



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



OGEE TİPİ DOLU SAVAKLAR ÜZERİNDEKİ
AKIMLARIN DENEYSEL VE NÜMERİK
MODELLENMESİ

Öznur KOCAER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs-2019
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Öznur KOCAER tarafından hazırlanan “OGEE TİPİ DOLU SAVAKLAR ÜZERİNDEKİ AKIMLARIN DENEYSEL VE NÜMERİK MODELLENMESİ” adlı tez çalışması 23/05/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği /~~oy çokluğu~~ ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Doç. Dr. Şerife Yurdağül KUMCU

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Alpaslan YARAR

Üye

Doç. Dr. Meral BÜYÜKYILDIZ

İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr.
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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



Öznur KOCAER

Tarih:23.05.2019

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

OGEE TİPİ DOLU SAVAKLAR ÜZERİNDEKİ AKIMLARIN DENEYSEL VE NÜMERİK MODELLENMESİ

Öznur KOCAER

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Alpaslan YARAR

Yıl, 2019 119 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Alpaslan YARAR
Doç. Dr. Şerife Yurdağül KUMCU
Doç. Dr. Meral BÜYÜKYILDIZ

Ogee tipi dolusavak, fonksiyonel uygunluğu ve yüksek güvenlik faktörü nedeniyle en çok tercih edilen savak tiplerinden biridir. Rezervuardaki debilerin ve su seviyelerinin kontrol edilmesi için acil durumlarda su seviyesinin düşürülmesi, normal nehir fonksiyonlarının sürdürülmesi ve fazla suyun tahliyesi gibi birçok kullanımı vardır. Bu çalışmanın temel amacı, ogee tipi dolusavağın laboratuvar ortamlarında açık kanal içinde deneyleri yapılarak üzerindeki akışın araştırılması ve sayısal model ile simüle edilmesidir. Fiziksel modelin birebir aynı boyutlardaki sayısal modeli açık kaynak kodlu ve ticari paket program olmak üzere iki farklı programla modellenmiştir. Modellerin belirlenen dört noktada akış derinlikleri ölçülmüştür. Sayısal analizde $K-\varepsilon$ ve $K-\omega$ SST türbülans modelleri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, akış derinliklerini ve su yüzey profillerini simüle etmek için sayısal araçların yeterince gelişmiş olduğu kanıtlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, Ogee Tipi Dolusavak, $K-\varepsilon$ Türbülans Modeli, $K-\omega$ SST Türbülans Modeli, Deneysel Analiz, Nümerik Analiz

ABSTRACT

MS THESIS

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL MODELING OF FLOW ON OGEE SPILLWAY

Öznur KOCAER

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

Advisor: Assistant Profesor Alpaslan YARAR

2019, 119 Pages

Jury

**Assistant Professor Alpaslan YARAR
Associate Professor Şerife Yurdagül KUMCU
Associate Professor Meral BÜYÜKYILDIZ**

The Ogee type spillway is one of the most preferred sluice types due to its functional suitability and high safety factor. In order to control discharges and water levels in the reservoir, spillways have many uses for reducing water level in emergency situations such as reducing water level, maintaining normal river functions and draining water. The main purpose of this study is to investigate the flow of ogee type spillway in open channels in laboratory environments and to simulate it with numerical model. The physical model is modeled in two different programs as open source and commercial package program. Flow depths of the models were measured at four determined points. K- ϵ and K- ω SST turbulence models were used in numerical analysis. According to the results obtained, it has been proven that the numerical tools are sufficiently developed to simulate the flow depths and water surface profiles.

Keywords: Computational Fluid Dynamics, Ogee Type Spillway, K- ϵ Turbulence Model, K- ω SST Turbulence Model, Experimental Analysis, Numerical Analysis

ÖNSÖZ

Tez çalışması boyunca verdiği değerli tavsiyelerle beni yönlendiren, ihtiyacım olduğu her an desteğini ve tecrübelerini esirgemeyen bana bu çalışma ekibinin bir parçası olma şansı veren danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Alpaslan YARAR'a gösterdiği tüm yardım, sabır ve rehberliği için minnetlerimi sunuyorum.

Öğrencilik yıllarımdan itibaren her konuda desteğini benden esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Sami DÖNDÜREN'e yol göstericiliği ile hep yanımda olduğu için minnettarım. Onun öğrencisi olmak benim için her zaman bir onurdu.

Tezime özgünlük katmamda büyük katkıları olan hesaplamalı akışkanlar dinamiğine dair pek çok şey öğrendiğim beni bu alana yönlendiren Sayın Prof. Dr. Mustafa ARAL hocama geniş bilgi birikimi ve tecrübesini benden esirgemediği için minnetlerimi sunuyorum.

Tezimin her aşamasında tereddüt etmeden bana yardım eden desteğini hiçbir zaman esirgemeyen Arş. Gör. Ali YILDIZ'a yardımlarından dolayı minnettarım.

Tezim ile ilgili takıldığım noktalarda desteğini benden esirgemeyen Arş. Gör. Volkan AKGÜL'e gösterdiği sabır ve yardımlarından dolayı teşekkürlerimi sunuyorum.

OpenFoam programına dair bilgi edinmemi sağlayarak tezimin gelişmesinde katkıda bulunan Sayın Doç. Dr. Ender DEMİREL hocama teşekkürlerimi sunuyorum.

Son olarak sadece tez sürecinde değil hayatımın her aşamasında desteklerini her zaman yanımda hissettiğim sahip olduğum herşeyi borçlu olduğum aileme, anneme ve babama gösterdikleri sonsuz sevgi ve anlayış için minnettarım.

Öznur KOCAER
KONYA-2019



Aleme...

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Genel	1
1.2. Ogee Tipi Dolusavak	2
1.3. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD)	3
1.4. Çalışmanın Amacı.....	3
1.5. Tezin Düzeni.....	4
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	5
2.1. Ogee Tipi Dolusavak Tasarım Çalışmaları.....	5
2.2. CFD Programları ile Dolusavak Modelleme Çalışmaları.....	6
2.3. Volume of Fluid (VOF) Metodu.....	10
2.4. K- ϵ Türbülans Modeli.....	11
2.5. K- ω Türbülans Modeli ve Shear-stress transport (SST) k- ω modeli.....	12
3. FİZİKSEL MODEL DENEY DÜZENİĞİ	14
3.1. Giriş	14
3.2. Fiziksel Modellemenin Önemi.....	14
3.3. Ogee Tipi Dolusavak	14
3.4. Ogee Tipi Dolusavak	15
3.5. Ogee Tipi Dolusavak Tasarımı	16
3.5.1. Dolusavak tepe basıncı	19
3.5.2. Dolusavak debi katsayısının (C) hesaplanması.....	19

3.6. Deneysel Düzenek.....	22
3.7. Deneyin Yapılışı	24
4. ANSYS FLUENT NÜMERİK MODELLEME AŞAMALARI.....	26
4.1. Ön hazırlık (pre-processing)	26
4.1.1. Model geometrisinin oluşturulması	26
4.1.2. Model kalibrasyonu	30
4.1.3. Verilerin paylaşımı	30
4.2. Çözüm (Solving).....	31
4.2.1. Sınır koşulları.....	31
4.2.2. Türbülans modeli	32
4.2.3. VOF metodu	34
4.3. Model Kurulumu.....	36
4.4. Çözüm Değerlendirmesi (Post-Processing).....	38
5. OPENFOAM NÜMERİK MODELLEME AŞAMALARI.....	41
5.1. Ön Hazırlık (Pre-Processing).....	41
5.1.1. Model geometrisinin oluşturulması	42
5.2. Çözüm (Solving).....	43
5.2.1. OpenFoam VOF metodu.....	46
5.2.2. Türbülans modeli	48
5.2.3. Çözücüler	49
5.3. Çözüm Değerlendirmesi (Post-processing)	50
6. ARAŞTIRMA SONUÇLARI.....	53
6.1. Nümerik Modelleme ve Deneysel Modelleme Sonuçları.....	53
6.1.1. Deneysel modelleme sonuçları	53
6.1.2.2D Ansys Fluent-3D Ansys Fluent nümerik model sonuçlarının karşılaştırılması.....	54
6.1.3.3D Ansys Fluent-3D OpenFoam Nümerik Model Sonuçlarının Karşılaştırılması	56
6.1.4. Nümerik model sonuçlarının karşılaştırılması	59
6.1.5. Nümerik model sonuçlarının karşılaştırılması	61

6.1.6. Ansys Fluent ve OpenFaom karşılaştırılması	63
7. TARTIŞMA VE ÖNERİLER.....	65
7.1. Çalışmanın İyileştirilmesi İçin Öneriler	65
7.2. Gelecek Çalışma İçin Öneriler.....	66
KAYNAKLAR	67
EKLER	70
ÖZGEÇMİŞ	103



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

ε

u_c

ω

Kısaltmalar

2D : İki Boyutlu

3D : Üç Boyutlu

CFD : Computational Fluid Dynamics

FVM : Finite Volume Method

PISO : Pressure implicit splitting of operator

RANS : Reynolds averaged Navier-Stokes

SIMPLE : Simi-implicit method for pressure-linked equation

VOF : Volume of fluid

Re : Reynolds Sayısı

Fr : Froude Sayısı

USACE : U.S. Army Corps of Engineers

LDA : Laser Doppler Anemometry

SKE : Standard k- ε

RNG : Renormalization Group k- ε

RKE : Realizable k- ε

MKW : Modified k- ε

SST : Menter's Shear Stress Transport

RSM : Reynolds Stress Model

LES :Large Eddy Simulation
DNS :Direct Numerical Simulation
MMF :Mixture Multiphase Flow
FAVOR :Fractional Area/volume Method
OpenFOAM :Open Field Operation and Manipulation



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Keskin Başlıklı Dolusavak ve Ogee Tipi Dolusavak Görünümü (Soydan ve diğ., 2012).....	5
Şekil 3.1. Dolusavak çeşitlerinin gösterimi (Vischer ve Rutschmann,1988).	15
Şekil 3.2. Nap şeklindeki kret profillerinin elemanları (USBR 1987).....	17
Şekil 3.3. Kret profil denkleminde kullanılan n değerleri tablosu(USBR 1987).....	18
Şekil 3.4. Kret profil denkleminde kullanılan K değerleri tablosu(USBR 1987).....	18
Şekil 3.5. Düşey yüzlü ogee kreti için debi katsayısı (USBR 1987).	20
Şekil 3.6. Tasarım yükünden farklı su yükleri için savak katsayısı (USBR 1987).....	21
Şekil 3.7. Kuyruk suyu etkilerinden kaynaklanan debi katsayılarının oranı (USBR 1987).	21
Şekil 3.8. Deney düzeneğine yerleştirilmiş olan ogee tipi dolusavak	22
Şekil 3.9. Deney düzeneğine yerleştirilmiş olan eşik	23
Şekil 3.10. Deney düzeneği üst görünümü	23
Şekil 3.11. Deney düzeneği genel görünümü	24
Şekil 3.12. Deneysel ölçüm alınan H_1, H_2, H_3 ve H_4 noktaları	24
Şekil 3.13a) Elektromanyetik debimetre cihazı, b) Frekans değiştirici kontrol panosu. 25	
Şekil 4.1. AutoCAD 3 boyutlu model görünümü	27
Şekil 4.2. 2 boyutlu model görünümü.....	27
Şekil 4.3. 3 boyutlu model görünümü.....	28
Şekil 4.4. Mesh araç çubuğu görünümü	28
Şekil 4.5. 2 boyutlu model hegzahedral mesh görünümü.....	29
Şekil 4.6. 2 boyutlu model tetrahedral mesh görünümü	29
Şekil 4.7. 3 boyutlu model hegzahedral mesh görünümü.....	30
Şekil 4.8. 2 boyutlu model sınır koşulları	31
Şekil 4.9. 3 boyutlu model sınır koşulları	32
Şekil 4.10. 2 boyutlu hava-su fazlarının görünümü.....	35
Şekil 4.11. 3 boyutlu hava-su fazlarının görünümü.....	36
Şekil 4.12. Ansys Workbench'de Fluent araç çubuğu.....	36
Şekil 4.13. Ansys Fluent başlangıç ekranı	37
Şekil 4.14. Ansys Fluent general penceresi	38

