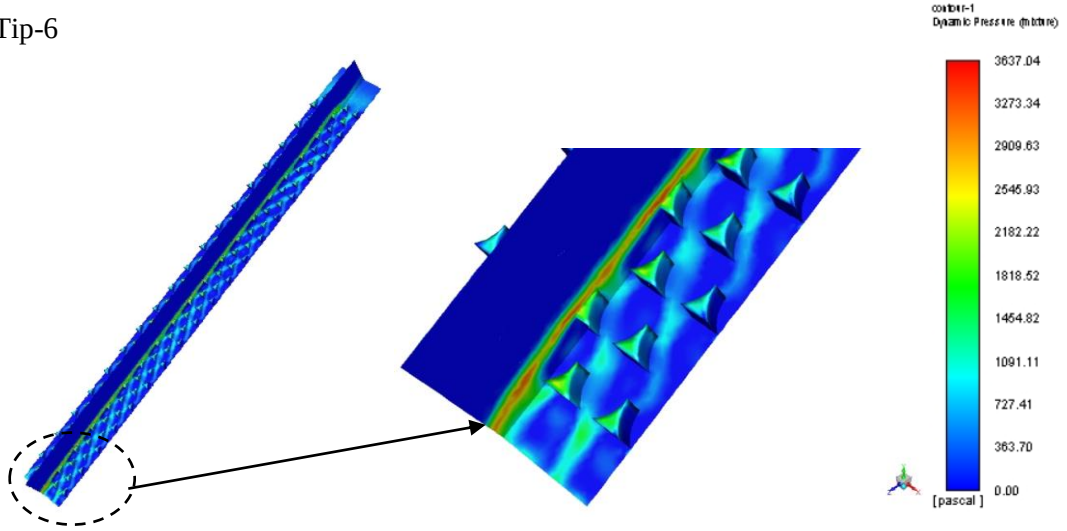


Tip-5



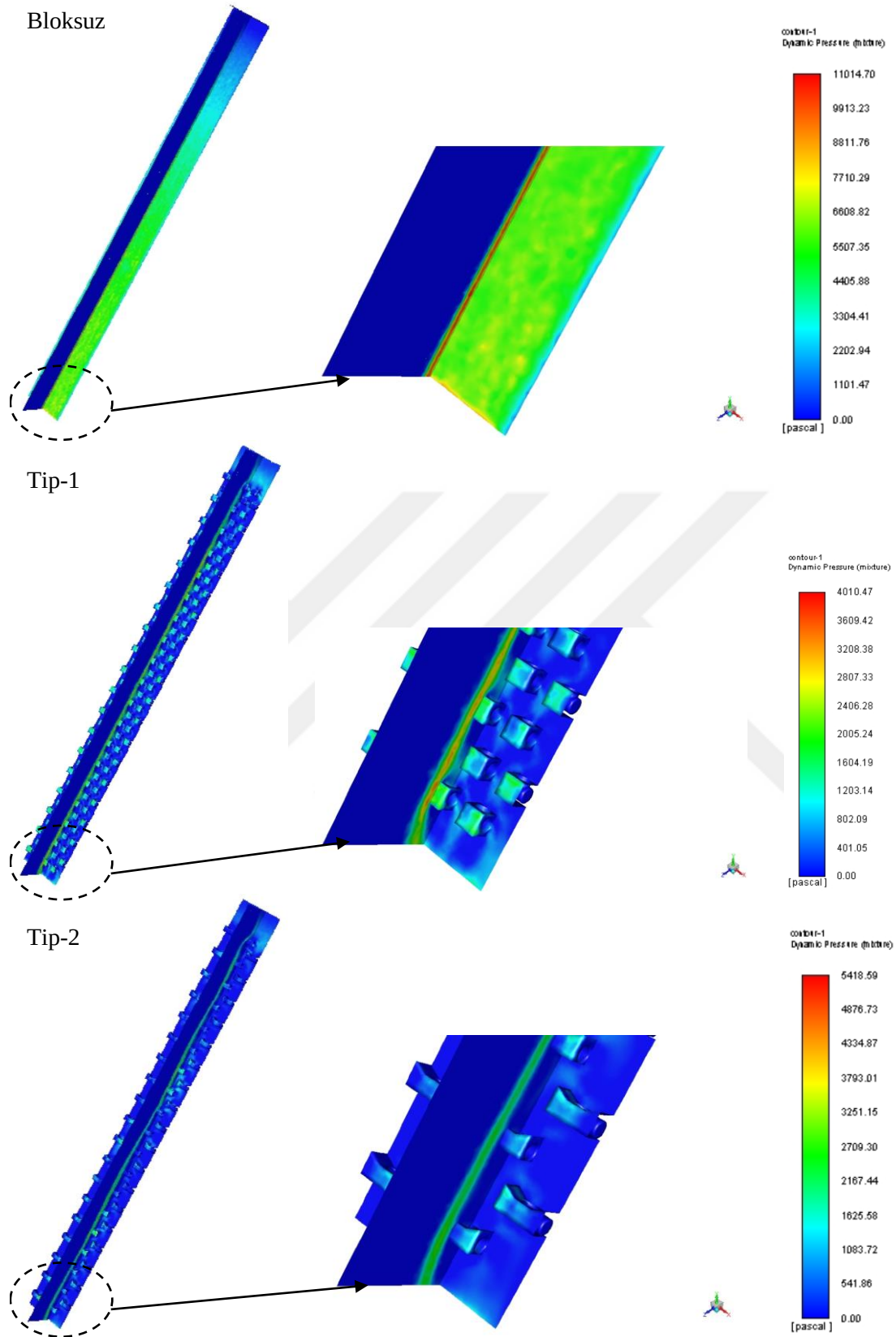
Şekil 4.31 (devam) : $\alpha=30^\circ$ şüt açısı $x=0.2$ m'de $Fr=0.98$ için dinamik basınç değerlerinin kıyaslanması.

