



**ÇOKLU SU ALMA AĞIZLARINA AİT KRİTİK BATIKLIĞIN
HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ MODELİ KULLANILARAK
BULUNMASI**

Fatih ÜNSAL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ŞUBAT 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Fatih ÜNSAL

10 / 02 / 2023

ÇOKLU SU ALMA AĞIZLARINA AİT KRİTİK BATIKLIĞIN HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ MODELİ KULLANILARAK BULUNMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Fatih ÜNSAL

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Şubat 2023

ÖZET

Akım ortamlarından veya durgun sulardan su temini için çeşitli büyüklük ve şekillerde su alma ağızları kullanılmaktadır. Tek bir su alma ağzının debisinin yeterli olmaması durumunda, ikili veya üçlü su alma ağızları kullanılabilir. Yatay veya düşey olarak düzenlenebilen bu yapılardan su alınırken hava girişi olmamasına dikkat edilmesi gerekir. Ağız veya ağızlara hava girişinin deneysel olarak incelenmesi, bazı projeler için maliyet ve zaman açısından uygun olmayabilmektedir. Bu çalışmada, açık bir kanal akımı içerisinde bulunan ve düşey aşağı su alan ikili ve üçlü dairesel su alma ağız grubuna ait kritik batıklık, bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı ile bulunmuştur. Model sonuçları literatürdeki deneysel neticelerle karşılaştırılmıştır. Modellerde, türbülans modeli olarak büyük girdapları çözen, küçük girdapları da modelleyen LES (Large Eddy Simulation) modeli seçilmiştir. Sayısal analizler sonucunda, kritik durumda hava çekirdekli çevrintinin ağza ulaştığının simülasyonlarda tam olarak gözlemlenmesi için oldukça küçük çözüm ağı aralığı seçilmesi gerektiği görülmüştür. Bu yüzden kritik batıklığın tahmini için akım alanı içerisindeki vortisite dağılımından da yararlanılmıştır. Gerek ikili gerekse üçlü ağız durumunda, ağız merkezlerini birleştiren doğru ile ağızlara yaklaşan akım doğrultusundaki açının büyümesi halinde hata oranının düştüğü, bu açı sıfıra doğru yaklaştıkça ise hata oranının arttığı görülmüştür. Bunun sebebinin membada bulunan su alma ağız akımlarından kaynaklanan ve mansaba doğru taşınması beklenen çevrintili akımın simülasyonlarda tam olarak benzeşiminin yapılamadığı sonucuna varılmıştır. Sonuç olarak kullanılmış olan hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımının, kanal akımı içerisine yerleştirilmiş ve düşey aşağı su alan çoklu su alma ağızlarına ait kritik batıklığı bulma konusunda, belirli akım ve geometri şartlarında kabul edilebilir doğrulukta sonuçlar verebildiği belirlenmiştir.

Bilim Kodu : 91101

Anahtar Kelimeler : Çevrinti, hesaplamalı akışkanlar dinamiği, kritik batıklık, su alma ağızı

Sayfa Adedi : 83

Danışman : Doç. Dr. Kerem TAŞTAN

PREDICTION OF CRITICAL SUBMERGENCE FOR MULTIPLE PIPE INTAKES BY
A COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS MODEL

(M. Sc. Thesis)

Fatih ÜNSAL

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

February 2023

ABSTRACT

Various sizes and shapes of intakes are used for taking water from flow environments or stagnant waters. If the discharge of a single intake is not sufficient, dual or triple intakes can be used. While taking water from these structures, which can be arranged horizontally or vertically, care should be paid to avoid air-entrainment to intakes. Experimental examination of the air entrainment to intakes may not be suitable in terms of cost and time for some projects. In this study, the critical submergence was investigated for the dual and triple vertically downward flowing intakes located in an open channel flow with a computational fluid dynamics software. The model results were compared with the available experimental results. In the simulations, the LES (large eddy simulation) turbulence model, which solves large eddies and models small eddies, was chosen. Numerical analysis showed that very small mesh sizes should be adopted in the simulations in order to fully observe the air-core vortex in the critical condition. Therefore, the vorticity distribution within the flow field was also used for the estimation of critical submergence of both dual and triple intakes. It was observed that when the angle between the direction of the approaching flow and the line connecting the intake centers increased, the error decreases, and as this angle approached zero, the error increased. The reason for this was thought to be the separation vortices originated from the flow of the upstream intake and expected to be carried towards the downstream could not be fully simulated in the simulations. It was deduced that the computational fluid dynamics software used can give acceptable results for the prediction of critical submergence for multiple intakes located in the channel flow under certain flow and geometrical conditions.

Science Code : 91101

Key Words : Vortex, computational fluid dynamics, critical submergence, intake

Page Number : 83

Supervisor : Doç. Dr. Kerem TAŞTAN

TEŞEKKÜR

Öncelikle bu çalışmayı hazırlarken bana her daim destek olan aileme ve danışmanım Doç. Dr. Kerem TAŞTAN'a teşekkürlerimi sunarım. Ek olarak sorularımı hiçbir zaman cevapsız bırakmayan İnşaat Yüksek Mühendisi Gültaze YILDIRIM'a, Flow – 3D konusunda bana destek olan Arş. Gör. Efe BARBAROS'a şükran ve minnetlerimi belirtmek isterim. Bununla birlikte çalışmamı inceleyen ve değerli bilgileriyle katkı sağlayan jüri üyeleri Doç. Dr. Müsteyde BADUNA KOÇYİĞİT ve Doç. Dr. Melih ÇALAMAK'a teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	3
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	15
3.1. Çoklu Su Alma Ağzlarına ait Kritik Batıklığı Etkileyen Parametreler.....	15
3.2. Çoklu Su Alma Ağzlarına Ait Kritik Batıklığın Deneysel Olarak İncelenmesi	17
3.3. Deneylerdeki Gözlemler	20
4. ÇOKLU SU ALMA AĞIZLARININ KULLANILMASI DURUMUNDA AĞIZ AKIMLARININ KRİTİK BATIKLIK ÜZERİNE ETKİSİNİN AÇIKLANMASI	23
4.1. Rankine Ovali ve Çevrinti Oluşumu.....	23
4.2. Bir Ağza Ait Kritik Batıklığın Üzerinde Akım Engel Etkileri	24
5. SAYISAL ÇÖZÜMLEME YÖNTEMİ: FLOW-3D	31
5.1. VOF (Volume of Fluid - Akışkan Hacim) Metodu	32
5.2. Programının Çözdüğü Eşitlikler.....	33
5.3. Türbülans Modeli Tipleri.....	35

	Sayfa
5.4. Program Arayüzü	37
6. SAYISAL ÇALIŞMA: DÜŞEY BORU TİPİ ÇOKLU SU ALMA AĞIZLARININ MODELLENMESİ	41
6.1. Sayısal Modelin Kurulumu.....	42
6.2. Kritik Batıklığın Sayısal Modeller İçin Belirlenmesi	54
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	75
KAYNAKLAR	79
ÖZGEÇMİŞ.....	83

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 6.1. Modellenen deney setleri	41
Çizelge 6.2. $\alpha_{12} = 90^\circ$, $a_{12}/D = 2$, $c/D = 4$, $Q_1 = 4$ lt/s, $Q_2 = 8$ lt/s, $Q_\infty = 15,86$ lt/s, h = 34 cm değerleri için ağ aralığı ile hava çekirdekli çevrinti uzunluğu arasındaki ilişki	48
Çizelge 6.3. Mevcut çalışmalarda kullanılan ağ aralıkları.....	48
Çizelge 6.4. Türbülans modelinin etkisi ($\alpha_{12} = 90^\circ$, $a_{12}/D = 2$, $Q_1 = 1$ lt/s, $Q_2 = 8$ lt/s, $Q_\infty = 19,1$ lt/s, h = 28 cm)	51
Çizelge 6.5. Mevcut çalışmalarda kullanılan simülasyon zamanı.....	53
Çizelge 6.6. Simülasyon sonuçları ile deney sonuçlarının karşılaştırılması.....	60

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Su alma ağzına ait batıklık, kritik batıklık ve hava girişi	1
Şekil 2.1. a) Üniform kanal akımı ve noktasal kuyu özellikli su alma ağzı, b) Rankine şekli, c) Kritik küresel kuyu yüzeyi (KKKY)	4
Şekil 2.2. Rezervuar ve düşey yukarı doğru su alma ağzlarının genel görünümü	8
Şekil 2.3. Rezervuar serisi ve son rezervuardaki 1 adet batık düşey konumlu su alma ağzı	9
Şekil 2.4. Flow-3D programında oluşturulan 2 düzenek	10
Şekil 2.5. Asimetrik konumlu yatay bir ağza ait kritik batıklık görünümü.....	13
Şekil 3.1. Kanal içerisindeki su alma ağzları ve konumlandırılmaları	15
Şekil 3.2. Deneylerdeki su alma ağzlarının kanal içindeki yerleşimi	19
Şekil 4.1. Ağzlara ait Rankine ovaleri ve ortak kesişim bölgesi	25
Şekil 4.2. Su alma ağzlarına ait küresel kuyu yüzeyleri	25
Şekil 4.3. a) Ağız I ve ağız II'ye ait KKY I ve KKY II, b) Ağız I'ye ait KKY I ve ağız II'ye ait KKKY II, c) Hava çekirdekli çevrintinin ağız II'ye girmesi durumu d) Hava çekirdekli çevrintinin iki ağza da girmesi durumu	26
Şekil 4.4. Küresel geçiş yüzeylerinin hayali geçirimsiz sınır ile değiştirilmesi	27
Şekil 4.5. $\alpha_{12} = 90^\circ$ iken oluşan su altı çevrintilerinin Flow-3D görüntüsü.....	29
Şekil 5.1. Hücrelerin doluluk oranı.....	32
Şekil 6.1. Modelin plan görünümü	43
Şekil 6.2. Modelin yan görünümü.....	44
Şekil 6.3. Çevrinti tipleri.....	45
Şekil 6.4. Hava çekirdekli çevrinti profili için tanımlanan geometrik büyüklükler a) Hava girişi yok, b) Kritik durum, c) Sürekli hava girişi	46
Şekil 6.5. Eşitlikler 6.1 ve 6.2'ye göre hava çekirdekli çevrinti profilleri.....	47
Şekil 6.6. Farklı ağ aralıklarında hava çekirdekli çevrintinin görünümü	48

Şekil	Sayfa
Şekil 6.7. Modele ait ağ blokları	49
Şekil 6.8. Model ağ bloklarının sınır koşulları	50
Şekil 6.9. Farklı türbülans modellerinde hava çekirdekli çevrintinin görünümü: a) LES, b) RNG, c) k-w, d) Laminer	52
Şekil 6.10. Kanal içerisindeki su seviyesinin zamanla değişimi	53
Şekil 6.11. Su alma ağzında hava çekirdekli çevrinti oluşumu	56
Şekil 6.12. Akım alanında z yönündeki eş vortisite eğrileri: a) Herhangi bir hava çekirdekli çevrinti oluşumu yok, b) Çevrinti oluşumu başlamış fakat vortisite şiddeti ağza kadar ulaşmıyor, c) Hava çekirdekli yarım bir çevrinti var ve vortisite konturu ağza kadar ulaşıyor	57
Şekil 6.13. Kritik batıklığın sayısal olarak bulunması sırasında izlenen yöntem	59
Şekil 6.14. Deney ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması.....	61
Şekil 6.15. Ağız I ve ağız II'ye ait Rankine ovallerinin birbirine göre çeşitli durumları.....	62
Şekil 6.16. Ağız I, ağız II ve ağızlara ait Rankine ovaleri kaynaklı ayrılma çevrintileri	63
Şekil 6.17. $\alpha_{12} = 0^\circ$ ve $Q_1/Q_2 \ll 1$ olduğu durumdaki vortisite dağılımı (a) Yan görünüm, (b) Plan görünümü.....	66
Şekil 6.18. $\alpha_{12} = 0^\circ$ ve $Q_1/Q_2 \sim 1$ olduğu durumdaki vortisite dağılımı (a) Yan görünüm, (b) Plan görünümü.....	68
Şekil 6.19. $\alpha_{12} = 0^\circ$ ve $Q_1 \gg Q_2$ olduğu durumdaki vortisite dağılımı (a) Yan görünüm, (b) Plan görünümü.....	70
Şekil 6.20. $\alpha_{12} = 0^\circ$ ve $a_{12}/D = 10$ olduğu durumdaki vortisite dağılımı (a) Yan görünüm, (b) Plan görünümü.....	71
Şekil 6.21. $Q_1/Q_2 = 0,5$, $\alpha_{12} = 90^\circ$ ve $a_{12}/D = 2$ olduğu durumdaki vortisite dağılımı (a) Yan görünüm, (b) Plan görünümü.....	72
Şekil 6.22. $Q_1/Q_2 = 2$, $\alpha_{12} = 45^\circ$ ve $a_{12}/D = 2$ olduğu durumdaki vortisite dağılımı (a) Yan görünüm, (b) Plan görünümü.....	73

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Laboratuvar ortamında deney düzeneğinin görünümü.....	20
Resim 4.1. Deney ortamında $\alpha_{12} = 90^\circ$ iken oluşan su altı çevrintisi.....	28

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A	Su alma ağız kesit alanı
a_{12}	Ağız I ve ağız II merkezleri arasındaki yatay mesafe
a_{23}	Ağız II ve ağız III merkezleri arasındaki yatay mesafe
b_1	Ağız I merkezinin sağ duvara olan yatay mesafesi
b_2	Ağız I merkezinin sol duvara olan yatay mesafesi
b_3	Ağız II merkezinin sağ duvara olan yatay mesafesi
b_4	Ağız II merkezinin sol duvara olan yatay mesafesi
c	Ağız merkezi ile taban arasındaki mesafe
c_1	Ağız I merkezinin kanal tabanından yüksekliği
c_2	Ağız II merkezinin kanal tabanından yüksekliği
cm	Santimetre
dk	Dakika
D	Ağız iç çapı
e_1	Ağız I cidar kalınlığı
e_2	Ağız II cidar kalınlığı
Fr	Froude sayısı
F_x	x yönündeki kütle bileşeni
F_y	y yönündeki kütle bileşeni
F_z	z yönündeki kütle bileşeni
g	Yer çekimi ivmesi
h	Rezervuar içindeki su yüksekliği
h_v	Hava çekirdekli çevrintinin düşey uzunluğu
H_r	r'deki su yüzeyi yüksekliği
H_0	Hava çekirdekli çevrinti yüksekliği

Simgeler	Açıklamalar
$k-\epsilon$	Bir türbülans modeli
$k-w$	Bir türbülans modeli
k	Türbülans kinetik enerjisi
K	Çevrinti sayısı
kW	Kilowatt
lt	Litre
L	Karakteristik uzunluk
l_1	Ağız I merkezi ve ölü son duvarı arası yatay mesafe
l_2	Ağız II merkezi ve ölü son duvarı arası yatay mesafe
m	Metre
m^3	Metreküp
p	Basınç değeri
p'	Basıncın dalgalanma değeri
$\bar{p}$	Zaman ortalımalı basınç değeri
Q	Su alma ağzına ait debi
Q_1	Ağız I debisi
Q_2	Ağız II debisi
Q_3	Ağız II debisi
Q_∞	Ağızlara yaklaşan akımın debisi
R	Boyutsuz yatay radyal mesafe
r	Yatay radyal mesafe
Re	Reynolds sayısı
r_m	Hava çekirdekli çevrintinin viskoz çekirdek yarıçapı
S	Batıklık
S_c	Kritik batıklık
s	Saniye
sa	Saat
t	Zaman

Simgeler**Açıklamalar**

U_{∞}	Ağızlara yaklaşan üniform akım
u	x yönündeki hız bileşeni
u'	x yönündeki hızın dalgalanma değeri
$\bar{u}$	x yönündeki zaman ortalamalı hız
v	y yönündeki hız bileşeni
v'	y yönündeki hızın dalgalanma değeri
$\bar{v}$	y yönündeki zaman ortalamalı hız
V	Su alma ağzına ait ortalama hız
V_1	Ağız I içerisindeki ortalama hız
V_2	Ağız II içerisindeki ortalama hız
V_{s1}	KKY I üzerindeki radyal hız
V_{s2}	KKY II üzerindeki radyal hız
V_{sc}	KKKY üzerindeki radyal hız
V_{sc1}	KKKY I üzerindeki radyal hız
V_{sc2}	KKKY II üzerindeki radyal hız
v_t	Karakteristik hız
W	Weber sayısı
w	z yönündeki hız bileşeni
w'	z yönündeki hızın dalgalanma değeri
$\bar{w}$	z yönündeki zaman ortalamalı hız
z	Hava çekirdekli çevrinti üzerindeki düşey mesafe
α_{12}	Akım ile merkezleri birleştiren doğru arasındaki açı
β	DeneySEL bir katsayı
ε	Türbülans sönümleme hızı
Δc	Ağız merkezleri arasındaki düşey mesafe
Δh	İki su seviyesi arası fark
ρ	Kanaldaki akışkanın yoğunluğu
σ	Yüzey gerilmesi

Simgeler**Açıklamalar** μ

Dinamik viskozite

 ν

Kinematik viskozite

 Γ

Sirkülasyon (çevri)

Kısaltmalar**Açıklamalar****JSME**

The Japan Society of Mechanical Engineers

KKY I

Ağız I etrafındaki küresel kuyu yüzeyi

KKY II

Ağız II etrafındaki küresel kuyu yüzeyi

KKKY I

Ağız I etrafındaki kritik küresel kuyu yüzeyi

KKKY II

Ağız II etrafındaki kritik küresel kuyu yüzeyi

LES

Large Eddy Simulation (Büyük girdap simülasyonu)

RNG

Renormalization Group

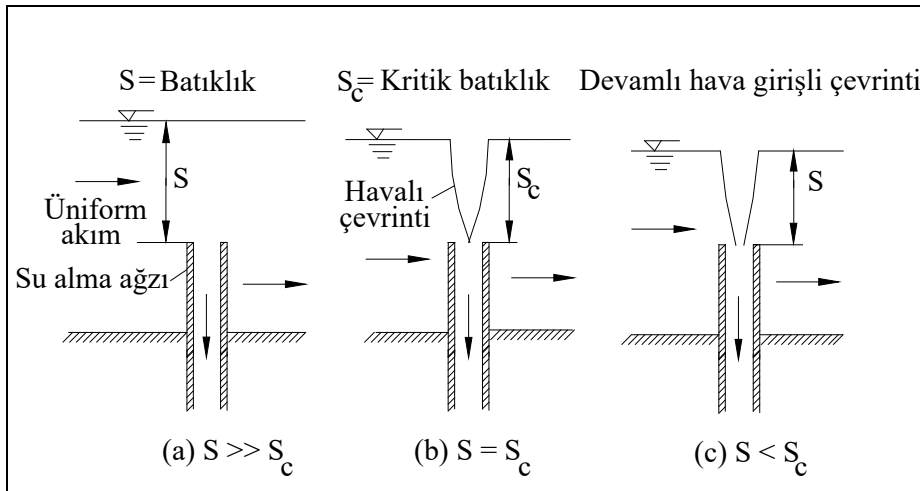
VOF

Volume of fluid (Akışkan hacmi)

1. GİRİŞ

Su alma ağızları, durgun sulardan veya akım ortamlarından su temini için kullanılan yapılardır. Su alma yapıları tasarlanırken temin edilmek istenen su debisinin sağlanmasının yanında, yapıya sediment veya hava girişi olup olmayacağı da dikkate alınmalıdır. Su alma yapılarından alınan sudaki belli bir çap ve miktarın üzerindeki sediment, türbinlerde ve diğer yapılarda aşınma gibi sorunlara neden olur ve çökeltim havuzlarının verimini azaltır. Bununla birlikte su alma ağızı üzerinde oluşan serbest çevrıntiler sonucu hava girişi de önemli bir sorundur. Eğer ağıza hava girişi olursa istenilen debinin altında su temin edilir. Buna ek olarak pompa ve türbinlerin verimliliğinin düşmesine, gürültü, titreşim ve kavitasyona neden olur (Rudolf ve Klas, 2015). Oluşan bu hava girişli çevrıntiler sistemin çalışmasının askıya alınmasına bile sebep olabilir.

Su alma ağızına hava girişini önlemek için su yüzeyi ile ağız arasında belli bir düşey mesafe farkı olması gerekir. Ağız merkezinden su yüzeyine kadar olan düşey mesafe, o su alma ağızına ait “batıklık (S)” değerini gösterir. Su alma ağızı üzerinde tam bir çevrinti oluşumu sonrası hava girişinin başladığı su derinliği ise “kritik batıklık (S_c)” olarak tanımlanmaktadır. Şekil 1.1.’de düşey bir su alma ağızına ait batıklık ve akım durumları görülmektedir.



Şekil 1.1. Su alma ağızına ait batıklık, kritik batıklık ve hava girişi (Arslan, 2006)

Durgun sulardan veya akım ortamlarından alınmak istenilen su için tekli su alma ağızları yetmeyebilir. Bu durumda çoklu (ikili veya üçlü gibi) su alma ağızları kullanılabilir. Bu

ağızlar tasarlanırken ağza su yüzeyinde oluşabilecek hava çekirdekli çevrinti yoluyla hava girişinin tahkiki için genelde model deneyleri yapmak gerekmektedir. Fakat bazı projeler için zaman ve maliyet kısıtlamalarından ötürü model deneyleri yapılamayabilir. Böyle durumlarda hesaplamalı akışkanlar dinamiği ilkelerinden yararlanılarak bilgisayar üzerinden sayısal modellemeler de oluşturulabilir. Bu çalışmada da, kanal akımı ortamında bulunan ikili ve üçlü düşey su alma ağızları için kritik batıklık nümerik olarak araştırılmıştır.

Bu çalışmada bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) programı olan Flow-3D aracılığı ile kanal akımı içerisinde tabandan belli bir seviye yüksekte olacak şekilde konumlanmış, çoklu (ikili veya üçlü) su alma ağızlarına ait kritik batıklık araştırılmıştır. Boru tipi ağızlara ait sayısal sonuçlar ile deneysel sonuçları karşılaştırmak amaçlı Taştan (2007)'nin yaptığı deneysel çalışma sonuçları dikkate alınmıştır. Böylece incelenen yazılım ile kurulan modellerin, kanal akımı ortamında bulunan çoklu su alma ağızlarına ait kritik batıklığı ne ölçüde ve hangi koşullar altında tahmin edebildiği ortaya konmuştur.

Tez çalışmasının, 1. bölümünde genel bir giriş yapılmış, 2. bölümde konuyla ilgili literatürde bulunan çalışmalara yer verilmiştir. Oluşturulan sayısal modellere esas teşkil eden deneysel çalışma 3. bölümde, su alma ağızı akımlarının kritik batıklık üzerindeki etkileri 4. bölümde anlatılmıştır. 5. bölümde kullanılmış HAD yazılımı hakkında bilgi verilmiş ve bu yazılımdan elde edilen sonuçlar 6. bölümde tartışılmıştır. Çalışmanın genel sonuçları ise 7. bölümde sunulmuştur.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde su alma ağzlarıyla ilgili yapılan, bir ve birden fazla, yatay veya düşey konumlanmış su alma ağzlarına ait kritik batıklık değerinin bulunması ve çevrinti oluşumu konuları üzerindeki geçmiş çalışmalar incelenmiştir. Çalışmaların bir kısmı tamamen deneysel olup bir kısmında sayısal ve analitik modellerden yararlanılmıştır.

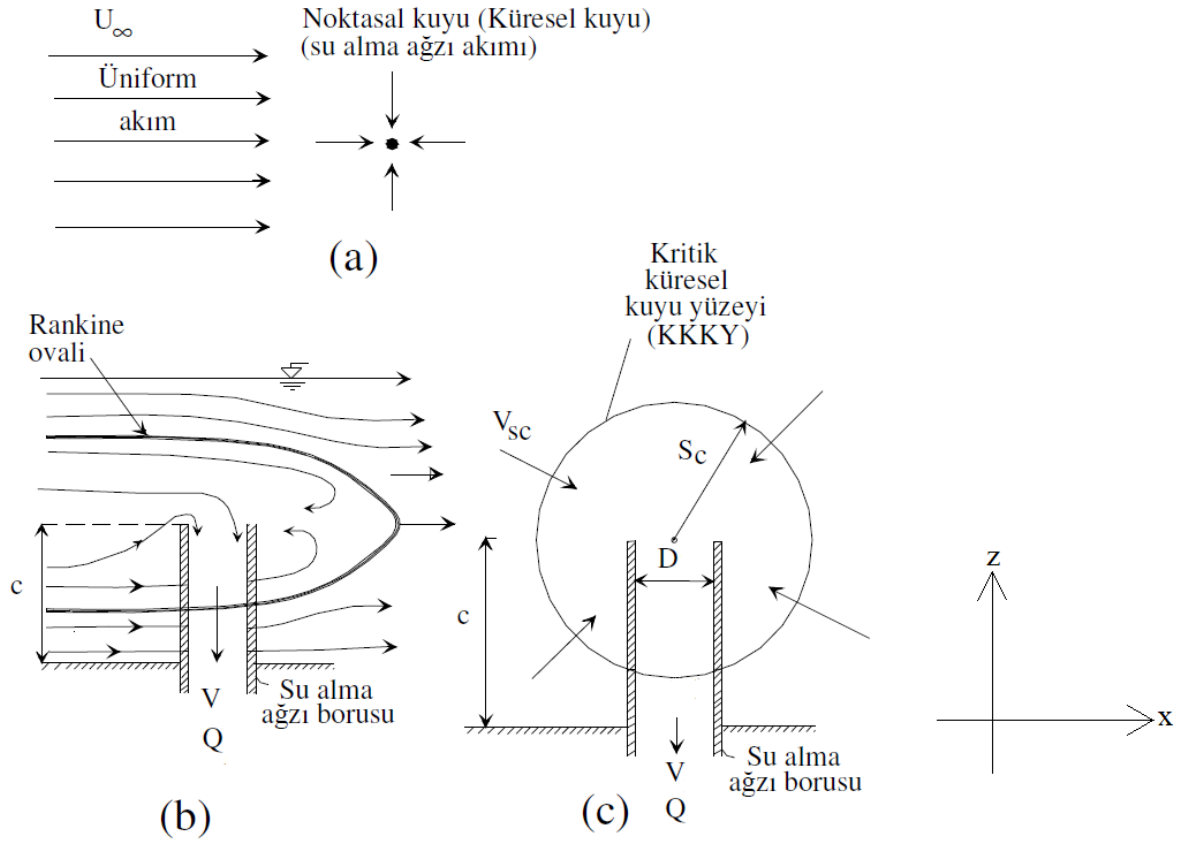
Tek bir su alma yapısına ait kritik batıklığın incelendiği deneysel ve teorik çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Odgaard (1986) bir su alma ağzına ait kritik batıklığı, analitik olarak Rankine çevrinti modeli yardımıyla tespit etmiştir. Yaklaşımına göre ağız üzerindeki su yüzeyinde, belli bir radyal mesafeye kadar zorlamalı çevrinti, o radyal mesafeden sonra serbest çevrinti oluştuğunu ifade etmiştir. Hava çekirdekli çevrintinin çekirdek bölümünün laminar ve türbülanslı olmasına göre kritik batıklığın, ilgili ağzın sahip olduğu çevrinti, Weber, Reynolds ve Froude sayılarıyla değiştiği bir ifade ortaya koymuştur. Ağza ait kritik batıklık üzerinde çevrinti ve Froude sayılarının diğer değişkenlerden daha önemli olduğunu belirtmiştir. Bununla birlikte, Reynolds sayısı $1,1 \times 10^5$ 'den, Weber sayısı da 720'den büyükse kritik batıklık hesabında etkilerinin göz ardı edilebileceğini eklemiştir.

Hite ve Mih (1994) dikdörtgen geometriye sahip bir kanalın yan duvar bölümünden su alan bir su alma ağzına ait hava çekirdekli çevrinti oluşumunu, laboratuvar ortamında ve teorik olarak araştırmışlardır. Hava çekirdekli çevrintinin şekil özelliklerini ve eksenel, radyal ve teğetsel hız dağılımını deneysel ve teorik olarak bulup sonuçları karşılaştırmışlardır.

Yıldırım ve Kocabaş (1995) dikdörtgen kesitli bir açık kanal akımı içerisinde konumlanmış düşey aşağı yönlü su alan bir su alma ağzına ait kritik batıklık değerini laboratuvar ortamında ve teorik olarak araştırmışlardır. Teorik incelemede üniform akım ve noktasal kuyu kabulü yaptıkları potansiyel akım çözümünü kullanmışlar ve akım alanında bir Rankine şekli oluştuğunu göstermişlerdir. Ağza hava girişinin olabilmesi için Rankine şeklinin üst yüzeyinin ağız üzerinde su yüzeyi ile çakışması gerektiği varsayımıyla düşey su alma ağzı etrafında bir Küresel Kuyu Yüzeyi (KKY) oluştuğunu ifade etmişlerdir. Bu KKY ile su alma ağzı merkez ve debisinin aynı olduğunu belirtmişlerdir. Buna ek olarak

kritik batıklık durumunda Şekil 2.1.'de gösterilen Kritik Küresel Kuyu Yüzeyi (KKKY) oluştuğunu ve kritik batıklık (S_c) değerinin bu KKKY'nin yarıçapına eşit olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca KKKY üzerinde, üniform kanal akım hızının yarısına eşit radyal hızın (V_{sc}) olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 2.1. a) Üniform kanal akımı ve noktasal kuyu özellikli su alma ağızı, b) Rankine şekli, c) Kritik küresel kuyu yüzeyi (KKKY) (Taştan, 2007)

Şekil 2.1.'de geçen parametreler şu şekilde tanımlanmaktadır:

U_∞ = Ağızlara yaklaşan kanal akımının üniform hızı,

Q = Su alma ağızına ait debi

V = Su alma ağızına ait ortalama hız

V_{sc} = KKKY üzerindeki radyal hız

D = Su alma ağızının iç çapı

c = Su alma ağız merkezi ile taban arasındaki mesafe

S_c = Su alma ağızına ait ilgili kanal ve akım koşullarındaki kritik batıklık

Bunlarla birlikte, yaptıkları deneysel sonuçlarla uyumlu olan ve potansiyel akım çözümü

sonucunda elde edilen Eşitlik 2.1’de verilen bir S_c formülü de türetmişlerdir.

$$\frac{S_c}{D} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \left(\frac{V}{U_\infty} \right) \quad (2.1)$$

Yıldırım ve Kocabaş (1998) KKKY tanımının durgun bir su ortamından su alan su alma ağızı için de geçerli olduğunu ifade etmiştir.

Yıldırım, Kocabaş ve Gülcan (2000) akıma ait sınırların ve su alma ağzının kendisinin kritik batıklık üzerindeki engel durumlarını incelemişlerdir. Buldukları engel etkisi durumunu, bir KKKY’ye ait küresel yüzey alanındaki kayıplar olarak ifade etmişlerdir.

Yıldırım ve Kocabaş (2002) daha önceki çalışmalarında belirttikleri sonuçlara ek olarak eğer ağız ölü son duvarına yakın bir konumdaysa, kritik batıklığı belirlemede, ağza ait Rankine şeklinin duraklama noktası ile ağız arasındaki mesafeyi yarıçap kabul eden KKKY’nin kullanılmasının daha doğru sonuçlar verdiğini ifade etmiştir.