Şekil 4.15. Ansys Workbench’de Fluent araç çubuğu.....	39
Şekil 4.16. CDF Post’da oluşturulan tablo gösterimi	39
Şekil 4.17. CDF Post’da oluşturulan su yüksekliğinin volume fraction yöntemiyle okunması.....	40
Şekil 5.1. OpenFOAM 3 boyut model görünümü	43
Şekil 5.2. OpenFOAM mesh görünümü	43
Şekil 5.3. OpenFOAM U dosyası	44
Şekil 5.4. OpenFOAM Transportproperties dosyası	45
Şekil 5.5. OpenFOAM ControlDict dosyası.....	46
Şekil 5.6. OpenFOAM TurbulanceProperties dosyası.....	49
Şekil 5.7. OpenFOAM fvSolution dosyası	50
Şekil 5.8. Slice atma işlemi.....	50
Şekil 5.9. ParaView Post Processing	51
Şekil 5.10. ParaView Post Processing akım derinliğinin ölçülmesi.....	51
Şekil 6.1. Debi-Su yüksekliği deneysel veri grafiği	54
Şekil 6.2. H ₁ noktası için Fluent 2D-Fluent 3D nümerik model sonuçlarının karşılaştırılması.....	54
Şekil 6.3. H ₂ noktası için Fluent 2D-Fluent 3D nümerik model sonuçlarının karşılaştırılması.....	55
Şekil 6.4. H ₃ noktası için Fluent 2D-Fluent 3D nümerik model sonuçlarının karşılaştırılması.....	55
Şekil 6.5. H ₄ noktası için Fluent 2D-Fluent 3D nümerik model sonuçlarının karşılaştırılması.....	56
Şekil 6.6. H ₁ noktası için Fluent 3D-OpenFoam 3D nümerik model sonuçlarının karşılaştırılması.....	57
Şekil 6.7. H ₂ noktası için Fluent 3D-OpenFoam 3D nümerik model sonuçlarının karşılaştırılması.....	57
Şekil 6.8. H ₃ noktası için Fluent 3D-OpenFoam 3D nümerik model sonuçlarının karşılaştırılması.....	58
Şekil 6.9. H ₄ noktası için Fluent 3D-OpenFoam 3D nümerik model sonuçlarının karşılaştırılması.....	58

Şekil 6.10. H ₁ noktası için Fluent 2D-Fluent3D OpenFoam 3D nümerik model sonuçları	59
Şekil 6.11. H ₂ noktası için Fluent 2D-Fluent3D OpenFoam 3D nümerik model sonuçları	59
Şekil 6.12. H ₃ noktası için Fluent 2D-Fluent3D OpenFoam 3D nümerik model sonuçları	60
Şekil 6.13. H ₄ noktası için Fluent 2D-Fluent3D OpenFoam 3D nümerik model sonuçları	60



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 5.1. OpenFOAM başlangıç ayarı model katsayıları	48
---	----



1. GİRİŞ

1.1. Genel

Su insan yaşamının vazgeçilmez unsurlarından biridir. Tarih boyunca insanlar sudan en verimli şekilde yararlanmak için çeşitli yöntemler geliştirmiş ve suya yakın yaşamayı tercih etmiştir. Su ile iç içe yaşanan bir yaşamda insanoğlu suyun verebileceği zararlardan korunmak için çeşitli şekillerde su yapıları inşa etmiştir. Barajlarda bu su yapılarından biridir. Barajlar yalnızca korunma amaçlı değil aynı zamanda su kaynaklarının geliştirilmesi kapsamında inşa edilen ve ülkenin ekonomik tarımsal sosyal ve kültürel bakımından kalkınmasına büyük katkılar sağlayan önemli mühendislik yapılarıdır.

Mevcut su kaynaklarının en verimli şekilde kullanılmasını sağlayan barajlar çeşitli tip ve yüksekliklerde inşa edilirler. Barajların kemer baraj, dolgu baraj, beton baraj gibi tipleri vardır. Çeşitli tip ve yükseklikte inşa edilen barajların temel amaçlarının başında elektrik enerjisi üretimi, içme suyu temini, tarımsal araziler için sulama suyu temini, sel ve taşkınların kontrolü, akarsu ulaşımı balıkçılık ve mesire yerlerinin teşkili gibi ekonomik ve sosyal faydaları vardır.

Barajların büyük yapılar olması sebebiyle, hesaplarında ya da inşasında yapılacak en ufak hata bile çok sayıda insanın hayatına mal olacak sonuçlar doğurabilir. Bu nedenle, barajları gerek inşa ederken gerek de işletme ömrü boyunca aralıklarla denetimini yapmak, oluşması muhtemel kazaları tahmin edebilmek ve öncesinde tedbir alabilmek gereklidir. Tahmini kullanım ömürleri 50-100 yıl olan barajların yapımına başlanmadan önce çok dikkatli ve kapsamı geniş bir araştırma sürecinden sonra projelendirmesinin yapılması gerekmektedir. Barajların güvenlik çalışmaları daha projelendirme aşamasında başlar ve barajın ömrü boyunca devam eder. İşletme aşamasında bir barajın denetimi daha sık yapılırken, barajın yaşlanması ile birlikte baraj denetiminin de seyrekleşmesi öngörülmektedir. Barajların denetim altında tutulmasının temel olarak nedenleri arasında barajın yapısal olarak güvenliğinden emin olmak dolayısıyla insanların can ve mal güvenliğini sağlamak ve gelecekte yapılacak olan aynı tip projeler için verileri toplamak gelmektedir.

Baraj yapılarında başlıca hasar sebebi sel olaylarıdır. Barajlar su ile etkileşim halinde oldukları için suyun aşırı olan tüm faaliyetlerinden etkilenirler. Bu nedenle, bu yapılar belirli aralıklarla geçebilecek olan azami taşkın debisine dayanacak şekilde

projelendirilirler. İşletme dönemindeki su yapılarında sel riski baraj gövdesinden çok santral binalarında, iletim kanalları ve iletim hatlarında meydana gelmektedir. Toprak dolgu ve kaya dolgu barajlar kret üzerinden su aşması halinde erozyona uğraması sonucunda yıkılırlar. Ancak dolusavak yapısı bu yıkılmayı engellemek için tasarlanmıştır. Böyle bir durumla karşılaşıldığında dolusavak kapakları açılır veya fazla su dolusavak üzerinden tahliye edilir. Bu nedenle su taşkınları meydana geldiğinde baraj güvenliğinin sağlanması için dolusavak barajın en önemli kısmını oluşturmaktadır. Savaklar su seviyesini düzenlemenin yanı sıra su almak, enerji sönmölemek gibi birçok amaçla kullanılmaktadır. Bu hidrolik yapılar; sulama, yağmur suyu ve atık su sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Dolusavaklar su yapılarında hazneye gelen fazla suyu memba tarafından mansap tarafına geçiren yapılar olarak tanımlanmaktadır. Yeterli kapasiteye sahip bir dolusavak sistemi için daha hızlı, ekonomik ve güvenli hesaplama yöntemlerine ihtiyaç duyulduğu söylenebilir. Dolusavakların tasarım sürecinde birçok farklı durum göz önüne alınır. Öncelikli olarak, su yapısının akarsu üzerindeki konumu belirlenir ve savağın su yapısı içindeki konumuna karar verilir. Bu işlemin sonunda ise hidrolik hesaplamalar ve statik hesaplamalar yapılmalıdır. Hesaplamalarda viskozite etkisi, yüzey gerilmesi, savak boyutlarının yaklaşım kanalının boyutlarına oranı, savak kretinin eğriliği, yaklaşım kanalındaki hız dağılımı, savak yüzeyindeki ve yaklaşım kanalındaki yüzey pürüzlülüğü göz önüne alınmaz (diğer bir değışle akışkanın ideal akışkan olduğu kabul edilir). Yapılan bağlamalarda dolusavak gibi çalışarak su seviyesini belirli bir kota kadar yükseltmek, suyu belirli bir yöne çevirmek ve istenilen seviyeden arzu edilen miktarda su almayı sağlamak gibi fonksiyonlar için kullanılabilir.

1.2. Ogee Tipi Dolusavak

Dolusavaklar aşırı suyu barajdan tahliye etmek için kullanılan yapılar olup suyun kontrol edilememesi halinde baraj güvenliğini tehlikeye atacağından dolayı güçlü ve sağlam yapılar olmak zorundadır. Ogee tipi dolusavaklar sıklıkla tercih edilen dolusavak türlerindedir. Yüksek güvenlik faktörü, işlevsel uygunluğu, sel suyu kontrol kapasitesi tercih edilmesinin en önemli faktörleri arasındadır. Ayrıca ogee tipi dolusavaklar tasarlanırken keskin bir yüzeyden akan suyun aldığı şekle göre taban yapısına şekil verilir. Bu nedenle dolusavaklar neredeyse maksimum verimliliğe sahiptir. Ogee tipi

dolusavak gövdesi, tepe noktasının mansap ve memba kısmı olmak üzere iki profilden oluşmaktadır.

1.3. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD)

Günümüzde gelişen bilgisayar teknolojileri ile birlikte bilgisayar kullanımı yaygınlaşmış ve her alanda etkinliğini göstermeye başlamıştır. Bilgisayarlar kullanılarak yapılan simülasyonlar daha hızlı ve daha güvenilir çözümler elde etmeyi sağlamıştır. Özellikle hidrolik alanında geliştirilen HAD su yapılarındaki akışın modellenmesini sağlayarak maliyet ve zamandan büyük ölçekte kar etmeye olanak sağlamıştır. Deneysel veriler alınırken kullanılan yüksek maliyetli aletlerin yerine, çok kısa süre içinde veriler toplamak mümkün olduğu gibi deneysel koşullara bağlı olarak yaşanan ölçüm hataları gibi hataları en aza indirdiğinden HAD kullanımı gelişerek yaygınlaşmaktadır. Bu alanda kullanılan birçok paket program vardır. ANSYS–Fluent, CFX, OpenFoam, StarCCM+, Flow-3D bu paket programlardan yaygın olarak kullanılanlar arasındadır.