Tip-6



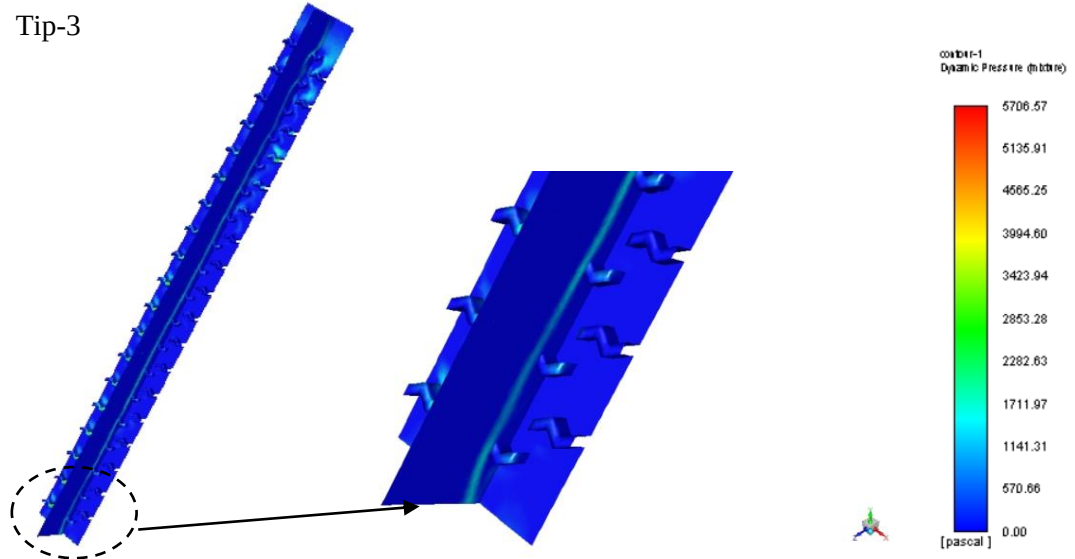
Şekil 4.31 (devam) : $\alpha=30^\circ$ şüt açısı $x=0.2$ m’de $Fr=0.98$ için dinamik basınç değerlerinin kıyaslanması.

Şekil 4.31 incelendiğinde, maksimum dinamik basınç değeri yüksek akım hızı nedeniyle bloksuz kanal durumu için elde edilmiştir. Burada kanal açısına bağlı olarak dinamik basınç değeri yüksek çıkmıştır. Blok tiplerini kendi içerisinde kıyasladığımızda Tip-5 blok için maksimum dinamik basınç değeri elde edilirken, Tip-4 blok için ise minimum dinamik basınç değerleri elde edilmiştir. Böyle bir sonuç elde edilmesinde açı etkisi ve blok geometrisinin etkili olduğu söylenebilir. Çünkü Tip-5 blok, akımın bloğa temasıyla birlikte memba yönüne doğru akımı ters çeviren geometrisi gereği, maksimum dinamik basınç görüldüğü söylenebilir. Ayrıca $\alpha=30^\circ$ şüt açısı bu blok için etkisini gösterebildiği etkin şüt açısı denilebilir. Şüt kanalına giren akım ve açı değeri blok etkisini tamamen ortaya çıkarmıştır. Tip-4 blok ise, akımla temas halinde olan kavisli geometrisi gereği diğer blok tiplerine göre çok fazla zorlanmamıştır. Membadan gelen suyun temas ettiği yüzey alanı yumuşak bir akım geçişine olanak sağlamıştır. Böylece blokların çok fazla zorlanmadan akımı mansaptaki kanala ilettiği söylenebilir. Diğer blok tiplerinde sırasıyla Tip-2, Tip-6, Tip-3 ve Tip-1 için yüksek dinamik basınç değerleri görülmüştür. Burada Tip-2 ve Tip-5’in akımla zorlanma etkilerinin birbirine yakın olduğu söylenebilir. Yine Tip-1 ve Tip-4’ün akımla zorlanma etkileri birbirine yakın olduğu için mühendislik uygulamalarında öncelikli olarak Tip-4 veya Tip-1 bloklarından biri seçilebilir. Şekil 4.32’de bloksuz durum ve 6 farklı blok geometrisi kullanılarak kanal orta ekseninde $x=0.2$ m’de tanımlanan planda, $\alpha=50^\circ$ şüt açısında ve $Fr=0.98$ için elde edilen görüntüler yer almaktadır.

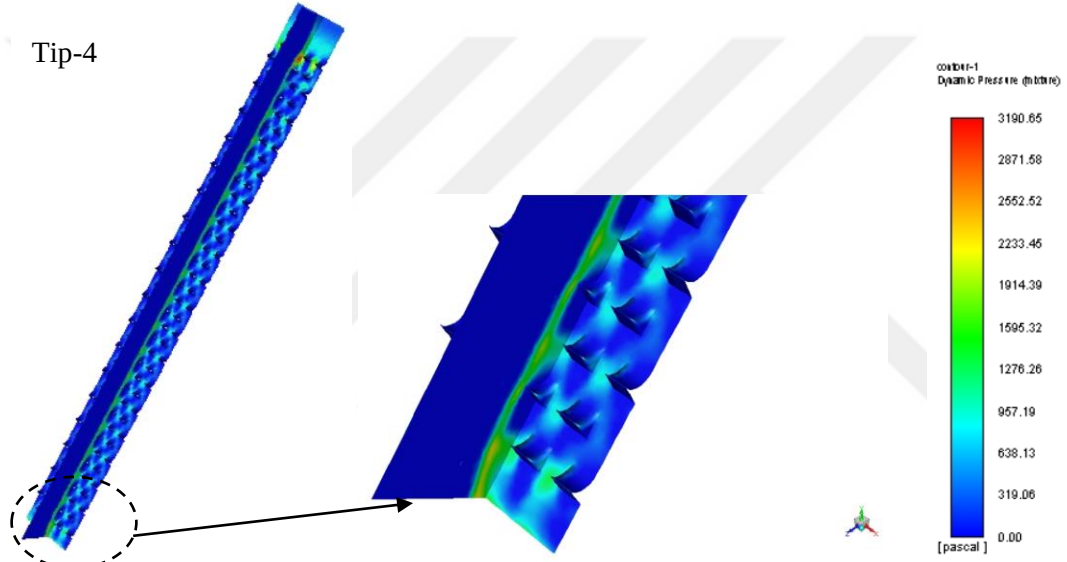


Şekil 4.32 : $\alpha=50^\circ$ şüt açısı $x=0.2$ m’de $Fr=0.98$ için dinamik basınç değerlerinin kıyaslanması.