Yıldırım ve Taştan (2009) akım sınırlarının, üniform akımlı bir kanal içerisindeki dairesel ve dikdörtgen kesitli su alma ağzlarına ait kritik batıklık üzerindeki etkilerini incelemek amaçlı yaptıkları deneysel çalışmada, ağzın kanal sınırlarına göre bulunduğu yerin, ağza ait kritik batıklığa büyük ölçüde etki ettiğini belirtmişlerdir. Yan duvarlar gibi serbest su yüzeyini kesen sınırların, taban gibi serbest su yüzeyini kesmeyen sınırlara göre kritik batıklığı daha fazla etkilediğini ifade etmişlerdir. Bununla birlikte su alma ağzına ait kritik batıklık değerinin, su alma ağzının su yüzeyinin kesen akım sınırlarına yaklaştıkça viskozite nedeniyle ciddi şekilde azaldığını belirtmişlerdir. Ek olarak kritik batıklık değerinin, ağız tabana yaklaşırken arttığını, ölü son duvara yaklaşırken azaldığını, yine ağız ölü son duvara yaklaştıkça ağzın Froude sayısının kritik batıklık değeri üzerindeki etkisinin arttığını belirtmişlerdir.

Yıldırım, Eroğlu ve Taştan (2012) hava girişli çevrintinin oluşumunu açıklamaya çalışmışlardır. Buna göre, su alma ağzına giren çevrintilerin kaynağı ağız akımına engel teşkil eden akım sınırlarıdır ve çevrintiler bu sınırlardan başlar. Bu sınırlara serbest su yüzeyi, katı sınırlar, katmanlı akışkan sınırları, akım ayırım sınırları örnek verilebilir. Bununla birlikte su alma ağzına giren çevrintilerin hepsi su altı çevrintileridir ve hepsinin

oluşum mekanizmaları temelde aynıdır. Bununla birlikte çevrinti oluşumunu engellemek için süzgeç-koni ve süzgeç-boru tipli yapılar kullanmışlar, bu yapıların çevrinti oluşumunu önlemede etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Azarpira, Sarkardeh, Tavakkol, Roshan ve Bakhshi (2014) Karun III barajı hidrolik modellemesi üzerinde, yatay bir su alma ağızı dolayısıyla oluşacak çevrintilerin yüzey hız dağılımı üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Ağza ait batıklığın artırılmasının düzlemsel hızların azaltılmasında önemli bir etkiye sahip olduğunu ifade etmişlerdir. 1,6 m olarak tespit ettikleri kritik batıklık değerini 3,2 m'ye çıkardıklarında yüzeye yakın maksimum hızın %30, ağız eksenini üzerindeki hızın %40 azaldığını belirtmişlerdir. Bununla birlikte yaptıkları deneysel çalışmanın daha sonra yapılacak bir nümerik çalışmaya referans olabileceğini ifade etmişlerdir.

Çoklu su alma ağızlarına ait kritik batıklık ile ilgili mevcut sınırlı sayıdaki çalışmalardan aşağıda bahsedilmiştir.

Yıldırım ve Taştan (2009) süperpozisyon yöntemi kullanarak çoklu su alma ağızlarına ait kritik batıklığı bulmuşlardır. Süperpozisyon yönteminde her bir ağza ait küresel kuyu yüzeyleri toplanarak ağızların birbirleri üzerindeki akım engel etkileri göz önüne alınmıştır.

Yıldırım, Taştan ve Arslan (2009) kanal akımı içerisine yerleştirilmiş düşey aşağı su alan ikili dairesel su alma ağızlarının kritik batıklığını, potansiyel akım çözümü kullanarak bulmuştur.

Yıldırım ve Taştan (2017) ikili ağız durumunda ağız akımlarının birbirleri üzerinde akım engel etkilerinin ihmal edilebileceği mesafeyi araştırmışlardır.

Yıldırım, Akay ve Taştan (2011) potansiyel akım yaklaşımı kullanarak çoklu su alma ağızlarına ait kritik batıklığı teorik olarak belirlemişlerdir.

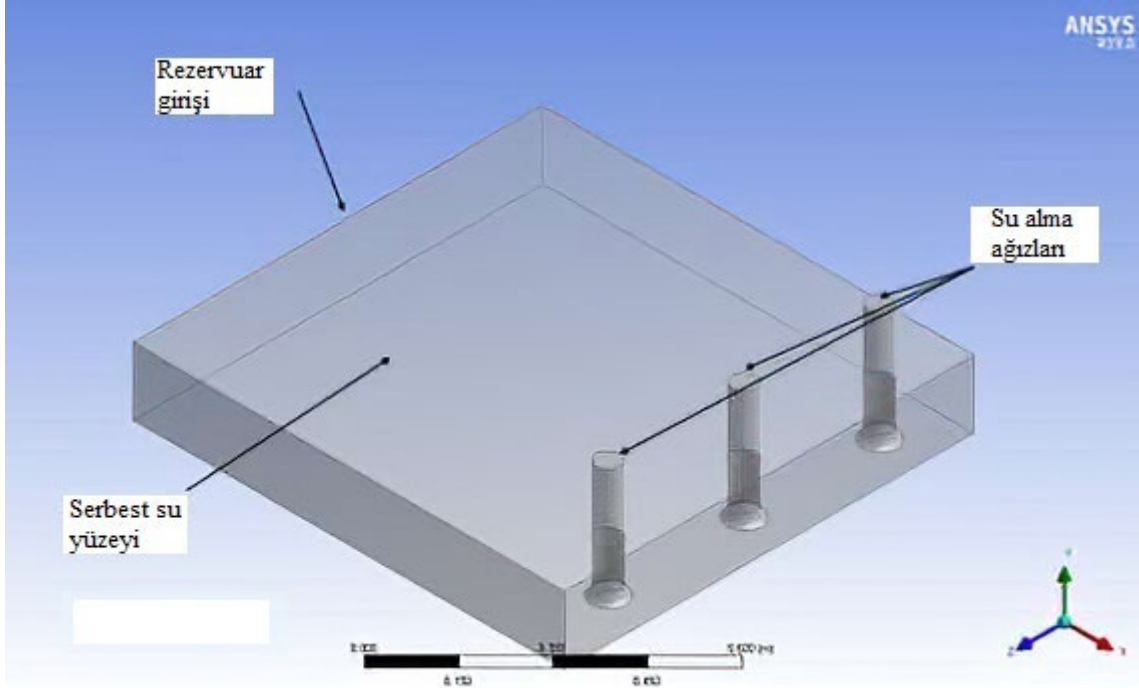
Yıldırım, Eyüpoğlu ve Taştan (2012) süperpozisyon yöntemi kullanarak konumları değişken, dikdörtgen kesitli, ikili su alma ağızlarına ait kritik batıklığı tespit etmişlerdir.

İlgili ağızlara ait küresel kuyu yüzeyini, iki ucu yarım küresel kuyu yüzeyi ile kapanmış bir silindirik kuyu yüzeyi olarak ifade etmişlerdir.

Su alma yapıları ve bu yapılarda oluşabilecek çevrintili akımların HAD kullanılarak çözümleriyle ilgili yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

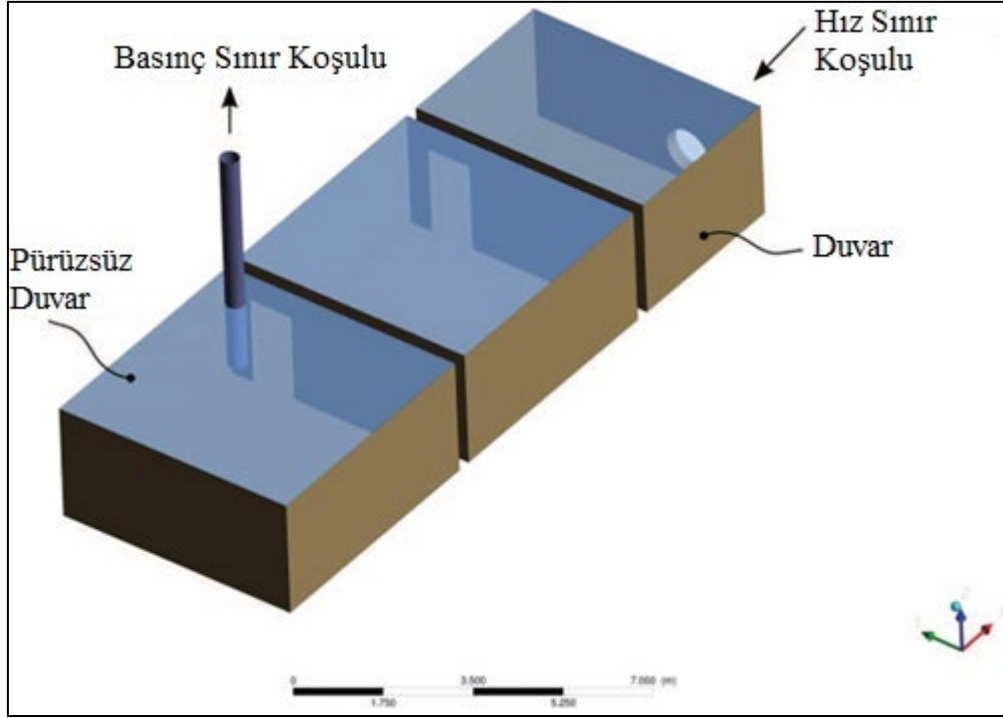
Sefidkoobi, Shahidi, Ramezani ve Kahe (2017) Flow-3D kullanarak dikdörtgen bir kanal içerisindeki akımın bir kısmını yönlendirecek şekilde, düz kanal eksenine 90° açıyla konumlandırılmış yatay bir kanal sonundaki su alma ağzı için modellemeler yapmış, farklı ağız yükseklikleri, farklı debiler ve program içeriğinde bulunan 5 farklı türbülans modeliyle yapılan denemeler sonucu oluşan çıktıları incelemişlerdir. Laboratuvar gözlemleri ve sayısal modellere göre tahmin edilen sonuçları karşılaştırmış en doğru sonuçları Renormalized Group - RNG (Yeniden Normalleştirme Grubu) Türbülans Modeli'nin verdiğini belirtmiştir. Bununla birlikte kanaldan geçen debi ne kadar azsa ana kanal eksenine 90° açıyla konumlandırılmış yan kanal sonunda bulunan ağızdan alınan su miktarının o kadar fazla olduğunu ifade etmişlerdir.

Kadhim ve Thamiry (2020) ANSYS Fluent kullanarak Şekil 2.2.'de görülen sayısal model üzerinde kritik batıklık incelemesi yapmışlardır. 3 farklı ağız tipi, 5 farklı batıklık, 3 farklı boru arası mesafe ve 5 farklı emiş hızı kullanıp 225 farklı kombinasyon için kritik batıklık değerini bulmuşlardır. Yaptıkları nümerik çalışmayı daha önce yapılmış deneysel bir çalışmayla doğrulamışlardır. Bunlara ilave olarak programda denedikleri düzenlemelerden, hava içerikli çevrinti oluşumuna karşı en iyi durumun 4D (D = boru çapı) boru aralığı, 1,25D batıklık ve 2 m/s'den küçük çekme hızının olduğu model ve en kötüsünün 2D boru aralığı, 2D batıklık ve 3 m/s çekme hızlı model olduğunu belirtmişlerdir. Borular arasındaki mesafe ve hava girişli çevrinti oluşumu arasında bir ilişki olduğunu belirtip, 4D aralıklı düzenin hava girişli çevrinti oluşumuna karşı en iyisi, 2D aralıklı düzenin en kötüsü olduğunu ifade etmişlerdir. Kadhim ve Thamiry (2020) çalışmasının bu çalışmadan farkı, çalışmalarında su temini yaptıkları haznede bir kanal akımı olmamasıdır.



Şekil 2.2. Rezervuar ve düşey yukarı doğru su alma ağızlarının genel görünümü (Kadhim ve Thamiry, 2020)

Rudolf ve Klas (2015) ANSYS Fluent kullanarak Şekil 2.3.'te görünen rezervuar serisi ve düşey yukarı yönlü su çeken bir pompanın bulunduğu bir model oluşturmuşlardır. Belli bir giriş hız profili elde etmek için 3 bölmeden oluşan bir rezervuar modeli kullandıklarını ifade etmişlerdir. Çalışmalarında düşey ağız ucundaki pompanın 3 farklı çalışma rejimine karşılık gelen 3 farklı ağız hızı için deneme yapmışlardır. İnceledikleri modelde oluşan 2 yüzey ve 1 taban çevrintisinin pompa kanatlarında kavitasyona neden olabileceğini ifade etmişlerdir. Çevrinti oluşumunun ağızın yan duvarlara ve tabana yakın olmasıyla oldukça ilintili olduğunu belirtmişlerdir. Ağız çevrintilerinin oluşumunu engellemek ve etkilerini azaltmak amaçlı çeşitli tasarım özellikleri ve cihazlar öneriler de tasarım sürecinde birincil olanın su alma ağzının rezervuar içerisindeki konumu olduğunu vurgulamışlardır. Günümüzde pompa rezervuarlarının (pump-sump) HAD ile modellenmesi uygulanabilir olsa da bu durumun hala birtakım sorunlarının olduğunu aktarmışlardır.

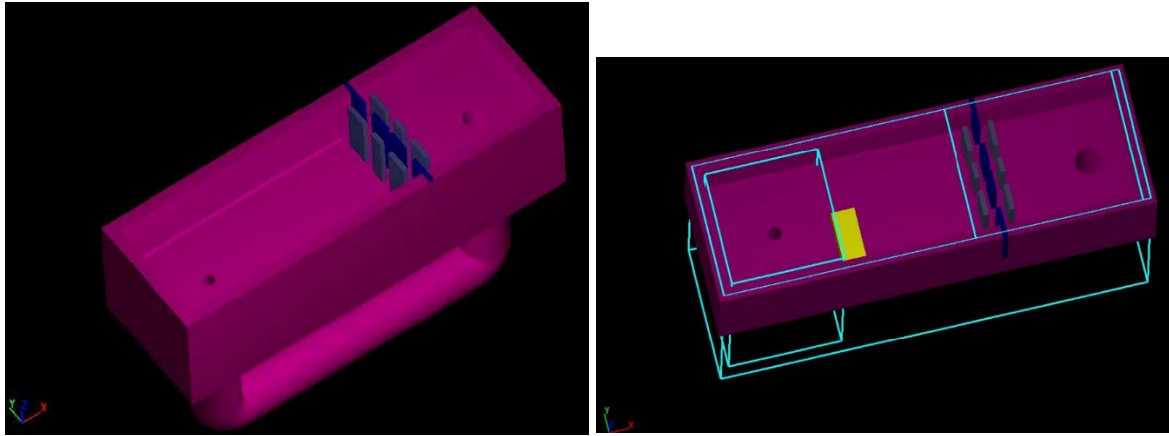


Şekil 2.3. Rezervuar serisi ve son rezervuardaki 1 adet batık düşey konumlu su alma ağızı (Rudolf ve Klas, 2015)

Jain, Ahmad ve Singh (2013) Reynolds Ortalamalı Navier Stokes denklemlerini kullanan ANSYS Fluent 14.0 programında $k-\epsilon$ türbülans modeliyle çoklu su alma ağızlarının bulunduğu serbest su yüzeyli bir rezervuarda oluşan çevrintilerle alakalı sayısal bir çalışma yapmıştır. Sonuç olarak çevrinti oluşumunun Froude sayısı ile doğru orantılı olduğunu, çevrintinin yok olmasının, yukarı yönlü su alan düşey su alma ağzının batıklık miktarı ile üstel olarak orantılı olduğunu ifade etmişlerdir.

Guyot, Maaloul ve Archer (2014) sonlu hacimler yöntemi kullanan Flow-3D programının verdiği sonuçların kararlılık ve uygunluğunu test etmek amaçlı, hidrolik olarak kompleks bir olay olan, serbest yüzeyli akımlarda çevrinti oluşumu üzerine çalışma yapmışlardır. Hedeflerinden biri, laboratuvar ortamında oluşan çevrintinin Flow-3D ortamında da olup olmayacağını kontrol etmek, diğeri ise çevrintiyi fiziksel deneylerde görüldüğü şekliyle temsil eden en basit HAD parametre setini bulmak olmuştur. Hazırladıkları model, laboratuvarında bulunan düşey bir su alma ağzına sahip, 1 metre uzunluğunda ve yaklaşık yarım metre genişliğinde, sabit su seviyesine ve ayarlanabilir akım hızına sahip bir deney düzeneğine dayanmaktadır. Bu deneyin asıl avantajının, fiziksel modelin HAD programında kolay bir şekilde simüle edilmesi olduğunu ifade etmişlerdir. Kontrol için uzunluğu, kanal tabanına kadar uzanan ama hava girişi olmayan bir çevrintinin oluştuğu

durum seçilmiştir. Sonuç olarak gerçekte var olan çevrintinin, basit ve simetrik bir geometri kullanıldığı için gözlemlendiğini, böylece HAD modelinin niteliksel ve ön tasarım açısından uygun olduğunu fakat sayısal model içinde çevrinti uzunluğunun tam olarak belirlenemediği ifade edilmiştir. Bunun yanında daha detaylı bir doğrulama çalışmasına ihtiyaç olduğunu, bunun için de diğer girdap parametre testlerinin dahil olduğu sayısal çalışmaların ve daha detaylı deneysel ölçümlerin yapılması gerektiğini belirtmişlerdir. Son olarak bu hidrolik olayla fazlaca karşılaşılrsa da fiziksel modellerin ve onların benzerlik yasalarının kullanımına son vermek amaçlı hala çaba göstermek gerektiğini ifade etmişlerdir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Flow-3D programında oluşturulan 2 düzenek (Guyot ve diğerleri, 2014)

Kyoji ve Tomoyoshi (2005) kentlerdeki drenaj pompa sisteminin boyutlarının küçültülerek maliyetinin azaltılmak istendiğini, bunun bir sonucu olarak da bu sistemlerdeki akış hızlarının artacağını ve hava girişli veya batık çevrıntiler gibi istenmeyen hidrolik olayların oluşabileceğini ifade etmişlerdir. JSME (The Japan Society of Mechanical Engineers) Standartları'na göre bahsedilen hidrolik olayların geleneksel pompa rezervuarlarında görülmesine izin verilmemektedir ve pompa rezervuarlarının yapım öncesi durumu ölçekli deneysel modellerle değerlendirilmektedir. JSME Standardı: "Pompa Rezervuarının Performansının Model Testi İçin Standart Yöntem", Japonya Turbo Makineler Topluluğu'nun bir komitesi tarafından Mart 2005'te revize edilmiştir. Bu yeniden değerlendirme sırasında 10 farklı HAD programı denenmiştir. Bu topluluk, model rezervuarda uygulanan 6 farklı programda oluşturulan toplam 10 farklı HAD modeli için bir kıyaslama oluşturmuştur. Buldukları sonuçlara göre modellerdeki rezervuarda bulunan ağız etrafındaki akışın 10 farklı modelde çok farklı olmadığını ancak elde

edilen çevrintilerin güçleri arasında önemli farklar olduğunu ifade etmişlerdir. Bu durumun sayısal yöntemden, ağ aralığının değişiminden ve bazı geometrik farklılıklardan kaynaklandığını belirtmişlerdir. Kararsız akımlarda, hava girişli çevrinti başlangıcı için pratik olarak etkili bir yöntem geliştirmişlerdir. Son olarak kararsız akımlarda 3 boyutlu akış simülasyonlarının güvenilirliğini artırmak için daha fazla çalışmanın gerekli olduğunu ifade etmişlerdir.

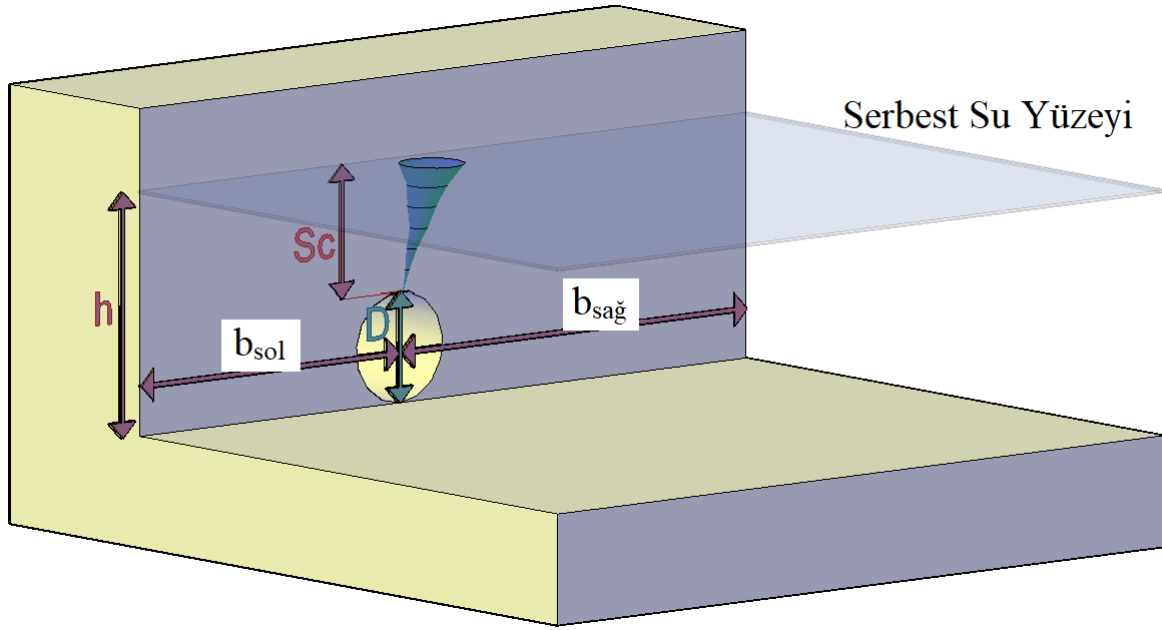
Aybar (2012) bir hidroelektrik santralinin yükleme havuzunun deneysel ve sayısal modelini yapmış, hız alanlarını ölçmüş ve çevrinti oluşumunu incelemiştir. Çevrinti güçlerini, potansiyel akım kabulü yaparak hem deneylerdeki hız alanlarını hem de Flow-3D programında oluşturduğu yükleme havuzu modelinden elde ettiği hız alanlarını kullanarak hesaplamış ve çevrinti güçlerinin batıklık esaslı Froude sayısı ile arttığını ifade etmiştir. Deneysel sonuçlar ile sayısal sonuçları karşılaştırıp, yüksek hızların bulunduğu durumlarda %15 sapma olduğunu belirtmiş ve Flow-3D programını oldukça yeterli bulmuştur. Flow-3D programının çevrinti tespiti için kullanılabileceğini ancak belirli havuz tiplerinde çevrintileri tespit edemeyebileceğini eklemiştir.

Tataroğlu (2014) hazne ve yatay su alma ağzından oluşan bir sistemdeki çevrinti oluşumunu Flow-3D yazılımı ile sayısal olarak incelemiştir. Sayısal modellemelerde debi, ağız çapı, hazneye ait yan duvarların birbirine olan uzaklığı gibi değerleri değiştirmiş ve her düzenek için kritik batıklık değerini bulmuştur. Bununla birlikte oluşabilecek çevrintileri engelleyici su alma ağzının üzerinde konumlandırılmış bir plaka da kullanmış ve bunun başarılı olduğunu belirtmiştir. Buna ek olarak bazı prototiplerin sayısal modellerini hazırlamış, prototipler ve onların sayısal modellerinin kritik batıklık sonuçları arasında sapmalar tespit etmiştir. Yine de Flow-3D yazılımının hava alma durumundaki vorteksleri tespit etmede işe yarar olduğu ifade etmiştir.

Lucino, Liscia ve Duró (2010) Flow-3D programının temsil ve tahmin edebilme yeteneğini, bir haznedeki pompa ile düşey yukarı yönlü bir ağız aracılığı ile su çekilmesi sonucu oluşan çevrintilerin deneysel sonuçlarını, programın verdiği nümerik sonuçlar ile kıyaslayıp doğrulamayı amaçlayan bir çalışma yapmışlardır. Hesaplanan hızlar fiziksel modeldekiler ile büyüklük bakımından iyi bir benzeşim gösterdiğini ve vortisite konturlarındaki yüksek vortisite (çevri) değerlerinin çevrintinin tahmini için kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Evranos (2019) yatay su alma ağızlarında vorteks (çevrinti) engelleyici yapılarla ilgili Flow-3D aracılığıyla sayısal bir çalışma yapmıştır. Vorteks engelleyici yapıların olmadığı modellerde güçlü çevrintilerin oluştuğunu, bu oluşumların vorteks engelleyici yapılarla önemli ölçüde sönümlendiğini belirtmiştir.

Sungur (2018) Şekil 2.5.'te gösterilen asimetrik konumlu yatay bir su alma ağzına ait kritik batıklığı Flow-3D aracılığı ile incelemiş ve elde ettiği nümerik sonuçları, Haspolat (2015)'in deneysel sonuçları ile karşılaştırmıştır. Nümerik ve deneysel sonuçlar arasında %3,21 ila %16,76 hata payı olduğunu, bu sebeple programın asimetrik konumlu ağızlar için çevrinti oluşumunu araştırmada oldukça başarılı olduğunu belirtmiştir. Sayısal sonuçlara ulaşırken ağza ait boru çapı, yan duvarların birbirine olan mesafesi, sisteme verilen debi vb. özellikleri değiştirerek farklı kombinasyonlar denemiştir. Bununla birlikte ağ aralıklarını daraltarak elde edilecek sonuçların deneysel sonuçlara ve gerçek fiziki yapılara ait sonuçlara yakın olacağını ifade etmiştir. Simülasyon süresi olarak 50 saniye belirlenmiş olup, deneylerde 10-15 dakika gözlem süresi olduğunu, programın hesaplama zamanı artacağından uzun simülasyon süresi seçilemediğini, eğer simülasyonların uzun süre çalıştırılırsa deneysel sonuçlara daha yakın olabileceğini belirtmiştir. Yer çekimli akım etkisindeki durumda ağza doğru tam bir hava çekirdekli çevrinti görünümü oluşmadığını, Tataroğlu (2014)'nin yaptığı çalışmada pompa gücüyle su çekildiği için ağza doğru tam bir hava çekirdekli çevrinti gözlemlendiğini, bu yüzden programın hava çekirdekli girdapları modellemede pompalı sistemler için daha uygun olduğunu ifade etmiştir. Özellikle prototip ölçeğinde, yer çekimli akışlar için hava çekirdekli çevrintiyi görüntülemenin mümkün olmadığını eklemiştir. Buna ek olarak ilerleyen çalışmalarda programın, Froude sayısı ve asimetri seviyesinin kritik batıklık üzerindeki etkilerini araştırmak için kullanılabileceğini belirtmiştir.



Şekil 2.5. Asimetrik konumlu yatay bir ağza ait kritik batıklık görünümü (Sungur, 2018)

Yıldırım (2020) bir hazne ve duruma göre sayıları birden üçe kadar değişen yatay su alma ağızlarından oluşan bir sistem aracılığıyla asimetrik akım yaklaşımı durumunda düzeneklere ait kritik batıklık derinliklerini sayısal ve deneysel olarak incelemiştir. Kanal genişliği, ağız çapları ve gelen akım debisi gibi özellikleri değiştirip farklı geometrik ve hidrolik durumlar için kritik batıklık derinliklerini hem sayısal hem de deneysel olarak belirleyip bu çıktıları birbiriyle kıyaslamıştır. Bununla birlikte sayısal modellerin, çevrintilerin yeri ve gücünü tespit etmede kullanılabileceğini ancak hava girişli çevrintileri tespit etmek için hidrolik model çalışmalarının gerektiğini belirtmiştir. Sayısal modellerin, çevrintinin oluşup oluşmayacağı konusunda hidrolik modeller kadar güvenilir olmadığını, çevrintinin oluşumu gözlenirse de kuyruk kısmının ve hava girişinin tam olarak tespit edilmesi için çok ince aralıklı ağ blokları oluşturmak gerektiğini belirtmiştir. Serbest yüzey dinamiklerini tespit etme konusunda da sayısal modelleri yetersiz bulduğunu ifade etmiştir.

Yıldırım (2021) yatay konumlu ve farklı geometrik şekillerden oluşan ağızların şeklinin ağız membaındaki hız dağılımına etkisini teorik ve Flow-3D aracılığı ile sayısal olarak incelemiştir. Bu araştırmayı ağza hava ve sediment girişini etkileyen önemli unsurlardan biri olan ağız etrafındaki hız dağılımını incelemek için yaptığını belirtmiştir. Sonuçta ağız geometrisinin, ağız membaındaki hız dağılımını önemli ölçüde etkilediğini, bu etkinin ağızdan uzaklaştıkça azaldığını ifade etmiştir. Buna ek olarak ağız etrafındaki hız dağılımına eşkenar dörtgen, üçgen ve kare olan ağızların dairesel ağızlara benzer etki

yaptığını, en/boy oranı büyük olan ağızların etkisinin dairesel ağızlardan farklı olduğunu belirtmiştir. Bulduğu teorik ve sayısal sonuçların da yakın olduğunu eklemiştir.

Literatürde bu çalışmalara ek olarak hava girişli çevrinti engelleyicilerle (anti-vortex devices) alakalı çalışmalar da önemli yer tutmaktadır (Yıldırım ve diğerleri, 2012; Kabiri-Samani ve Borghei, 2013; Taghvaei, Roshan, Safavi ve Sarkardeh, 2012; Göğüş, Altan-Sakarya ve Köken, 2016; Heidmann ve Ekkad, 2007; Monshizadeh, Tahershamsi, Rahimzadeh ve Sarkardeh, 2017; Khadem Rabe, Ghoreishi Najafabadi ve Sarkardeh, 2016; Kim, Choi, Y.D., Choi, J.W. ve Lee, 2012; Park, Kim, Seong, Rhee, 2018).