1.4. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmadaki ana amaç nümerik modelde ve inşa edilen deneysel modelde hidrolik davranışların birbirleriyle uyumunun karşılaştırılarak yorumlanmasıdır. Çalışmada Reynolds ortalama Navier-Stokes denklemleri kullanılarak oluşturulan 2 boyutlu ve 3 boyutlu modellerde belirlenen noktalarda elde edilen su yükseklikleri deneysel ve nümerik olarak karşılaştırılmış ve sonuçların tutarlılığı üzerine analizler yapılmıştır. Çalışmada iki farklı program ile oluşturulmuş sayısal model ve deneysel model bulunmaktadır. Deneysel modelde kullanılan ogee tipi dolusavağın tasarımı ile ilgili bilgi verilmesi ve oluşturulan sayısal modelde model kurulumu, kalibrasyonu ve belirli parametrelere duyarlılığı (mesh kalitesi gibi) ile ilgili detayların açıklanarak nümerik model kurulum aşamaları hakkında ayrıntılı bilgi verilmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca nümerik modellemede kullanılan iki farklı program hakkında karşılaştırmalı bilgilere yer verilerek programların birbirlerine olan üstün yönlerine dikkat çekmek amaçlanmaktadır.

1.5. Tezin Düzeni

Bu çalışma 6 başlık halinde bölünerek açıklanmıştır.

Bölüm 1’de genel giriş, çalışmada fiziksel modelde ana unsur olarak kullanılan ogee tipi dolusavak ile ilgili bilgiler, CFD ile ilgili kısa giriş ve çalışmanın amacından bahsedilmiştir.

Bölüm 2’de ise tezin konularını oluşturan nümerik ve deneysel metotlar için yapılan literatür taramasına yer verilmiştir. Ogee tipi dolusavaklarla yapılan deneysel çalışmalar incelenmiş ayrıca genel olarak dolusavakları modellemede kullanılan paket programlarına ve türbülans modellerine değinilmiştir.

Bölüm 3’de fiziksel modelin kurulması ile ilgili bilgiler verilmiş olup ogee tipi dolusavağın USBR standartlarına göre nasıl inşa edildiği anlatılmıştır. Ogee tipi dolusavağın neden tercih edildiği konusunda açıklamalar yapılmış üstün yönlerinden bahsedilmiştir. Deneysel düzenek üzerinde yapılan çalışma hakkında bilgi verilmiştir.

Bölüm 4 ve Bölüm 5’de ise nümerik modelin arka planı ile ilgili bilgiler verilmiştir. Nümerik modelde kullanılan VOF metodu ve türbülans modelleri açıklanarak modellemede kullanılan paket programlar Ansys-Fluent ve OpenFOAM hakkında bilgiler verilmiştir. Nümerik modelin sırasıyla kurulum aşamaları anlatılmıştır.

Bölüm 6’da deneysel ve nümerik modelden elde edilmiş olan sonuçlar grafikselleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlarla ilgili olarak yorumlara ve çalışmanın iyileştirilmesi için önerilere yer verilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Ogee Tipi Dolusavak Tasarım Çalışmaları

Ogee tipi dolu savak, keskin kenarlı bir savaktan su tahliye edildiğinde meydana gelen şekli alacak şekilde dizayn edilmiştir. Ogee tipi dolusavak dizaynında su sınır tabaka ile etkileşimi olmadan Şekil 2.1’de gösterildiği gibi kretin üzerinden akıcı bir şekilde akar ve dolusavaktan alınan verim maksimum seviyededir. (U.S. Bureau Reclamation, 1974).



Şekil 2.1. Keskin Başlıklı Dolusavak ve Ogee Tipi Dolusavak Görünümü (Soydan, 2012)

Ogee üzerindeki savak yükü arttırıldığında yani savak yükü dizayn savak yükünü geçtiği zaman kret üzerinde basınç, açık hava basıncının altına düşerek negatif basınç oluşturur. Buda kavitasyona sebep olur. Bu nedenle, dolusavaktan verimlilik elde etmek için dolusavak tasarımı büyük önem arz etmektedir.

Gelişen bilgisayar teknolojileriyle beraber gerçek modele yüksek oranda benzer tasarım yapmak çok daha kolay ve etkili bir hal almıştır. Modellemeler 2 boyutlu ve 3 boyutlu olarak yapılabilir. Ancak iki boyutlu modellerde türbülans gibi etmenler için düzgün hesaplama yapılamadığından yalnızca su yüzey profilini doğrulamak gibi basit çözümler yapılabilir. Gelişen teknolojiyle beraber tasarım yapmak mümkündür. Ancak yine de doğruluğunu kontrol etmek amacıyla fiziksel modele de ihtiyaç duyulmaktadır.

Kandaswamy ve Rouse (1957), ogee üzerindeki debi ve debi katsayısının hesaplanması konusunda yaptığı çalışmada debi katsayısının doğru bir şekilde belirlemenin debinin doğru bir şekilde hesaplanmasında önemli bir etmen olduğunu belirtmiştir.

Zarrati ve diğ. (2004), kanal eğimindeki ani basınç değişiminden sonra serbest akış basınç dağılımını hesaplamak üzere sayısal bir model geliştirmiştir. Bu modelin doğruluğunun kanıtlanabilmesi için sayısal verileri deneysel verilerle karşılaştırmıştır. 6.22°, 10° ve 15° eğim değişiklikleri değişik debilerle test edilmiştir. Ani eğim değişim noktalarının yakınında hidrostatik basıncın 25 katına kadar olan basınçlar ölçülmüştür.

Aynı zamanda bu basınçların modellenmesi de yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Kanal yatağı boyunca derinlik ve basınç dağılımının sonuçlarının oldukça örtüştüğü gözlemlenmiştir.

Tullis ve Neilson (2008), yaptığı çalışmada batmış akım için dokuz farklı geometriye sahip ogee üzerinde deneyler yaparak memba ve mansap tarafındaki akımları incelemiştir. USBR tarafından belirlenen batmış akım katsayısı $S > 0.8$ için sonuçların uyuşma göstermediğini $S < 0.8$ için ise tutarlı sonuç verdiğini belirtmişlerdir.

Ghobadian ve diğ. (2013), ogee tipi dolusavak üzerindeki tepe pürüzlülüğünün akışa olan etkilerini araştırmış ve pürüzlülük ile debi katsayısı arasında ters orantı olduğunu belirtmiştir.

Kamanbedast ve diğ. (2014), benzer olarak yaptığı çalışmada yüzey pürüzlülüğünün fiziksel model üzerinde etkisini araştırmıştır. Bunun sonucunda pürüzlülük ile debi katsayısının arasındaki ters orantıya değinmişlerdir.

Herrera-Granados ve Kostecki (2016), Güney Polonya'daki yeni Niedów barajı üzerindeki akışı iki boyutlu ve üç boyutlu simüle etmiştir. Olası yıkıcı durumlar için ogee dolusavağının debi tahliye kapasitesini araştırmıştır. Deneyler sürekli akışlar için dolusavağın tahliye kapasitesini güvenli bir şekilde karşıladığını kanıtlamıştır.

2.2. CFD Programları ile Dolusavak Modelleme Çalışmaları

Geçmiş yıllarda hidrolik mühendisliğinde CFD uygulamaları yapılmadan önce MacDonald ve diğ. (1997), fiziksel model kullanılarak test etme işlemi ile beraber sabit St-Venant denklemlerine dayanan sürekli açık kanal akışı için grafiksel yöntemler ve yinelemeli yöntemler kullanılarak derinlik ve su yüzey profilleri elde edilmiştir. Deney maliyetinin yüksek, kurulum süresinin uzun ve yapılacak hataların can ve mal kaybına neden olabilecek kadar büyük olmasından dolayı farklı çözüm teknikleri araştırmaya başlanmıştır. Sonuç olarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği ortaya çıkmıştır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği pek çok farklı alanda (akış alanı, yanma gibi) fiziksel detayların gözlemlenebildiği bilgisayar tabanlı çözümler yapan bir bilim koludur. Su yapı etkileşiminin olduğu dolusavak akımlarını araştırmak için nümerik olarak yapılmış birçok çalışma vardır.

Song ve Zhou (1999), yapmış olduğu çalışmada sıkıştırılamayan akım için açık sonlu hacim denklemi kullanarak 1 boyutlu su yüzü profillerini kullanarak 3 boyutlu çözümlenmiş ve su yüzü profili, hız ve basınç dağılımlarını incelemiştir.

Dolusavakların çeşitli tipleri ile yapılmış çalışmalar arasında ogee tipi dolu savakla ilgili olarak, Choi ve Kim (2000), baraj mansabında ogee profilli savak üzerinden geçen akımın debisini, savak üzerindeki hız ve basınç dağılımlarını ve su yüzü profillerini sonlu elemanlar yöntemi kullanarak sayısal olarak hesap etmişlerdir. Çalışmaları sonucunda elde ettikleri verileri, USACE (U.S.Army Corps of Engineers) sonuçları ile karşılaştırmışlar, deneysel ve sayısal bulguların birbirleriyle oldukça uyumlu olduğunu ifade etmişlerdir.

Ho ve diğ. (2003), dolusavak profilini iki ve üç boyutlu CFD modellemesini araştırmışlardır. Yükselen taşkın seviyeleri altında hidrolik model ve deneysel veriler karşılaştırıldığında birbiriyle uyumlu sonuçlar elde edildiğini belirtmişlerdir.

Chatila ve Tabbara (2004), yaptıkları çalışmada ogee profili dolusavakların hidrolik özelliklerini deneysel ve teorik olarak incelemişlerdir. ADINA programı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemine dayalı çözümler yapmışlar ve elde edilen sayısal su yüzü profilleri ile deneysel ölçülen su yüzü profilleri karşılaştırmışlar, deneysel veriler ile program veri sonuçlarının uyum içinde olduğunu belirtmişlerdir.

Gessler (2005), bir gölün kuzey ve güneyinde bulunan iki tane dolusavak için modelleme yapmış ve 1960'da Research Laboratory Inc.'de 1:60 boyutunda modellenip alınan sonuçlar ile karşılaştırma yapmıştır. Nümerik modelde fiziksel modelle uygun validasyonlarını yapmış ancak sonuçlarda doğa etkisinin de göz önünde bulundurulması gerektiğini vurgulamıştır. Fiziksel sonuçlar ve daha önce elde edilmiş olan deneysel sonuçlar birbiriyle benzer şekilde elde edilmiştir.

Kim ve Park (2005), yaptığı çalışmada ogee profili dolusavaklardaki boyut ve pürüzlülük etkisinin hız, su yüzü profili ve basınç üzerindeki etkilerini sayısal model kullanarak araştırmışlardır. Sayısal model için Flow-3D paket programını kullanmışlardır. 6 farklı parametrenin araştırılmasına dayanan çalışmalarında pürüzlülük katsayısı $k=0.5$ mm, $k=3.0$ mm ve 1/50, 1/100, 1/200 oranlarında prototip oluşturarak çalışma yapmışlar ve çalışmalarının sonucunda uzunluk ölçeğinin artmasının yüzey pürüzlülüğünün artmasına bağlı olarak benzer etkilere neden olduğunu belirtmişlerdir. Ogee profilindeki herhangi bölümdeki maksimum hızın yüzey pürüzlülüğü ve uzunluk ölçeği oranı arttıkça azaldığı model sonuçlarında belirtilmiştir. Ayrıca ölçek oranı 100 veya 200'den az ise ölçek etkilerindeki hataların kabul edilebilir olduğunu belirtmişlerdir.

Kim ve diğ. (2010), Ciberang Nehrinde bulunan Karian barajını çalışma alanı olarak kullanmıştır. Barajın planı baz alınarak stabilite kontrolü yapılmaya çalışılmıştır. Flow-3D yardımıyla hidrolik stabilitenin geliştirilmesi amacıyla modelleme

çalışmalarında bulunmuş çalışmanın sonunda yeterli stabilite şartlarının olmadığı anlaşılmış ve geliştirmek amacıyla dizaynda bazı revizyonlar yapılmıştır.