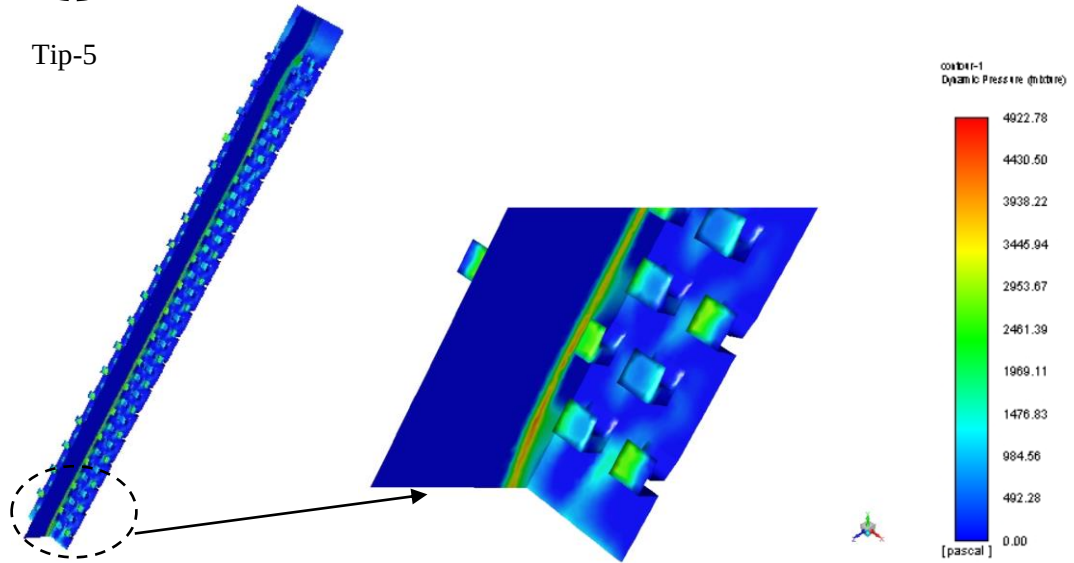
Tip-3



Tip-4

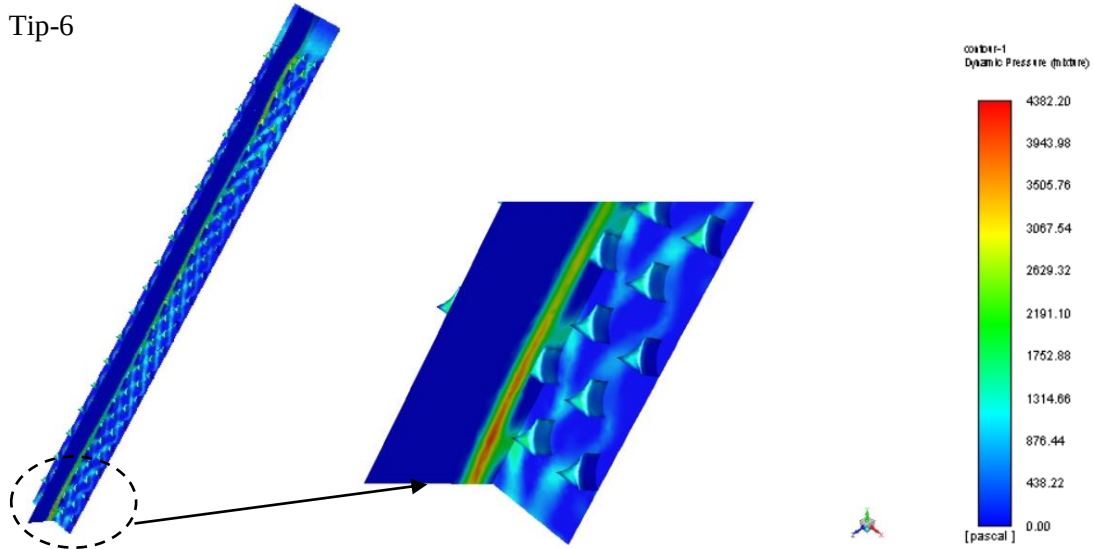


Tip-5



Şekil 4.32 (devam) : $\alpha=50^\circ$ şüt açısı $x=0.2$ m’de $Fr=0.98$ için dinamik basınç değerlerinin kıyaslanması.

Tip-6



Şekil 4.32 (devam) : $\alpha=50^\circ$ şüt açısı $x=0.2$ m’de $Fr=0.98$ için dinamik basınç değerlerinin kıyaslanması.