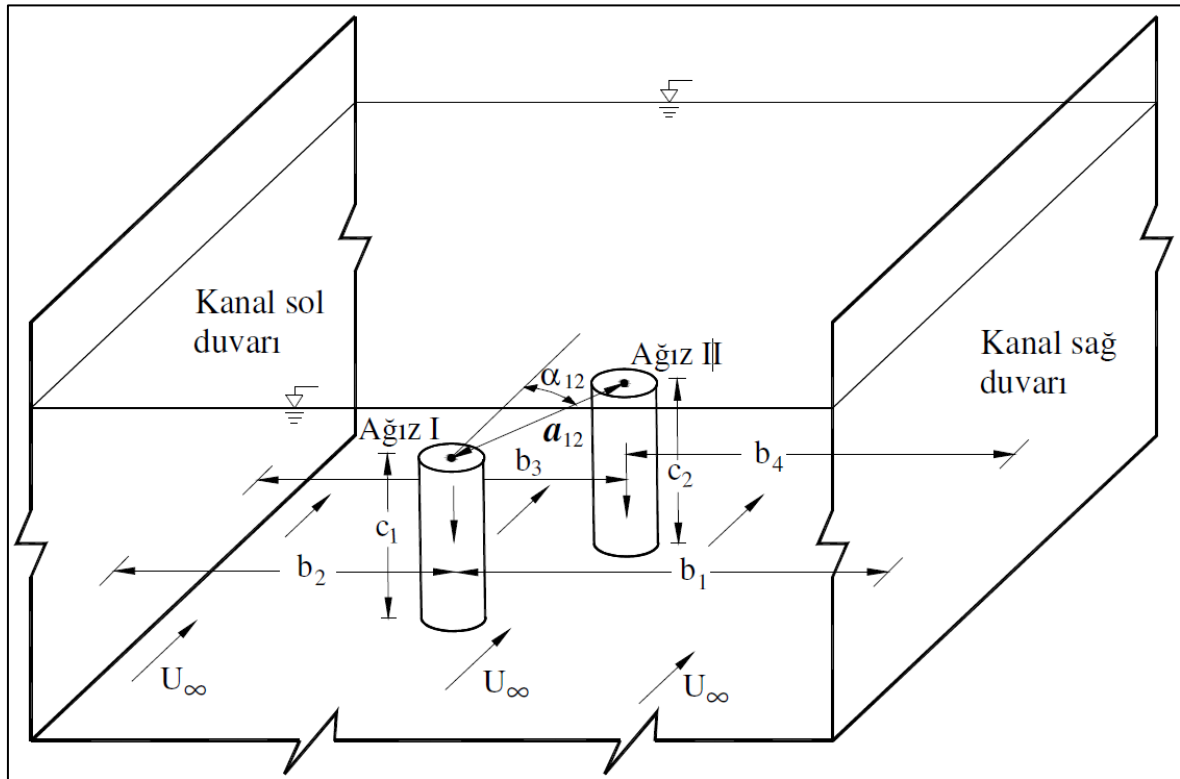
Yapılan çalışmalar göz önüne alındığında, kanal akımı ortamında düşey aşağı su alan çoklu (ikili veya üçlü) su alma ağızlarına ait kritik batıklığın bir HAD programıyla bulunması ile ilgili benzer sayısal bir çalışma olmadığı görülmüştür. Bu çalışmada dikdörtgen bir kanal akımı ortamında farklı pozisyonlarda konumlandırılmış ikili veya üçlü düşey aşağı su alan dairesel su alma ağızlarına ait kritik batıklık Flow-3D yazılımıyla bulunmaya çalışılmıştır. Böylece, kullanılan yazılımın bu tip bir problemi hangi ölçüde ve hangi şartlar altında tahmin edebildiği mevcut çalışmalardaki deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak ortaya konmuştur.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada, dikdörtgen kesitli kanal akımı içerisinde düşey aşağı yönlü su alan çoklu su alma ağızlarına ait kritik batıklık değerinin sayısal olarak bulunması amaçlanmıştır. Bulunan sonuçların doğruluğunun kıyaslanması için deneysel verilere ihtiyaç olduğundan çoklu su alma ağızlarına ait kritik batıklığın deneysel olarak incelendiği Taştan (2007)'nin çalışmasından faydalanılmıştır. Bu çalışmadaki Flow – 3D'de kurulacak modellere temel teşkil etmesi sebebiyle, Taştan (2007)'de kullanılan deney düzeneği ve deneylerin yapılışı aşağıda açıklanmıştır. Öncelikle deneyler esnasında hangi boyutsuz parametrelerin önemli olduğunu belirlemek için boyut analizi yapılmıştır.

3.1. Çoklu Su Alma Ağızlarına ait Kritik Batıklığı Etkileyen Parametreler

Şekil 3.1.'de 2 su alma ağzının bulunduğu dikdörtgen kesitli bir kanala ait örnek bir model kesiti görülmektedir.



Şekil 3.1. Kanal içerisindeki su alma ağzları ve konumlandırılmaları (Taştan, 2007)

2. ağıza ait kritik batıklık, S_{c2} 'yi etkileyen büyüklükler, Eşitlik 3.1'deki gibi ifade edilmektedir (Arslan, 2006).

$$S_{c2} = f(Q_1, Q_2, V_2, U_\infty, \rho, \mu, \Gamma, \sigma, g, D_1, D_2, c_1, c_2, b_1, b_2, b_3, b_4, l_1, l_2, a_{12}, e_1, e_2, \alpha_{12}) \quad (3.1)$$

Buradaki ifadelerden;

Q_1 = 1. ağıza ait debi,

Q_2 = 2. ağıza ait debi,

V_2 = 2. Ağzın içindeki ortalama hız,

U_∞ = Ağızlara yaklaşan akımın ortalama hızı,

ρ = yoğunluk,

μ = dinamik viskozite,

Γ = sirkülasyon (çevri),

σ = yüzey gerilmesi,

g = yer çekimi ivmesi,

D_1 = 1. ağızın iç çapı,

D_2 = 2. ağızın iç çapı,

c_1 = 1. ağızın kanal tabanından yüksekliği,

c_2 = 2. ağızın kanal tabanından yüksekliği,

b_1, b_2, b_3 ve b_4 = 1. ağız ve 2. ağız merkezlerinin kanal yan duvarlarına olan yatay mesafeleri,

l_1 ve l_2 = 1. ağız ve 2. ağız merkezlerinin ölü son duvarına olan yatay mesafeleri,

a_{12} = 1. ağız ve 2. ağızın merkezleri olan M_1 ve M_2 noktaları arasındaki mesafe,

e_1 = 1. ağızın cidar kalınlığı,

e_2 = 2. ağızın cidar kalınlığı,

α_{12} = ağızlara yaklaşan üniform akım yönüyle M_1 ve M_2 noktalarını birleştiren doğru parçası arasındaki açıdır.

Boyut analizi yapıldığında Eşitlik 3.2 elde edilmektedir.

$$\frac{S_{c2}}{D_2} = f_2 \left(\frac{Q_1}{Q_2}, \frac{V_2}{U_\infty}, \frac{D_1}{D_2}, W_2, K_2, Re_2, Fr_2, \frac{c_1}{D_2}, \frac{c_2}{D_2}, \frac{b_1}{D_2}, \frac{b_2}{D_2}, \frac{b_3}{D_2}, \frac{b_4}{D_2}, \frac{l_1}{D_2}, \frac{l_2}{D_2}, \frac{a_{12}}{D_2}, \frac{e_1}{D_2}, \frac{e_2}{D_2}, \alpha_{12} \right) \quad (3.2)$$

Eşitlik 3.2'deki ifadelerden;

$W_2 = \rho D_2 V_2^2 / \sigma = 2$. ağız için Weber sayısı,
 $K_2 = \Gamma / (V_2 D_2) = 2$. ağız için çevrinti sayısı,
 $Re_2 = V_2 D_2 / \nu = 2$. ağız için Reynolds sayısı,
 $Fr_2 = V_2 / (g D_2)^{1/2} = 2$. ağız için Froude sayısı,
 $\nu = \mu / \rho$ kinematik viskozitedir.

Bu çalışmada incelenen deneylerde, ağızların yan duvarlara ve tabana olan mesafeleri kritik batıklıktan daha büyük olduklarından c_1 , c_2 , b_1 , b_2 , b_3 ve b_4 'ü içeren boyutsuz ifadeler Eşitlik 3.2'den çıkartılmıştır. Ayrıca bu çalışmada ele alınan deneylerde bir ölü son duvarı da bulunmadığından l_1 ve l_2 büyüklüklerinin de etkileri yoktur. Bu yüzden Eşitlik 3.2' deki bu değerlere ait boyutsuz ifadeler çıkarılmıştır. Deneylerde kullanılan ağızların iç çapları birbirine eşit ve cidar kalınlıkları da yeterince küçük (0.3 cm olduğundan) e_1/D_1 , e_2/D_2 ve D_1/D_2 değerlerinin etkileri de ihmal edilmiştir. Akıma deney yapılırken bir sirkülasyon (çevri) uygulanmamıştır ($K=0$). Uygulamada W , Re , Fr değerlerinin etkileri de belirli limit değerlerin üzerinde olmaları halinde ihmal edilebileceği önceki çalışmalarda belirtilmiştir (Odgaard 1986, Taştan, 2007).

Tüm bunları göz önünde alındığında 2. ağza ait kritik batıklığı etkileyen faktörlerin boyutsuz hali Eşitlik 3.3'teki gibi olmaktadır.

$$\frac{S_{c2}}{D_2} = f_3 \left(\frac{Q_1}{Q_2}, \frac{V_2}{U_\infty}, \frac{a_{12}}{D_2}, \alpha_{12} \right) \quad (3.3)$$

Aynı şekilde 1. ağıza ait kritik batıklığı etkileyen faktörler de Eşitlik 3.4'teki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{S_{c1}}{D_1} = f_4 \left(\frac{Q_1}{Q_2}, \frac{V_1}{U_\infty}, \frac{a_{12}}{D_1}, \alpha_{12} \right) \quad (3.4)$$

Taştan (2007), yaptığı deneylerde bu büyüklüklerin kritik batıklık üzerindeki etkisini araştırmıştır.

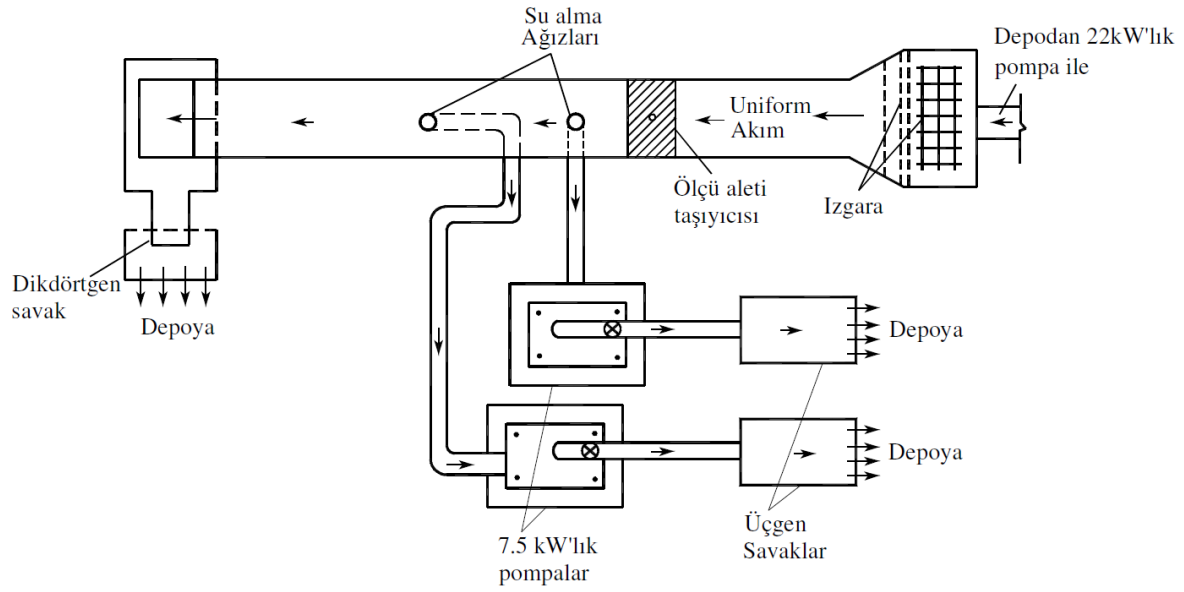
3.2. Çoklu Su Alma Ağzlarına Ait Kritik Batıklığın Deneysel Olarak İncelenmesi

Laboratuvar ortamında su alma ağzlarına ait kritik batıklık araştırılırken Taştan (2007)'nin çalışmasında yatay, dikdörtgen geometriye sahip açık bir kanal kullanılmıştır. Kanal uzunluğu 10 m, genişliği 50 cm ve yüksekliği ise 60 cm'dir. Akım, kanal başlangıcındaki 22 kW gücünde bir pompayla kanala verilmiştir. Kanala verilen akımı üniform ve dönmesiz bir hale getirmek amacıyla kanal başlangıcından 2,5 m mesafede ızgara kullanılmıştır. Deney düzeneği Şekil 3.2. ve Resim 3.1.'de gösterilmektedir.

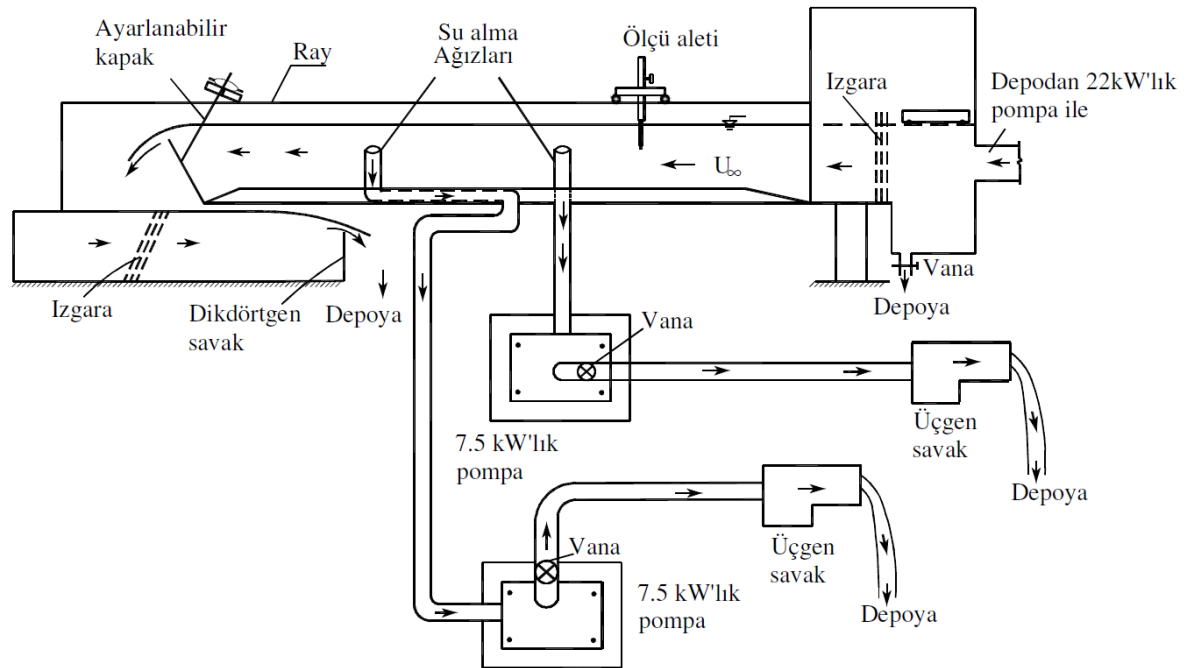
İç çapı $D = 5,32$ cm, dış çapı $D = 5,92$ cm boru tipi düşey aşağıya doğru su alan su alma ağzları kullanılmıştır. Boruların cidar kalınlığı 0,3 cm'dir. Kanal ortasında konumlandırılmış su alma ağzlarının sayısı ise 2 veya 3 olmak üzere deney setine göre değişmektedir.

Deney setlerinde ağız arası mesafeler a_{12} , ağzların birbirine göre açıları ise α_{12} ile gösterilmiştir. Çalışmada kritik batıklık üzerindeki yan duvar ve kanal tabanı etkilerinin ihmal edilebilmesi için ağzların belirtilen katı sınırlardan en büyük kritik batıklık değerinden daha fazla olacak şekilde konumlandırıldığı ifade edilmiştir. Çalışmadaki temel amacın ağzların birbirlerine ait akımlar üzerindeki tesirini araştırmak olduğu belirtilmiştir. Bu sebeple ağız merkezleri ile kanal tabanı arası düşey mesafe $4D$ olarak (21,28 cm) seçilmiştir.

PLAN



YAN GÖRÜNÜŞ



Şekil 3.2. Deneylerdeki su alma ağızlarının kanal içindeki yerleşimi (Taştan, 2007)



Resim 3.1. Laboratuvar ortamında deney düzeneğinin görünümü (Taştan, 2007)

Ağızlardan alınan debiler kanal dışında 7,5 kW gücünde pompalar aracılığıyla çekilmiştir. Kanala su verilirken de 22 kW gücünde bir pompa kullanılmıştır. Pompa çıkışındaki vanalar sayesinde ağızlardan çekilen debiler ve kanala verilen debi ayarlanabilmiştir. Bununla birlikte debi ölçümü için ağızlardan çıkan akımın geçtiği pompalardan sonra üçgen savak, kanal sonunda su alma ağızlarından arta kalan suyun geçtiği dikdörtgen savak kullanılmıştır. Kanal sonundaki bulunan ayarlanabilir kapak yardımıyla da kanaldaki seviye ayarlanabilmiştir.

Deneyler yapılırken pompalar aracılığıyla kanala su verilmiş ve ağızlardan su alınmıştır. Tam bir çevrinti (hava girişli çevrinti) oluşuncaya kadar beklenilmiş eğer oluşum yoksa kanal sonundaki kapak aracılığıyla seviye belli bir miktar düşürülmüştür. Çevrinti oluşunca ise debi ve kanaldaki su seviyesi ölçümleri yapılmıştır.

3.3. Deneylerdeki Gözlemler

Deneyler esnasında tam havalı çevrinti oluşumuna dair belli noktalara dikkat çekilmiştir.

Buna göre;

- Eğer $\alpha_{12} = 0^\circ$ olacak şekilde ağızlar kanal eksenine boyunca sıralanmışsa, mansap tarafında bulunan ağzın debisi de memba tarafında bulunan ağız debisinden çok küçük değilse tam çevrinti memba tarafında bulunan ağızda oluşamaz. İlk sıradaki ağza göre mansap tarafında bulunan ağzın debisi oldukça küçükse bu durumun istisnası olabilmektedir.
- Ağızlar kanal eksenine boyunca sıralı değilse, ağızlar arasındaki mesafe ve açığa bağlı olarak en büyük debinin çekildiği ağız üzerinde çevrinti oluşabilir. Bu oluşum esnasında ağza ait kritik batıklık, ağız tekli çalışsaydı sahip olacağı kritik batıklıktan daha fazladır.
- Ağızlardan yüksek debiler çekilmesi durumunda, ağızlar arasında kavitasyon ve buna bağlı kavitasyon çevrintileri oluşmaktadır.

4. ÇOKLU SU ALMA AĞIZLARININ KULLANILMASI DURUMUNDA AĞIZ AKIMLARININ KRİTİK BATIKLIK ÜZERİNE ETKİSİNİN AÇIKLANMASI

4.1. Rankine Ovali ve Kritik Küresel Kuyu Yüzeyi (KKKY)

Su alma ağzına hava çekirdekli çevrinti vasıtasıyla hava girişinin başlayacağı, ağız ile su yüzeyi arasındaki düşey mesafenin “kritik batıklık” olduğu daha önce belirtilmişti. Bir su alma ağzı kritik batıklığa sahip durumdayken, ağız ile aynı merkez ve debiye sahip bir Kritik Küresel Kuyu Yüzeyi (KKKY) oluştuğu da Yıldırım ve Kocabaş (1995) tarafından potansiyel akım kabulü sonucunda bulunmuştur (Şekil 2.1).

Ağza ait batıklığın kritik olması durumunda, noktasal kuyu ve üniform kanal akımı toplamının olduğu potansiyel akım çözümünde bir Rankine ovali oluşur. Bu Rankine ovalinin dışında olan bölgedeki su, ağza giremez. Yine kritik batıklık durumunda, Rankine ovalinin üst bölgesi ile serbest su yüzeyi yaklaşık olarak aynıdır. Dolayısıyla kritik durumda ağza hava girebilmesi için ağız üzerinde Rankine ovalinin üst sınırı, su yüzeyi ile çakışmalıdır. Bu bilgiden yararlanılarak akım alanında yarıçapı kritik batıklık olan debisi ve merkezi su alma ağzındaki ile aynı olan hayali KKKY elde edilmiştir. KKKY için Eş. (4.1)’de verilen süreklilik denklemi yardımıyla kritik batıklık bulunabilir.

$$Q = A_c \cdot V_{sc} = AV \quad (4.1)$$

Eşitlik 4.1’de Q = ağız debisi; A = ağzın kesit alanı; V = ağızdaki ortalama akış hızı; A_c = “engel etkileri” çıkarıldıktan sonraki Kritik Küresel Kuyu Yüzeyi alanı; V_{sc} = radyal olarak Kritik Küresel Kuyu Yüzeyi’ndeki hızdır.

Yıldırım ve Kocabaş (1995) üniform akımlı bir kanalda V_{sc} değerinin sabit olduğunu ve deneylerle belirlenebileceğini ifade etmiştir. Buna göre üniform akımlı bir kanal akımı içinde konumlandırılmış ağız için KKKY üzerindeki radyal hız V_{sc} , Eşitlik 4.2’de gösterildiği gibi ifade edilmiştir.

$$V_{sc} = U_{\infty} / 2 \quad (4.2)$$

Eşitlik 4.2’de gösterilen U_{∞} ağza yaklaşan kanal akımının üniform hızıdır. A_c terimi ise KKKY üzerinde yüzey alan kaybı meydana getiren katı sınırların etkileri düşüldükten sonraki KKKY’nin kalan net yüzey alanıdır.

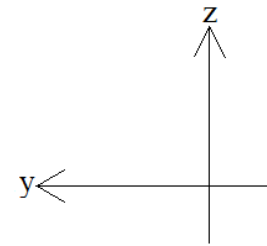
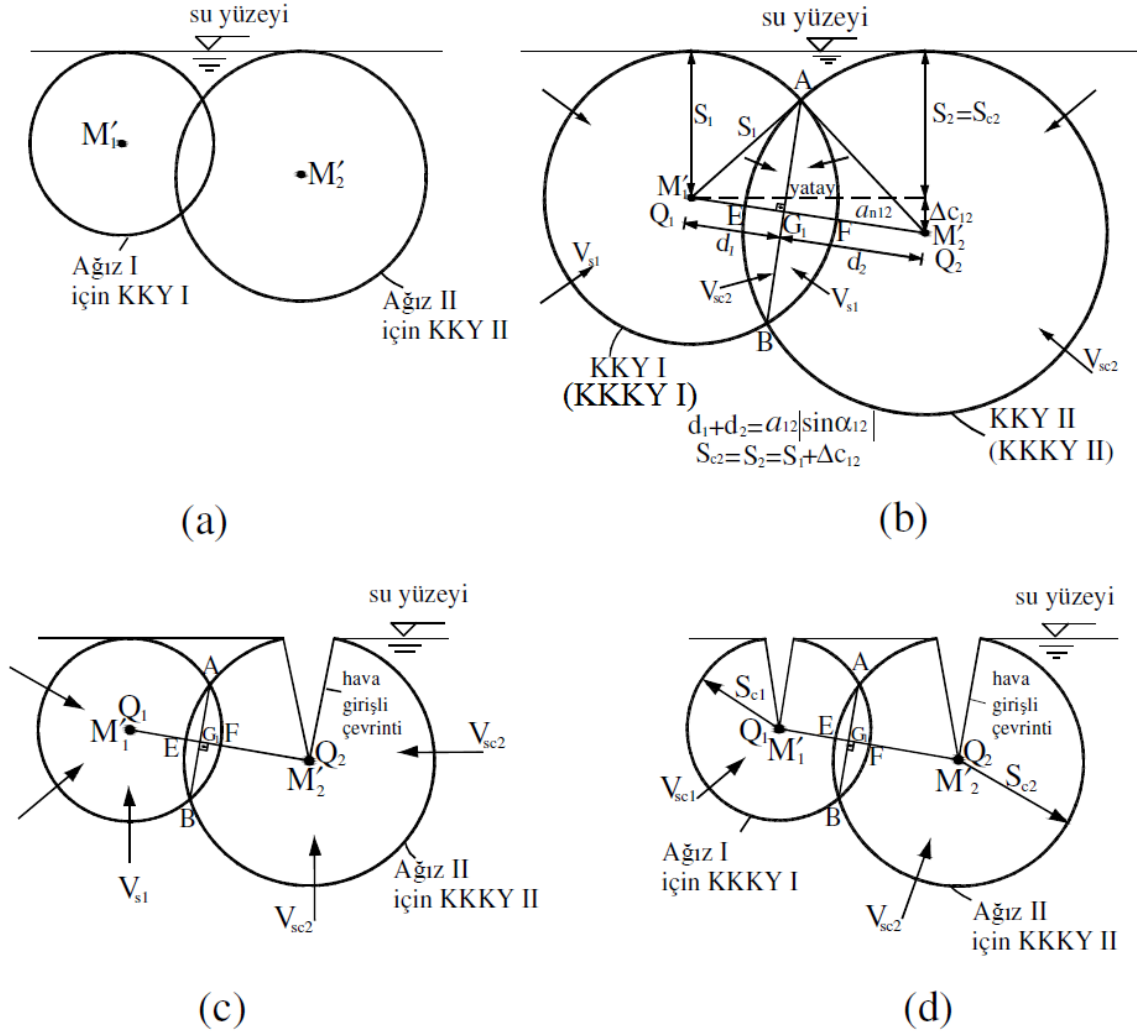
Eğer KKKY’nin yarıçapı olan kritik batıklık, ağzın kanal sınırlarına (yan duvar, taban, ölü son duvarı, ağzın kendi borusu gibi) olan mesafesinden daha küçükse, bu sınırlar KKKY’yi keserek yüzey alan kaybına neden olur. Bu durumda Eş. (4.1) de verilen süreklilik denkleminin de sağlanması ve bu alan kaybının telafi edilebilmesi için KKKY yarıçapının büyümesi (yani kritik batıklığın artması) gerekmektedir.

Tüm bunlar dikkate alındığında tek bir su alma ağzına ait kritik batıklık katı sınırlardan önemli ölçüde etkilenebilmektedir. Çoklu su alma ağzları olması durumunda göz önüne alınan ağız çevresindeki diğer su alma ağzlarına ait akımlar da bir çeşit engel etkisi oluşturur. Bu engel etkisinde (ki buna akım engel etkisi denilmiştir) bir alan kaybı olmamasına rağmen göz önüne alınan ağza giden debinin bir miktarının diğer ağızlara gitmesi durumu vardır.

4.2. Bir Ağza Ait Kritik Batıklığın Üzerinde Akım Engel Etkileri

Noktasal kuyu tipi bir su alma ağzına ait Rankine ovalinden yola çıkılarak KKY ve KKKY olduğu Yıldırım ve Kocabaş (1995) tarafından ifade edilmişti. Potansiyel akım çözümü de akımların süperpozisyonuna (toplanmasına) izin veren bir çözümdür. Bir grup su alma ağzının her birine ait Rankine ovaleri toplanırsa Rankine ovalerinin kesişim bölgesi ağzların birbirleri üzerindeki akım engel etkilerini içerir (Şekil 4.1.).

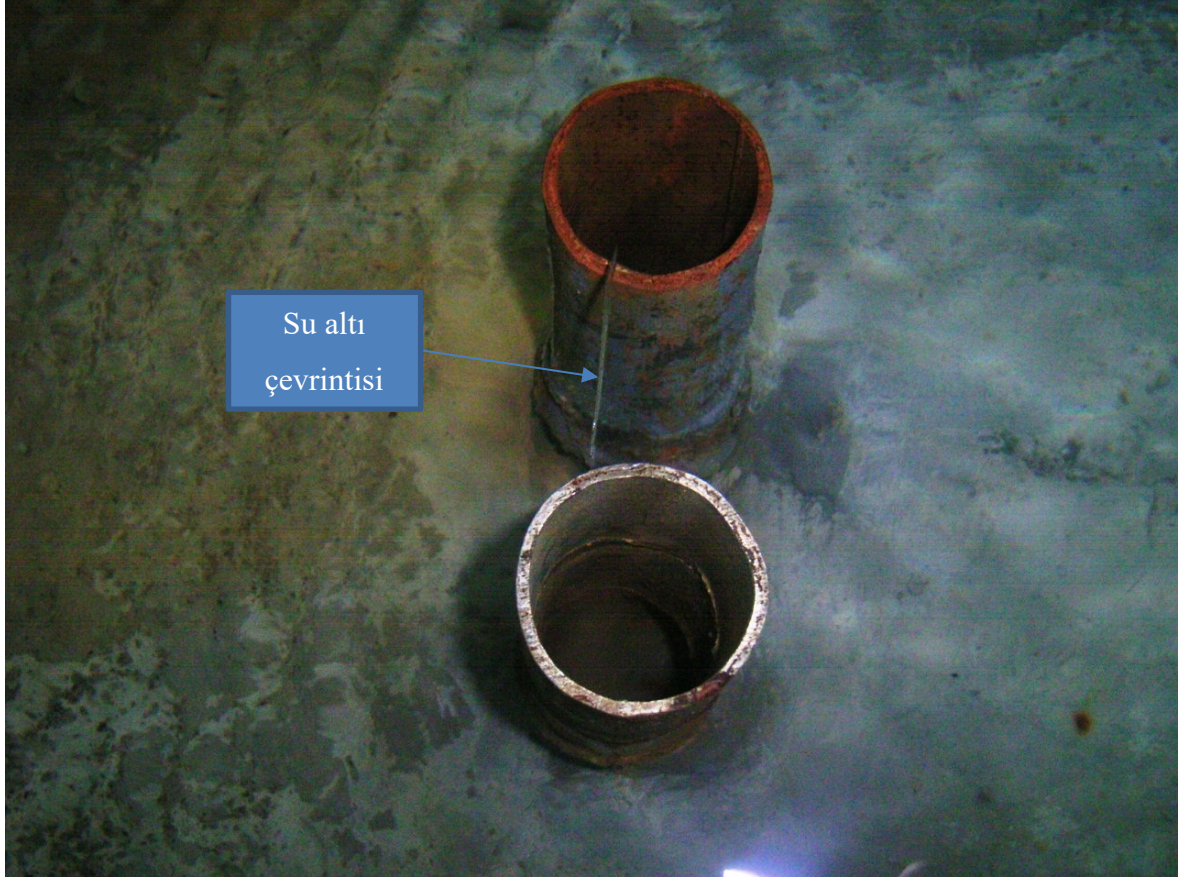
radyal hızı, Δc = ağız merkezleri arasındaki düşey mesafeyi göstermektedir (bu çalışmada $\Delta c = 0$ olmasına rağmen genel bir açıklama amacıyla Δc ifadesi çıkarılmamıştır).