Li ve diğ. (2011), gerçek boyutlu sistemin 1/54 ölçekli fiziksel prototipini oluşturmuş ve sonuçlar almıştır. Model oluştururken mesh oluşturma bölümünde Ansys Inc.'nin GAMBIT paket programı kullanılırken simülasyon için Ansys-Fluent programı kullanarak taşkın akımının sayısal olarak modellenmesini yapmıştır. Yaklaşım kanalının şekli üzerinde çeşitli kombinasyonlar deneyerek su yüzü yükseklikleri arasındaki farkı karşılaştırmıştır. Ayrıca CFD model ile prototipin 29 noktada hız değerlerini alarak karşılaştırma yapmış ve prototiple nümerik model sonuçları arasında uyum gözlemlenmiştir.

Bal (2011), geniş başlıklı dolusavak üzerinde yaptıkları çalışmada hız alanlarını LDA (Laser Doppler Anemometry) ile ölçmüştür. Aynı deney koşullarındaki akım için temel denklemler ve sonlu hacim yöntemlerine dayalı olarak ANSYS Fluent paket programı için çözüm yapmışlardır. Yapılan sayısal modellemede altı farklı SKE (Standart k-ε), RNG (Renormalization Group k-ε), RKE (Realizable k-ε), MKW (Modified k-ε), SST (Menter's Shear Stress Transport) ve RSM (Reynold Stress Model) modeli için karşılaştırma yapılmış ve bu akım alanlarının sayısal simülasyonunda en iyi sonucu SST modelinin verdiği belirtilmiştir.

Attari ve Sarfaraz (2012), yapmış olduğu çalışmada basamaklı dolusavak modeli oluşturmuş ve oluşturduğu modelde ogee tepe noktasıyla basamaklar arasında bir geçiş bölgesi olması gerektiğini vurgulamıştır. Geçiş bölgesi olan ve geçiş bölgesi olmayan her iki durumda simülasyonunu yapmış ve dolusavak dizaynında nümerik modellemenin hızlı ve kolay sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Morales ve diğ. (2012), ogee profilli dolu savak üzerinden geçen akımı ve radyal kapağı VOF (Volume of Fluid) metoduyla oluşturmuş ve sonrasında yaptığı deney düzeneğinden elde ettiği sonuçları karşılaştırmıştır. Çalışma sonucunda fiziksel model ile deneysel model karşılaştırmasında olumlu sonuçlar elde etmiş ve CFD metodunun hidrolik yapıların dizaynında kullanılabilir olacak önemli bir araç olduğundan bahsetmiştir.

Andersson ve diğ. (2013), karmaşık geometriye sahip rezervuardan su akışını üç boyutlu olarak modellenmesini gerçekleştirmiş ve modellemede standart k-ε ve SSG (Reynold Stress Model) olmak üzere iki farklı türbülans modeli kullanılmıştır. Sonuçları laboratuvar deneyleriyle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda sayısal olarak tutarlılık gözlemlenmiştir.

Fadaei-Kemani ve Barani (2014), yaptığı çalışmada Flow-3D paket programını kullanarak dolusavak üzerinden geçen akışı simüle etmiş ve dört farklı nokta için hız ve basınç ölçümleri almıştır. Deneysel ve nümerik sonuçlar arasındaki hız değerleri için maksimum farklılık %5.47 ölçülürken basınç değerleri arasındaki farklılık %7.97 olarak ölçülmüştür. Nümerik sonuçlarının deneysel sonuçlarla makul oranda yakınlık gösterdiğini ve nümerik modellemenin dizaynın doğruluğu için kontrol aracı olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Gümüş ve Kırkgöz (2014), dolusavak akımının farklı türbülans modelleri ile sayısal olarak hesaplamasını yapmış ve deney çalışmasında yuvarlak başlıklı dolusavak kullanmıştır. Çalışmada, k-ε tabanlı üç türbülans kapatma modeli kullanılmış ve sayısal çözümleri sonlu hacimler yöntemine dayalı ANSYS Fluent paket programıyla yapmışlardır. Çalışma sonucunda türbülans modelleri içinden RSM modelinin akım eğrilerinin olumlu sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

Usta (2014), Laleli barajı dolusavağının hidrolik karakteristiklerini sayısal olarak araştırmış ve elde ettiği sonuçları deneysel verilerle karşılaştırmıştır. Laleli Barajı dolusavağının modellenmesinde Flow-3D programını kullanmış, modeldeki basınç dağılımı, akıma hava girişi etkisi ve kavitasyon durumu araştırılmıştır. CFD ile sayısal modellemenin tasarımın güvenli ve hızlı olması bakımından yarar sağladığını ve dolusavak üzerinde kaydedilen basınç dağılımının verileriyle kurulan modelin sonuçlarının çok benzer olduğunu belirtmiştir.

Kanyabujinja (2015), çalışmasında ogee profilli dolusavağa yer vermiş kullanılma amaçlarından bahsetmiştir. Değişik türbülans modellerinin ANSYS-Fluent akış parametreleri üzerinde etkisini araştırmış kurduğu deneysel düzenekte 9 farklı debi için su seviyesi ölçümleri almıştır. Çalışma sonucunda 3D modelin 2D modelden daha iyi sonuç verdiği ancak basınç grafiklerinde yakın değerlerin elde edilemediği belirtilmiştir.

Peltier ve diğ. (2015), çalışmasında biri diğerinin boyutlarının yarısı olan iki tip ogee profili üzerinde ölçek etkisini araştırmıştır. Deneysel ölçümler sonucunda ölçek etkisinin hız alanlarında değişiklik oluşturmadığını belirtmiştir.

Kumcu (2016), yaptığı çalışmada Kavşak Barajı'nın nümerik ve fiziksel modelini oluşturmuştur. Kavşak barajını sayısal modellemesini Flow-3D paket programını kullanarak 1/50 ölçekte modellemiş fiziksel modelde ogee üzerinde su yüzey profilleri ve çeşitli konumlardaki basınçlar ölçülerek aynı zamanda ogee dolusavak profili boyunca kavitasyon riskini incelemiştir. Akış oranı sonuçlarına bakılarak oluşturulan nümerik

model ile fiziksel model arasında ortalama yüzde 3.2 fark ile sayısal ve fiziksel modelin oldukça makul sonuçlar verdiğini belirtmiştir.

Date ve diğ. (2017), STAR CCM+ CFD tabanlı programını kullanarak ogee profilli dolusavağın VOF modeli ve MMF modeli kullanarak modellemiş, elde ettiği verileri deneysel verilerle karşılaştırmıştır. Çalışma sonucunda VOF modeli ile birlikte RNG türbülans modelinin kullanılması ogee tipi dolusavaktaki akışı simüle etmek için MMF modelinden daha iyi sonuç verdiği belirtilmiştir.

2.3. Volume of Fluid (VOF) Metodu

VOF metodu serbest ara yüzlerin incelenmesi için en çok tercih edilen iki fazlı akış yöntemlerinden biridir. VOF yöntemi temel olarak hesaplamada eleman hacimlerinin dolu, boş ya da kısmen dolu olmasına ayrıca çözüm ağında hacimleri tanımlarken sıvı ve dolu olmayan eleman hacminin bir F miktarına bağlı olarak tanımlanmasına da dayanmaktadır.

VOF metodunda Navier-Stokes ve Süreklilik denklemlerine ek olarak her kontrol hacmi için fonksiyonu q olarak adlandırmıştır. $q=1$ hücrenin dolu, $q=0$ boş, $0 < q < 1$ kısmen dolu olduğunu gösterir. Hesaplamalar süreklilik denklemleri temel alınarak yapılır.

VOF metodunu Hirt ve Nichols (1981), kesirli hacimler metodu olarak tanımlamıştır. Çözümlemede az veri depolaması yapması sebebiyle, üç boyutlu yöntemlerde kullanılmasının işlevselliğine değinmiş ve daha verimli bir çözüm yöntemi olduğunu belirtmişlerdir.

Vinay ve diğ (2008), ara yüzlerin ve serbest yüzeylerin izlenmesi için yüzey yöntemleri ve hacim yöntemleri olarak ikiye ayırmışlar dört farklı ara yüz belirleme metodolojisi incelemişler ve içlerinden VOF metodunun daha doğru sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Eghbalzadeh ve Javan (2012), yapmış oldukları çalışmada basamaklı dolusavak üzerinde MMF ve VOF modelini kullanmıştır. MMF modelinin VOF modelinden fazların arasında kütle momentum enerji etkileşimi olması, fazların iç içe geçmesine izin vermesi, fazların kayma hızı kavramını kullanarak farklı hızlarda hareket etmesine imkân tanınması gibi farklılıkları olduğunu belirtmiştir. Sonuç olarak her iki modelinde sonuç tahmin etmekte oldukça iyi olup sonuçlarının çok yakın olduğunu belirtmiştir.

2.4. K- ε Türbülans Modeli

K-ε, yaygın olarak kullanılan türbülans modellerinden biridir. Türbülans modelleri akış denklemlerini hesaplamak için kullanılır ve ortalama akışın hesaplanmasını sağlarlar. Klasik türbülans modelleri Reynolds Ortalama Navier-Stokes (RANS) denklemlerine dayanarak çözüm yapar. K- ε türbülans modeli uygulanmasının oldukça basit olması ve özellikle açık kanal akışlarında makul sonuçlar vermesi nedeniyle tercih edilen bir modeldir. K-ε modeli, türbülanslı kinetik enerjiyi (birim kütle başına) etkileyen k değerine odaklanır.

Alfrink ve Van (1983), çalışmalarında basamaklı trapez kesitli açık kanal akımında k-ε türbülans modelini ve Reynolds denklemlerini kullanarak matematiksel modellemesini yapmıştır. Açık kanaldaki hız profili modellenerek sayısal çözüm ile deneysel ölçümler karşılaştırılmıştır. k-ε türbülans modelinin akımı ifade eden temel denklemlerin çözümünde başarılı olduğu ve modeldeki sabitlerin pürüzlük koşullarından etkilendiği tespit edilmiştir.

Sarker ve Rhodes (2004), açık bir kanaldaki dikdörtgen şeklinde enkesite sahip geniş başlıklı dolusavak üzerindeki serbest yüzeyli akımın özelliklerini nümerik ve deneysel modeller üzerinde incelemişlerdir. Nümerik modellemede ANSYS-Fluent paket programı ve Standart k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. İki modelin karşılaştırılması sonucunda k-ε modeli türbülans modelinin deneysel modele oldukça yakın sonuçlar elde ettiği gözlemlenmiştir.

Qian ve diğ. (2009), basamaklı dolusavak üzerinde yaptığı modellemede VOF ve MMF modelini kullanmış, Realizable k-ε, SST, k-ε türbülans modelleri ile sonuçlar almış ve deneysel sonuçlarla karşılaştırmıştır. Realizable k-ε türbülans modelinin gerçeğe en yakın sonuçlar verdiğini belirtmiştir.

Dursun ve Öztürk (2009), Dolusavak mansabında oluşan enerji kırılmasını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. ANSYS Fluent paket programı yardımıyla farklı akım koşulları altındaki akımı k-ε türbülans modelini kullanarak modellemişlerdir. Yapılan çalışmanın sonucunda sayısal ve deneysel sonuçların birbirleriyle benzer sonuçlar verdiği görülmüştür.