Şekil 4.32 incelendiğinde maksimum dinamik basınç değeri yüksek akım hızı değerleri nedeniyle yine bloksuz kanal akımının çıkışına doğru elde edilmiştir. Burada kanal açısına bağlı olarak dinamik basınç değeri yüksek çıkmıştır. Blok tiplerini kendi içerisinde kıyasladığımızda Tip-3 blok için maksimum dinamik basınç değeri elde edilirken, Tip-4 blok için ise minimum dinamik basınç değerleri elde edilmiştir. Böyle bir sonuç elde edilmesinde açı etkisi ve blok geometrisinin etkili olduğu söylenebilir. Çünkü Tip-3 blok, akımın blok ile temas halinde olduğu geniş bir dikdörtgen yüzey alanına sahip olduğu için, maksimum dinamik basınç değeri görüldüğü söylenebilir. Akımın temas attığı yüzey alanı arttıkça oluşacak olan dinamik basınç değerlerinin artış göstereceği söylenebilir. Ayrıca $\alpha=50^\circ$ şüt açısı bu blok için etkisini gösterebildiği etkin şüt açısı denilebilir. Gelen akım ve açı değeri blok etkisini tamamen ortaya çıkarmıştır. Tip-4 blok için, kavisli geometrisi akımın bloğa temasından itibaren yumuşak bir çarpma ve geçiş sağladığı söylenebilir. Dolayısıyla bu blok tipi membadan gelen akım değeri ve şüt açısı yüksek olmasına rağmen çok fazla zorlanmadan mansap kısma suyu iletebilmiştir. Diğer blok tiplerinde sırasıyla Tip-2, Tip-5, Tip-6 ve Tip-1 için yüksek dinamik basınç değerleri görülmüştür. Burada Tip-2 ve Tip-3’ün akımla zorlanma etkilerinin birbirine yakın olduğu söylenebilir. Yine Tip-1 ve Tip-4’ün akımla zorlanma etkilerinin birbirine yakın olduğu söylenebilir. Mühendislik uygulamalarında daha az dinamik basınç etkileri görüldüğü için öncelikli olarak Tip-4 veya Tip-1 bloklarından biri seçilebilir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması, üç aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, drenaj amaçlı şüt kanalları EKŞ içerisine yerleştirilen birbirinden geometrik açıdan farklı 6 blok tipinin enerji sönümleme performansları farklı debi, Fr sayıları ve şüt eğimleri için deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında bu blokların sudaki oksijen seviyesini artırma performansları deneysel olarak test edilmiştir. Hangi blok tiplerinin hangi açı değerinde ne kadar etkili olduğu detaylı bir şekilde incelenmiştir. Son aşamada ise, kanal ve blok geometrilerinin enerji kırma ve EKŞ içindeki akımın diğer hidrodinamik davranışları 3 boyutlu sayısal modeller (HAD yazılımı) kullanılarak detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Sayısal modellerde $k-\varepsilon$ türbülans ve VOF çözüm modelleriyle analizler gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve sayısal modellerden elde edilen enerji sönümleme oranları kıyaslanmış, ayrıca EKŞ üzerinde oluşan hız dağılımları, statik ve dinamik basınç gibi akım özellikleri sayısal modeller yardımıyla detaylı olarak incelenmiştir. Bu açıklamalar doğrultusunda tez çalışmasından elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

- EKŞ kanalında 6 farklı blok tipi için elde edilen deneysel verilere göre, tüm bloklar akımın enerjisini bloksuz duruma göre çok daha fazla sönümlemişlerdir.
- $\alpha=10^\circ$ için en fazla enerji sönümleyen Tip-6 blok iken, en az enerji sönümleme Tip-4 blok için elde edilmiştir.
- Yine $\alpha=20^\circ$ için ise en fazla enerji sönümleme değeri Tip-2 için elde edilmiştir.
- $\alpha=30^\circ$ için Tip-4, Tip-5 ve Tip-6 blokları daha fazla enerji sönümlemişlerdir.
- $\alpha=40^\circ$ için ise Tip-3, Tip-4 ve Tip-6 bloklarının daha etkili olduğunu söyleyebiliriz.
- $\alpha=50^\circ$ için Tip-1 ve Tip-6 blokları daha fazla enerji sönümlemişlerdir. Bu açı değeri için Fr sayısı arttıkça en az etkili olan blok tipleri Tip-2 ve Tip-4 olarak belirlenmiştir.
- $\alpha=56^\circ$ için ise Tip-1 ve Tip-6 bloklarının daha etkili olduğu söylenebilir.
- Genel olarak bütün blok tipleri en düşük Fr'da en iyi enerji sönümleme etkisi göstermişlerdir.
- Bütün açı değerlerine göre blokları kıyasladığımızda, mühendislik uygulamalarında verim almak adına $\alpha=50^\circ-56^\circ$ için Tip-1 ve Tip-6 blok tiplerinden birinin kullanımı daha faydalı olabilir. $\alpha=30^\circ-40^\circ$ için Tip-3, Tip-4, Tip-5 veya Tip-6 blok tiplerinden herhangi biri tercih edilebilir. $\alpha=10^\circ-20^\circ$ için ise Tip-6 ve Tip-2 blok tiplerinden birinin kullanımı tavsiye edilebilir.