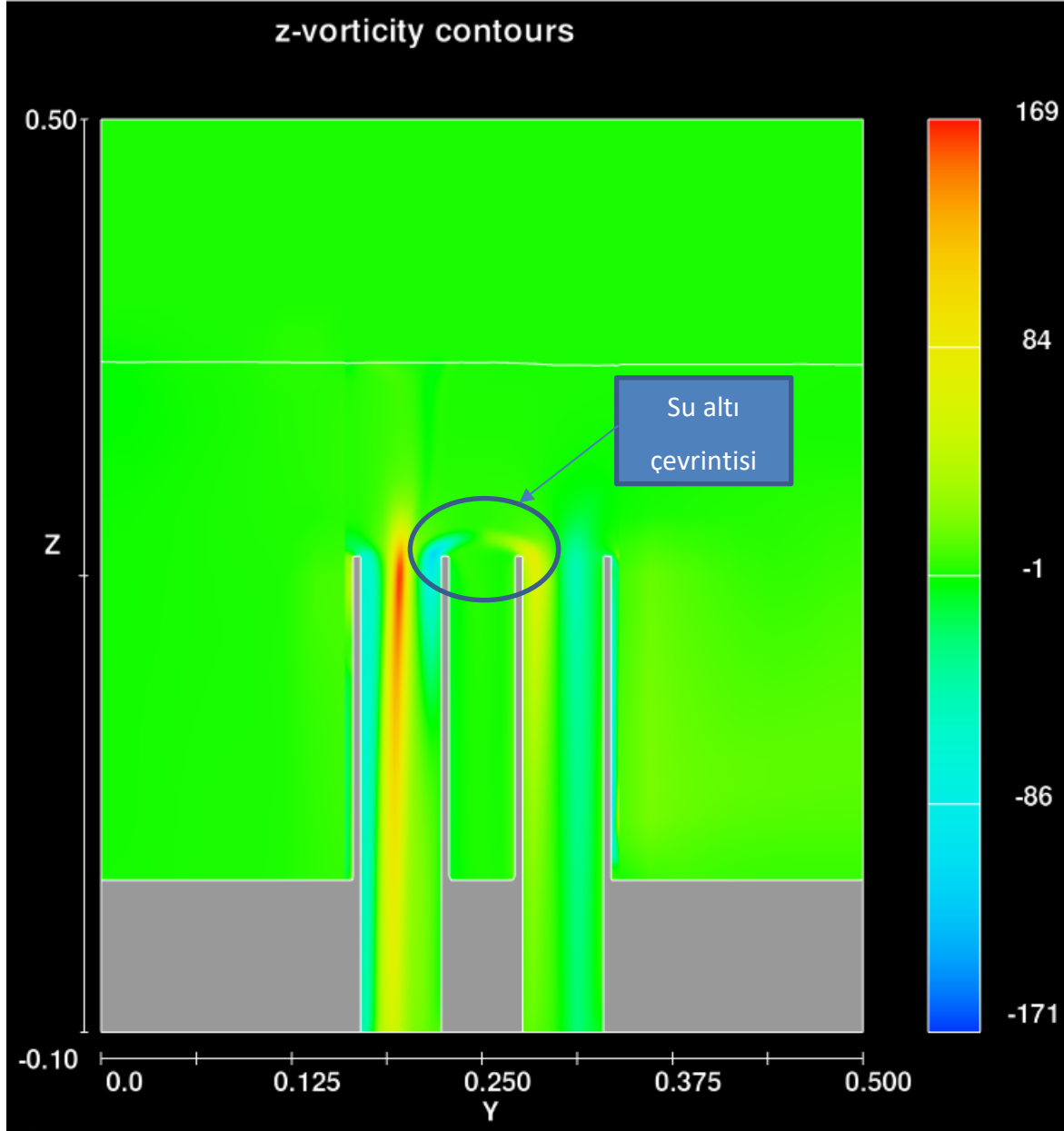
Şekil 4.3. a) Ağız I ve ağız II'ye ait KKY I ve KKY II, b) Ağız I'ye ait KKY I ve ağız II'ye ait KKKY II, c) Hava çekirdekli çevrintinin ağız II'ye girmesi durumu d) Hava çekirdekli çevrintinin iki ağıza da girmesi durumu (Taştan, 2007)

Bu şekilde, ağız I'e giden akımın, ağız II üzerindeki akım engel etkisi AFB yüzeyinden V_{s1} hızıyla ağız I'e giden debidir. Benzer şekilde ağız II'ye giden akımın ağız I üzerindeki akım engel etkisi AEB yüzeyinden V_{sc2} hızıyla ağız II'ye giden debidir. Bu akım engel

2009). Bu duruma ait deney görüntüsü ve bir sonraki bölümde anlatılacak olan Flow-3D çözümüne ait vortisite dağılımı sırasıyla Resim 4.1 ve Şekil 4.5.'te gösterilmektedir.



Resim 4.1. Deney ortamında $\alpha_{12} = 90^\circ$ iken oluşan su altı çevrintisi (Taştan, 2007)



Şekil 4.5. $\alpha_{12} = 90^\circ$ iken oluşan su altı çevrintilerinin Flow-3D görüntüsü

2. Durum

$$AEB.V_{sc2} - AFB.V_{s1} > 0 \quad (4.4)$$

Bu durumda AEB ve AFB yüzeylerinden ağız II'ye doğru bir debi gitmektedir. Giden debi de Eşitlik 4.4'te gösterilmiştir. Şekil 4.4.'te gösterilen AG₁B aksı da geçirimli bir yüzey gibi davranmaktadır. Buna ek olarak sınır etkisi açısından ağız I, AG₁B aksı ile değiştirilebilir.

3. Durum

$$AEB.V_{sc2} - AFB.V_{s1} < 0 \quad (4.5)$$

Bu durumda ağız II'ye ait KKKY II'den Şekil 4.4.'te gösterilen AG₁B aksı üzerinden ağız I'e bir akım geçişi olur. Bunun sonucunda ise ağız II'ye ait kritik batıklık değeri artabilir. Bu su geçişi olurken AG₁B aksı geçirimli bir yüzey gibi davranır.

Çoklu su alma ağızlarına ait akımların kritik batıklığı nasıl etkilediği fiziksel olarak açıklandıktan sonra, bu çalışmada sayısal çözümleme kısmında kullanılan Flow 3D yazılımı hakkında 5. bölümde önce kısa bir bilgi verilecek daha sonra da 6. bölümde modellerin bilgisayar ortamında nasıl kurulduğu ve elde edilen sonuçlar açıklanacaktır.

5. SAYISAL ÇÖZÜMLEME YÖNTEMİ: FLOW-3D

Hidrolik modellerin kurulumu ve deneylerinin yapılması zaman alıcı ve pahalı olmakta bunun yanında elde edilen verilerin doğruluğu da bazı durumlarda ölçek etkilerinden dolayı uygulama boyutunda yeterli olmayabilmektedir. Günümüzde zaman ve masraf açısından avantajlı olduğu için fiziksel sistemler, sayısal modeller kullanılarak bilgisayar ortamında da incelenebilmektedir. Mevcut çalışmada da çoklu su alma ağızları için kritik batıklık değeri sayısal olarak araştırılırken Flow-3D programı kullanılacaktır. Flow-3D özellikle serbest yüzeyli akımlarla alakalı çözümler üretme ve inceleme yapmak için kullanılan bir HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) programıdır (Yıldırım, 2021).

Flow-3D, dikdörtgen çözüm ağı için VOF (Volume of Fluid) metodu kullanan ticari bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği kodlamasıdır (Guyot ve diğerleri, 2014). Bu program Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) – (Computational Fluid Dynamics (CFD)) alanında kullanılan etkili bir modeldir. Flow-3D türbülans, viskozite, sıg sular, kavitasyon, gözenekli ortamlar gibi farklı fiziki durumları modelleyebilmektedir. Bu program, akış alanının üç boyutlu analizini yapabilir ve akışkanlarla ilgili konuları içeren geniş bir pratik aralığa sahiptir. Bu yazılım, döküm, hidrolik, havacılık, deniz bilimleri, petrol, gaz vb. konularla ilgili problemlerin çözümünde kullanılmaktadır.

Programda çözümlenmesi istenen model oluşturulduktan veya hazır bir model program ortamına aktarıldıktan sonra akım alanının hesaplanması için ağ sisteminin belirlenmesi ve daha sonra ağ bloklarının oluşturulması gerekmektedir. Bir model için tek bir ağ bloğu kullanılabildiği gibi daha detaylı inceleme için iç içe geçmiş (yuvalanmış - nested) ağ blokları da kullanılabilmektedir. Ağ sistemini ve ağ bloklarını modele uygun seçtikten sonra ağ aralıklarının belirlenmesi gerekmektedir.

Modele ait ağ aralıkları belirlenir veya istenilen sayıda hücre sayısı bir ağ bloğu için tanımlanır. Bu kontrol hücrelerinin merkezlerinde (kontrol hacmi olarak da tanımlanmaktadır) o hücreye ait skaler büyüklükler yer almaktadır (Yıldırım, 2021). Programda analiz yapılırken hücrelerin yüzeylerinde ise hız gibi vektörel büyüklükler bulunur.

Bu aşamadan sonra ise başlangıç koşulları, ağ bloklarına ait sınır koşulları ve türbülans modeli belirlenmelidir.

Programda FAVOR (Fractional Area / Volume Obstacle Representation) isminde, incelenecek hücrelere ait hacmin ne kadarının hesaplanabilir ne kadarının da katı ile dolu olduğunu gösteren bir yöntem bulunmaktadır (Flow-3D Rehberi, 2008). Bu sayede kullanıcı, modelin simülasyonuna başlamadan önce ağ blokları içerisindeki katı alanı ve akışkan hareketinin gerçekleşebileceği alanı inceleyebilmektedir.

5.1. VOF (Volume of Fluid - Akışkan Hacim) Metodu

Flow-3D paket yazılımı serbest yüzeyin takibi için VOF yöntemini kullanmaktadır. VOF, program hesaplama yaparken ağ bloklarındaki hücrelerin ne kadarının dolu olduğunu belirlemede kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde hücrenin doluluk oranını temsil eden bir F katsayısı mevcuttur. Buna göre $F = 1$ ise hücre doludur, $0 < F < 1$ ise hücre kısmen doludur, $F = 0$ ise hücre boştur. Bu yöntemde Geo – Reconstruct adı verilen, serbest akışkan yüzeyi belirlemede kullanılan bir yaklaşım mevcuttur (Gümüş, Şimşek, Soydan, Aköz ve Kırkgöz, 2018). Buna göre, kısmi dolu hücrelere ait akışkan ve serbest yüzey arasındaki yüzeyin yeri o hücreye ait ağırlık merkezine göre belirlenir. Bu yüzeyin yeri o hücreye ait doluluk oranı gibi veriler kullanılarak bulunur. Bundan sonra o hücrenin serbest yüzeyine ait hız değerleri kullanılarak o hücreye taşınan veya hücreden transfer olan akışkan miktarı belirlenir. Daha sonra hücrenin son doluluk oranı hesaplanır ve bu şekilde bir döngü tamamlanır. Şekil 5.1.'de bir HAD programının bu metotla serbest yüzey-akışkan sınırını nasıl çizdiği görülmektedir.

1	1	1	.68	0
1	1	1	.42	0
1	1	.92	.09	0
1	.85	.35	0	0
.31	.09	0	0	0
0	0	0	0	0

Şekil 5.1. Hücrelerin doluluk oranı (Başyazıcı, 2007)

VOF yöntemi akışkanların birbiri ile karışmadığı akım durumları için uygun bir yöntemdir. Örneklemek gerekirse, hava kabarcıklı akımlar veya parçacık bulunduran akımların olduğu modeller için, karışım akımının ortalama özelliklerine göre analiz yapan karışım (mixture) yöntemi uygundur.

5.2. Programının Çözdüğü Eşitlikler

Flow-3D modelle alakalı incelemeler yaparken sonlu hacim yöntemini kullanmakta, süreklilik ve Navier-Stokes denklemlerini üç boyutta çözebilmektedir.

Akışkan kütlelerinin ve parçacık hareketinin rastgele doğası ve onların türbülanslı akıştaki ekstra düzensizlikleri, bu tür bir akışın teorik olarak incelemenin zor hatta imkansız olduğunu göstermektedir. Türbülanslı akışı çözmek için mevcut modeller vardır ancak türbülansı sınırsız bir ayrıntıyla inceleyememektedir. Bununla birlikte bu modeller mühendislik açısından değerli bilgiler sağlamaktadır.

Programda laminar ve türbülanslı akımları çözmek için süreklilik ve Navier-Stokes denklemleri olmak üzere temelde aynı denklemler kullanılmaktadır. Tek fark, türbülanslı akışı çözmek için Navier-Stokes denklemlerinin zaman ortalamalı olması gerektiğidir. Bunun bir sonucu olarak Navier-Stokes denklemlerinde türbülans gerilmeleri (Reynolds gerilmeleri) olarak adlandırılan bazı ilave terimler ortaya çıkmaktadır.

Navier-Stokes denklemlerinin standart hali kullanılarak türbülanslı akışlar incelenmek istenirse, çok küçük hücre boyutları ve zaman aralıklarını dikkate almak gerekmektedir. Türbülanslı akışları analiz etmek için, ilk olarak, akış özellikleri (örneğin, hız ve basınç bileşenleri) ortalama değer ve dalgalı değer toplamı olarak ifade edilmektedir.

$$u = \bar{u} + u' \quad (5.1)$$

$$p = \bar{p} + p' \quad (5.2)$$

Eşitlik 5.1 ve 5.2'deki $\bar{u}$ ve $\bar{p}$ parametreleri, sırayla zaman ortalamalı hız ve basınç değerlerini, u' ve p' ise onların dalgalanma değerlerini göstermektedir. Bu ifadeler aracılığıyla türbülanslı akışlar Navier-Stokes denklemleriyle incelenebilmektedir.

Süreklilik ve Navier-Stokes denklemlerinde, 5.1 ve 5.2 eşitlikleri yerlerine yazıldığında ve denklemlerin de zaman ortalamaları alındığında sıkıştırılamaz akışlar için Kartezyen koordinat sisteminde Eşitlik 5.3'den 5.6'ya kadar olan denklem seti elde edilmektedir (Sefidkoohi ve diğerleri, 2017).

Kartezyen koordinatlarda süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (5.3)$$

Zaman ortalamalı Navier-Stokes denklemi:

x- yönü :

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) = F_x - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \nabla^2 \bar{u} - \rho \left(\frac{\partial \overline{u'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right) \quad (5.4 - a)$$

y- yönü :

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) = F_y - \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu \nabla^2 \bar{v} - \rho \left(\frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \right) \quad (5.4 - b)$$

z- yönü :

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) = F_z - \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \mu \nabla^2 \bar{w} - \rho \left(\frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'w'}}{\partial z} \right) \quad (5.4 - c)$$

Eşitlik 5.4.(a-c)'deki terimlerden:

ρ : Sıvı yoğunluğu

p : Basınç

μ : Dinamik viskozite

$\bar{u}$: x yönündeki ortalama hız

$\bar{v}$: y yönündeki ortalama hız

$\bar{w}$: z yönündeki ortalama hız

t : zaman

F_x = x yönündeki kütle bileşeni

F_y = y yönündeki kütle bileşeni

F_z = z yönündeki kütle bileşeni

Zaman ortalamalı Navier-Stokes denklemlerinin (5.4 a-c eşitlikleri) sağ tarafındaki parantez içi son terimler Reynolds gerilmelerini göstermektedir.

Eşitlik 5.4 (a-c) ile Navier-Stokes denklemlerinin tipik formu arasındaki tek fark, Eşitlik 5.4 (a-c)'ye Reynolds gerilmelerinin eklenmesidir. Türbülans modelleri, bu terimlerin miktarını tahmin ederek doğru çözümü bulmayı amaçlar. Çoğu türbülans modelinde, Reynolds gerilmelerini belirlemek için “Boussinesq Teorisi” kullanılır. Türbülans viskozite katsayısına sahip bu teori, Reynolds gerilmelerini hız gradyanlarıyla ilişkilendirir.

$$\overline{u'_i u'_j} = \nu_t \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (5.5)$$

$$\tau_{i,j} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (5.6)$$

Eşitlik 5.5 ve 5.6'da gösterilen μ_t ve ν_t sırasıyla dinamik ve kinematik girdap viskozitesidir ve $\mu_t = \rho \nu_t$ 'dür. Girdap viskozitesi, türbülans gerilmelerini hesaplamak için uygulandığından, türbülanslı akış özelliklerinin bir fonksiyonu olmalıdır. Akış özelliklerinin girdap viskozite boyutuna [m^2/s] göre formülize etmenin en uygun yönteminin hız ve uzunluk birimlerini kullanmak olduğu belirtilmektedir. Bu nedenle, dinamik girdap viskozitesi Eşitlik 5.7 ile temsil edilir.

$$\mu_t = C_p \nu_t L \quad (5.7)$$

Eşitlik 5.7'de C sabit bir katsayı, ρ sıvı yoğunluğu, ν_t hız ve L uzunluk büyüklüğüdür.

5.3. Türbülans Modeli Tipleri

Navier-Stokes denklemlerinde ortaya çıkan ek terimleri çözmek için türbülans modelleri kullanılmaktadır. Farklı araştırmacılar tarafından türbülanslı akışları çözmek için çeşitli türbülans modelleri geliştirilmiştir. Bu modeller türbülans miktarını hesaplamak için içerdikleri diferansiyel denklemler açısından sıfır eşitlikli, bir eşitlikli, iki eşitlikli, gerilme eşitliği içeren, büyük girdapları simüle eden modeller olmak üzere kategorilendirilmektedir (Sefidkoobi ve diğerleri, 2017).

Sıfır Denklemli Modeller

Bu modellerde türbülans miktarlarını belirlemek için diferansiyel denklemler kullanılmaz.

Bu modeller nispeten basittir ve laboratuvar verilerine dayalı olarak formülize edilirler. Bu modellerin bazı türleri; sabit girdap viskozitesi, Prandtl karışım uzunluğu modeli ve Prandtl serbest kesme tabakası modelidir.

Bir Denklemlerli Modeller

Bu modeller, türbülans miktarını k cinsinden temsil eden bir diferansiyel denklem kullanır. Burada k , Eşitlik 5.8 ile hesaplanan türbülans kinetik enerjisidir:

$$k = u'^2 + v'^2 + w'^2 \quad (5.8)$$

Eşitlik 5.7'deki hız büyüklüğü ise şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$v_t = \sqrt{k} \quad (5.9)$$

k parametresi için Navier-Stokes denklemleri çözüldüğünde bu parametre belirlenebilir.

İki Denklemlerli Modeller

Bu modellerde uzunluk ölçüleri tek denklemlerli modellerden farklı olarak deneysel ilişkilere dayanmadan belirlenir. Bu modellerde, diferansiyel denklemlerin çözümünden elde edilen uzunluk ve hız büyüklükleri kullanılarak türbülans miktarları tahmin edilir. Bu modellerden bazıları girdap viskozitesini, cebirsel ve doğrusal olmayan Reynolds gerilmesini içerir. Bu modeller ayrıca Navier-Stokes denklemi kullanılarak k parametresine benzer tahmin edilen türbülans sönümlenme hızı veya ϵ [m^2/s^3] olarak gösterilen bir başka türbülans miktarını içerir. ϵ bir uzunluk ölçüsünü temsil etmektedir. Uzunluk ölçüsü olarak, türbülanslı sıvı kütlelerine aktaran kinetik enerjiye sahip büyük girdapların (eddy) boyutunu temsil eder.

Gerilme Denklemlerli Modeller

Bu modeller Renormalization Group – RNG (Yeniden Normalleştirme Grubu) türbülans modeline dayanmaktadır. Bu yaklaşım, türbülans kinetik enerjisi ve yayılma hızı gibi

türbülans miktarlarını tahmin etmek için ortalama denklemlerin çıkarılmasında kullanılan istatistiksel yöntemleri içerir. RNG modeli, k- ϵ modelinde bulunanlar gibi ilişkileri kullanır. Aradaki fark, deneysel olarak çıkarılan k- ϵ modelindeki sabit katsayıların RNG modelinde kesin olarak hesaplanmasıdır.

Büyük Girdap Simülasyon Modeli (Large Eddy Simulation Model):

Bu modelin ana fikri, hesaplama ağı kullanılarak hesaplanabilen tüm türbülanslı yapıları doğrudan hesaplamak ve hesaplanamayan küçük yapıları da tahmin etmektir.

Türbülanslı bir akımın simülasyonu, bu beş modelden biri kullanılarak FLOW-3D'de gerçekleştirilir. FLOW-3D tarafından kullanılan türbülans modelleri şunları içerir: Prandtl karışım uzunluğu, tek denklemlili türbülans kinetik enerji denklemi, iki denklemlili k- ϵ ve k-w modeli, Renormalization Group (RNG) modeli ve Large Eddy Simulation (LES) modeli.

Çalışmada türbülans modeli olarak, daha sonra da açıklanacağı üzere, büyük girdapları çözen, küçük girdapları modelleyen LES türbülans modeli seçilmiştir.

5.4. Program Arayüzü

Programda üst menü dışında sekme şeklinde 4 temel bölüm bulunmaktadır.

Simulation Manager

Bu bölümde çalışma alanları (workspace) ve bu çalışma alanları içerisinde model dosyaları oluşturulmaktadır. Model oluşturulduktan sonra da simülasyon bu bölümden çalıştırılır.

Model Setup

Bu bölümde incelenmek istenen model geometrisinin oluşturulacağı Meshing&Geometry alt sekmesinin yanında General, Physics, Fluids, Output ve Numerics menüleri yer almaktadır.

General: Bu kısımda simülasyonun kaç saniye çalıştırılacağı, birim sistemi, kaç akışkanla çalışılacağı, akımın sıkıştırılamaz olup olmadığı, gibi seçenekler belirlenmektedir.

Physics: Bu sekmede çeşitli özelliklerin programa yazıldığı 27 seçenek vardır. Yapılan modellemelerde, yer çekimi ivmesinin yazıldığı “Gravity and non-inertial reference frame” ve türbülans modelinin belirlendiği “Viscosity and Turbulence” seçenekleri kullanılmıştır

Fluids: Bu sekme altında Properties ve Equations bölümleri bulunmaktadır. Properties menüsü altındaki “Fluid 1” menüsünden 20° sıcaklıktaki su özellikleri hazır olarak seçilmiştir.

Meshing & Geometry: Bu bölümde model geometrisi program araçları ile oluşturulabilmekte aynı zamanda başka bir programda hazırlanan bir çizim dosyası program içine aktarılabilir (örneğin Autocad programında hazırlanan çizimin aktarıldığı stl dosyasıyla). Model oluşturulduktan sonra kartezyen ve radyal ağ sistemlerinden biri seçilmekte ve ağ blokları oluşturulmaktadır. Daha sonra ağ bloğuna/bloklarına ait ağ aralıkları ve sınır şartları belirlenmektedir.

Flow-3D diğer HAD programlarına kıyasla daha kolay bir mesh (çözüm ağı) sistemine sahiptir (Sungur, 2018).

Bu bölümde “Add Mesh Block” a tıklayıp istenilen çözüm ağı (mesh) blokları model üzerinde oluşturulur. Daha sonra çözüm ağı aralıkları veya çözüm ağı içerisindeki hücre sayısı ve çözüm ağı koordinatları belirlenir. “Mesh Block(s) Info” seçildiğinde çözüm ağı bloklarına ait hücre sayıları görülebilir.

Çözüm ağı bloklarına ait koordinatların yazıldığı bölümlerin yanından (örneğin: X Min) Boundary Condition (Sınır Koşulları) menüsü açılıp ilgili sınıra ait koşul belirlenir. Bu açılan pencere içinde “Boundary type (Sınır tipi)” şu şekilde sıralanmaktadır:

- Symmetry: Bu sınır koşulunda sınırdaki akım ve sürtünme yoktur.
- Continuation: Bu sınır koşulunda sınır boyunca akım sürtünmesiz olarak sürekli devam eder.

- Specified pressure: Bu sınır koşulu kapalı akışkan rezervuarları, mekanik bir cihazdan uygulanan basıncı, laboratuvar ortam koşulu gibi durumları temsilen seçilir.
- Grid overlay: Serbest bir yüzey gibi davranır. Bir sınır yüzeyinden geçen debiyi incelemek için vs uygundur.
- Wave: Bu sınır koşulunda sayıları 100'e kadar çıkan, başlangıçları, frekansları, genlikleri birbirinden farklı olabilecek şekilde sinüzoidal yüzey dalgaları tanımlanabilir.
- Wall: Sınır geçirimsiz duvar olarak tanımlanacaksa seçilir.
- Periodic: İlgili fiziksel geometri ve beklenen akış/termal çözüm modelinin periyodik olarak tekrar eden bir yapıya sahip olduğu durumlarda kullanılır. Problemden hesaplama çabasını azaltır.
- Specified velocity: Sınırdaki belli bir akışkan hızı belirlenecekse seçilir.
- Outflow: Sınırdaki serbest su akışı için seçilir.
- Volume flow rate: Sınırdan verilecek veya temin edilecek akışkan bu sınır koşuluyla belirlenir.

Output: Bu kısımda modelin simülasyonu bittikten sonra incelenmek istenen çıktı değerleri seçilmektedir.

Numerics: Bu kısımda Volume-of-Fluid Advection ve Momentum Advection bölümlerinde değişiklik yapılabilmektedir (Sungur, 2018, Evranos, 2019).

Bu çalışmada ise Numerics kısmında bir değişiklik yapılmamıştır.

Analyze

Bu bölümde simülasyon bittikten sonra program tarafından oluşturulan çıktı dosyaları yazı (text), grafik (grafical) olarak 1 - 2 veya 3 boyutlu görünümde incelenebilmektedir.

Display

Bu sekmede simülasyona ait çıktı dosyaları görüntülenmektedir. Burada çıktılara ait videolar da kaydedilebilmektedir.

Modellerin oluşturulduğu ve simülasyonların çözümlendiği dizüstü bilgisayar özellikleri aşağıdaki gibi sıralanmaktadır;

ASUS FX506LH

İşlemci: Intel(R) Core(TM) i5-10300H CPU @ 2.50GHz

RAM: 2*8 GB DDR4 RAM

Depolama: 512 GB Micron SSD

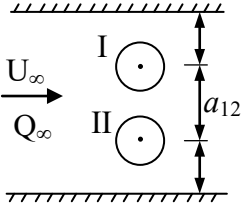
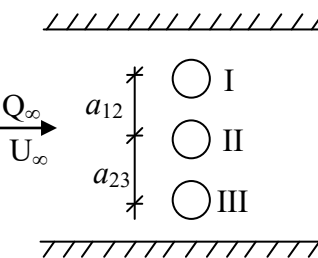
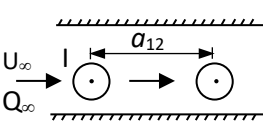
Ekran Kartı: NVIDIA Geforce GTX 1650 128 bit GDDR6 4 GB

Özellikleri belirtilen bilgisayarda, Bölüm 6'da anlatılacak modele ait 50 saniyelik bir simülasyonun çözümü, modele göre değişmekle birlikte 4 - 5 gün arası sürmektedir.

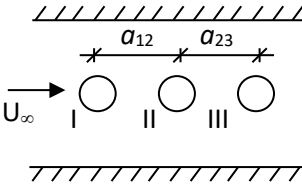
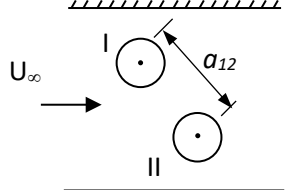
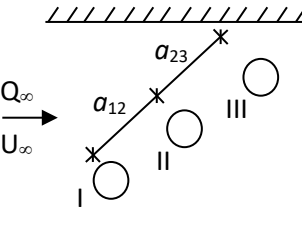
6. SAYISAL ÇALIŞMA: DÜŞEY BORU TİPİ ÇOKLU SU ALMA AĞIZLARININ MODELLENMESİ

Bu bölümde anlatılan sayısal modellemelerde, 3. bölümde bahsedilen Taştan (2007)'nin deneysel çalışması esas alınmıştır. Bu çalışmada sayısal olarak modellenen deney setlerine ait tablo aşağıdaki Çizelge 6.1'de verilmiştir (Bu tabloda Q_∞ ağız grubuna yaklaşan akımın debisini göstermektedir).

Çizelge 6.1. Modellenen deney setleri

Şekil	Deney No	a_{12}/D	c/D	Q_∞ (lt/sn)	Q_1 (lt/sn)	Q_2 (lt/sn)	Q_3 (lt/sn)
	1.1	2	4	15,83	6	6	-
	1.2			15,48	6	2	-
	1.3			15,66	4	8	
	1.4			15,1	2	8	
	1.5			15,1	3	6	
	2.1	2	4	17,58	4	2	6
	2.2			22,8	5	5	5
	3.1	2	4	20,22	6	6	-
	3.2			21	7	7	-
	3.3	4	4	22,94	10	5	-
	3.4	2	4	18,42	10	1	-
	3.5	2	4	14,76	2	8	-
	3.6	15	4	18,34	10	2,5	-

Çizelge 6.1. (devamı) Modellenen deney setleri

Şekil	Deney No	a_{12}/D	c/D	Q_∞ (lt/sn)	Q_1 (lt/sn)	Q_2 (lt/sn)	Q_3 (lt/sn)
	4.1	2	4	21,7	5	5	5
	4.2	2	4	18,16	1	7,5	0,75
	5.1	2	4	12	6	1	-
	5.2	2	4	16,49	4	2	-
	6.1	2	4	22,11	5	5	5
	6.2	2	4	19,37	6	2	1

6.1. Sayısal Modelin Kurulumu

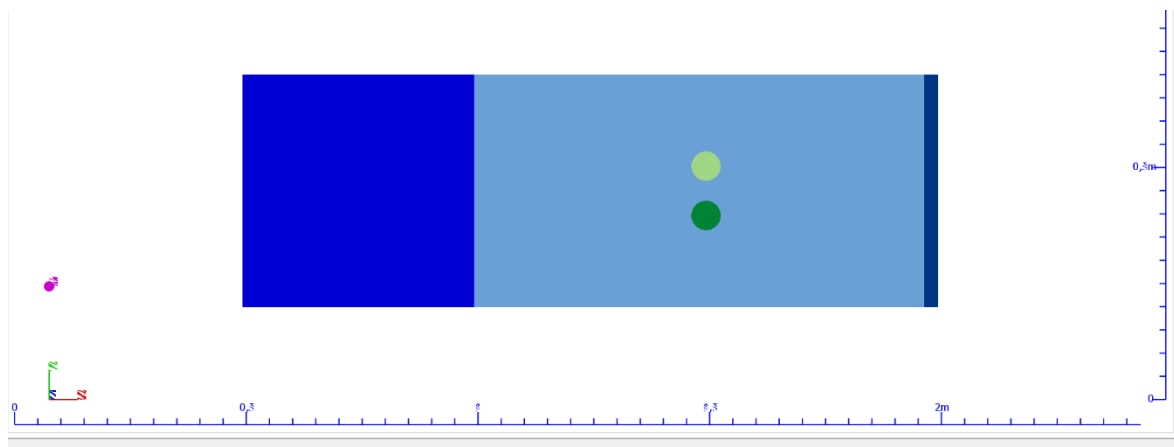
Sayısal modelin kurulumunun ilk aşaması deneydeki fiziksel modelin yazılıma tanıtılmasıdır. Bu bağlamda, 1,5 m uzunluğunda dikdörtgen kesitli, yatay tabanlı bir açık kanal düzeneği ve akışkan olarak 20° sıcaklıkta bulunan su kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan kanalın boyu 7,5 m olmasına rağmen, 1,5 m’lik kanal uzunluğunun, daha uzun kanal uzunluklarına kıyasla simülasyonlarda ciddi bir fark oluşturmadığı görüldüğünden çözüm süresinden tasarruf etmek adına bu kanal uzunluğunun seçilmesi yeterli görülmüştür. Kanal boyuna eksen “x” yönünde olup, kanal uzunluğu yaklaşık 1,5 m’dir. Kanal uzunluğunun değişme nedeni su alma ağızlarının konumlarıdır. Su alma ağızları $x = 0,5$ m dolaylarında konumlandırılmıştır.