Zhenwei ve diğ. (2012), yapmış olduğu çalışmada dolusavak üzerindeki akışı Standart K-ε türbülans modelini kullanarak modellemiştir. Basınç ve hız değerlerini deneysel model ile karşılaştırmıştır. Elde edilen değerlere göre k-ε türbülans modelinin oldukça iyi sonuçlar verdiğini belirtilmiştir.

Soydan (2012), trapez kesitli geniş başlıklı savak akımını ANSYS-Fluent paket programını kullanarak modellemiştir. Türbülans modeli olarak Standart k-ε, RNG k-ε ve Realizable k-ε türbülans modelleri kullanılmış ve ölçüm alınan su yüzü profilleri ile deneysel verileri karşılaştırmıştır. Çalışmanın sonucunda k-ε türbülans modeli grubunun tamamının su yüzey profillerinde oldukça iyi sonuçlar verdiği ancak bunların içinde standart k-ε türbülans modelinin diğer modellere göre kısmen daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

Nikseresht ve diğ. (2012), iki tip basamaklı dolusavak üzerinde modelleme yapmış ve modellemede Large Eddy Simulaiton (LES), Standard k-ε, Realizable k-ε, RNG k-ε, Standard k-ω, SST (Shear Stress Transport) k-ω modeli ve RSM modelini kullanmış hangi modelin daha iyi sonuç vereceğini araştırmıştır. Çalışmanın sonucunda gerçek değerlere en yakın değeri ve benzer davranışları gösteren modelin RSM türbülans modeli olduğunu belirtmiştir.

Rad ve diğ. (2016), yapmış olduğu çalışmada 3 tip farklı dolusavak türü üzerinde sayısal modelleme yapmıştır. Sayısal modellemenin ön gördüğü basınç ve enerji kaybı, akış alanı gibi parametreleri inceleyerek hidrolik yapıların en verimli tasarımını yapılmasını sağlayacağını belirtmiştir. Modellediği kombinasyonlar içinde fiziksel modelde en uygun sonuçlar veren modelin VOF metodu ve Realizable k-ε kombinasyonu olduğunu belirtmiştir.

Rodi (2017), yaptığı çalışmada türbülansı simüle etmek için geçmiş dönemlerde kullanılan yöntemleri araştırmıştır. En yaygın olarak kullanılan türbülans modelinin k-ε türbülans türbülans modeli olduğuna değinmiştir. DNS, LES, RANS gibi çeşitli yöntemleri deneyerek uygulamaları örneklendirmiş ve geniş bir literatür bilgisi vermiştir.

2.5. K- ω Türbülans Modeli ve Shear-stress transport (SST) k- ω modeli

K-ω türbülans modeli başlangıçta Wilcox tarafından önerilmiştir (Wilcox, 1988). K-ω türbülans modeli geniş basınç gradyanlarında ve akış ayırım bölgelerinde verdiği olumlu sonuçlardan dolayı tercih edilen türbülans modelleri arasındadır.

Shear-stress transport (SST) k-ω türbülans modeli Menter tarafından 1994 yılından önerilmiştir (Menter, 1994). K-ω türbülans modeline benzer olarak türbülans kinetik enerjisi (k) ve spesifik yayılma oranı (ω) olan iki ana denklemi bulunmaktadır. K-ω-SST türbülans modeli k-ε ve k-ω türbülans modellerinin en gelişmiş özelliklerini bir araya getirilmesinden oluşmuştur.

K- ϵ ve k- ω iki denklemlili türbülans modelleri ortalama hız gradyanları ve türbülans viskoziteli Reynolds gerilmelerine bağlı difüzyon teoremlerini kullanır. Hz, türbülans viskozitesi ve türbülans uzunluğu ölçek boyutuna göre modellenir (ANSYS Inc., 1970).

Berg ve diğ. (2006), yapmış olduğu çalışmada dikdörtgen bir su jetinde k- ϵ ve k- ω türbülans modellerini kullanarak matematiksel model ve dört farklı kombinasyon için sayısal model zmlemesi yapmıştır. Sonuç olarak k- ϵ modelinin deneysel sonuçlarla en iyi eşleşmeyi verdiği gözlemlenmiştir.

Kırkgöz ve ner (2006), yaptığı çalışmada açık kanal içerisine yerleştirilen dairesel bir boru ile etkileşime giren iki boyutlu türbülanslı akımın hem deneysel hem de teorik olarak özelliklerini incelemişlerdir. Modelleme için ANSYS-Fluent paket programı kullanılmış, türbülans modeli olarak ise Standart k- ϵ ve Standart k- ω ve SST türbülans modelleri kullanılmıştır. Deneysel lmler ve nümerik analiz sonuçlarından alınan hız ölçüm verileri karşılaştırıldığında türbülans modelleri içinden Standart k- ω ve SST türbülans modellerinin hız alanını belirlemede en başarılı olduğu sonucuna varılmıştır.

3. FİZİKSEL MODEL DENEY DÜZENEĞİ

3.1. Giriş

Bu bölüm laboratuvarında ogee tipi dolusavak kullanılarak gerçekleştirilmiş olan deneysel düzenekle ilgili ayrıntılı açıklamalardan oluşmuştur. Test süreci ile ilgili ve deneysel yöntemin nasıl geliştirildiğiyle ilgili açıklamalara yer verilmiştir. Deneysel testlerin yapılmasındaki amaç CFD modellemesi ile elde edilmiş olan sonuçlarla deneysel olarak elde edilmiş olan sonuçların karşılaştırmalı analizinin yapılmasıdır. Bu nedenle deneysel düzenekte ogee tipi dolusavak üzerinden akan suda farklı debiler için su yüzünün hidrolik profili incelenmiştir.

3.2. Fiziksel Modellemenin Önemi

Fiziksel modeller geçmişten günümüze kadar büyük önem taşıyarak çalışmaların bir parçası haline gelmiştir. CFD yöntemi kullanılmaya başlanmadan önce yapılacak olan modeller küçük boyutlardaki fiziksel modellerle test edilmiş ve yapının optimum tasarımını elde etmek için tasarım sürecinde büyük rol oynamıştır. Fiziksel modeller, nümerik modellerin kalibrasyonun yapılmasında kontrol aracı olarak kullanılır. İki modelin karşılaştırılması ile kesin sonuç eldesi sağlanması nedeniyle CFD teknikleri gelişmesine rağmen, fiziksel model önemini korumaya devam etmiştir. Fiziksel modelleme hala araştırmacıların en güvendiği yöntemlerden biri olarak çalışmalarda sıklıkla kullanılmaktadır.

3.3. Ogee Tipi Dolusavak

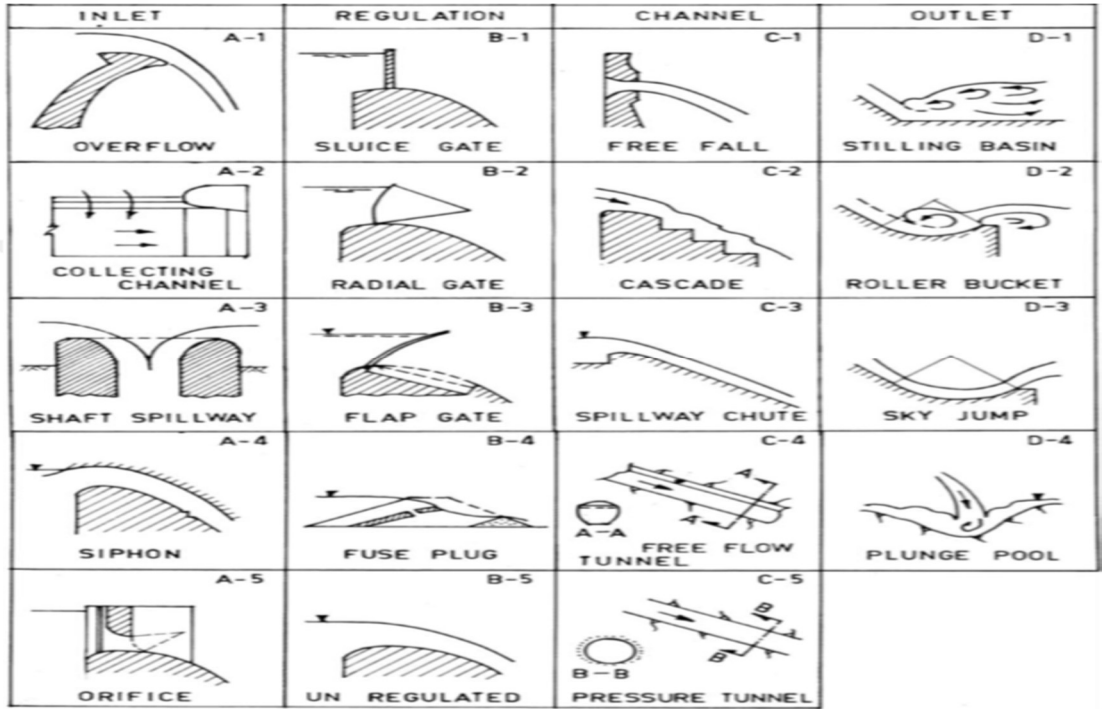
Dolusavaklar bir baraj projesinin en önemli yapıları arasındadır. Herhangi bir taşkın durumunda projenin güvenliğini sağlamak, projeye taşma suyunu kontrollü veya kontrolsüz bir şekilde aktarabilmek için gerekli olan yapılardır. Barajın zarar görmesini engellemek amacıyla dolusavakların yeterli kapasitede tasarlanmaları büyük önem arz etmektedir. İnsanların güvenliği söz konusu olduğunda tasarım yapılırken oluşabilecek maksimum taşmayı göz önüne alarak dolusavakın tasarımı yapılmalıdır. Dolusavak kontrol yapısı, deşarj kanalı, terminal yapısı ve gerekli olduğu durumlarda giriş ve çıkış kanalları olmak üzere bölümlere ayrılmıştır.

Kontrol Yapısı: Dolu savaktaki çıkış akımının ayrılması için kullanılan yapılardır.

Deşarj Kanalı: Kontrol yapısından çıkan suyun mansap tarafına aktarılmasını sağlayan kanaldır.

Terminal Yapısı: Mansaba zarar gelmesini önlemek için yapılan enerji kırıcı yapılardır.

Maliyet, topografik koşullar, baraj yüksekliği, bulunan yerin jeolojisi ve hidrolojisi bakımından birden çok dolusavak türü düşünülebilir. Labirent tipi dolusavak, yandan alıslı dolusavak, serbest akışlı dolusavak, şaft (morning glory) dolusavak, bloklu şüt (buffle shute) dolusavak, tünel tipi dolusavak geniş başlıklı dolusavak, keskin başlıklı dolusavak ve ogee tipi dolusavak bu çeşitlerden yalnızca bazılarıdır. Şekil 3.1'de dolusavakların çeşitleri gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Dolusavak çeşitlerinin gösterimi (Vischer ve Rutschmann,1988).

3.4. Ogee Tipi Dolusavak

Keskin kenarlı savak üzerinden akış aşağı yönde dökülen su yüksek hızlara ulaşarak pürüzsüz yüzeylere sahip olan bir ogee profil şeklini alır. Ogee kretli dolusavak, keskin kenarlı savak üzerindeki akımın alt napı aşağısında kalan kısmın beton ile doldurulmasıyla oluşturulur. Ogee tipi dolusavak uygun geometrisi sayesinde akım kret yüzeyine yapışarak daha verimli bir debi tahliyesi sağlar.