- Kavisli blok yapısına sahip Tip-6 bloğun bütün Fr değerleri için en düşük açıda $\alpha=10^\circ$ en fazla enerji sönümleyen blok tipi olduğu söylenebilir.
- Şüt açısının biraz daha arttığı yumuşak açı $\alpha=20^\circ-30^\circ$ aralığında, belirli blok tipleri geometrik yapılarına bağlı olarak Fr sayısının arttığı bütün deneylerde enerji sönümleme üzerinde etkili olmuşlardır. Trapez kesitli, keskin köşeli ve boşluklu Tip-2 blok, zikzaklı yapısı ile akım yönüne dik geniş yüzeylere sahip olan Tip-3 blok, kavisli yapısı ile bir sıçratma eşiği gibi işlevi olan Tip-4 blok ile trapez kesitli ve keskin köşelere sahip Tip-5 blok tiplerinin bu yumuşak açı geçişlerinde daha etkili oldukları söylenebilir.
- Yüksek şüt açıları $\alpha=40^\circ-56^\circ$ aralığında ve yüksek Fr sayılarında blok genişliği daha dar, keskin köşeli ve boşluklu Tip-1 blok ve kavisli yapısı ile akımı iki eşit parçaya ayırarak enerjiyi sönümleyen Tip-6 blok daha fazla etkilidir. Bu durumun blok geometrilerine bağlı olduğu söylenebilir. Tip-1 blok içerisine giren akım boşluklardan geçişi sırasında geriye doğru bir çevrinti hareketi ve yan boşluklardan gelen akımla çarpışma durumunu meydana getirdiğinden daha fazla enerji sönümlendiği söylenebilir. Aynı şekilde keskin uclu ve kavisli Tip-6 blok, yüksek Fr değerlerinde akımı daha fazla parçaya ayırarak yönlendirdiği için enerji sönümleme etkisinin maksimum düzeyde hissedildiği söylenebilir.
- Tüm blok tiplerini enerji sönümleme bakımından literatürde yapılan çalışmalarla kıyasladığımızda düşük Fr değerleri, $Fr=0.64-0.83$ için blok etkisinin çok daha iyi olduğu söylenebilir. Yüksek Fr değerlerinde ise $Fr=0.93-0.98$ aralığında blokların literatürle uyumlu olduğu ve bazı çalışmalara göre daha iyi sonuç sağlarken bazılarında ise yakın değerlerde enerji sönümleme değerlerinin elde edildiği söylenebilir.
- Farklı blok geometrilerine bağlı olarak $\alpha=10^\circ$ ve 20° için en yüksek OTV değerleri Tip-6 blok için elde edilmiştir. Bu blok tipinin akımı iki parçaya ayırarak türbülans ve çalkantıları arttırdığı ve böylece havalandırma verimini arttırdığı düşünülmektedir.
- Yine $\alpha=30^\circ$ için ise en iyi OTV değeri Tip-3 blok en iyi sonuçları sağlamıştır. Bunun sebebi ise, bloğun geometrisi suyun çarptığı yüzeyde çok fazla sıçrama ve bir sonraki blok sırasına akımı parçalayarak ilettiği için oksijen verimi doğal olarak artış göstermektedir. Bu blok tipi için deney sırasında elde edilen görüntülerde olduğu gibi, çok fazla kaotik bir akış ve güçlü köpüklenme meydana gelmiştir.

- Grafik değerleri incelendiğinde en yüksek verim Tip-1 blok için $\alpha=40^\circ$, $\alpha=50^\circ$ ve $\alpha=56^\circ$ elde edilmiştir. Tip-1 blok, geometrisi gereği dar bir kesit içerisine giren suyu hem geri döndürerek hem de iki kola ayırarak yandaki bloktan gelen suyla çarpmasını sağlamaktadır. Akım burada kısa süreliğine de olsa basınçlı bir boru akımına dönüşmektedir. Bu durum kütle transferi için gerekli olan yüzey alanını arttırır. Dolayısıyla atmosferden havanın alındığı hızlı bir oksijen transferi gerçekleşmiştir.
- Tip-5 blok $\alpha=10^\circ$ hariç diğer bütün açılarda en az oksijen transferini gerçekleştirmiştir.
- HAD yöntemi ile çözülen sayısal model verilerinin gerçek verilerle karşılaştırılmasında şüt açısı değerine bağlı olarak maksimum Fr sayısına göre akım görüntüleri, hız vektörlerinin büyüklüğü ve kanal tabanı ile bloklar üzerindeki negatif basınç etkileri simüle edilmiştir.
- Akım kanalı içerisindeki dinamik basınç etkileri de simüle edilmiş ve Tip-4 bloğun bütün açılı değerlerinde daha az dinamik basınca maruz kaldığı tespit edilmiştir. Yine yumuşak şüt açılarında ($\alpha=10^\circ-30^\circ$) için diğer blok tiplerine nazaran daha düşük dinamik basınca maruz kaldığından, Tip-1 blok farklı bir alternatif olarak mühendislik uygulamalarında tavsiye edilebilir.
- Deneysel olarak ölçülen ve simüle edilen bütün değerler $\pm\%20$ hata payı arasında yer almıştır. Burada Tip-3 blok hariç bütün blok tipleri için düzgün bir akım yüzeyi elde edilmiştir. Böylelikle VOF metodunun ve RNG $k-\epsilon$ türbülans modelinin bizim çalışmamızdaki sayısal çözümler için uygun olduğu söylenebilir.
- Bu çalışmada ayrıca bir diğer kıyaslama metodu olarak sayısal ve deneysel rölatif enerji sönmleme farkının, d/H boyutsuz parametresine göre değişimi de şüt açılarına göre karşılaştırılmıştır.
- Sağlama oranı değerlerine göre düşük açılı değerlerinde sayısal ve deneysel rölatif enerji sönmleme farkı azdır. Açılı değeri arttıkça aradaki farkta artmıştır. Tip-4 blok tipi için $\alpha=20^\circ-56^\circ$ aralığında en iyi sayısal ve deneysel benzeşim elde edilmiştir denilebilir. $\alpha=10^\circ$ için ise daha iyi model benzeşimi sağlayan Tip-2, Tip-3 ve Tip-5 bloklarıdır. Tip-1 blok bütün açılı değerleri için ortalama aynı benzeşimi sağlamıştır. Tip-6 blok için genel anlamda deneysel ve sayısal model sağlama oranı diğer blok tiplerine göre daha yüksek değerler elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Aisenbrey, A. J.** (1974). *Design of small canal structures* (No. 627.13 A5).
- Aisenbrey, A. J., Hayes, R. B., Warren, H. J., Winsett, D. L., & Young, R. B.** (1978). Design of small canal structures, US Bureau of Reclamation, Denver. *Colorado. USA.*
- Akoz, M. S., Kirkgoz, M. S., & Oner, A. A.** (2009). Experimental and numerical modeling of a sluice gate flow. *Journal of Hydraulic Research*, 47(2), 167-176.
- Andre, S., Dewals, B., Pirotton, M., & Schleiss, A.** (2003). Quasi 2D-numerical model of aerated flow over stepped chutes. In *Proc. 30th IAHR Congress* (pp. 671-678). IAHR.
- Ashour, M. A., Sayed, T., & El-Attar, S.** (2014). A new water energy dissipater for efficient energy dissipation and enriching the flow with dissolved oxygen content. *Limnological Review*, 14(1), 3.
- Aydın, M.C., Aydın, S.,** (2005) Kars Barajı Yandan Alışlı Dolusavak Teknesinde Üç Boyutlu Analiz Uygulaması, *II. Ulusal Su Mühendisliği Sempozyumu* 21-24 Eylül, 599-610, Gümüşdör-İZMİR
- Aydın, M. C., & Emiroglu, M. E.** (2013). Determination of capacity of labyrinth side weir by CFD. *Flow Measurement and Instrumentation*, 29, 1-8.
- Aydın, M. C., & Ulu, A. E.** (2017). Numerical modelling of sluice gates with different sill types under submerged flow conditions. *Bitlis Eren University Journal of Science and Technology*, 7(1), 1-6.
- Aydın, M. C., & Karaduman, Ç.** (2018). Numerical simulation of scour at downstream of submerged sluice flow. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 24(3), 439-443.
- Aydın, M. C., Bilhan, Ö., & Emiroğlu, M. E.** (2019). Trapez Labirent Savakların Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) Kullanılarak Analizi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 10(2), 731-742.
- Baffled spillway at Dovestone Reservoir, Greenfield, Peak District National Park.** Erişim: 27 Mayıs 2021, <https://www.alamy.com/stock-photo-baffled-spillway-at-dovestone-reservoir-greenfield-peak-district-national-139594546.html>.
- Baylar, A.** (2002). *Study on the effect of type selection of weir aerators on oxygen transfer* (Doctoral dissertation, Ph. D. Thesis, Firat University, Elazığ, Turkey, (In Turkish)).
- Baylar, A.** (2007a). Aeration Efficiency Estimation In Stepped Cascade Aerators using Neural Network Approach. *Engineering Sciences*, 3(2), 360-371.
- Baylar, A.** (2007b). Cfd Analysis To Predict Optimal Air Inlet Hole Diameter Of Venturi Tube in Terms Of Air Injection. *Engineering Sciences*, 3(2), 211-224.
- Baylar, A., & Aydın, C.** (2008). Natural and applied sciences civil engineering/Hydraulic. *e-Journal of New World Sciences Academy*, 3(2), A0065.
- Baylar, A., & Emiroglu, M. E.** (2003). Study of aeration efficiency at stepped channels. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water and Maritime Engineering* (Vol. 156, No. 3, pp. 257-263). Thomas Telford Ltd.