Kanal genişliği 0,5 m olup, fiziki deneylerdeki kanal genişliğinin aynısıdır. Kanal yüksekliği 0,6 m olup, z düşey yönü göstermek üzere, $z = -0,1$ m’de başlayıp $z = 0,5$ m’de

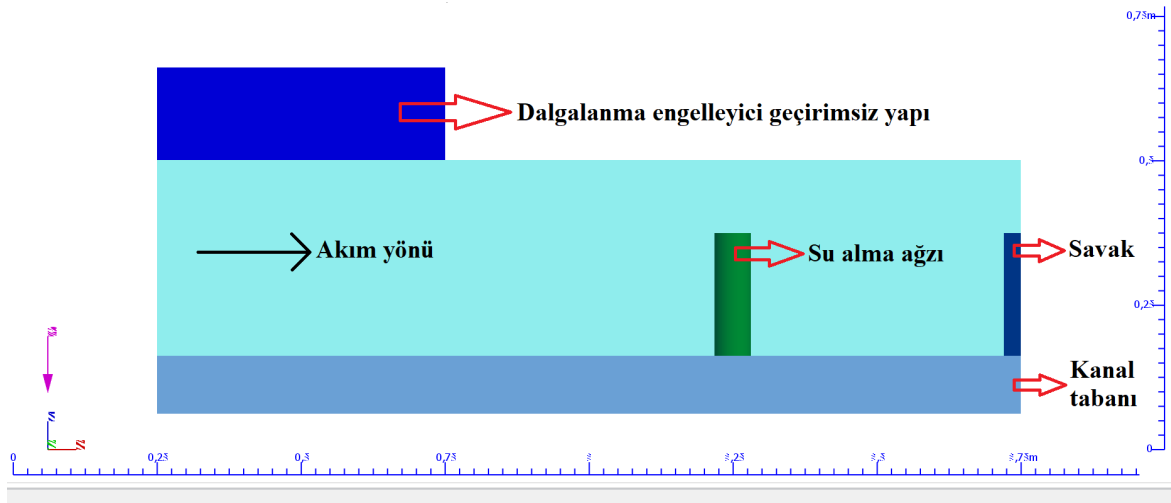
bitmektedir. Kanal tabanını temsilen de 0,1 m yüksekliğinde, $z = -0,1$ m’de başlayıp $z = 0$ m’de biten katı, geçirimsiz bir yapı kullanılmıştır.

Kanal tabanında ağız merkezlerinin olduğu yerde 0,0266 m yarıçapında boşluklar oluşturulmuştur. Taştan (2007)’nin yaptığı deneylerde 0,03 m cidar kalınlığına sahip borular kullanılmasına rağmen, sayısal modellerde bu et kalınlığına sahip boruların modellenebilmesi için ince ağ bloklarının (bu çalışmada kullanılan ağ aralıklarından daha da küçük) kullanılması gerekmekte, bu durum da çözüm süresini oldukça arttırmaktadır. Dolayısıyla ağ aralığını gereğinden daha fazla küçültmeden borulardaki ovalliğin tanımlanabilmesi için borulara ait cidar kalınlığı 0,05 m seçilmiştir. Ayrıca, Yıldırım ve Kocabaş (1995) ve Yıldırım ve diğerleri (2000)’de belirtildiği üzere, boru cidarlarının kritik batıklık üzerindeki etkisi çok büyük et kalınlıkları dışında (et kalınlığının boru çapına yaklaştığı durumlar) önemli olmadığından bu değişikliğin de büyük farklar oluşturmayacağı düşünülmektedir.

Kanal sonunda yüksekliği değiştirilebilen, deneylerde bulunan ayarlanabilir kapağı temsil eden düşey bir katı engel bulunmaktadır. Kanal başlangıcında su yüzeyine temas eden, su yüzeyindeki dalgalanmaları engelleme amaçlı 0,5 m uzunluğunda ve kanal genişliğince katı bir yapı kullanılmıştır. Kanal ve su alma ağızlarına ait plan Şekil 6.1’de, yan görünüm Şekil 6.2.’de görülmektedir.



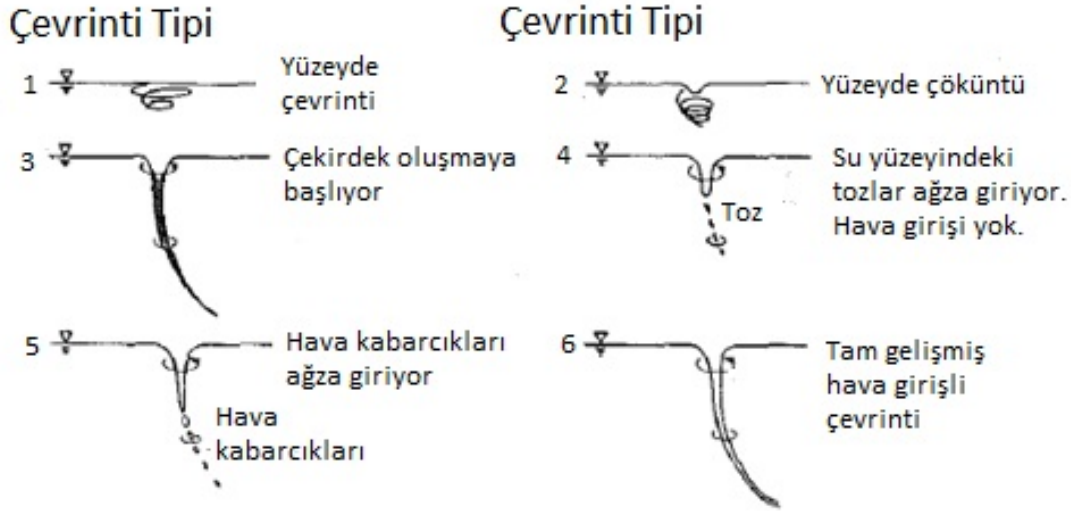
Şekil 6.1. Modelin plan görünümü



Şekil 6.2. Modelin yan görünümü

Yukarıda anlatılan fiziksel model, yazılımda oluşturulduktan sonra çözüm ağlarının yazılıma tanıtılması gerekir. Modelde, tüm kanalı kapsayacak bir ana ağ bloğu ve her bir su alma ağızını ve civarındaki akımı tanımlayacak ana ağ bloğu içine tanımlanmış ağ blokları (nested mesh blocks) kullanılmıştır. Dolayısıyla örneğin ikili ağız durumunda toplam 3 adet çözüm ağı bloğu bulunmaktadır. Çözüm ağı bloklarının oluşturulmasından sonra ağ aralıklarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada ağ aralıkları belirlenirken çevrintinin özellikleri ve şekli düşünülerek bazı çıkarımlar yapıldığından bu noktada genel olarak su alma ağızlarında oluşan çevrinti tipleri ve çevrintinin geometrik profili hakkında bilgi vermekte fayda vardır.

Padmanabhan ve Hecker (1984) pompalı su alma ağızlarına hava girişi üzerinde boyut etkisinin varlığını araştırdığı çalışmalarında, su alma ağızlarında oluşan çevrinti tiplerini sınıflandırmışlardır (Şekil 6.3). Ağza hava girişinin başladığı çevrinti tipi 6 nolu çevrintidir. 4 ve 5 nolu çevrinti tiplerinde çekirdek oluşmuş ve aşağı doğru uzamış olmasına rağmen ağza hava girişi henüz gerçekleşmemiştir. Fakat Yıldırım ve Kocabaş (1995), Yıldırım ve Taştan (2009) ve Taştan (2007)'nin su alma ağızlarında hava girişi çevrinti ile ilgili yaptıkları deneysel çalışmalarda, 5 nolu çevrinti tipi ile 6 nolu çevrinti tipinin oluştuğu batıklıklar arasında bir miktar fark olmakla beraber bu farkın çok da büyük olmadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 6.3. Çevrinti tipleri (Padmanabhan ve Hecker, 1984)

Su alma yapılarında oluşan hava çekirdekli çevrintinin profili için ise literatürde en çok kullanılan iki eşitlik aşağıda verilmiştir. Bunlar Vatistas, Kozel ve Mih (1991) ve Hite ve Mih (1994)'in önerdiği eşitliklerdir.

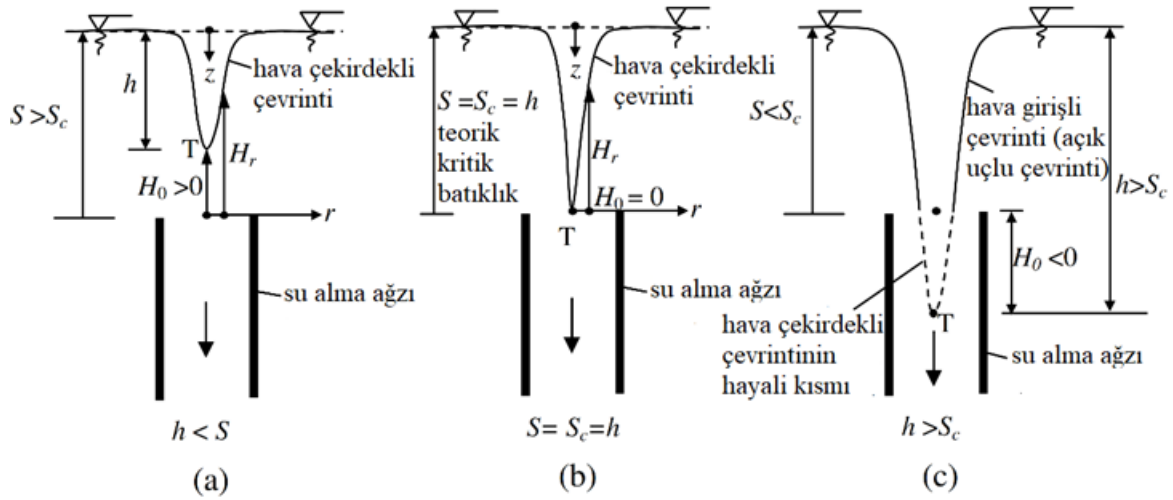
Vatistas, Kozel ve Mih (1991) eşitliği:

$$\frac{z}{h} = 1 - \frac{2}{\pi} \tan^{-1}(\beta R^2) \quad (6.1)$$

Hite ve Mih (1994) eşitliği:

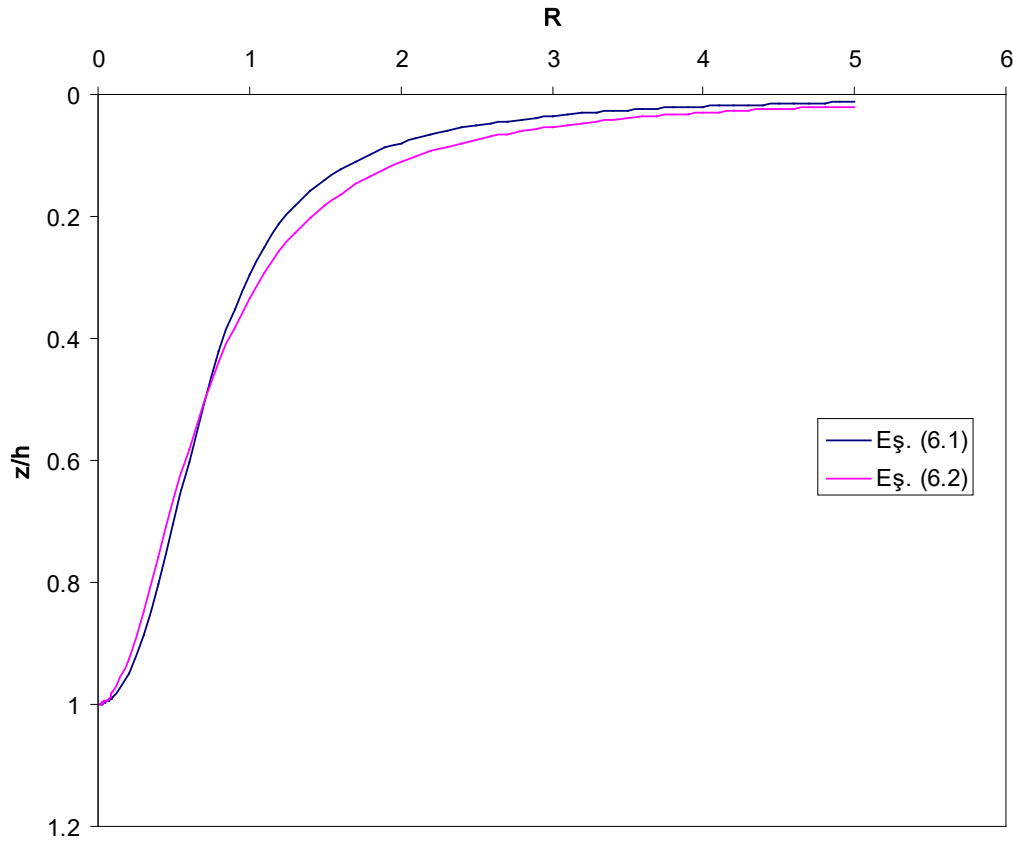
$$\frac{z}{h} = \frac{1}{1+2R^2} \quad (6.2)$$

Bu eşitliklerde; $R = r/r_m$, düşey hava çekirdekli çevrinti çöküntüsü merkezinden veya düşey su alma ağzı merkezinden ölçülen boyutsuz yatay radyal mesafe; r = hava çekirdekli çevrintinin düşey merkez ekseninden yatay radyal mesafe; r_m = hava çekirdekli çevrintinin viskoz çekirdek yarıçapı (viskoz bölgenin dış sınır yarıçapı veya iç viskoz çekirdek ile dış viskoz olmayan bölgeyi ayıran ve maksimum teğetsel hızın olduğu yarıçap); z = hava çekirdekli çevrinti merkezi eksen boyunca yatay serbest yüzeyden düşey aşağı doğru eksen [Şekil 6.4, $z = h_v - (H_r - H_0)$]; h_v = hava çekirdekli çevrintinin düşey uzunluğu; H_r = r 'deki su yüzeyi yüksekliği; H_0 = düşey hava çekirdekli çevrintinin alt kapalı uç noktasının yüksekliği; ve β = test verilerine uyacak şekilde seçilen sabit bir katsayıdır ve genelde $\beta = 2$ olarak alınmaktadır (Sun ve Liu, 2015).



Şekil 6.4. Hava çekirdekli çevrinti profili için tanımlanan geometrik büyüklükler a) Hava girişi yok, b) Kritik durum, c) Sürekli hava girişi

Eşitlikler 6.1 ve 6.2'ye göre tipik hava çekirdekli çevrintilerin profili Şekil 6.5.'te verilmiştir. Bu profiller incelendiğinde, çevrintinin alt kısmının oldukça dar bir yarıçapa sahip olduğu görülmektedir. Örneğin $z/h_v = 0,8$ için $R \cong 0,35$ civarlarındadır. $R = r/r_m$ olduğundan bu yükseklikteki çevrinti yarıçapını (r) bulabilmek için r_m değeri gerekir. r_m , Rankine vorteks modeline göre viskoz iç çekirdek ve viskoz olmayan bölgenin ayrımındaki radyal mesafeyi gösterir. Bu mesafede silindirik koordinatlardaki teğetsel hız maksimum olmaktadır. r_m değeri ise ancak ölçüm yapılarak bulunabilir. Ancak Odgaard (1986) r_m değerini ağız yarıçapı olarak kabul etmiştir. Bu çalışma incelen su alma ağzlarının iç yarıçapı 2,66 cm olduğuna göre $r_m = 2,66$ cm alınırsa, $z/h_v = 0,8$ için $r \cong 0,35 \times 2,66 \cong 0,9$ cm bulunur. Bu değer çevrintinin daha alt uçlarına indikçe daha da azalır. Ayrıca sunulan eşitliklerin hava çekirdekli çevrinti boyunun ağza yakın yarısında üst yarıya göre daha hatalı tahminler de verebildiği literatürde belirtilmiştir. Sonuç olarak hava çekirdekli çevrintinin yarıçapının ağız merkezine doğru yaklaştıkça oldukça daraldığı açıktır.



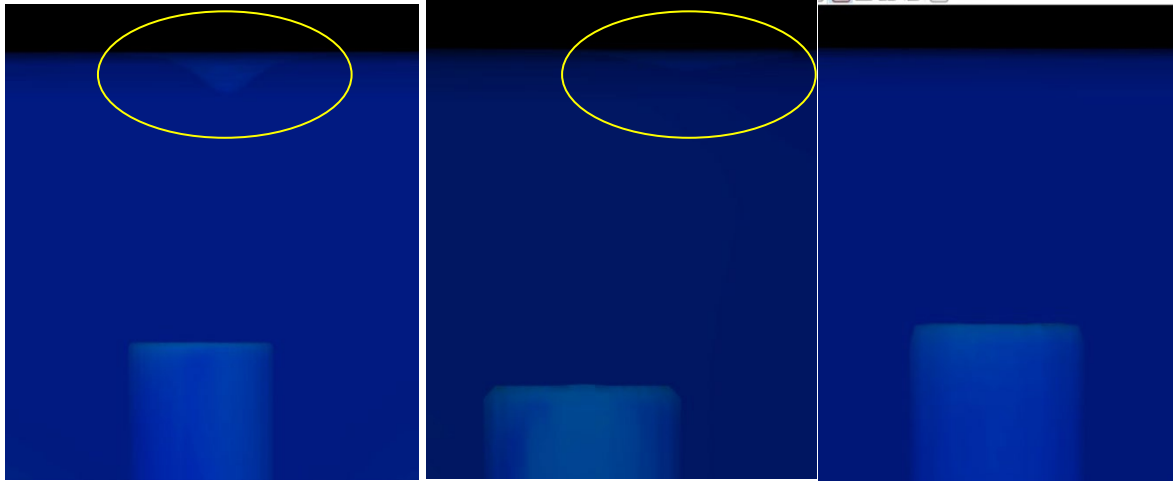
Şekil 6.5. Eşitlikler 6.1 ve 6.2'ye göre hava çekirdekli çevrinti profilleri

Yukarıda değinilen iki nokta göz önüne alındığında Padmanabhan ve Hecker (1984)'de tanımlanan 6 nolu çevrintinin tüm yükseklik boyunca modellenebilmesi için (özellikle ağza yakın alt kısımlarının) çok ince ağ aralığı (0,1 cm mertebesinde) gerekmektedir. Bu durum, kritik batıklığın tahmini için yapılacak sadece bir adet deneme-yanılma simülasyonun bile, bu çalışmada kullanılan bilgisayar imkanları da göz önüne alındığında haftalar sürmesine yol açacaktır. Bu nedenle bu çalışmada su alma ağızları çevresindeki çözüm ağlarına ait ağ aralığına karar verilirken hava girişli çevrintinin tümünün değil ama belirli bir kısmının gözlemleneceği bir ağ aralığı belirlenmeye çalışılmıştır (5 nolu çevrinti tipi). Gerek (5) nolu çevrintinin oluştuğu batıklık ile (6) nolu çevrintinin oluştuğu batıklığın arasındaki farkın çok büyük olmadığı gözlemine dayanarak, gerekse ileride bahsedilecek akım alanındaki vortisite dağılımından yararlanarak sayısal analizde (4) veya (5) nolu çevrinti gibi gözükken çevrintilerin de aslında hava girişli çevrinti olarak düşünülebileceği kabulü yapılmıştır.

Aşağıdaki Çizelge 6.2. ve Şekil 6.6.'da farklı ağ aralıklarında aynı debi ve batıklık değerinde hava çekirdekli çevrintinin ne kadarlık bir kısmının sayısal model sonucunda görülebildiği belirtilmiştir.

Çizelge 6.2. $\alpha_{12} = 90^\circ$, $a_{12}/D = 2$, $c/D = 4$, $Q_1 = 4$ lt/s, $Q_2 = 8$ lt/s, $Q_\infty = 15,86$ lt/s, $h = 34$ cm değerleri için ağ aralığı ile hava çekirdekli çevrinti uzunluğu arasındaki ilişki

Ağ aralığı (cm)	Hava çekirdekli çevrinti düşey uzunluğu (cm)
0,25	1,7
0,5	0,85
1	0



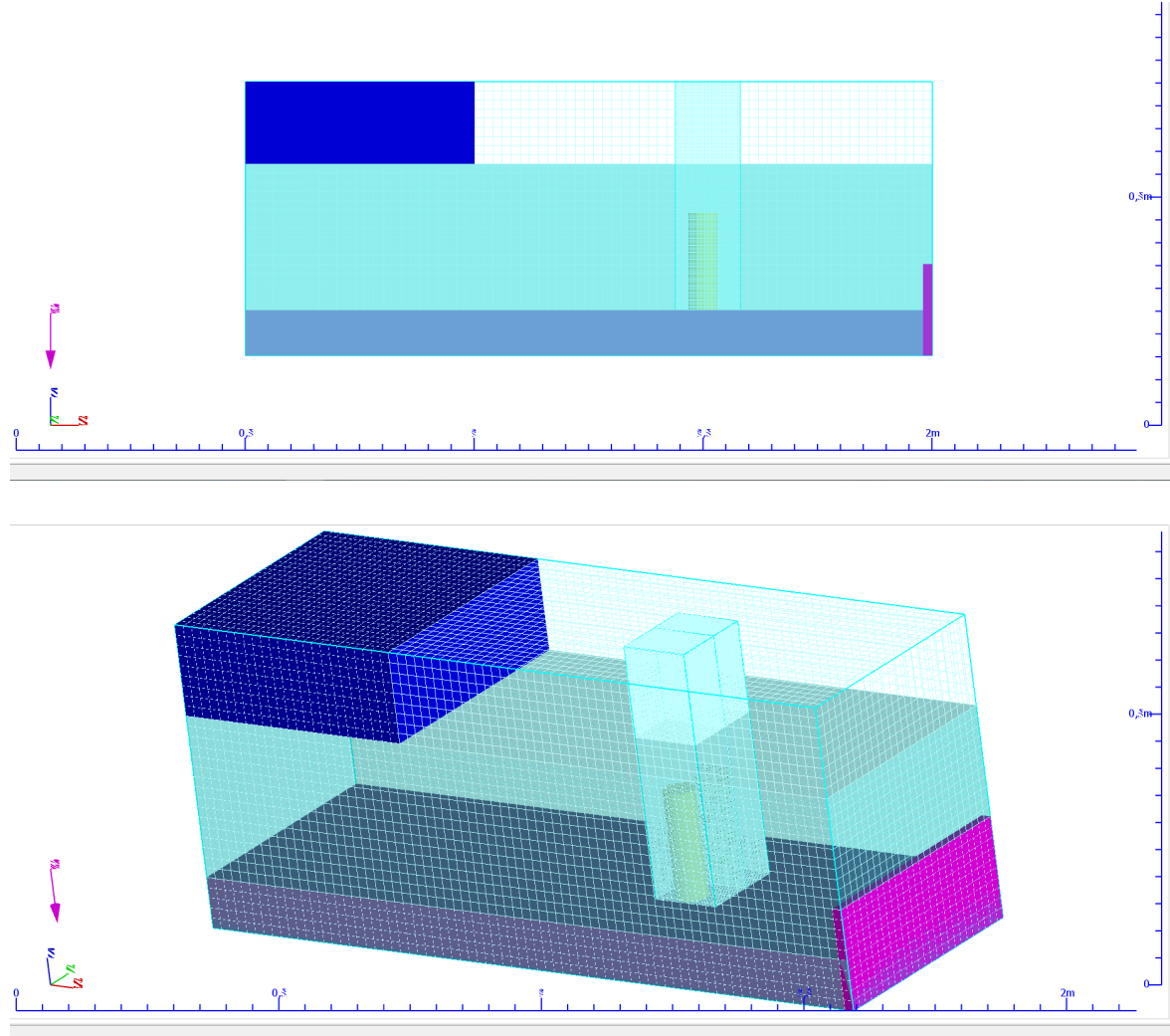
Şekil 6.6. Farklı ağ aralıklarında hava çekirdekli çevrintinin görünümü

Ayrıca bu konu ile ilgili yapılan çalışmalarda kullanılan ağ aralıkları da aşağıdaki Çizelge 6.3.'te verilmiştir.

Çizelge 6.3. Mevcut çalışmalarda kullanılan ağ aralıkları

Çalışma	Ağ aralığı (cm)
Aybar (2012)	0,5
Sungur (2018)	0,3
Evranoş (2019)	0,5
Yıldırım (2020)	0,25
Tataroğlu (2014)	0,75

Bu açıklamalar ışığında, programın akışkan hareketini hesaplaması için oluşturulan ana ağ bloğu 0,02 m aralıklı, çevrıntilerin daha detaylı gözlemi ve ağızlardan su temini için kullanılan ağız boruları etrafındaki ağ blokları 0,0025 m aralıklı belirlenmiştir. Ana ağ bloğu ve su alma ağızları çevresinde kullanılan ağ blokları Şekil 6.7.'de görülmektedir.



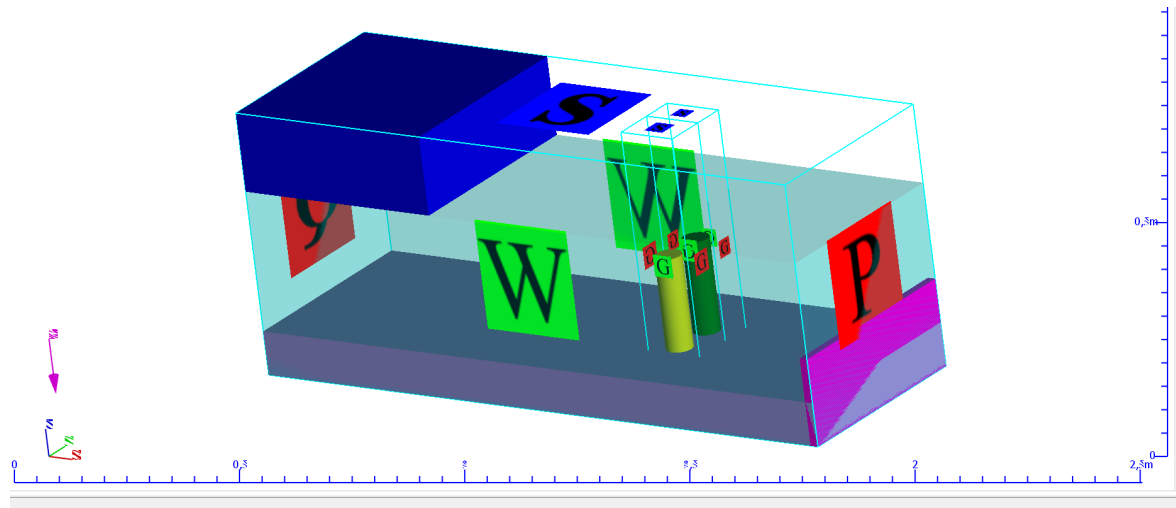
Şekil 6.7. Modele ait ağ blokları

Ağ blokları oluşturulduktan sonra bloklara ait sınır koşulları belirlenmiştir. Buna göre temel çözüm ağı bloğunun x yönünde minimum değeri için “Debi (Volume flow rate)” seçilip kanala verilecek su değeri deneylere ait verilerle aynı olarak m^3 cinsinden yazılmıştır. Temel ağ bloğuna ait x maksimum değeri “Specified pressure (Basınç)” seçilip ilgili simülasyon için seçilen su yükseklik değeri metre cinsinden “Fluid elevation (Su yüksekliği)” bölümüne yazılmıştır. Temel ağ bloğunun sınırları y minimum, y

maksimum, z minimum “Wall (Duvar)” olarak seçilmiştir. İlgili çözüm ağı bloğunun z maksimum değeri “Symmetry (Simetri)” olarak belirlenmiştir.

Su alma ağızı etrafındaki ince aralıklı çözüm ağı bloklarının sınır şartları z minimum hariç “Grid overlay” olarak belirlenmiştir. z minimum için $-z$ yönünde su çekilmesi amacıyla “Volume flow rate (Debi)” seçilmiştir. Ağızlardan su çekimi yapılırken disk şeklinde kuyu tipi kütle kaynaklarının kullanımı denenmiş fakat sınır koşulu olarak su çekilmesine karar verilmiştir. Başlangıç koşulu olarak da simülasyon başlangıcında kanalın seçilen su yüksekliği ile dolu olduğu kabul edilmiştir.

Ağ bloklarına ait sınır şartı seçimleri model üzerinde Şekil 6.8.’de görülmektedir.



Şekil 6.8. Model ağ bloklarının sınır koşulları

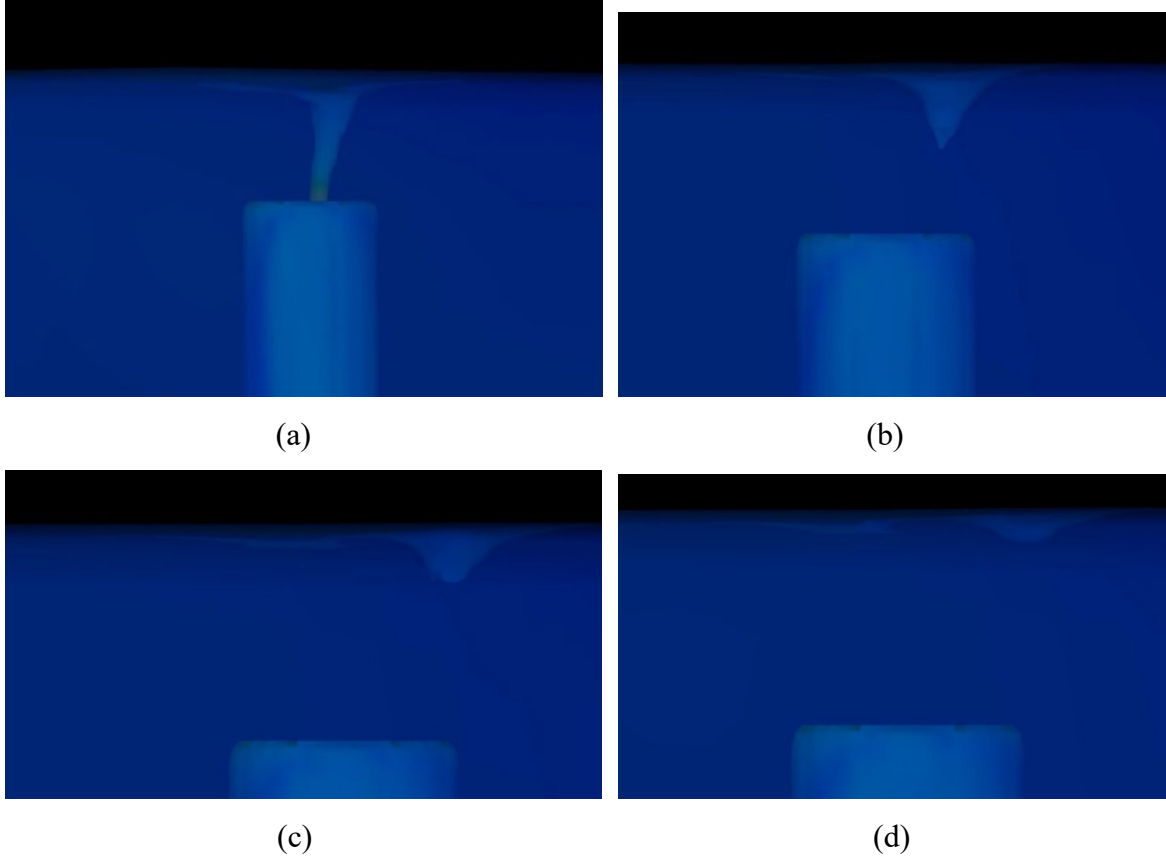
Bu çalışmada incelenen çoklu su alma ağızlarına ait kritik batıklığın sayısal olarak bulunması konusu üzerinde sayısal modelde kullanılacak türbülans modelinin seçimi de önemlidir. Bu çalışmada türbülans modeli olarak Büyük Girdap Simülasyonu (Large Eddy Simulation) seçilmiştir. LES türbülans modelinde önceki bölümde de belirtildiği gibi, büyük çvrntiler direk olarak çözülürken küçük çvrntiler modellenir. Dolayısıyla DNS (direct numerical simulation) çözümüne göre çözüm süresi kısıyken tüm çvrntilerin modellendiği k- ϵ veya k-w gibi türbülans modellerine göre ise daha ince bir çözüm aralığı gerektirdiğinden çözüm süresi daha uzundur. Büyük çvrntiler akıma ait momentumun, enerjinin ve kütlenin büyük bölümünü taşıdığından akım sınırlarına ve sınır koşullarına oldukça bağımlıyken küçük çvrntiler izotropik olmaya daha yakın olup sınırlardan çok

etkilenmezler. LES modelinin çevrinti içeren akımlarda çevrintileri yakalayabilme potansiyeli, özellikle çözüm ağı aralığının yeterince küçük olması durumunda, diğer türbülans modellerine göre daha fazladır (Tokyay ve Constantinescu 2006).