3.5. Ogee Tipi Dolusavak Tasarımı

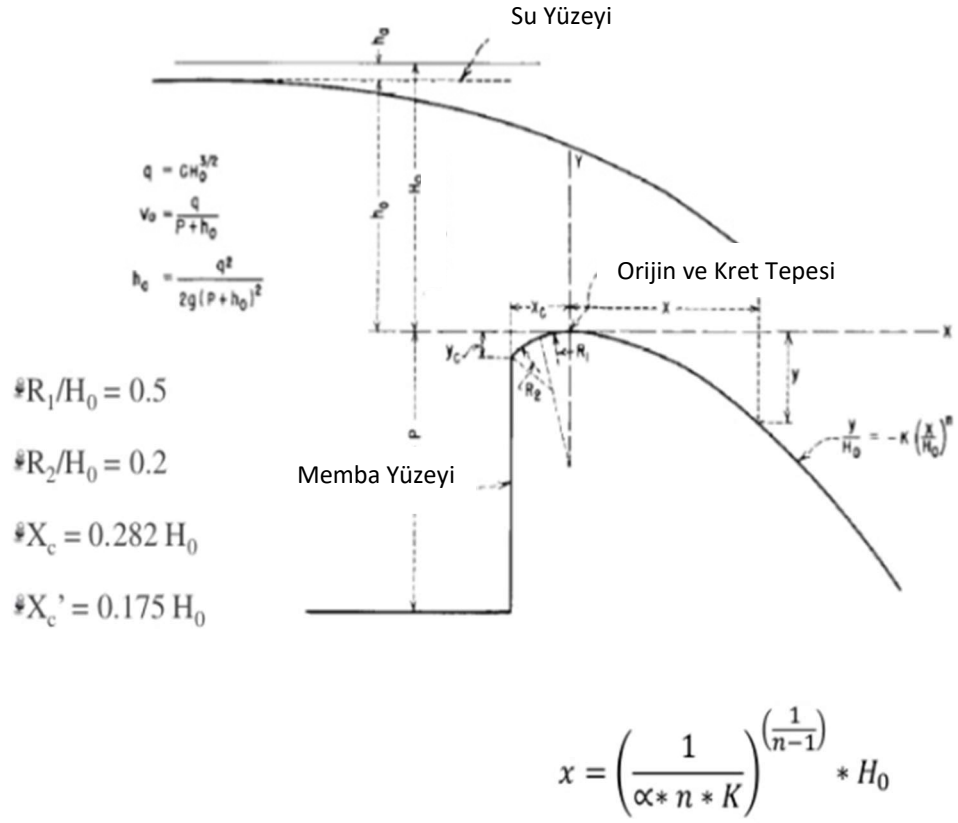
The United States Bureau of Reclamation (USBR) dolusavakların tasarımı ile ilgili pek çok çalışmalar yapmış ve en uygun tasarım yöntemi ortaya koyulmuştur. Ogee tipi dolusavak tasarlanırken profil tasarımı alt napa şeklini vermektedir. Her tasarım akış koşulu için yalnızca bir tane optimum tasarım boyutu vardır. Bu boyutların optimum şekilde belirlenmesi debi denklemindeki (C) katsayısı ile ilişkilidir. Ogee tasarımıyla ilgili işlem sırası aşağıda gösterilmiştir.

- Tasarım savak yükü (H_0) belirlenir. H_0 , H_{max} 'ın % 75 ila 80'dir.
- Tasarım debi katsayısını (C_0) bulmak için kretten zemine kadar olan P derinliğini kullanılır.
- C debi katsayısı bulunur.
- Dolusavak profili belirlenir

USBR tasarımına göre kret profili; krete gelen yüke, memba yüzey eğimine, kretin tabandan olan yüksekliğe bağlıdır. Ogee profili, kret membası ve kret mansabı olmak üzere iki bölümden oluşur. Memba tarafında kalan kısım yarıçapları farklı iki dairesel yayın birleşimiyle tanımlanırken, mansap kısmı için USBR tarafından önerilmiş olan kret profil denklemi 3.1'de gösterilmiştir.

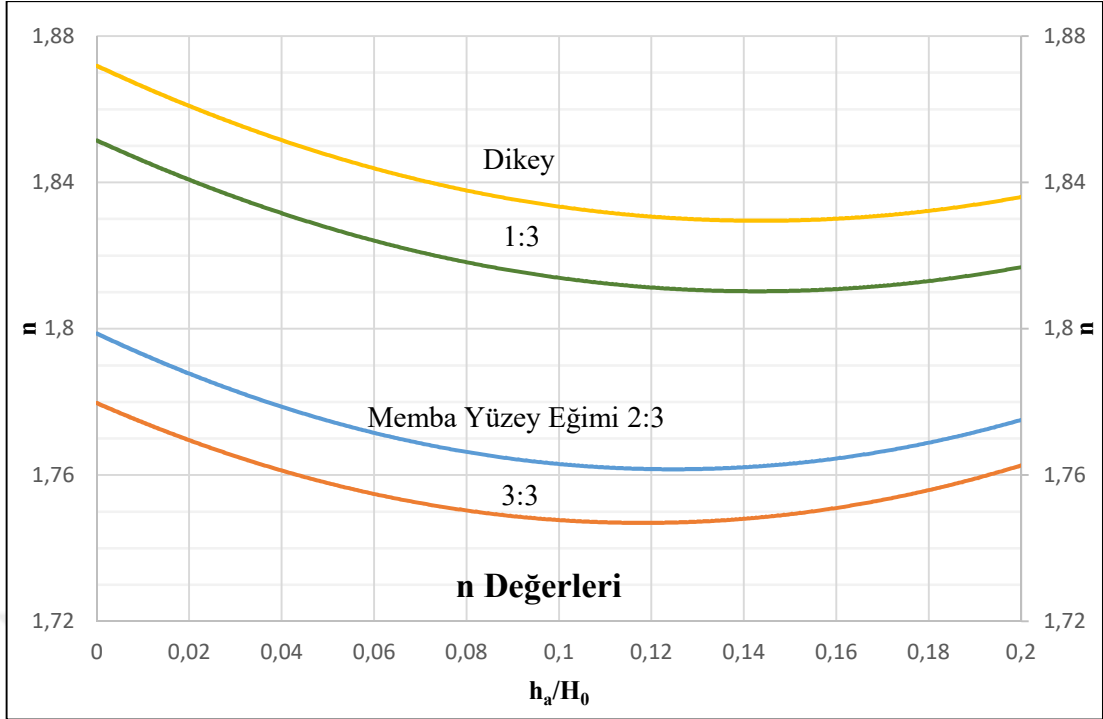
$$\frac{y}{H_0} = -K \left(\frac{x}{H_0} \right)^n \quad (3.1)$$

Burada K ve n üst eğim ve yaklaşım hızına bağlı sabitleri, H_0 ise su yüzünü temsil etmektedir. Şekil 3.2'de ogee kret profili tasarımı için profil elemanları gösterilmiştir.

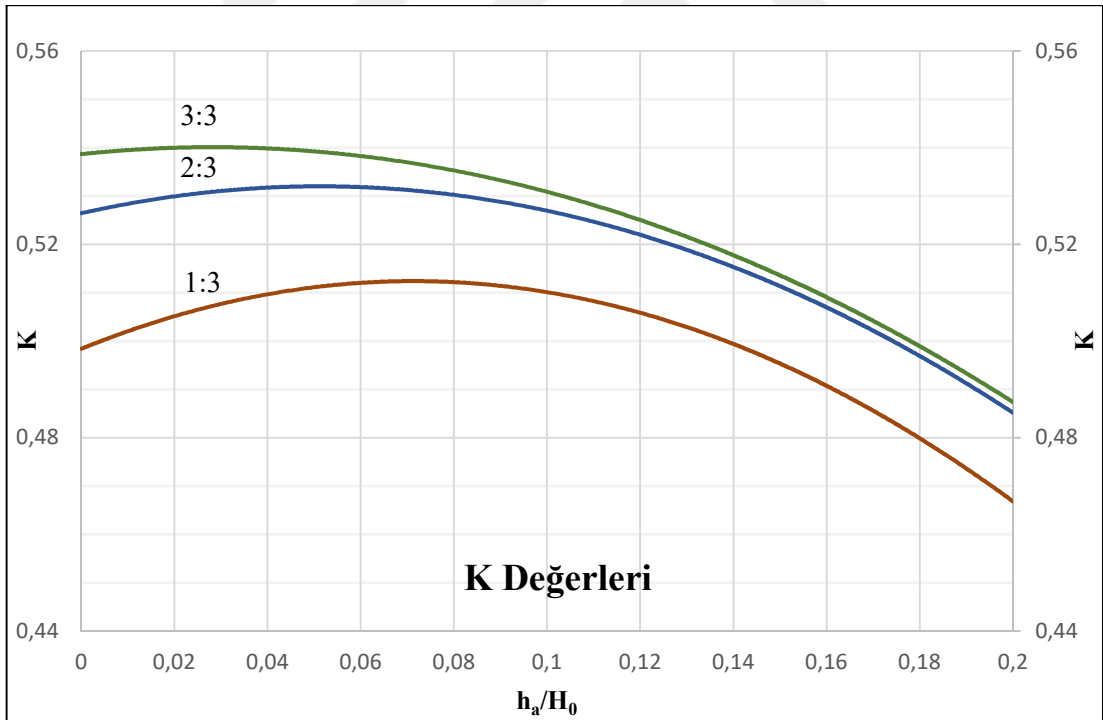


Şekil 3.2. Nap şeklindeki kret profillerinin elemanları (USBR 1987).

Bir ogee kret profili tasarımı için x 'e değer verilerek y değeri bulunur. Kullanılacak olan n ve k değerleri Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'den bulunurlar.



Şekil 3.3. Kret profil denkleminde kullanılan n değerleri tablosu(USBR 1987).



Şekil 3.4. Kret profil denkleminde kullanılan K değerleri tablosu(USBR 1987).

3.5.1. Dolusavak tepe basıncı

Ogee tipi dolusavak kretinde oluşan basınç H_e/H_0 sabitiyle ters orantılıdır. $H_e/H_0=1$ olduğunda ise kretteki basınç gerçek atmosfer basıncına eşittir. H_e/H_0 oranının artmasıyla negatif basınçlar oluşur yani basınçlar atmosfer basıncının altına düşer. Negatif basınç oluşumu kret üzerinde kavitasyon probleminin ortaya çıkmasına neden olacaktır. Bu sebeple tepe basınçları için optimum yaklaşım yapılması yapısal olarak dolusavak tasarımında büyük önem arz etmektedir. H_e/H_0 oranının 1.33 değerini aşmaması önerilmektedir. (USBR 1987).