- Baylar, A., & Ozkan, F.** (2006). Applications of venturi principle to water aeration systems. *Environmental Fluid Mechanics*, 6(4), 341-357.
- Baylar, A., Unsal, M., & Ozkan, F.** (2010). Hydraulic structures in water aeration processes. *Water, Air, & Soil Pollution*, 210(1), 87-100.
- Boes, R. M., & Hager, W. H.** (2003). Two-phase flow characteristics of stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(9), 661-670.
- Brown, C., & Crowley, R.** (2018). United States Bureau of Reclamation Type IX Baffled Chute Spillways: A New Examination of Accepted Design Methodology Using CFD and Monte Carlo Simulations, Part I. In *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings* (Vol. 7, No. 1, p. 13).
- Bung, D. B., & Valero, D.** (2016). Optical flow estimation in aerated flows. *Journal of Hydraulic Research*, 54(5), 575-580.
- Chanson, H.** (1993). Self-aerated flows on chutes and spillways. *Journal of hydraulic engineering*, 119(2), 220-243.
- Chanson, H.** (1994). Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes. *Journal of hydraulic research*, 32(2), 213-218.
- Chanson, H.** (1995). Air bubble entrainment in free-surface turbulent flows: Experimental investigations.
- Chanson, H.** (2009). Turbulent air–water flows in hydraulic structures: dynamic similarity and scale effects. *Environmental fluid mechanics*, 9(2), 125-142.
- Cheng, X., Chen, Y., & Luo, L.** (2006). Numerical simulation of air-water two-phase flow over stepped spillways. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 49(6), 674-684.
- Chu, K., Hua, Z., & Ji, L.** (2014). Aeration at overflow dams with curved surfaces by different flashboard spillways. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 22(3), 226-236.
- Çakmak, N. V.** (2005). *Enerji Kırıcı Havuzlarda Farklı Tip Enerji Kırıcı Yapının Enerji Sönümleme Etkisinin İncelenmesi* (MSc Thesis, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ).
- Dursun, Ö. F.** (2009). *Basamaklı dolusavaklar üzerinde oluşan akımlarının sayısal analizi* (Doctoral dissertation, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ).
- Eghbalzadeh, A., & Javan, M.** (2012). Comparison of Mixture and VOF Models for Numerical Simulation of Air–entrainment in Skimming Flow over Stepped Spillways. *Procedia engineering*, 28, 657-660.
- Eloubaidy, A. F., Al-Baidhani, J. H., & Ghazali, A. H.** (1999). Dissipation of hydraulic energy by curved baffle blocks. *Pertanika J. Sci. Technol*, 7(1), 69-77.
- Enerji Kırıcı Yapılar.** Erişim: 27 Mayıs 2021, https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/99042/mod_resource/content/1/TSY_Blm5.pdf.
- Essery, I. T. S., Tebbutt, T. H. Y., & Rasaratnam, S. K.** (1978). *Design of spillways for re-aeration of polluted waters*. Construction Industry Research and Information Association.
- FEMA** (2010) “Outlet Works Energy Dissipators” Technical Manual FEMA P-679