Su alma yapılarında hava çekirdekli çevrinti oluşumunu inceleyen benzer çalışmaların çoğunda da LES modeli kullanıldığından (Evranoş, 2019; Sungur, 2018; Yıldırım, 2020) bu çalışmada da türbülans modeli olarak LES seçilmiştir. Çizelge 6.4. ve Şekil 6.9.'da aynı geometri ve akım koşullarında, laminar akım, RNG, k-w, LES türbülans modelleriyle çözülmüş farklı çözümler görülmektedir. Buradan da görüleceği üzere LES modelinin hava çekirdekli çevrintiyi daha detaylı modellediği görülmektedir.

Çizelge 6.4. Türbülans modelinin etkisi ($\alpha_{12} = 90^\circ$, $a_{12}/D = 2$, $Q_1 = 1$ lt/s, $Q_2 = 8$ lt/s, $Q_\infty = 19,1$ lt/s, su derinliği = 28 cm)

Türbülans modeli	Hava çekirdekli çevrinti düşey uzunluğu (cm)
LES	Hava girişi var
RNG	3,56
k-w	1,92
Laminer	1,1



Şekil 6.9. Farklı türbülans modellerinde hava çekirdekli çevrintinin görünümü: a) LES, b) RNG, c) k-w, d) Laminer

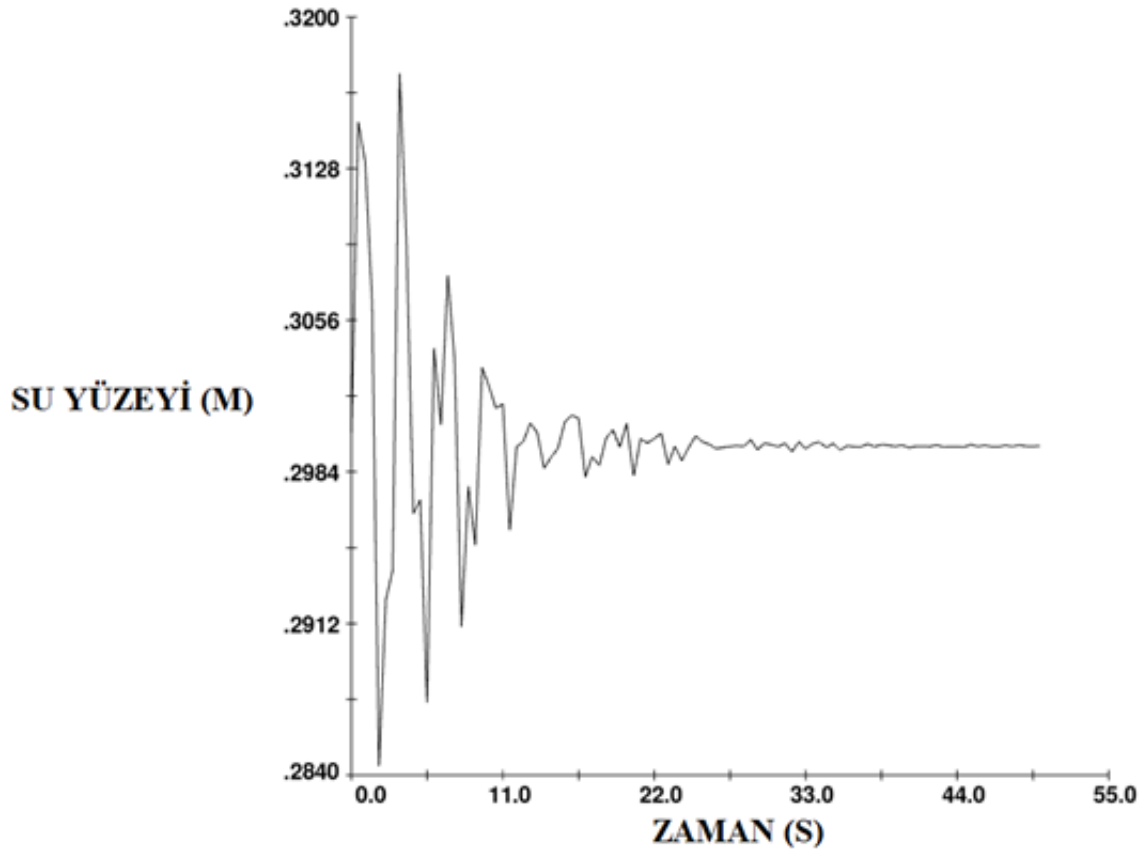
Çoklu su alma ağızlarında kritik batıklığın sayısal olarak tespiti üzerinde etkili parametrelerden biri de simülasyon zamanıdır. Deneylerde su yüzeyi sabitlendikten sonra hava girişli çevrintinin oluşup oluşmadığının tayini için en az 30 dk beklenmiş, hava girişi olmadığı görüldükten sonra su seviyesi düşürülmüştür.

Su alma ağızlarında hava girişli çevrinti oluşumu ile ilgili çalışmalarda kullanılan simülasyon zamanı Çizelge 6.5.'te verilmiştir.

Çizelge 6.5. Mevcut çalışmalarda kullanılan simülasyon zamanı

Çalışma	Simülasyon zamanı (Saniye)	Çalışma koşulları	Ağız iç çapı (m)
Aybar (2012)	70 s	Düşey tek ağız	0,80
Sungur (2018)	50 s	Yatay tek ağız	0,25 – 0,10
Evrano (2019)	60 s	3 adet dikdörtgen	0,2*0,12
Yıldırım (2020)	20 s	Yatay tekli ağız	0,23
Tataroğlu (2014)	50 s	Yatay tekli ağız	0,1 – 0,144 – 0,194

Bu çalışmada da simülasyon zamanının belirlenebilmesi için simülasyonların başlamasıyla birlikte su yüzeyinde oluşan dalgalanmanın ne kadar sürede bittiği izlenmiştir. Su alma ağızlarında su yüzeyindeki hava çekirdekli çevrinti oluşumu yüzeydeki rahatsızlıklara karşı hassas olduğundan doğru bir simülasyon yapılabilmesi için su yüzeyinin sabit olması önemlidir (Taştan ve Yıldırım 2010). Bu amaçla Şekil 6.10.'da örnek olması amacıyla ikili ağız durumu ve $\alpha_{12} = 0^\circ$ için membadaki ağzın 30 cm membasındaki su yüzeyi seviyesinin zamanla değişimi gösterilmiştir.



Şekil 6.10. Kanal içerisindeki su seviyesinin zamanla değişimi

Bu şekilden de görüldüğü üzere su yüzeyindeki dalgalanma, simülasyonların başlamasından yaklaşık 30 saniye sonra oldukça azaldığı görüldüğünden ve Çizelge 6.5.'te verilen önceki çalışmalar da dikkate alındığında simülasyon zamanı olarak 50 s seçilmiştir.

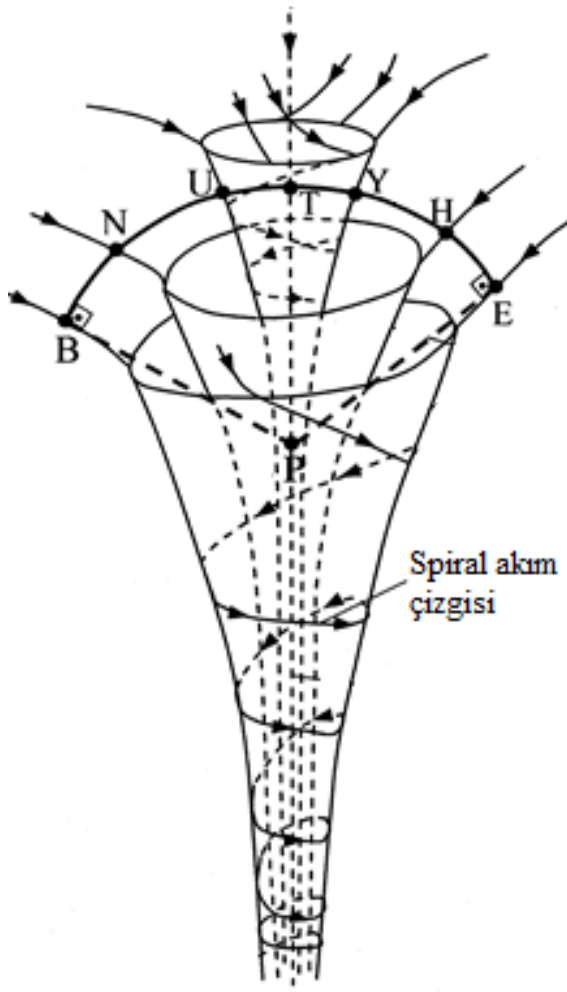
Bir sonraki kısımda da bahsedileceği gibi bu simülasyon zamanı için bile çözüm süresi yaklaşık 5 gün olmaktadır. Su alma ağızlarına hava girişinin ilk başladığı su seviyesinde hava çekirdekli çevrintinin oluşumunun dengeli olmadığı, aralıklı olarak oluşup kaybolduğu deneysel çalışmalarda da gözlemlenmiştir (Yıldırım ve Taştan, 2009; Yıldırım ve Kocabaş, 1995). Dolayısıyla simülasyon süresi ne kadar uzatılıp deneydeki bekleme zamanına yaklaştırılırsa kritik batıklığın tahmininin daha güvenilir olacağı unutulmamalıdır. Fakat çözüm süresinin uzunluğu göz önüne alınarak bu çalışmada simülasyon zamanı 50 s olarak belirlenmiştir.

6.2. Kritik Batıklığın Sayısal Modeller İçin Belirlenmesi

İncelenen sayısal modellerde genel çözüm ağ aralığı 2 cm, su alma ağızlarına ait çözüm ağlarına ait ağ aralığının 0,25 cm belirlendiği daha önce belirtilmişti. Bu ağ aralıkları için hava girişinin tam olarak her modelde gözlemlenemediğinden de bahsedilmişti. Su yüzeyinde bir çöküntü ve hava çekirdekli çevrintinin su alma ağzına doğru düşey aşağı yönde bir miktar uzaması görülebiliyorken hava çekirdekli çevrintinin ağza tamamiyle ulaşması simülasyonların çoğunda, seçilen çözüm ağ aralıklarında mümkün olmamıştır. Hava girişli çevrintinin tam olarak ağza girişinin gözlemlenmesi için su alma ağızlarını çevreleyen çözüm ağı bloklarının çok daha küçük ağ aralıklarına sahip olması gerekmektedir (örneğin $< 0,1$ cm). Bu çalışmada genel çözüm ağı bloğu 2 cm aralıklı, ince çözüm ağı blokları 0,25 cm aralıklı seçilmiş ve bunun sonucu çözümlerin alındığı bilgisayar için 50 s'lik simülasyon, yaklaşık 5 gün sürmüştür. Biraz ileride de anlatılacağı gibi bir deney verisine ait kritik batıklığın bulunması için en az iki veya daha fazla sayıda deneme yapılması gerekmektedir. Bu durum da, bir deney verisine ait çözümün seçilen çözüm aralığında bile yaklaşık 15 gün sürmesi anlamına gelmektedir. Daha ince bir çözüm ağı kullanılması bir simülasyon için harcanacak zamanı ay mertebesine getireceği için bu noktada yatay tekli bir su alma ağzında kritik batıklığın araştırıldığı Sungur (2018)'in çalışmasında izlenen yöntemden faydalanmıştır.

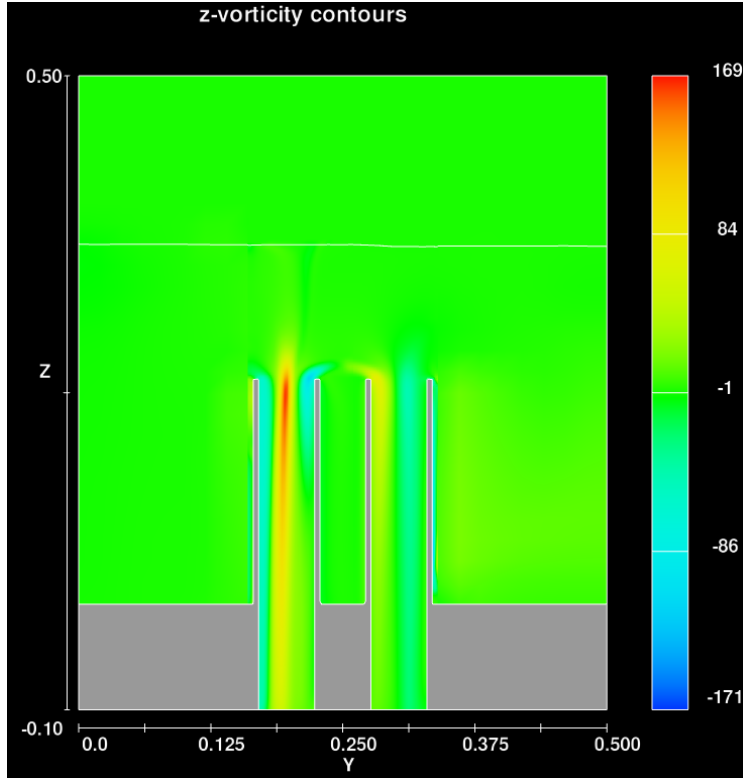
Sungur (2018), ölü sonlu dikdörtgen bir kanalda yatay tekli bir su alma ağzına ait kritik batıklığın sayısal olarak incelendiği çalışmada, bu çalışmadakine benzer olarak ağ aralıklarının hava çekirdekli çevrintinin ağza girişini tam olarak yakalayabilecek kadar çok küçültülmesinin uygulamadaki zorluğuna değinirken sirkülasyon ve vortisite değerlerini kritik batıklığın tahmini için kullanmıştır. Hava girişli çevrinti durumunda, su yüzeyinde başlayan vortisite, büyüklüğünde azalma olmadan ağza kadar ulaşmalıdır. Dolayısıyla simülasyonlarda, hava çekirdekli çevrintiye ait çöküntü ve bir miktar düşey uzamanın gözlemlenmesinin ardından vortisite konturları takip edilerek ağza kadar vortisitenin taşınıp taşınmadığı kontrol edilmiştir.

Bu noktada, hava girişli çevrinti oluşumu ve vortisite ile ilgili olarak Taştan ve Yıldırım (2018)'in çalışmasındaki açıklamalardan bahsetmekte fayda vardır. Hava çekirdekli çevrintinin oluşumu esnasında, her bir yüzey ve yüzey altı parçacığı çevrintinin düşey eksenini etrafında döngülü ve burgulu (descending and converging unclosed swirling pathline) bir yörünge izler (Şekil 6.11.). Koriolis etkisi, akımda zaten var olabilecek düzensizlikler ve çevrintilerin yanında, bu parçacıkların birbirleriyle çarpışmaları da vortisitenin artmasına katkı yapar. Yüzey parçacıklarının ağza doğru hareketi sırasında, yüzey altında ana burgulu çevrintiye dahil olan diğer parçacıklar da eklenince ağza doğru vortisite veya sirkülasyon değeri artar. Sun ve Liu (2015, Şekil 7) ait deney verileri, serbest yüzeyden hava çekirdekli çevrinti boyunca ağza doğru ilerledikçe sirkülasyonda artış olduğunu göstermektedir. Bu artışın büyük bir bölümünün ağzın hemen üstünde gerçekleştiği, hava çekirdekli çevrintinin büyük kısmında çevrinti değerinin çok fazla değişmediğini belirtmişlerdir. Sun ve Liu (2015) bu keskin artışın taban etkisinden olabileceğini belirtirken Taştan ve Yıldırım (2018) bu artışın taban olsun ya da olmasın gerçekleşmesinin kaçınılmaz olduğunu ifade etmişlerdir.

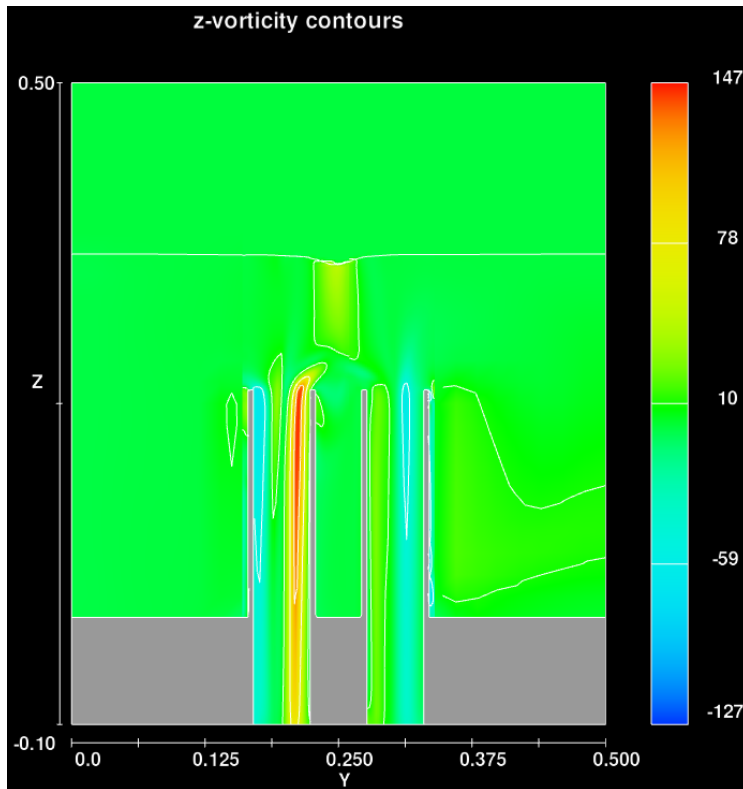


Şekil 6.11. Su alma ağzında hava çekirdekli çevrinti oluşumu

Bu açıklamalardan da görüleceği gibi hava çekirdekli çevrintinin oluşumunun takibi için vortisite konturlarını takip etmek, ağza hava girişinin olup olmadığı hakkında önemli bir bilgi sağlamaktadır. Bu çalışmada, ağız üzerinde yüzeyde oluşan çöküntü ve düşey aşağı uzamanın görünmesinin ardından vortisite konturları takip edilmiştir. İncelenen bazı farklı düzeneklere ait vortisite konturları aşağıda Şekil 6.12.'de verilmiştir.

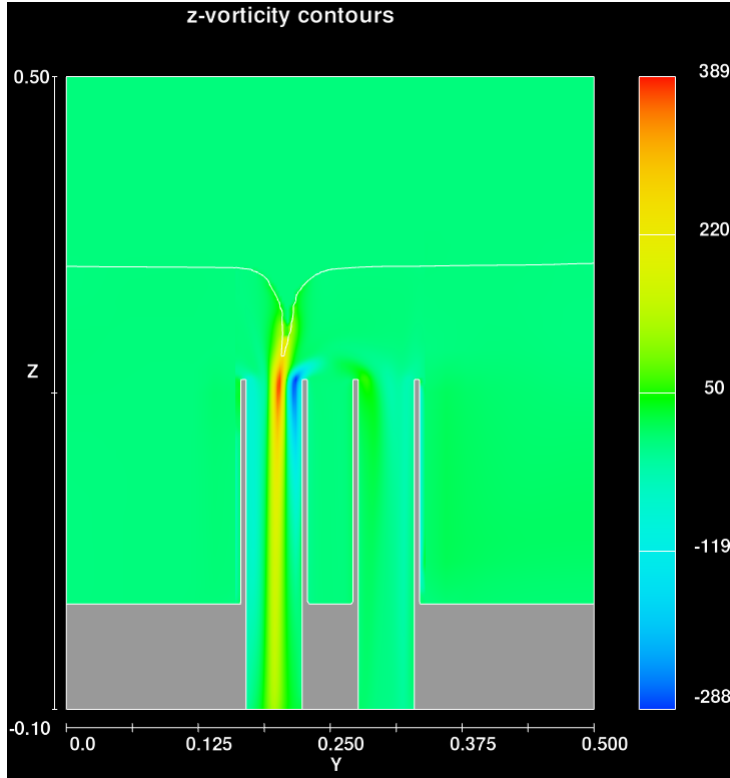


(a)



(b)

Şekil 6.12. Akım alanında z yönündeki eş vortisite eğrileri: a) Herhangi bir hava çekirdekli çevrinti oluşumu yok, b) Çevrinti oluşumu başlamış fakat vortisite şiddeti ağza kadar ulaşmıyor, c) Hava çekirdekli yarım bir çevrinti var ve vortisite konturu ağza kadar ulaşıyor

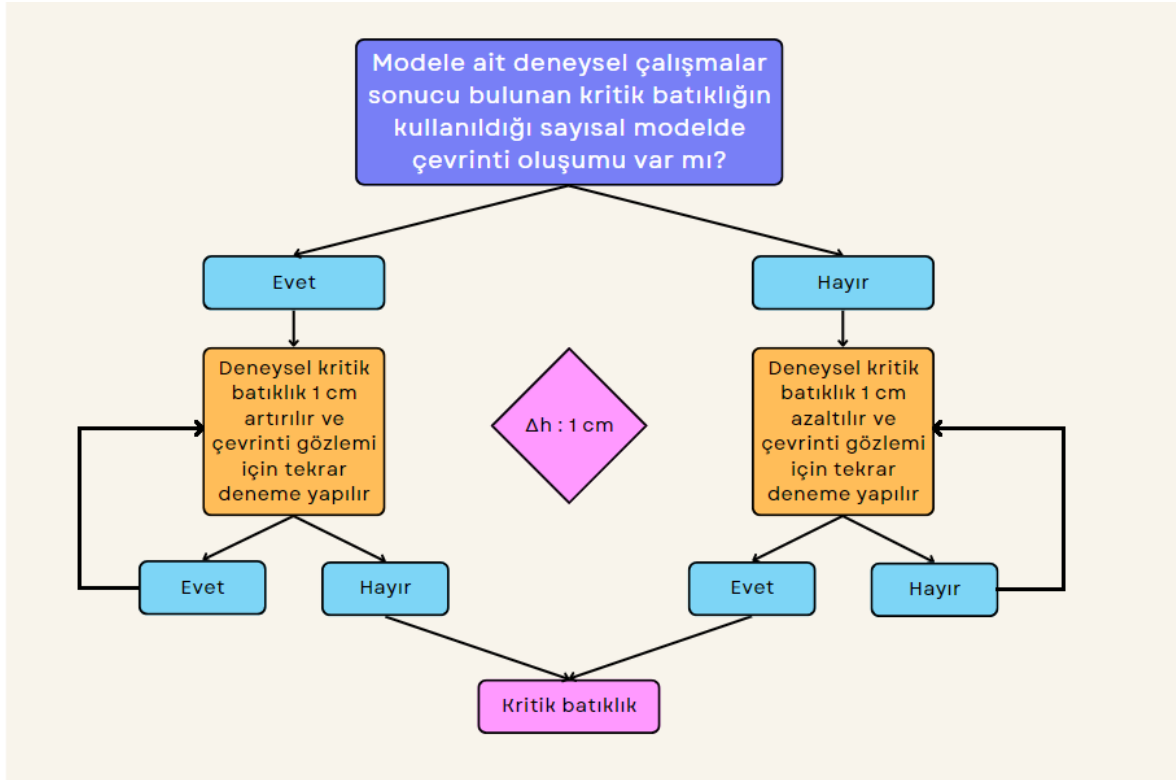


(c)

Şekil 6.12. (devamı) Akım alanında z yönündeki eş vortisite eğrileri: a) Herhangi bir hava çekirdekli çevrinti oluşumu yok, b) Çevrinti oluşumu başlamış fakat vortisite şiddeti ağza kadar ulaşmıyor, c) Hava çekirdekli yarım bir çevrinti var ve vortisite konturu ağza kadar ulaşıyor

Bu konturlardan da görüleceği gibi ağza hava girişinin olmadığı durumlarda yüzeyde oluşan vortisite, değerini koruyarak ağza kadar ulaşamamaktadır. Yüzeydeki vortisitenin değerini koruyarak ağza ulaştığı durumlarda da ağza hava girdiği yorumu kesin doğru olmamakla birlikte yapılabilir.

Bu çalışmada kritik batıklığın tahmini için deneme-yanılma yöntemi izlenmiştir. Seçilen deney verisi için deneyde gözlemlenen kritik batıklık değerine yakın bir su seviyesinde simülasyon çalıştırılmıştır. Eğer ağza hava girişi simülasyon süresi boyunca gözlemlenmezse su yüzeyi 1 cm düşürülerek simülasyon tekrar edilmiştir. Bu işlem hava girişi elde edilene kadar devam ettirilmiştir. Eğer ilk denemede hava girişi gözlemlenirse de, bu sefer su yüzeyi 1 cm arttırılarak hava girişinin devam edip etmediği kontrol edilir. Bu durumda da hava girişi olmayıncaya kadar su seviyesi arttırılmaya devam edilir (Şekil 6.13.). Dolayısıyla bir deney verisinin simülasyonu için en az 2 deneme yapılması gerekir ki, bu çalışmada kritik batıklığın bulunabilmesi için genelde 3-4 simülasyon yapılmıştır.

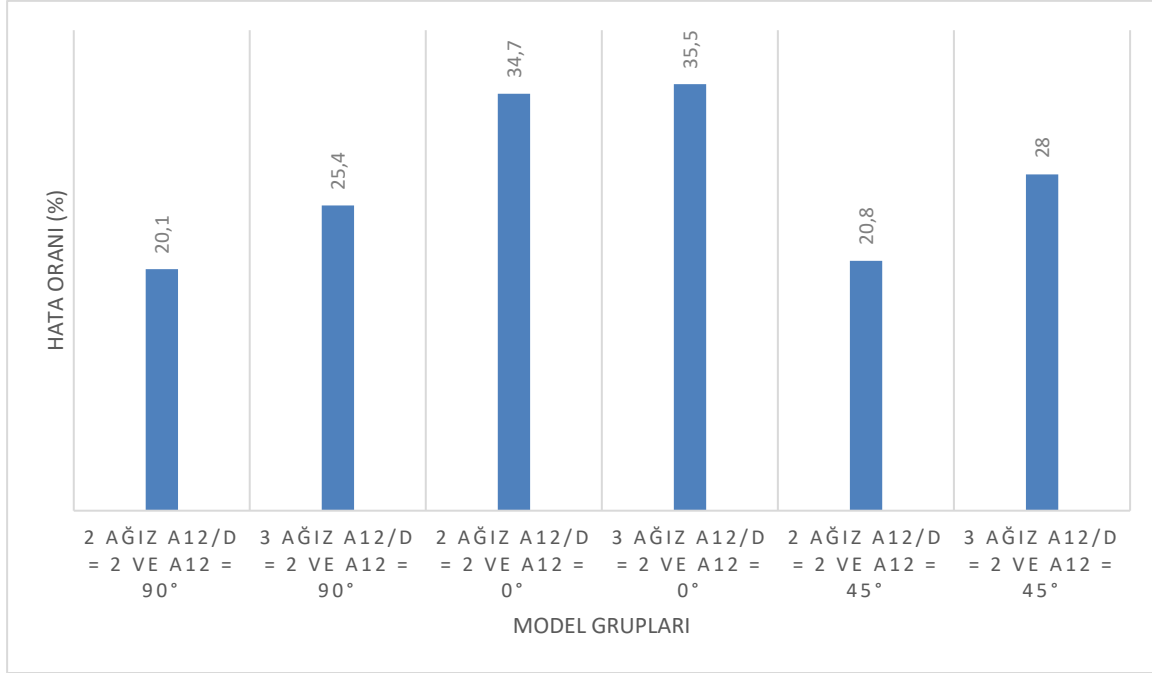


Şekil 6.13. Kritik batıklığın sayısal olarak bulunması sırasında izlenen yöntem

Yukarıdaki tüm açıklamalar ışığında simülasyonlar sonucunda elde edilen kritik batıklık değerleri ile deney neticelerinin karşılaştırılması Çizelge 6.6. ve Şekil 6.14.'te verilmiştir. Modellerin hepsinde c/D oranı 4'tür. Yani ağız merkezleri tabandan 21,28 cm yüksektir.

Çizelge 6.6. Modellere ait simülasyon sonuçları ile deney sonuçlarının karşılaştırılması

Deney No	a_{12}/D	α_{12} (Der.)	Q_{∞} (lt/s)	Q_1 (lt/s)	Q_2 (lt/s)	Q_3 (lt/s)	S_c (deney, cm)	S_c (model, cm)	Hata (%)	Ort. Hata (%)
1.1	2	90°	15,83	6	6	-	11,9	8,72	27	20,1
1.2			15,48	6	2	-	10,97	9,72	11,3	
1.3			15,66	4	8	-	12,72	11,72	7,9	
1.4			15,1	2	8	-	11,48	8,72	24	
1.5			15,1	3	6	-	10,85	8,72	19,6	
2.1	2	90°	17,58	4	2	6	9,65	7,02	27	25,4
2.2			22,8	5	5	5	10,13	7,72	23,8	
3.1	2	0°	20,22	6	6	-	13,1	8,72	33,4	34,7
3.2			21	7	7	-	18,35	10,72	41,5	
3.3	2	0°	18,42	10	1	-	13,01	9,11	30	
3.4	2	0°	14,76	2	8	-	14,1	9,9	34	
3.5	4	0°	22,94	10	5	-	12,65	6,72	46,9	
3.6	15	0°	18,34	10	2,5	-	18,28	14,22	22	
4.1	2	0°	21,7	5	5	5	11,88	7,72	35	35,5
4.2	2	0°	18,16	1	7,5	0,75	10,53	6,72	36	
5.1	2	45°	12,18	6	1	-	10,59	8,72	17,8	20,8
5.2	2	45°	16,49	4	2	-	7,51	5,72	23,8	
6.1	2	45°	22,11	5	5	5	10,16	6,72	33,4	28
6.2	2	45°	19,37	6	2	1	8,03	6,22	22,5	



Şekil 6.14. Deney ile simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Yapılan simülasyonlarda 1 cm'lik deneme yanılma payı olduğu ve simülasyon sonuçlarının 1 cm kadar da arttırılabileceği de göz önünde bulundurulmasında fayda vardır.