3.5.2. Dolusavak debi katsayısının (C) hesaplanması

Dolusavak debi katsayıları dolusavağın yüksekliği, memba eğimi, dolusavak üzerindeki su yükü gibi çeşitli parametrelere bağlı olarak hesaplanmaktadır. Ogee tipi dolusavakta debi formülü Denklem 3.2.'de gösterildiği gibi keskin kenarlı savak formülü ile benzer kullanıma sahiptir.

$$Q = C\sqrt{2g}LH^{3/2} \quad (3.2)$$

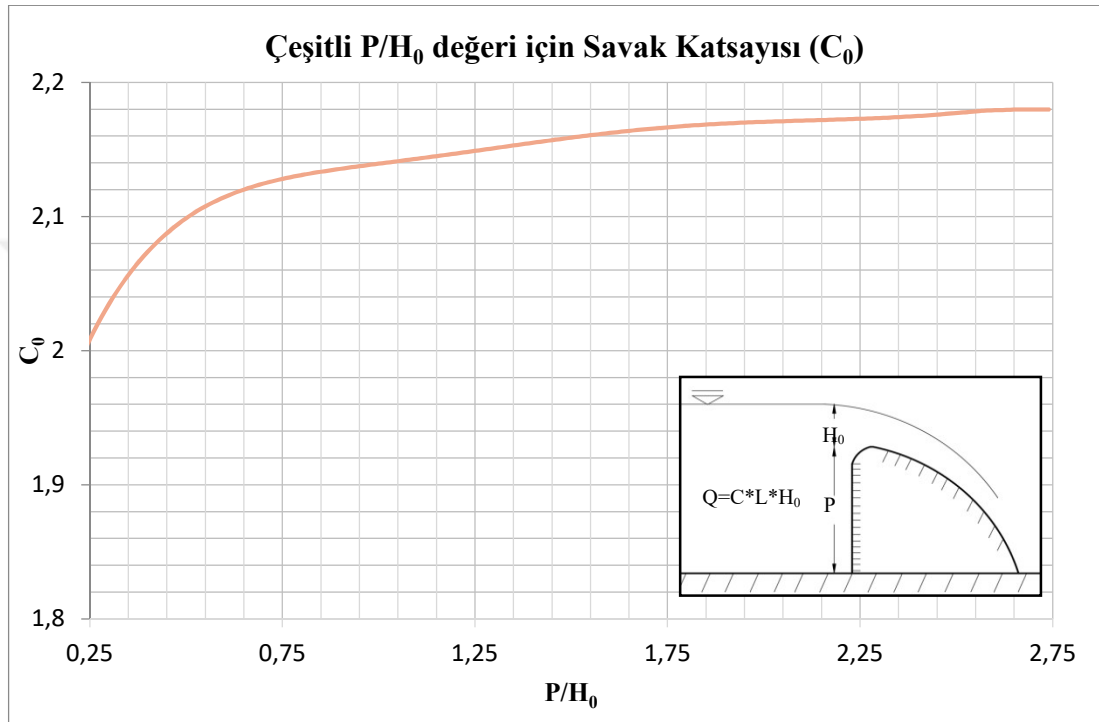
Burada Q debiyi, C debi katsayısını, g yerçekimi ivmesini, L efektif kret uzunluğunu, H ise savak üzerinden geçen yükü göstermektedir. Bu tasarım, P yaklaşma hızından kaynaklanan yaklaşma enerjisinin (yaklaşım yüksekliği) tepe üzerindeki maksimum savak yükünün yarısından az olduğu durumlar için geçerlidir. Ogee tipi savakların hazne kısmında suyun profile yaklaşım hızı çok küçük olduğu için yaklaşım hızından kaynaklanan yaklaşım enerjisi (yüksekliği) ihmal edilir. Bu şartlarla, ogee profili tasarımı için kretin verimliliğini düşürmeden gelen basınçları azaltan farklı bir çözüm yöntemi uygulanır. Ogee üzerindeki akış model formülü Denklem 3.3'de gösterildiği gibidir.

$$Q = CLH_e^{3/2} \quad (3.3)$$

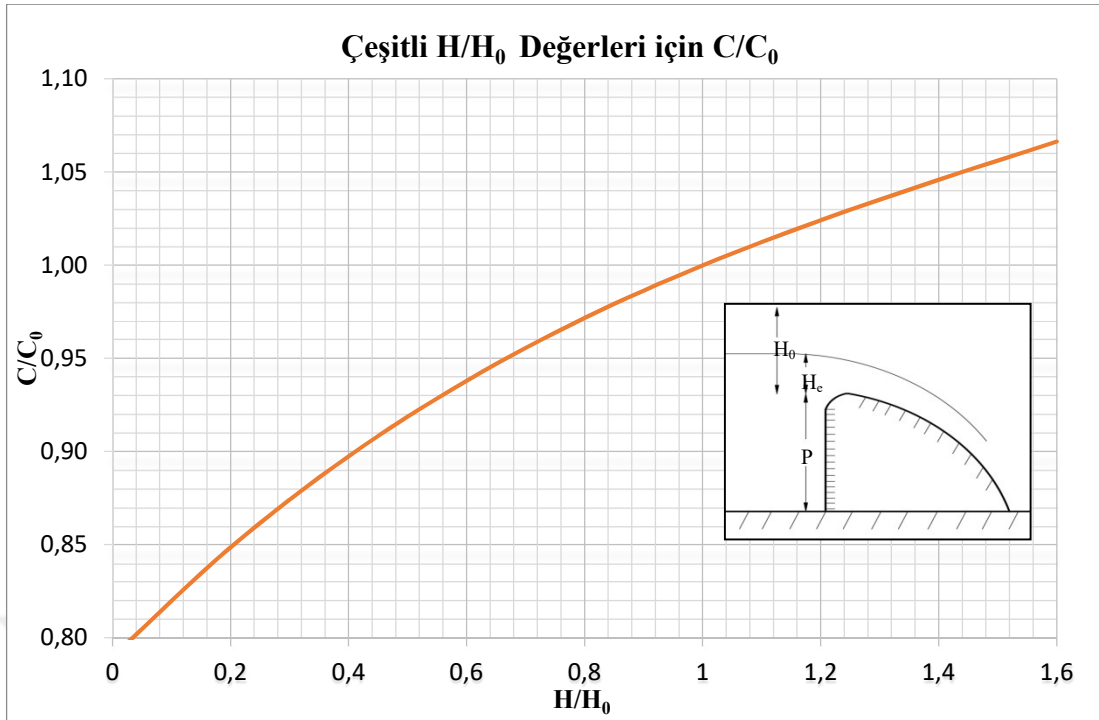
Burada H_e savak üzerinde geçen toplam yükü ($H+h_e$) ifade etmektedir. Bu denklemin kullanıldığı durumlarda, (C) debi katsayısının gerçek tepe şeklinin ideal nap

biçimiyle olan ilişkisinden yaklaşma derinliğinden, tepe noktasının memba ve mansap tarafının yüzey profilinden etkilenir. $H_e/H_0 = 1$ ise ogee profili ideal şeklini alır. Akış koşulları için deşarj katsayılarını Şekil 3.5. ve Şekil 3.6.'da gösterilmiştir.

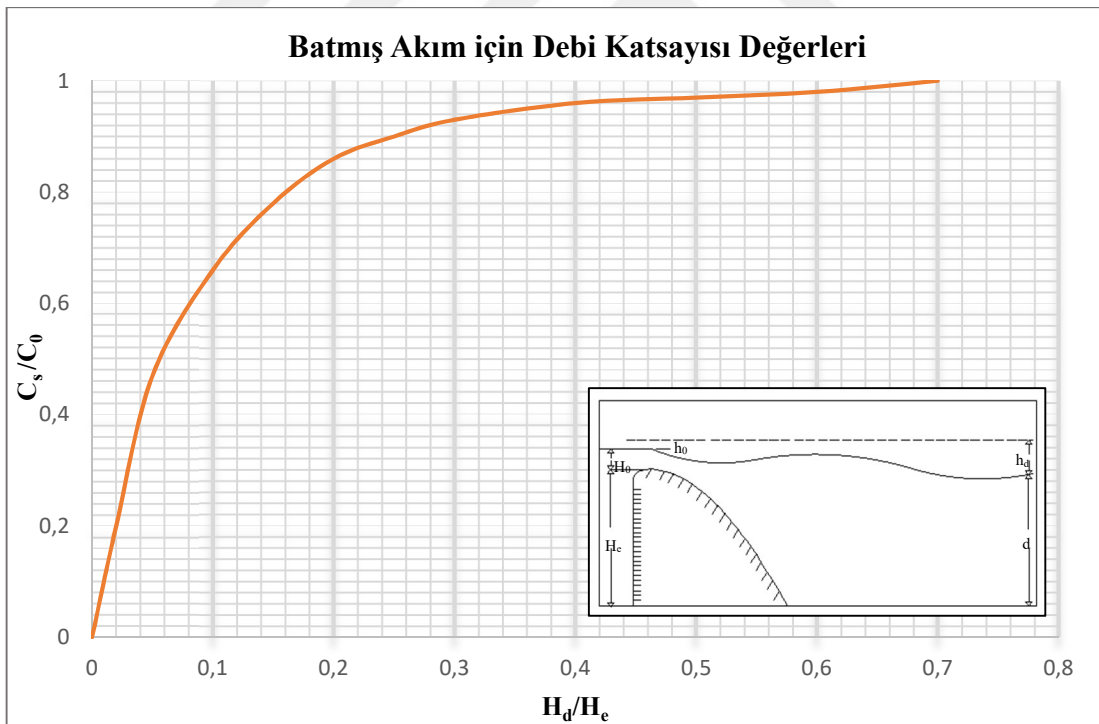
Apronun ve mansap yüzeyinin konumuna bağlı olarak, ogee önünde batmış hidrolik sıçrama oluşabilir veya hidrolik sıçrama oluşmaz. Şekil 3.7 mansap tarafının batmışlığına bağlı olarak debi katsayısındaki değişimini göstermektedir.



Şekil 3.5. Düşey yüzlü ogee kreti için debi katsayısı (USBR 1987).



Şekil 3.6. Tasarım yükünden farklı su yükleri için savak katsayısı (USBR 1987).



Şekil 3.7. Kuyruk suyu etkilerinden kaynaklanan debi katsayılarının oranı (USBR 1987).

3.6. Deneysel Düzenek

Fiziksel model deneyleri Konya Teknik  niversitesi hidrolik laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. 6.5 m uzunluğunda, 0.5 m derinliğinde ve 0.3 m genişliğinde olan kanal içine $P=0.28$ m olan genişliği 0.3 m olan ogee düzeneği yerleştirilerek deney düzeneği kurulmuştur. Ogee tasarımında USBR standartları göz önüne alınarak, H_d değeri 14.4 cm, K değeri 0.5, n değeri 1.85, C_0 değeri ise 2.17 seçilmiştir. Ayrıca deney düzeneğinde batmış hidrolik sıçramanın oluşması için 0.1 m y ksekliliğinde ve 0.6 m genişliğinde eşik yerleştirilmiştir. Şekil 3.8 ve Şekil 3.9' da deney düzeneğine yerleştirilmiş olan ogee tipi dolusavak ve eşik gösterilmiştir. Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'de ise deney düzeneğinin genel görünümü mevcuttur.