- Gameson, A. L. H.** (1957). Weirs and the aeration of rivers. *J. Inst. Wat. Engrs*, 11, 477-490.
- Gameson, A. L. H., Vandyke, K. G., & Ogden, C. G.** (1958). The effect of temperature on aeration at weirs. *Water and Water Engineering (British)* v, 753(62), 489.
- Gerger, R., Kisi, O., Faruk Dursun, O., & Emin Emiroglu, M.** (2017). Applicability of several soft computing approaches in modeling oxygen transfer efficiency at baffled chutes. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(5), 04016085.
- Ghaderi, A., Daneshfaraz, R., Dasineh, M., & Di Francesco, S.** (2020). Energy dissipation and hydraulics of flow over trapezoidal–triangular labyrinth weirs. *Water*, 12(7), 1992.
- Gonzalez, C. A., & Chanson, H.** (2008). Turbulence manipulation in air–water flows on a stepped chute: An experimental study. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 27(4), 388-408.
- Gulliver, J. S., Thene, J. R. and Rindels, A. J.** (1990) ‘Indexing gas transfer in self-aerated flows’, *Journal of environmental engineering. American Society of Civil Engineers*, 116(3), pp. 503–523.
- Gulliver, J. S., & Rindels, A. J.** (1993). Measurement of air-water oxygen transfer at hydraulic structures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 119(3), 327-349.
- Gulliver, J. S., Wilhelms, S. C., & Parkhill, K. L.** (1998). Predictive capabilities in oxygen transfer at hydraulic structures. *Journal of hydraulic engineering*, 124(7), 664-671.
- Habibzadeh, A., Loewen, M. R., & Rajaratnam, N.** (2012). Performance of baffle blocks in submerged hydraulic jumps. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(10), 902-908.
- Hirt, C. W., & Nichols, B. D.** (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of computational physics*, 39(1), 201-225.
- Jangam, P., Kudave, S., Kadage, V., Waghmare, N., & Malu, M.** (2017). To Study the Science behind the Construction and Techniques of Burj Al Arab. *International Journal of Engineering Technology Science and Research IJETSR*, 4(4), 309-315.
- Kang, J. G.** (2017). An experimental study on the dissipation effect of a Baffle downstream of a Weir. *Engineering*, 9(11), 937-949.
- Kawase, Y., & Moo-Young, M.** (1992). Correlations for liquid-phase mass transfer coefficients in bubble column reactors with newtonian and non-newtonian fluids. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 70(1), 48-54.
- Kaya, N.** (2003). *Enerji Kırıcı Havuzlarda Farklı Tip Enerji Kırıcı Blokların Enerji Sönümleme Oranlarının İncelenmesi* (Doctoral dissertation, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ).
- Kaya, N., & Emiroglu, M. E.** (2010, October). Study of oxygen transfer efficiency at baffled chutes. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management* (Vol. 163, No. 9, pp. 447-456). Thomas Telford Ltd.
- Khdhiri, H., Potier, O., & Leclerc, J. P.** (2014). Aeration efficiency over stepped cascades: Better predictions from flow regimes. *Water research*, 55, 194-202.

- Kherbache, K., Chesneau, X., Zeghmatti, B., Abide, S., & Benmamar, S.** (2017). The effects of step inclination and air injection on the water flow in a stepped spillway: A numerical study. *Journal of Hydrodynamics*, 29(2), 322-331.
- Kramer, M., Chanson, H., & Felder, S.** (2019). Can we improve the non-intrusive characterization of high-velocity air–water flows? Application of LIDAR technology to stepped spillways. *Journal of Hydraulic Research*.
- Küçükali, S.** (2006). *Hidrolik Sıçramanın Havalandırma Verimliliğinin İncelenmesi* (Doktora Tezi, PhD Thesis, İstanbul Teknik Üniversitesi İstanbul).
- Kobus, H.** (1984). Scale effects in modelling hydraulic structures, *Proceedings of international symposium on scale effects in modelling hydraulic structures*. IAHR, Esslingen, Germany.
- Kobus, H.** (1991). Introduction to air-water flows.
- Magoules, F. (Ed.).** (2011). *Computational fluid dynamics*. CRC Press.
- Maple River Dam Overflow Chute.** Erişim: 27 Mayıs 2021, <https://www.usgs.gov/media/images/maple-river-dam-overflow-chute>.
- Markofsky, M., & Kobus, H.** (1978). Unified presentation of weir-aeration data.
- McGhee, T. J.** (1991) 'Water Supply and Sewerage. McGraw-Hill', Inc ISBN 0-07-060938-1.
- Munz, C., & Roberts, P. V.** (1989). Gas-and liquid-phase mass transfer resistances of organic compounds during mechanical surface aeration. *Water Research*, 23(5), 589-601.
- Mustaffa, Z., Madzlan, N., & Rasool, A. G.** (2013). Dealing with Supercritical Flow in Culvert. *APCBEE procedia*, 5, 306-311.
- Ohtsu, I., Yasuda, Y., & Ishikawa, M.** (1999). Submerged hydraulic jumps below abrupt expansions. *Journal of hydraulic engineering*, 125(5), 492-499.
- Özdengiz, A.** (1973). Çok Meyilli Kanallarda Kanal, Tabanı Üzerinde İnşa Edilecek Pürüzlülük Blokları İle Zararlı Olabilecek Kinetik Enerjinin Yutulması Esasları. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 4(2).
- Özbay, Ö.** (2008). *Şüt kanallarına yerleştirilen farklı tip enerji kırıcı blokların incelenmesi* (MSc Thesis, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ).
- Peterka, A. J.** (1964). *Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators* (No. 25). US Department of the Interior, Bureau of Reclamation.
- Peterka, A. J.** (1974). *Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators*. United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation.
- Peterka, A. J.** (1978). Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators (No. 25). *Department of the Interior, Bureau of Reclamation*.
- Peyras, L. A., Royet, P., & Degoutte, G.** (1992). Flow and energy dissipation over stepped gabion weirs. *Journal of hydraulic Engineering*, 118(5), 707-717.
- Raikar, R. V., & Kamatagi, P. B.** (2015). Use of hydraulic phenomena in enhancement of dissolved oxygen concentration. *Int J Res Eng Technol*, 4(2).
- Reid, R. C., Prausnitz, J. M., & Poling, B. E.** (1987). The properties of gases and liquids.