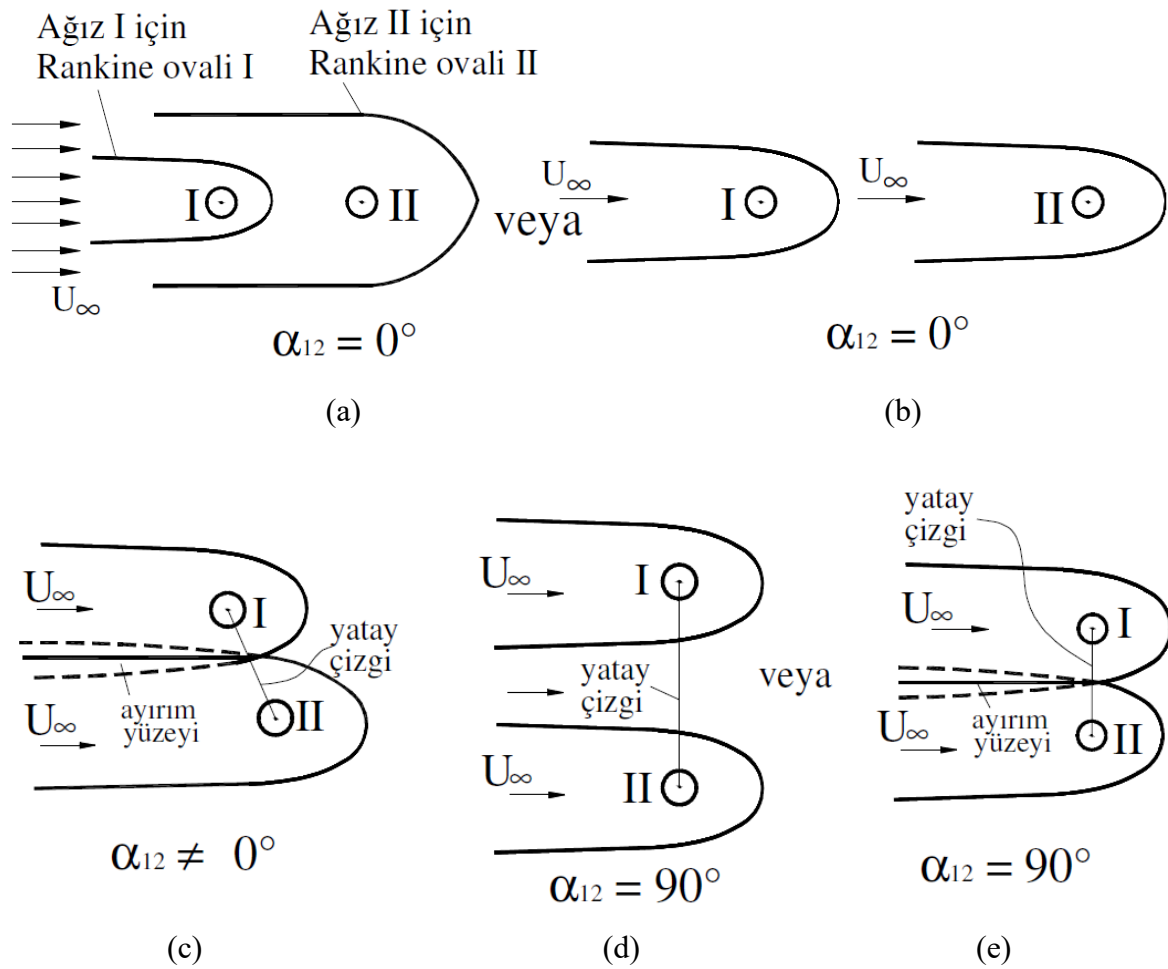
Çizelge 6.6. ve Şekil 6.14.'te görüldüğü gibi gerek iki gerekse üç su alma ağzının bulunduğu durumlarda α açısı (yani su alma ağzı merkezlerini birleştiren doğru ile yaklaşım akımı arasındaki açı) azaldıkça sayısal olarak bulunan kritik batıklık, deneydeki değerinden uzaklaşmaktadır ve tüm simülasyonlarda deney değerinden daha az sonuçlar elde edilmiştir. Bu durumun nedenleri aşağıda açıklanmıştır (Taştan, 2007).

Aynı batıklık, debi, çap ve yükseklik değerlerine sahip olan ağız I ve ağız II olmak üzere 2 ağız dikkate alındığında KKKY'lerine ait V_{sc1} ve V_{sc2} hızları farklı ise 2 ağız da aynı anda kritik duruma gelmeyebilir. Temel olarak şöyle bir açıklamada yapılabilir: “Bir grup su alma ağzı içerisinde, hangi ağza ait Rankine ovalinin üst sınırı su yüzeyiyle (ağız üzerinde) üst üste gelirse, öncelikle o ağız kritik batıklığa sahip olur (üzerinde tam bir havalı çevrinti oluşur)”.

Çoklu su alma ağız grubunda ağzların (ve o ağzlara ait Rankine ovalerinin) konumları hava çekirdekli çevrintiyi ve kritik batıklığı önemli ölçüde etkilemektedir. Bu durumun şu şekilde 3 nedeni vardır:

- Rankine ovallerinin çevresinde meydana gelen ayrılma çevrintileri
- Hava içerikli çevrintinin ağza ulaşma yolu
- Akımın ağza giren bölümü (en önemli etken)

Uygulamadaki bazı durumlar için, ağız I ve ağız II'nin birbirlerine göre konumları Şekil 6.15.'te verilmiştir.



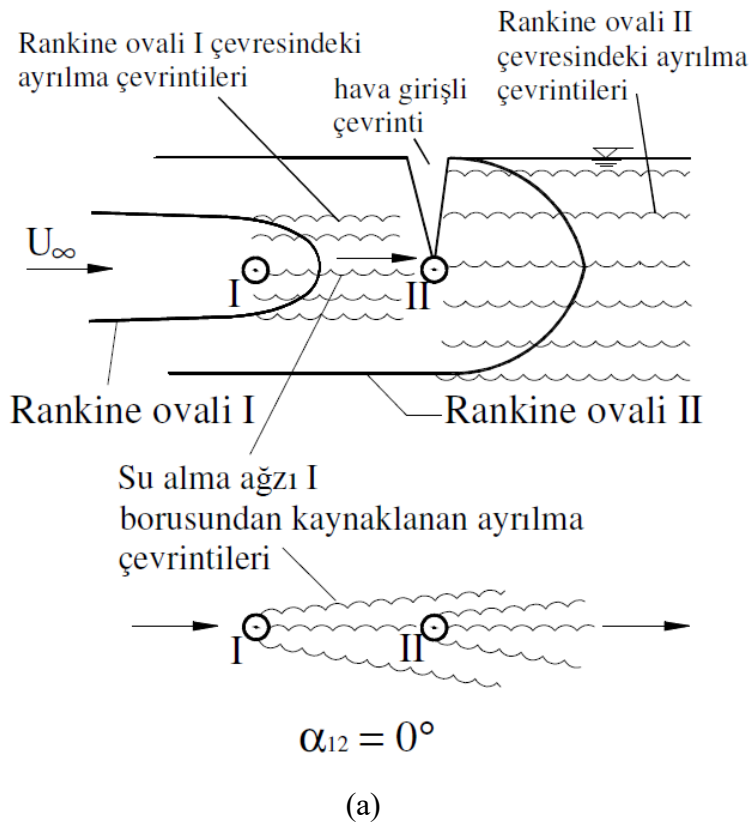
Şekil 6.15. Ağız I ve ağız II'ye ait Rankine ovallerinin birbirine göre çeşitli durumları (Taştan, 2007)

Şekil 6.15.'te görünen durumlar incelendiğinde:

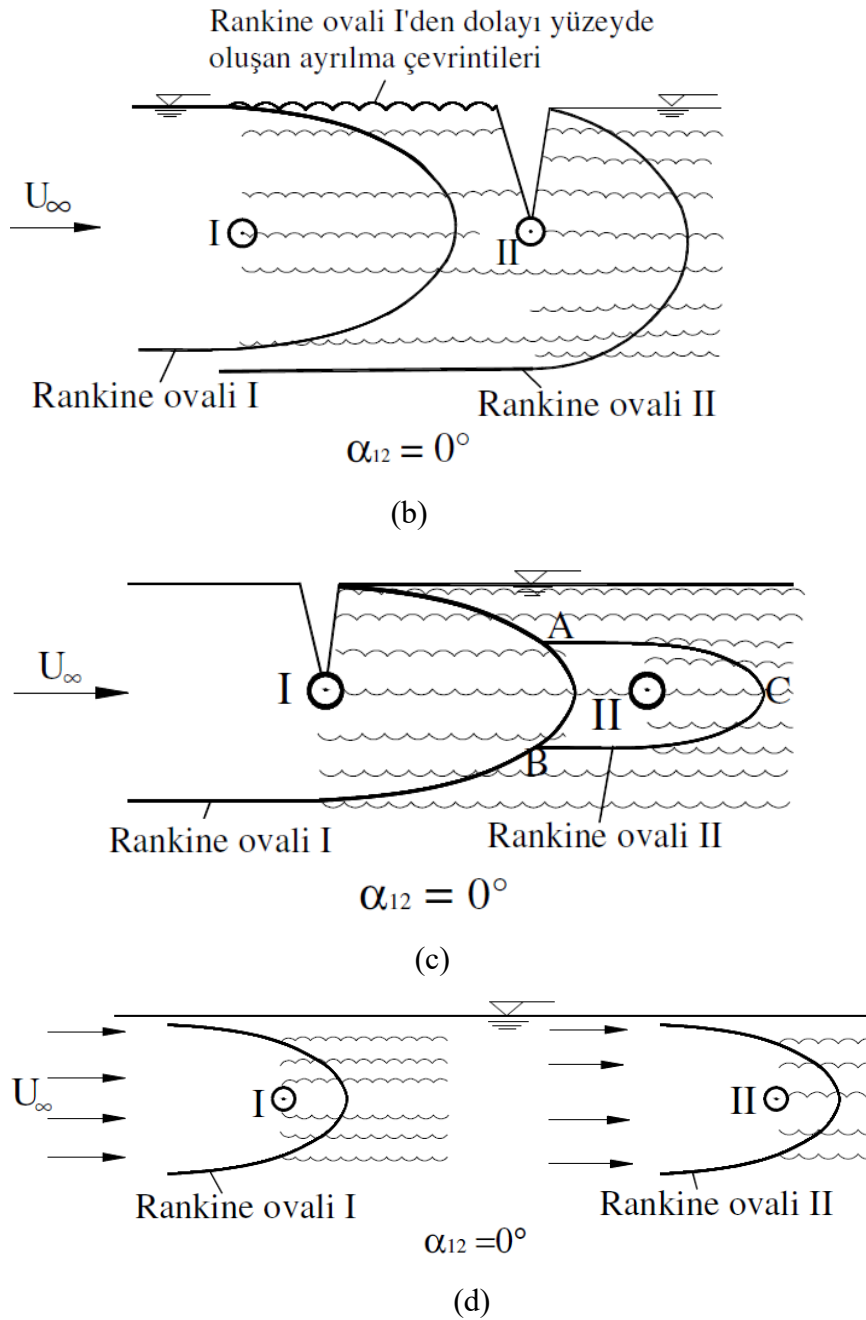
Şekil 6.15. (a)'da, ağız I ve ağız II birbirlerinin ardına, kanal akımı boyunca ($\alpha = 0^\circ$) konumlandırılmışlardır. Ağızların konumunun kritik batıklığı en fazla etkilediği durum budur.

Bir su alma ağzına yaklaşan akım içerisinde, o ağzın memba bölgesinde bulunan ağızdan ve yine memba bölgesinde bulunan ağza ait Rankine şeklinden kaynaklı ayrılma çevrintileri bulunuyorsa, mansap tarafında bulunan ağza yaklaşan akım üniform olmaktan çıkar. Bu durum da, mansapta bulunan ağza yaklaşan akımın önemli miktarda çevrinti taşımaya ve mansaptaki ağızda çevrinti oluşumunun etkilenmesine sebep olur. Hava girişli çevrinti meydana gelirken yüzeydeki rahatsızlıklar, yüzey altı rahatsızlıklara göre çevrinti oluşumunu daha fazla etkiler. Memba bölgesinde bulunan ağızlara ait Rankine ovalerinin üst sınırları su yüzeyine yakınsa veya su yüzeyi ile çakışıyorsa bu durumda Rankine ovali kaynaklı ayrılma çevrintileri mansaptaki ağza yaklaşan akımın yüzeyinde bulunur. Bilhassa bu durum, mansaptaki ağza hava girişli çevrinti girmesine yol açar.

Şekil 6.16.'da dört ayrı durum gösterilmiştir.



Şekil 6.16. Ağız I, ağız II ve ağızlara ait Rankine ovaleri kaynaklı ayrılma çevrintileri (Taştan, 2007)



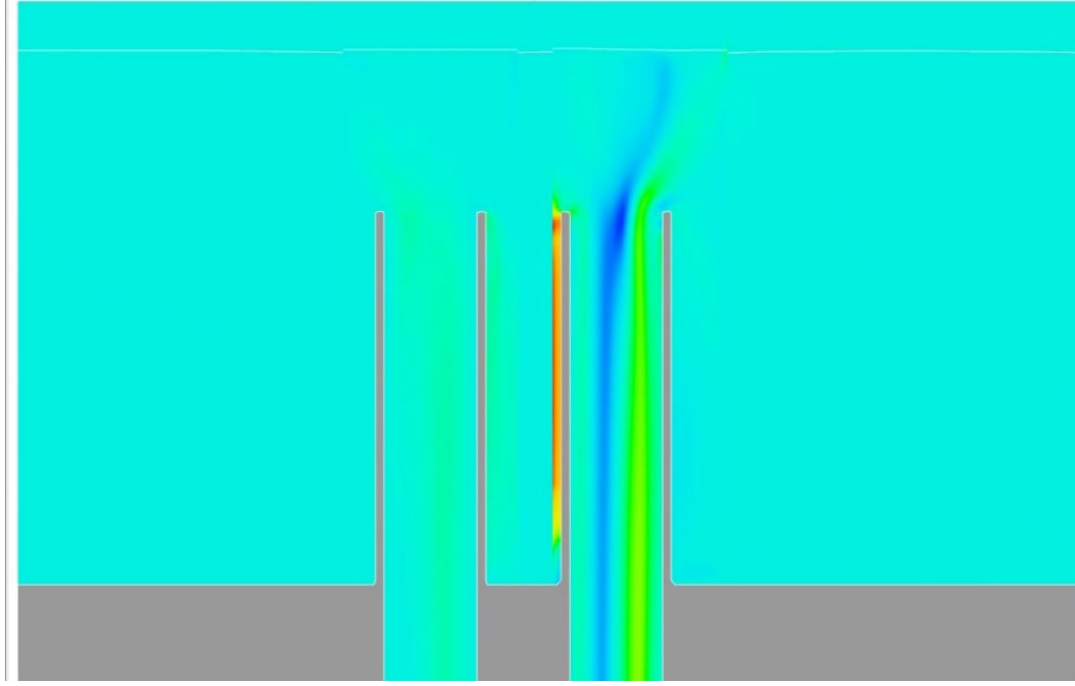
Şekil 6.16. (devamı) Ağız I, ağız II ve ağızlara ait Rankine ovalleri kaynaklı ayrılma çevrintileri (Taştan, 2007)

Şekil 6.15. (a) ve 6.16. (a)'da a_{12}/D küçük, $Q_1/Q_2 \ll 1$, $\alpha_{12} = 0^{\circ}$ 'dir. Membadaki ağza ait Rankine ovali mansaptaki ağza ait Rankine şekli içerisinde yer almaktadır. Ağız I'e ait Rankine ovali su yüzeyini kesmediğinden etrafında oluşan ayrılma çevrintileri ağız II'ye yaklaşan yüzey akımı içerisinde yer almaz. Bu nedenle hava girişli çevrinti oluşumunu etkilemezler. Bu durumda havalı çevrinti öncelikle mansap tarafındaki akım alanında oluşur. Eğer mümkün olursa ağız I üzerinde de havalı çevrinti oluşabilir. Havalı çevrinti kanal akımı ve ağız II akımı sebebiyle ağız II'ye doğru sürüklenir. Bunun sonucu havalı

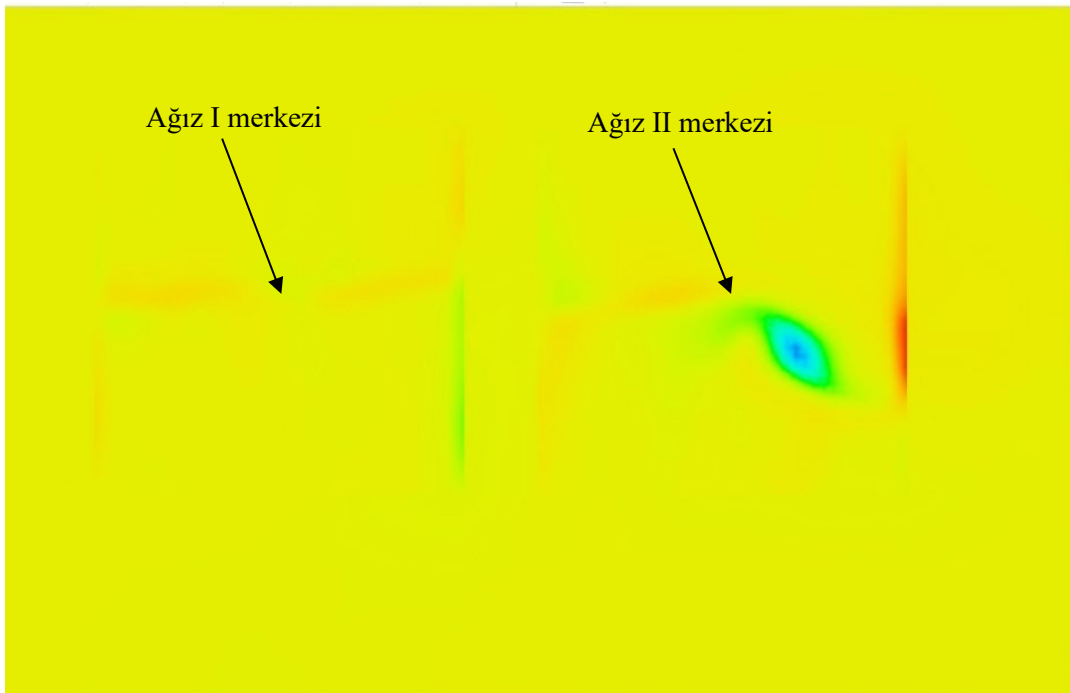
çevrinti ağız II üzerinde daha kolay oluşabiliyorken, ağız I üzerinde oluşması daha zordur. Bu durumda ağız I'e ait kritik batıklık büyüklüğü, ağız II'ye ait kritik batıklık büyüklüğünden daha küçüktür.

Ağız II kritik durumdayken etrafında oluşan Rankine ovalinin üst sınırı su yüzeyi ile üst üste gelmektedir. Ağız II'ye ait Rankine ovalinin etrafında oluşan yüzey ayrılma çevrintileri havalı çevrintinin ağız II'ye girmesine sebep olur.

Bu duruma ait simülasyonlar kritik batıklığı $\alpha_{12} = 0^\circ$ olduğu diğer durumlara göre nispeten daha iyi tahmin eder (yaklaşık hata %30 - 35). Çünkü membadaki ağız I'den dolayı oluşan çevrintiler ağız II üzerinde oluşabilecek hava çekirdekli çevrinti üzerinde çok etkin değildir. Bu durum için simülasyonlarda elde edilen vortisite konturları Şekil 6.17.'de gösterilmiştir.



(a)



(b)

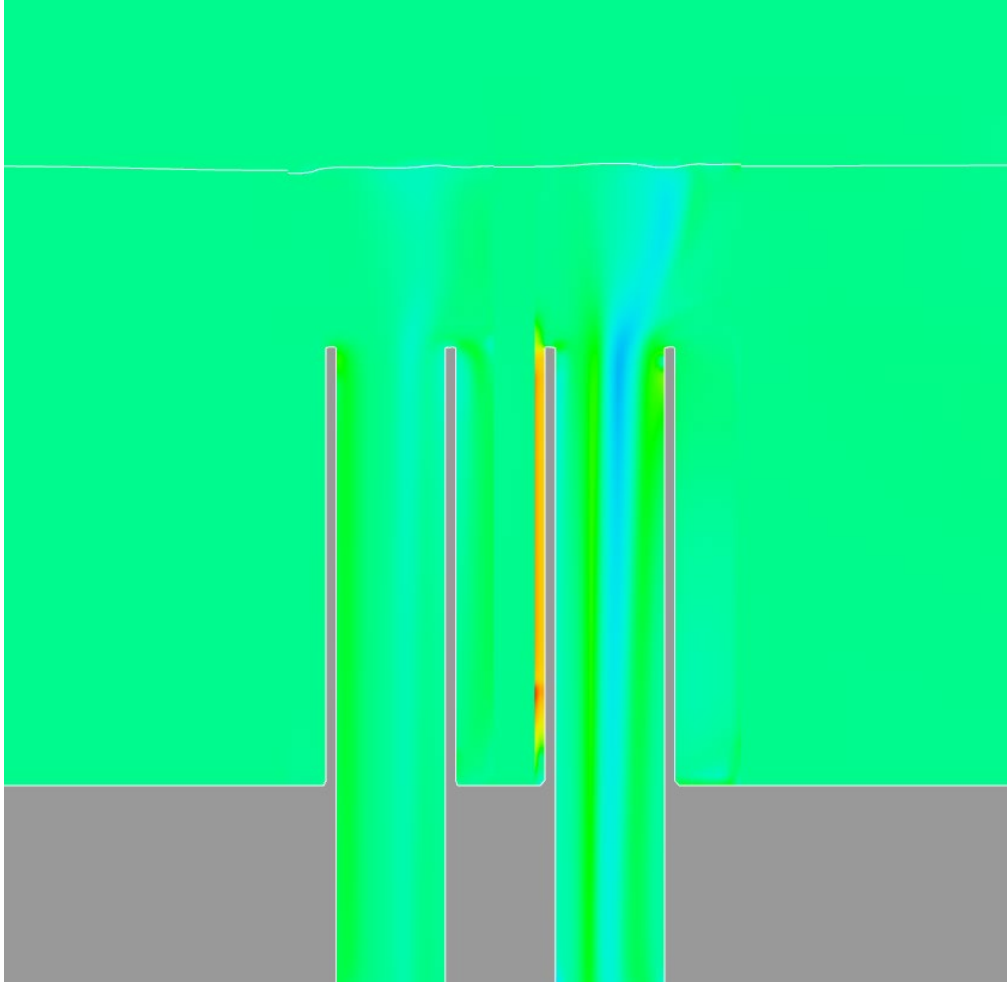
Şekil 6.17. $\alpha_{12} = 0^\circ$ ve $Q_1/Q_2 \ll 1$ olduğu durumdaki vortisite dağılımı (a) Yan görünüm, (b) Plan görünümü

Şekil 6.15(b) ve Şekil 6.16(b)'de $\alpha_{12} = 0^\circ$, $Q_1/Q_2 \sim 1$ ve a_{12}/D büyük değildir. Bu durumda memba tarafında bulunan ağza yaklaşan kanal akımının hızı, süreklilik kuralı gereği mansapta bulunan ağza yaklaşan kanal akım hızından fazladır. Bunun sonucu olarak mansap tarafında bulunan ağza ait Rankine ovalinin üst çizgisi su yüzeyini ağız I'e kıyasla

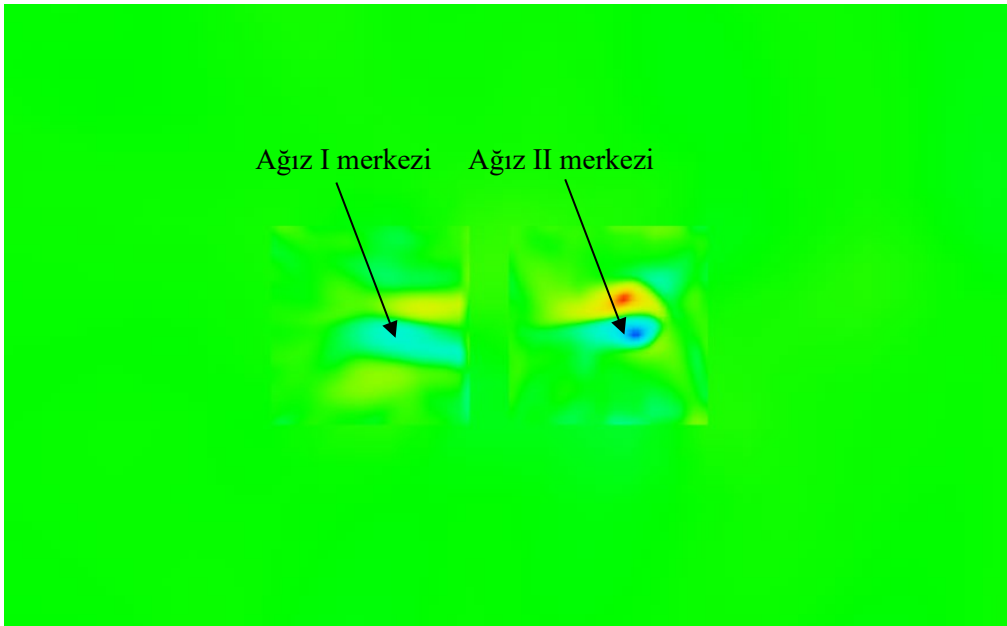
önce keser. 2 ağza ait Rankine ovali ağız I üzerinde su yüzeyine yakınsa ağız II'ye ait olan Rankine ovali bir miktar daha büyük olmak üzere iç içe bulunmaktadır. Bu durumda hava çekirdekli çevrinti ağız II üzerinde oluşur. Ancak bu durumda ağız I kaynaklı oluşan Rankine ovali etrafında ortaya çıkan ayrılma çevrintileri sürtünme ve viskoziteden dolayı sıfıra indirgenemez ve kritik batıklığı etkiler.

Ağız II'nin su çektiği bölgede bulunan yüzey akımı önemli miktarda çevrinti ve çöküntü içerir. $Q_1 > Q_2$ durumunda ağız II'ye ait su alma bölgesi olan Rankine ovaleri arasındaki bölgede dikkate değer oranda azalma olur, akım çizgileri eğilir, ağız II'ye doğru ilerlemekte olan akım potansiyel (sürtünmesiz) akım olmaktan çıkar ve ağız II kaynaklı Rankine ovalinin şekli değişir. Su yüzeyindeki bu değişiklikler ağız II'nin su çektiği bölüme geldiğinde aşağı yönlü uzayıp hava içerikli çevrintiyi oluşturur. Bu yüzden bu durumda hava içerikli çevrinti hep ağız II üzerinde oluşur. Deneysel sonuçlardan Q_1 , Q_2 'den birkaç kat büyükse ancak o durumda hava içerikli çevrintinin ağız I'e girebileceği anlaşılmıştır.

Fakat yapılan simülasyonlarda, yukarıdaki durum için gerek ağız I'e ait Rankine yüzeyi etrafındaki, gerekse membadaki ağız I borusu etrafındaki çevrintilerin, ağ aralığının yeterince küçük olmamasından dolayı yeteri kadar modellenemediği görülmüştür (Şekil 6.18.) Bu yüzden de sayısal analizlerde bulunan kritik batıklık, deneydeki değerinden uzak kalmaktadır (yaklaşık hata %35 - 40).



(a)



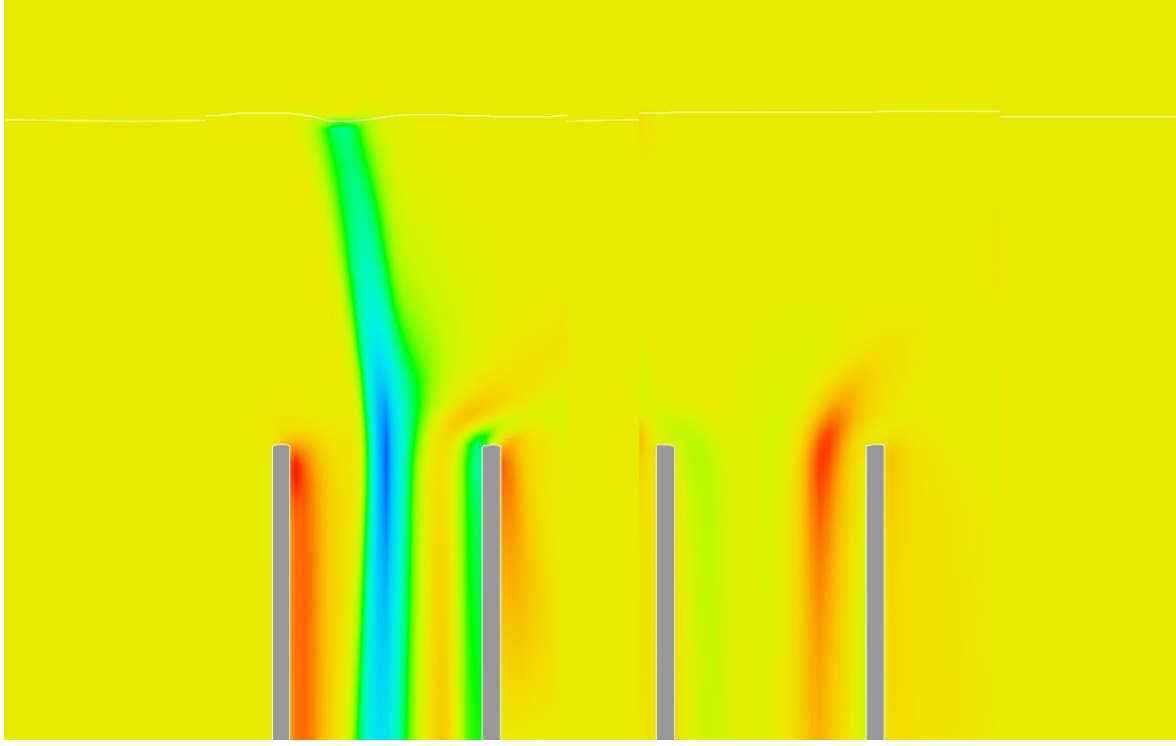
(b)

Şekil 6.18. $\alpha_{12} = 0^\circ$ ve $Q_1/Q_2 \sim 1$ olduğu durumdaki vortisite dağılımı (a) Yan görünüm, (b) Plan görünümü

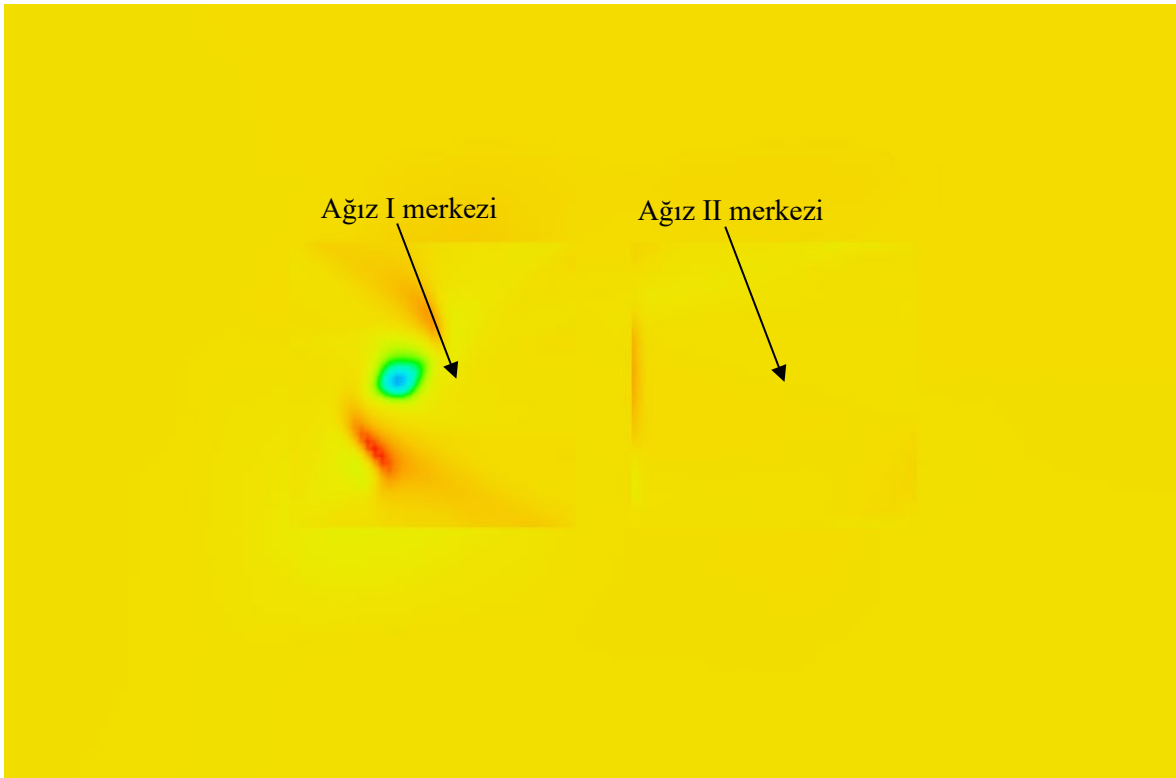
Şekil 6.16(c)'de $\alpha_{12} = 0^\circ$, $Q_1 \gg Q_2$ veya $Q_1/Q_2 \gg 1$ (örnek olarak; $Q_1/Q_2 \gg 10$) dir. Bu durumda ağız II'nin ağız I'e ait Rankine ovali üzerinde bir "akım engel etkisi" yoktur. Ağız I'e ait Rankine ovali, ağız II'ye ait Rankine ovali içerisinde yer almaz. Ağız I kaynaklı olan Rankine ovali, ağız II kaynaklı Rankine ovaline göre çok büyüktür.

Ağız I kaynaklı olan Rankine ovali üst sınırı ağız I üzerinde su yüzeyi ile üst üste gelir. Bu Rankine ovali kaynaklı ayrılma çevrintileri ve çöküntüler hava içerikli çevrintinin ağız I'e girmesini sağlar. Ağız II kaynaklı Rankine ovali, Rankine ovali I'e göre oldukça küçük ve batık durumdadır. Rankine ovali II, su yüzeyi ile üst üste gelemez. Bu yüzden hava içerikli çevrinti ağız II'ye giremez. Rankine ovali I kaynaklı ayrılma çevrintileri ve çöküntüler Rankine ovali II'nin olduğu bölgeden geçmezler bu yüzden ağız II akımının hava içerikli çevrinti üzerinde de bir etkisi yoktur.

Yukarıda anlatılan durum için sayısal yöntem membadaki ağza ait kritik batıklığı yaklaşık %30 civarında hata ile tahmin eder. Şekil 6.19.'da bu duruma ait vortisite dağılımı verilmiştir.



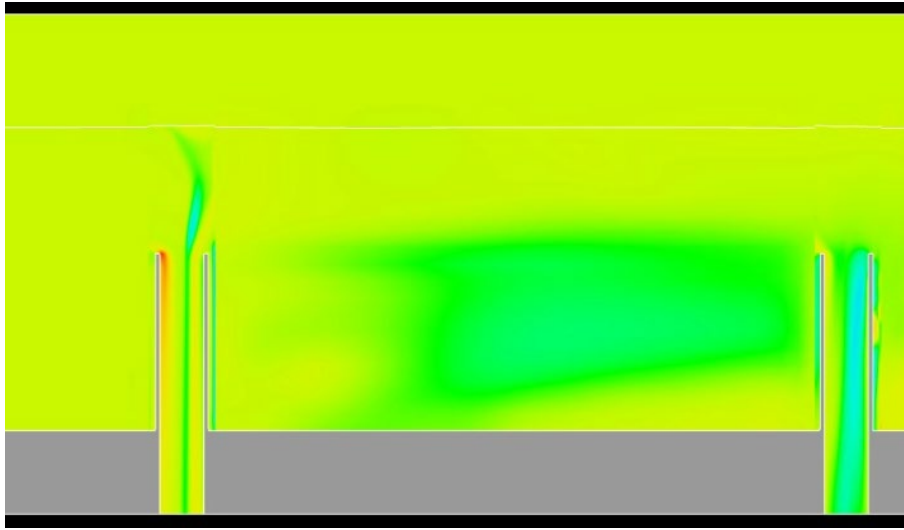
(a)



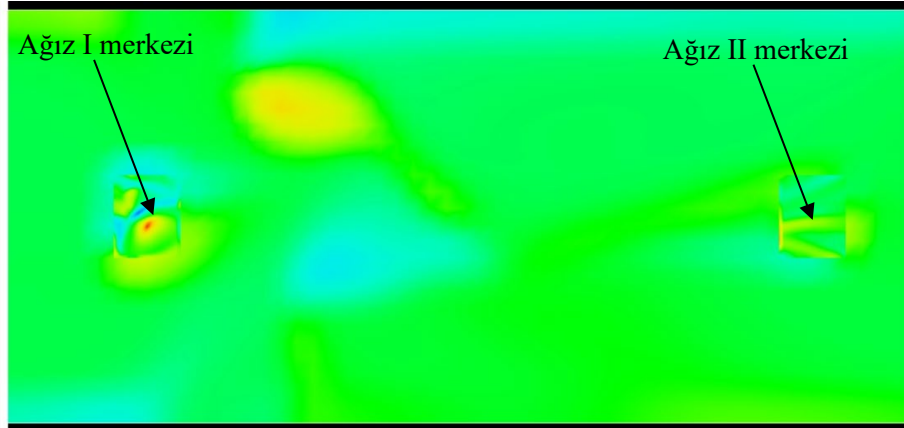
(b)

Şekil 6.19. $\alpha_{12} = 0^\circ$ ve $Q_1 \gg Q_2$ olduğu durumdaki vortisite dağılımı (a) Yan görünüm, (b) Plan görünümü

Şekil 6.16(d)'de, $\alpha_{12} = 0^\circ$, ve ağızlar arasındaki mesafe yeterince büyüktür ($a_{12}/D \geq 10$). Bu durumda ağız I kaynaklı Rankine ovali etrafında oluşan ayrılma çevrintileri viskozite ve sürtünme nedeniyle ağız II'ye ulaşmadan sönümlenir. Bunun sonucu ağız II'ye yaklaşan akım içerisinde ağız I'in etkisi yoktur denilebilir. Bu durumda ağız II'ye yaklaşan kanal akımı üniform kabul edilebilir. Bu durum için sayısal yöntem kritik batıklığı yaklaşık %20 hata ile tahmin eder. Şekil 6.20.'de bu duruma ait vortisite dağılımı verilmiştir.



(a)

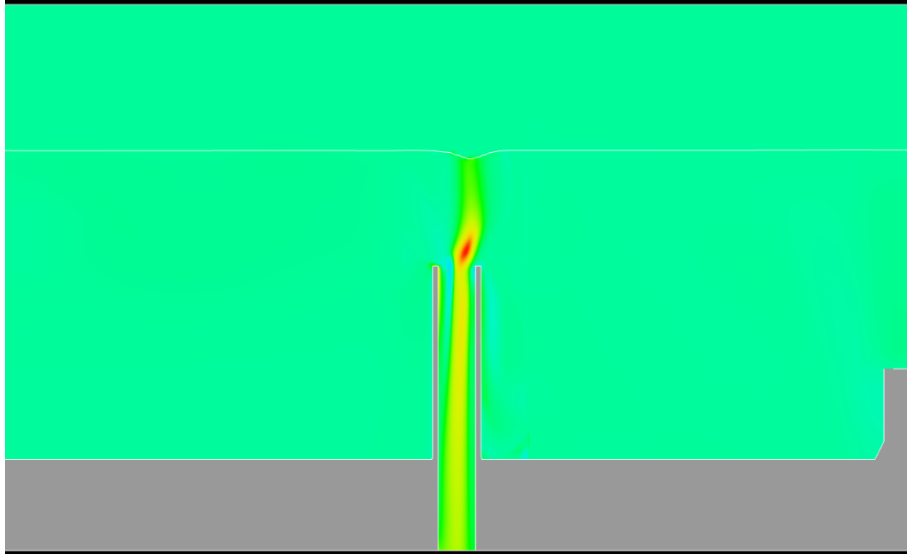


(b)

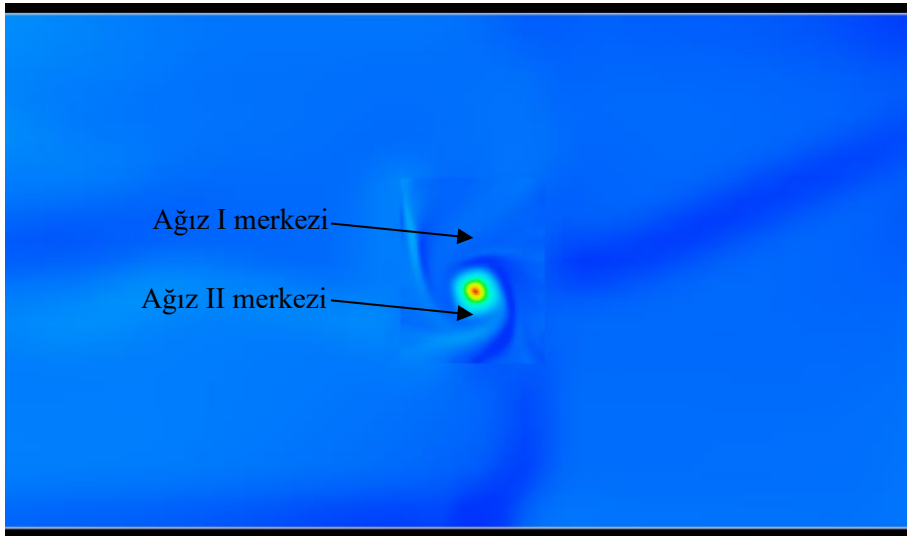
Şekil 6.20. $\alpha_{12} = 0^\circ$ ve $a_{12}/D = 15$ olduğu durumdaki vortisite dağılımı (a) Yan görünüm, (b) Plan görünümü

Şekil 6.15'te, $\alpha_{12} = 90^\circ$ için, bir ağız diğerrinin dümen suyu bölgesinde bulunmazlar. Bu durumda ağızlara yaklaşan akımlar Rankine ovalerinden ve ağız borularından dolayı meydana gelen çevrintilerden etkilenmezler (Şekil 6.21.). Bunun sonucu sayısal yöntem kritik batıklığı yaklaşık %20 - 25 civarında hata ile tahmin eder (Şekil 6.21.). Aynı

nedenden dolayı aynı yatay çizgi üzerindeki çoklu su alma ağızlarında da (iki ağızdan fazla) sayısal yöntem kritik batıklığı kabul edilebilir ölçüde doğru tahmin eder.



(a)

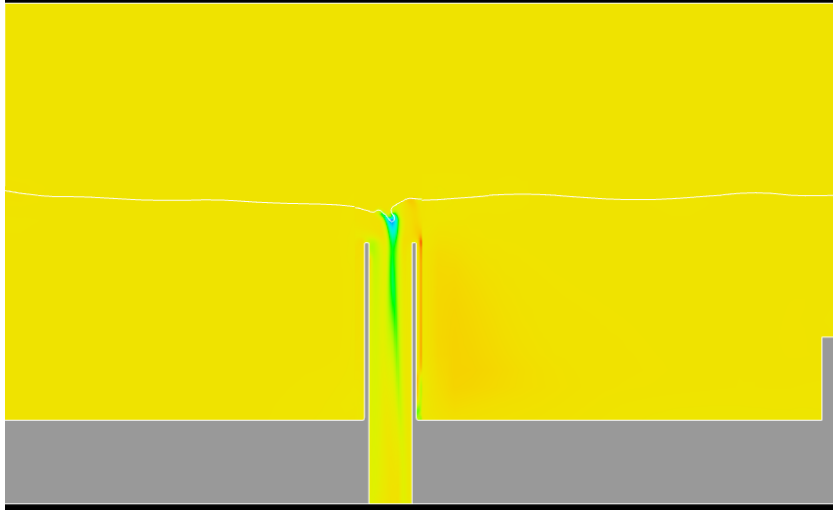


(b)

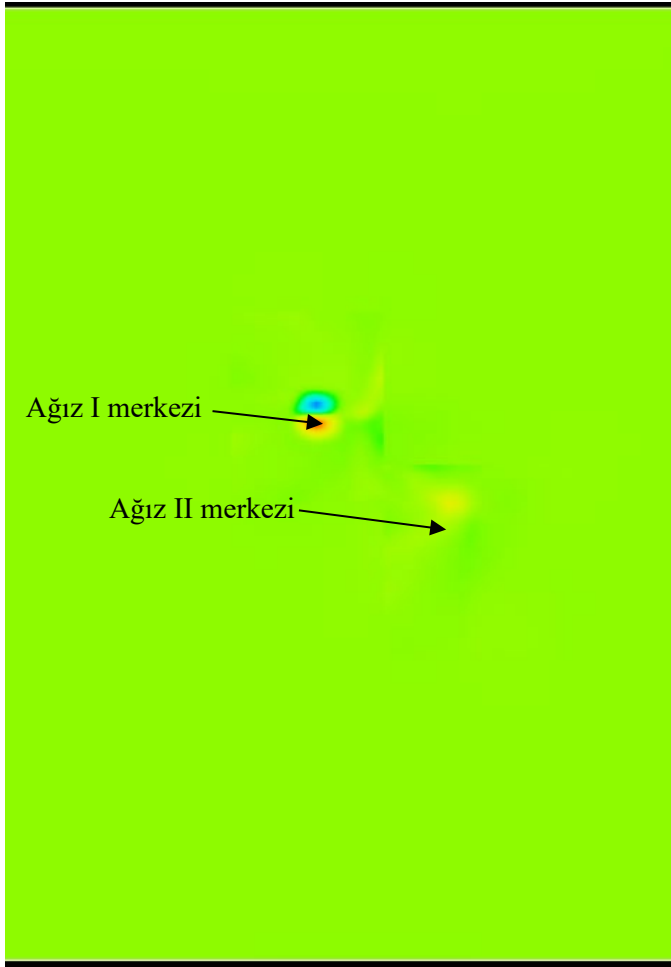
Şekil 6.21. $Q_1/Q_2 = 0.5$, $\alpha_{12} = 90^\circ$ ve $a_{12}/D=2$ olduğu durumdaki vortisite dağılımı (a) Yan görünüm, (b) Plan görünümü

Şekil 6.15.(c) durumunda kanal başlangıcına yakın ağız I'in kendisinden sonra gelen ağız II üzerindeki etkisi (su alma ağızı borusu etrafındaki ayrılma çevrintileri ve Rankine şekli sonucu oluşan ayrılma çevrintileri nedeniyle) a_{12}/D büyüklüğü ve α_{12} açısı ile alakalıdır. Ağız I'e ait Rankine şekli nedeniyle oluşan ayrılma çevrintileri ve ağız I'e ait ağız borusu etrafındaki ayrılma çevrintilerinin etkileri ağız II'ye ait kritik batıklık üzerinde $\alpha_{12} > 45^\circ$ değeri için yok sayılabilecek durumda olduğundan, sayısal yöntem deney sonuçlarına daha

uygun sonuçlar verir (yaklaşık hata %20-30). Şekil 6.22.'de bu duruma ait vortisite dağılımı verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 6.22. $Q_1/Q_2 = 2$, $\alpha_{12} = 45^\circ$ ve $a_{12} = 2D$ olduğu durumdaki vortisite dağılımı (a) Yan görünüm, (b) Plan görünümü

Görüldüğü gibi sayısal yöntem çoklu su alma ağızlarında kritik batıklık için özellikle α_{12} açısı ve ağız debilerine bağlı olarak belirli akım ve geometrik koşullarda kabul edilebilir ölçüde iyi sonuçlar vermektedir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Su alma ağızları tasarlanırken su yüzeyinde oluşan hava çekirdekli çevrıntiler yoluyla ağza hava girişinin engellenmesi gerekmektedir. Çünkü bu durum, su alma ağzının verimli çalışmamasına, istenilen debinin alınamamasına ve su iletim hattında kavitasyon ve titreşimlere neden olur. Bu durum için alınabilecek en kolay tedbir, ağız merkezleri ile su yüzeyi arasındaki düşey mesafe olan batıklığı su alma ağzına hava girişinin başlayacağı kritik batıklık değerinden yüksek tutmaktır. Kritik batıklığın tayini için çoğunlukla deneysel çalışmalar yürütülmektedir. Fakat bazı projeler için deneysel çalışma, zaman ve maliyet koşulları düşünüldüğünde uygun olmayabilir. Böyle durumlarda hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemleri kullanılarak modellemeler yapılabilir. Bu çalışmada dikdörtgen kesitli bir açık kanal akımı içerisine yerleştirilmiş ve düşey aşağı su alan dairesel kesitli çoklu su alma ağızlarına ait kritik batıklık, hesaplamalı akışkanlar dinamiği ilkelerini kullanan bir yazılım ile sayısal olarak elde edilmeye çalışılmıştır. Önceki mevcut çalışmalarda düşey su alan ve kanal akımı içerisine yerleştirilmiş çoklu (ikili veya üçlü) su alma ağızlarına ait kritik batıklık sayısal olarak araştırılmadığından bu yönüyle tez çalışmasının literatüre katkı yapacağı düşünülmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda sıralanmıştır.

- Çoklu su alma ağızları, aralarındaki mesafeye, açığa ve debi oranlarına bağlı olarak birbirleri üzerinde akım engel etkileri uygularlar.
- Bir ağız grubu içerisindeki bir ağız üzerinde oluşan hava çekirdekli çevrıntinin ağza kadar ulaşp ulaşmadığının bilgisayar modellemelerinde tam olarak gözlemlenebilmesi için çok küçük çözüm ağı aralıkları gerekmektedir. Çünkü hava çekirdekli çevrıntinin yarıçapı, çevrıntinin alt ucu ağza doğru yaklaştığında oldukça küçülmektedir. Dolayısıyla tam bir çözüm alınabilmesi çok yüksek kapasiteli bilgisayar imkanlarına ihtiyaç vardır.
- Kritik durumda hava çekirdekli çevrıntinin oluşumu dengeli olmadığı için simülasyonların süresinin, çevrıntinin oluşumunu tam olarak yakalayabilmesi için uzun tutulması gerekmektedir. Bu da yine ancak yüksek kapasiteli bilgisayarlar yardımıyla uygulanabilir hale gelebilir.

- Kritik batıklık veya hava çekirdekli çevrintinin oluşumu üzerinde bilgisayar modellerinde seçilen türbülans modelinin de önemi büyüktür. Bu çalışma kapsamında yapılan simülasyonlar, LES (large eddy simulation) türbülans modelinin hava çekirdekli çevrinti için daha başarılı olduğunu göstermiştir.
- Hava çekirdekli çevrintinin tam olarak ağza girişinin görülemediği durumlarda kritik batıklığın tahmini için ağız yüzeyindeki çöküntü ile belirginleşen ve ağza doğru ilerledikçe şiddeti artan vortisitienin takibi yapılmıştır. Ancak belirtilen durumun oluşması halinde bile ağza hava girişinin kesin olarak gerçekleştiğini söylemenin mümkün olmadığı bilinmelidir.
- Gerek ikili gerekse üçlü ağız durumunda, kanal akımı doğrultusu ile ağız merkezlerini birleştiren doğru arasındaki açının 90° 'ye yaklaşması durumunda deneysel kritik batıklık ile sayısal arasındaki yaklaşık ortalama hata debi durumlarına bağlı olmak kaydıyla %20 civarı iken bu hata, açının 0° 'ye yaklaşması durumunda %40'lara çıkmaktadır.
- Simülasyonlarda hata oranının en büyük olduğu durum, kanal akımı doğrultusu ile ağız merkezleri arasındaki açı 0° olduğu ve membada bulunan ağız debisi ile mansapta bulunan ağız debisi arasında ciddi bir farkın olmadığı durumdur. Böyle bir durumda mansaptaki ağzın debisi membadaki ağzın debisinden küçük olsa dahi kritik batıklık mansaptaki ağızda oluşmaktadır. Membadaki ağza ait Rankine şeklinin etrafında oluşan ayrılma çevrintileri kanal akımı ile birlikte mansaba taşınmakta ve mansaptaki ağzın üzerinde su yüzeyinde rahatsızlıklara sebebiyet vererek mansaptaki ağzın kritik duruma ulaşmasını sağlamaktadır. Fakat bilgisayar modellemelerinde membadaki ağız üzerinde oluşan ayrılma çevrintilerinin mansaba doğru taşınması tam olarak görüntülenmesi için çözüm ağı aralığının çok küçültülmesi gerektiğinden simülasyonlarda bu durum tam olarak yansıtılamamış ve kritik batıklık olması gerektiğinden çok daha az bulunmuştur.
- Kanal akımı doğrultusu ile ağız merkezleri arasındaki açı 0° olmasına rağmen eğer membadaki ağzın debisi mansaptakine göre çok büyükse veya mansaptaki ağzın debisi membadaki ağza göre çok büyükse veya ağızlar arasındaki mesafe çok büyükse ağızların birbirleri üzerindeki etkisi çok olmadığından kritik batıklık değeri bir önceki maddedeki duruma göre daha iyi tahmin edilebilmektedir.

- Kanal akımı doğrultusu ile ağız merkezleri arasındaki açı 90° olması durumunda ağızlara ait Rankine şekillerinin etrafındaki ayrılma çevrintileri yüzeyde ağız akımları üzerinde çok etkili olmadığından bu durum için yazılım nispeten daha düşük hata oranları ile sonuç verebilmektedir.
- Tüm bilgisayar simülasyonlarında kritik batıklık değeri deneysel kritik batıklıktan daha küçük bulunmuştur.
- Kritik batıklığın hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonları ile bulunması deneme-yanılma sürecini gerektirir. İki deneme arasındaki su yüksekliği küçültülürse kritik batıklık tahmininde bir miktar iyileşme sağlanabilir.
- Hata oranlarının daha iyi belirlenebilmesi için simülasyon sayısı arttırılmalıdır.

Sonuç olarak çoklu su alma ağızlarına ait kritik batıklığın hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı ile çözümü belirli akım ve geometri şartları için kabul edilebilir çözümler verse de şu aşamada deneysel modellemenin yerini alabilecek doğrulukta ve güvenilirlikte olduğunu söylemek mümkün değildir.

KAYNAKLAR

- Arslan, M., M. (2006). *Çoklu su alma ağızları için kritik batıklık*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-41.
- Aybar, A., (2012). *Computational modelling of free surface flow in intake structures using flow 3d software*, Master's thesis, Middle East Technical University, Ankara, 1-59.
- Azarpira, M., Sarkardeh, H., Tavakkol, S., Roshan, R., and Bakhshi, H. (2014). Vortices in dam reservoir: A case study of Karun III dam. *Sadhana*, 39(5), 1201-1209.
- Başyazıcı, İ. U. (2007). *İki fazlı akışlara sayısal yöntemlerin uygulanması*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 69-70.
- Evranoş, O.B., (2019). *Su alma yapılarındaki vorteks oluşumunun sayısal olarak incelenmesi ve anti vorteks yapıların değerlendirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 14-46.
- Flow-3D User Manual Version 9.3, (2008). Flow Science, Inc., Santa Fe, New Mexico, USA.
- Göğüş, M., Altan-Sakarya, A. B., ve Köken, M. (2016). Experimental investigation of the anti-vortex devices of Beyhan 1 dam and hydroelectric power plant water intake structure. *Procedia Engineering*, 161, 881-886.
- Guyot, G., Maaloul, H., and Archer, A. (2014). A Vortex modeling with 3D CFD. *In Advances in Hydroinformatics*, Singapore, 433-444.
- Gümüş, V., Şimşek, O., Soydan, N. G., Kırkgöz, M. S. & Aköz, M. S. (2018). Akışkan Hacimleri Yöntemiyle Yapılan Sayısal Modellemelerde Yan Duvar Etkisinin İncelenmesi. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 3(3), 15-21.
- Haspolat, E. (2015). *Determination of critical submergence depth at horizontal intakes*, Master's thesis, Middle East Technical University, Ankara, 33-119.
- Heidmann, J. D., and Ekkad, S. (2007, January). A novel anti-vortex turbine film cooling hole concept. *In Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, 47934, 487-496.
- Hite Jr, J. E., and Mih, W. C. (1994). Velocity of air-core vortices at hydraulic intakes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 120(3), 284-297.
- Jain, B., Ahmad, Z., and Singh, K. M. (2013). *Computational fluid dynamics: A design tool for multiple pump intakes*. Hydro International-2013 conference at IIT Madras, 351-357.
- Kabiri-Samani, A. R., and Borghei, S. M. (2013). Effects of anti-vortex plates on air entrainment by free vortex. *Scientia Iranica*, 20(2), 251-258.

- Kadhim, A. F., and Al Thamiry, H. A. (2020). Computation of critical submergence depth to avoid surface vortices at vertical pumps intakes. *Journal of Engineering*, 26(8), 59-68.
- Khadem Rabe, B., Ghoreishi Najafabadi, S. H., and Sarkardeh, H. (2018). *Numerical simulation of anti-vortex devices at water intakes*. Proceedings of the institution of civil engineers-water management, 171(1), 18-29.
- Kim, C. G., Choi, Y. D., Choi, J. W., and Lee, Y. H. (2012). *A study on the effectiveness of an anti vortex device in the sump model by experiment and CFD*. In IOP conference series: Earth and Environmental Science, 15(7), 072004.
- Kyoji, K., and Tomoyoshi, O. (2005). *CFD simulation of flow in model pump sumps for detection of vortices*. 8th Asian Int. In Fluid Machinery Conference, Yichang, China, 12-15.
- Lucino, C., Liscia, S.O., and Duró, G. (2010). *Vortex detection in pump sumps by means of CFD*. In XXIV latin American congress on hydraulics, Uruguay, 21-25.
- Monshizadeh, M., Tahershamsi, A., Rahimzadeh, H., and Sarkardeh, H. (2017). Comparison between hydraulic and structural based anti-vortex methods at intakes. *The European Physical Journal Plus*, 132(8), 1-11.
- Odgaard, A. J. (1986). Free-surface air core vortex. *Journal of Hydraulic Engineering*, 112(7), 610-620.
- Padmanabhan, M., and Hecker, G. E. (1984). Scale effects in pump sump models. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(11), 1540-1556.
- Park, I., Kim, H. J., Seong, H., and Rhee, D. S. (2018). Experimental studies on surface vortex mitigation using the floating anti-vortex device in sump pumps. *Water*, 10(4), 441.
- Rudolf, P., and Klas, R. (2015). *Numerical simulation of pump-intake vortices*. In the European Physical Journal Web of Conferences, 92, 02077.
- Sefidkoohi, R., Shahidi, A., Ramezani, Y., and Kahe, M. (2017). Simulation of flow pattern in intake by using a numerical model. *Water Harvesting Research*, 2(1), 24-36.
- Sun, H., and Liu, Y. (2015). Theoretical and experimental study on the vortex at hydraulic intakes. *Journal of Hydraulic Research*, 53(6), 787-796.
- Sungur, A. (2018). *Numerical investigation of vortex formation at asymmetric horizontal intakes*, Master's thesis, Middle East Technical University, Ankara, 15-42.
- Tagvaei, S. M., Roshan, R., Safavi, K., and Sarkardeh, H. (2012). Anti-vortex structures at hydropower dams, *International Journal of the Physical Science*. 7(28), 5069-5077.

- Taştan, K., (2007). *Çoklu Su Alma Ağzlarına İçin Kritik Batıklığın Süperpozisyon Yöntemiyle Hesabı*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Eğitim Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 5-64.
- Taştan, K., ve Yıldırım, N. (2018). Su alma ağzı giriş şeklinin hava girişli çevrinti üzerindeki ölçek etkisi. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 6(3), 492-506.
- Taştan, K., and Yıldırım, N. (2010). Effects of dimensionless parameters on air-entraining vortices. *Journal of hydraulic research*, 48(1), 57-64.
- Taştan, K., ve Yıldırım, N. (2009). Bir su alma ağzının kritik batıklığı üzerinde akım sınır etkilerinin karşılaştırılması. *Teknik Dergi*, 20(98), 4779-4792.
- Tataroğlu, R. M. (2014). *Numerical investigation of vortex formation at intake structures using flow-3d software*, Master's thesis, Middle East Technical University, Ankara, 13-46.
- Tokuyay, T. E., and Constantinescu, S. G. (2006). Validation of a large-eddy simulation model to simulate flow in pump intakes of realistic geometry. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(12), 1303-1315.
- Vatistas, G. H., Kozel, V., and Mih, W. C. (1991). A simpler model for concentrated vortices. *Experiments in Fluids*, 11(1), 73-76.
- Yıldırım, N., and Kocabaş, F. (1995). Critical submergence for intakes in open channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(12), 900-905.
- Yıldırım, N., and Kocabaş, F. (1998). Critical submergence for intakes in still-water reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(1), 103-104.
- Yıldırım, N., Kocabaş, F., and Gülcan, S. C. (2000). Flow-boundary effects on critical submergence of intake pipe. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(4), 288-297.
- Yıldırım, N., and Kocabaş, F., (2002). Effect of circulation on critical submergence of an intake pipe. *Journal of Hydraulic Research*, 40(6), 741-752.
- Yıldırım, N., and Taştan, K. (2009). Critical submergence for multiple pipe intakes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(12), 1052-1062.
- Yıldırım, N., Taştan, K., and Arslan, M. M. (2009). Critical submergence for dual pipe intakes. *Journal of Hydraulic Research*, 47(2), 242-249.
- Yıldırım, N., Akay, H., and Taştan, K. (2011). Critical submergence for multiple pipe intakes by the potential flow solution. *Journal of Hydraulic Research*, 49(1), 117-121.
- Yıldırım, N., Eroğlu, N., ve Taştan, K. (2012). Noktasal kuyu özellikli su alma ağzında çevri oluşumu. *Teknik Dergi*, 23(111), 5799-5812.

- Yıldırım, N., Eyüpoğlu, A. S., and Taştan, K. (2012). Critical submergence for dual rectangular intakes. *Journal of Energy Engineering*, 138 (4), 237-245.
- Yıldırım, N., and Taştan, K. (2017). Effective intake for critical submergence in the case of more than one intake. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21 (3), 1004-1008.
- Yıldırım, T. (2020). *Experimental and numerical investigation of vortex formation at multiple horizontal intakes*, Master's thesis, Middle East Technical University, Ankara, 19-74.
- Yıldırım, G. (2021). *Farklı kesit şekillerine sahip su alma ağızlarının membhasındaki hız dağılımlarının sayısal olarak incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 9-104.



Gazili olmak ayrıcalıktır