- Rhone, T. J.** (1977). Baffled apron as spillway energy dissipator. *Journal of the Hydraulics Division*, 103(12), 1391-1401.
- Rutherford, J. C.** (1994) *River mixing*. John Wiley & Son Limited.
- Soulaimani, A., & Saad, Y.** (1998). An arbitrary Lagrangian-Eulerian finite element method for solving three-dimensional free surface flows. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 162(1-4), 79-106.
- Tabbara, M., Chatila, J., & Awwad, R.** (2005). Computational simulation of flow over stepped spillways. *Computers & structures*, 83(27), 2215-2224.
- Tebbutt, T. H. Y.** (1972). Some studies on reaeration in cascades. *Water Research*, 6(3), 297-304.
- Thompson, P. L., & Kilgore, R. T.** (2006). *Hydraulic Design of Energy Dissipators for Culverts and Channels: Hydraulic Engineering Circular Number 14* (No. FHWA-NHI-06-086). National Highway Institute (US).
- Tiwari, H. L., Goel, A., Suresh, S., & Tiwari, S.** (2015). Effect of inverted T-shape splitter blocks on the performance of stilling basin models. *Aquatic Procedia*, 4, 1561-1568.
- Torres Mansilla, C.** (2018). *Numerical Modelling of Hydraulic Free Surface Flows and Scale Effects Associated with Physical Modelling* (Doctoral dissertation, University of Leeds).
- Unverdi, S. O., & Tryggvason, G.** (1992). A front-tracking method for viscous, incompressible, multi-fluid flows. *Journal of computational physics*, 100(1), 25-37.
- Urban Drainage and Flood Control District (UDFCD).** (2010). Urban storm drainage-criteria manual, Vol. 3-best management practices, *Water Resources Publications*, Denver.
- USBR, U.** (1963). Bureau of Reclamation," Concrete manual. *A Manual for the Control of Concrete Construction*, 7.
- USBR.** (1977). Design of Small Dams. United States Bureau of Reclamation.
- USBR.** (1987). Design of small dams, United States Department of Interior Bureau of Reclamation.
- Veersteeg, H. K., & Malalasekera, W.** (1995). An introduction to computational fluid dynamics. *The finite volume method*, 96.
- Varol, Ş.** (2007). Düşüm Havuzlarına Yerleştirilen Farklı Tip Enerji Kırıcı Blokların Enerji Sönümleme Oranlarının Sayısal Analizi (MSc Thesis, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ)
- Van Wachem, B. G. M., & Almstedt, A. E.** (2003). Methods for multiphase computational fluid dynamics. *Chemical Engineering Journal*, 96(1-3), 81-98.
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W.** (1995). *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. Pearson education.
- Waclawczyk, T., & Koronowicz, T.** (2008). Comparison of CICSAM and HRIC high-resolution schemes for interface capturing. *Journal of theoretical and applied mechanics*, 46, 325-345.

- Watson, C. C., Walters, R. W. and Hogan, S. A.** (1998) 'Aeration performance of low drop weirs', *Journal of Hydraulic Engineering*. American Society of Civil Engineers, 124(1), pp. 65–71.
- White, E., M.** (1979) 'Fluid Mechanics', *McGraw-Hill, Inc.*, New York, N.Y., pp.63-65.
- Wood, I. R.** (1991). Free surface air entrainment on spillways. *IAHR hydraulic structures design manual*, 4, 55-84.
- Wu, J. H., Zhang, B., & Ma, F.** (2013). Inception point of air entrainment over stepped spillways. *Journal of Hydrodynamics*, 25(1), 91-96.
- Yakhot, V., & Orszag, S. A.** (1986). Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory. *Journal of scientific computing*, 1(1), 3-51.
- Yakhot, V. S. A. S. T. B. C. G., Orszag, S. A., Thangam, S., Gatski, T. B., & Speziale, C. G.** (1992). Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 4(7), 1510-1520.
- Yalçın, O.** (1967). Barajlarda Enerji Kırıcı Tesis-lerin Projelendirilmesi. *TC Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Barajlar ve Hidroelektrik Santraller Dairesi Başkanlığı, Ankara, 23s.*
- Yeoh, G. H. and Tu, J.** (2010). *Computational Techniques for Multiphase Flows*. Oxford [UK]: Elsevier Ltd.
- Zare, H. K., & Baddour, R. E.** (2007). Three-dimensional study of spatial submerged hydraulic jump. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 34(9), 1140-1148.
- Zare, H. K., & Doering, J. C.** (2011). Forced hydraulic jumps below abrupt expansions. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(8), 825-835.
- Zhan, J., Zhang, J., & Gong, Y.** (2016). Numerical investigation of air-entrainment in skimming flow over stepped spillways. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 6(3), 139-142.
- Zhang, G.** (2017) *Free-Surface Aeration, Turbulence, and Energy Dissipation on Stepped Chutes with Triangular Steps, Chamfered Steps, and partially Blocked Step Cavities*, PhD Thesis, School of Civil Engineering, The University of Queensland. <https://doi.org/10.14264/uql.2017.906>.
- Zhang, G., & Chanson, H.** (2018). Air-water flow properties in stepped chutes with modified step and cavity geometries. *International Journal of Multiphase Flow*, 99, 423-436.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Mahmut AYDOĞDU

ÖĞRENİM DURUMU :

Lisans : 2009, Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği

Yüksek Lisans : 2014, İnönü Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Hidrolik Bilim Dalı

Doktora : 2021, İnönü Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Hidrolik Bilim Dalı

MESLEKİ DENEYİM:

- 2010-2011 Tunceli Üniversitesi, Araştırma Görevlisi
- 2012-2013 TCDD 5. Bölge Müdürlüğü, İnşaat Mühendisi
- 2013-devam ediyor Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Öğretim Görevlisi

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN ÇALIŞMALAR (Makaller, Bildiriler, Patentler v.b.)

Aydoğdu, M., Dursun, Ö.F. (2020) Şüt Kanalları Üzerine Yerleştirilen Blokların Enerji Sönümlenme Etkilerinin Araştırılması, *Su Kaynakları Dergisi* 5 (2), 34-39.