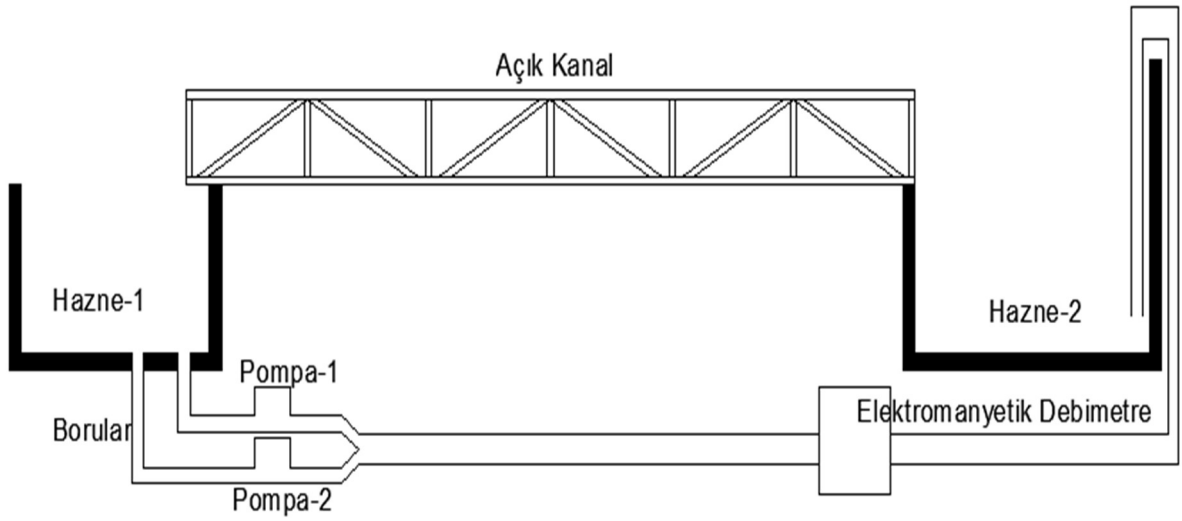
Şekil 3.8. Deney düzeneğine yerleştirilmiş olan ogee tipi dolusavak



Şekil 3.9. Deney düzeneğine yerleştirilmiş olan eşik



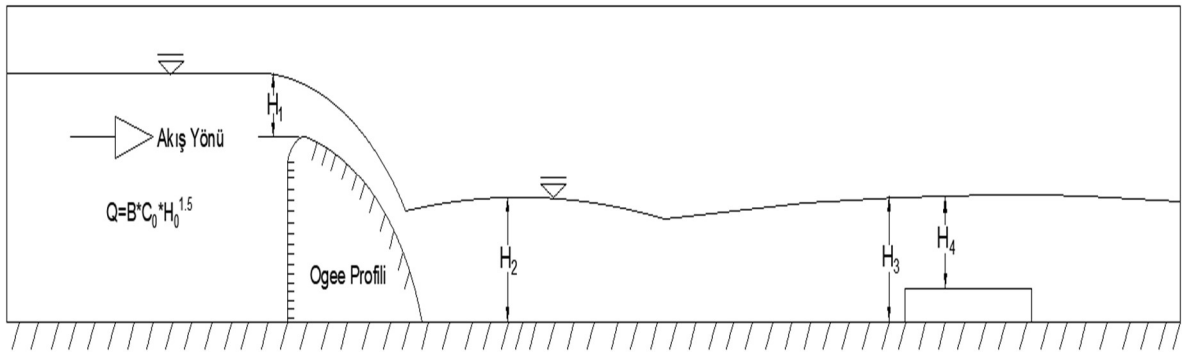
Şekil 3.10. Deney düzeneği üst görünümü



Şekil 3.11. Deney düzeneği genel görünümü

3.7. Deneyin Yapılışı

DeneySEL düzenegin üstünden 71 farklı debi için kanal üzerinde belirlenmiş olan dört noktada su yüzü yüksekliği ölçümleri alınmıştır. Şekil 3.12'de ölçüm alınan noktalar açık kanal üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 3.12. DeneySEL ölçüm alınan H_1, H_2, H_3 ve H_4 noktaları

Şekil 3.13a ve Şekil 3.13b'de deneySEL modelde kullanılmış olan kontrol panosu ve debimetre cihazı gösterilmiştir.



Şekil 3.13a) Elektromanyetik debimetre cihazı, b) Frekans değıştirci kontrol panosu

Şekil 3.13b’de Frekans değıştirci kontrol panosu sayesinde farklı debiler elde edilerek sisteme eklenmiş olan Şekil 3.13a’da gösterilen debimetreden debi ölçümleri alınmış ve debi değeri karşılık gelen su yükseklikleri limnometre yardımıyla ölçülmüştür. Ölçümlere başlamadan önce ön deneme ölçümleri alınmıştır. Ön deneme ölçümlerindeki tutarlılıklar kontrol edilmiş ve deney düzeneğinin doğru sonuçlar verdiğine emin olunduktan sonra farklı debiler için ölçüm alma işlemine başlanmıştır.

4. ANSYS FLUENT NÜMERİK MODELLEME AŞAMALARI

Bu bölüm ANSYS Fluent ticari paket programını kullanarak bir CFD modeli oluşturmanın aşamalarını sırasıyla göstermektedir. Ayrıca deneylerde gözlemlenmiş olan fiziksel olayların sayısal formülleri ve CDF tabanlı paket programların işleyişi hakkında bilgi verilmiştir. İki boyutlu ve üç boyutlu akımın simülasyonu yapılarak simülasyon için kullanılan başlangıç koşulları, mesh teknikleri, model kurulumu hakkında bilgilere yer verilmiştir. Nümerik model üç aşamada kurulur. Bunlar ön hazırlık, çözümleme ve sonuç değerlendirme aşamalarıdır. İlerleyen başlıklarda bu aşamalar detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Nümerik model kurulum aşamaları aşağıda gösterilmiştir.

- Simulasyonun Amacının Belirlenmesi
- Simülasyon İçin Gerekli Alanın Yardımcı Programlar Tarafından Oluşturulması
- Oluşturulan Alanın Çözüm İçin Aktarılması
- Fiziksel Modelin Mesh Ağının Oluşturulması
- Sınır ve Başlangıç Koşulları Tanıtılması
- Çözüm İşleminin Yapılması
- Çözüm Sonrası Sonucun Değerlendirilmesi

Çalışmada 2 boyutlu ve 3 boyutlu akışı simüle etmek için bir ticari hesaplamalı akışkanlar dinamiği paket programı olan Ansys Fluent kullanılmıştır. Ansys Fluent sıkıştırılabilir ve sıkıştırılamaz akım koşulları dahil pek çok farklı akım koşulu için çözümleme yapabilir. Ogee tipi dolusavak üzerinden akan akışı simüle etmek için hacim sıvısı VOF yöntemi kullanılmıştır.

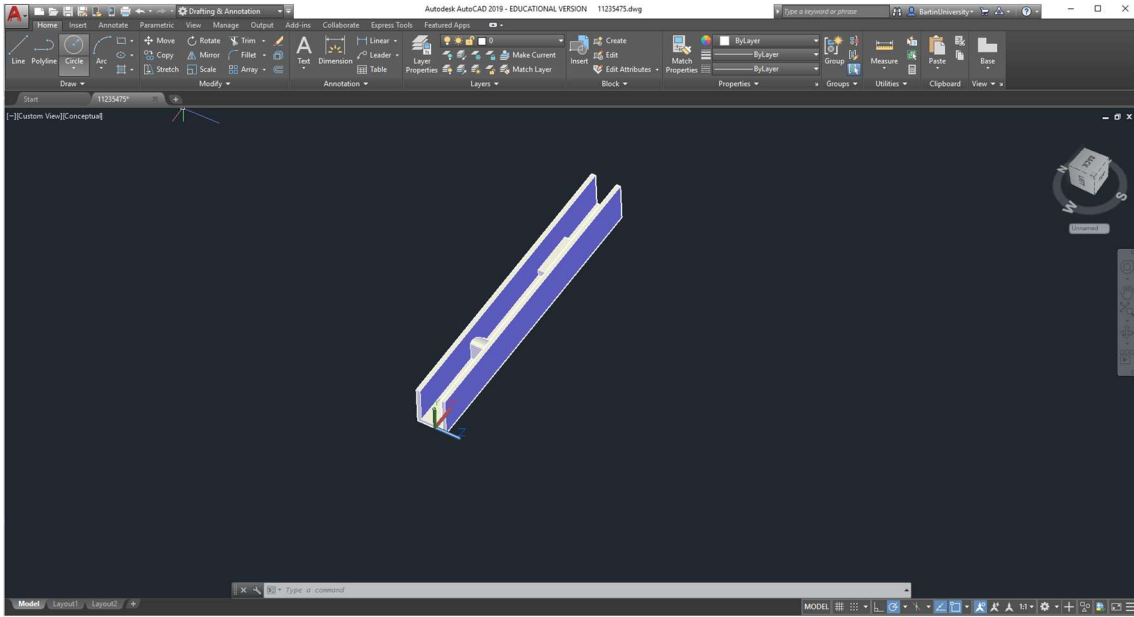
4.1. Ön hazırlık (Pre-processing)

Ön hazırlık aşamasında çözüm alanı belirleme, mesh ızgara alanı boyutlandırılması, uygun mesh türüne karar verilmesi, serbest yüzeyi belirlemek için VOF ve FAVOR metotlarının kullanılması işlemleri birbirini takip etmektedir.

4.1.1. Model geometrisinin oluşturulması

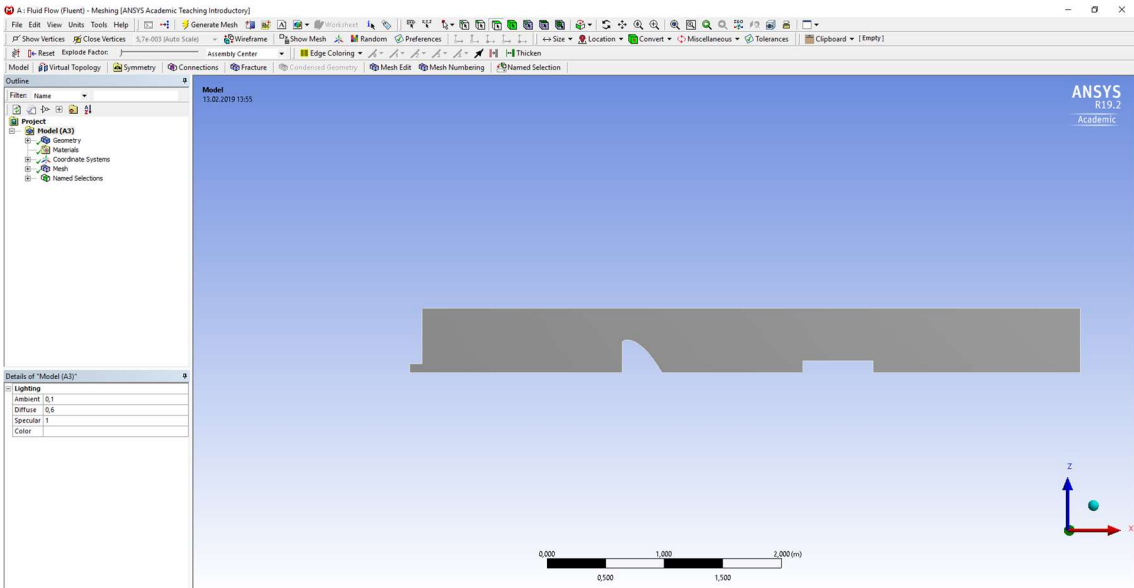
Ansys-Fluent paket programı Solidworks, Gambit, AutoCAD gibi pek çok programla entegre edilebilen bir programdır. Model geometrisi oluşturulurken AutoCAD

programında modelin üç boyutlu geometrisi çizilip ve ANSYS Fluent'e aktarılmıştır. Şekil 4.1'de çizilen modelin geometrisi gösterilmiştir.

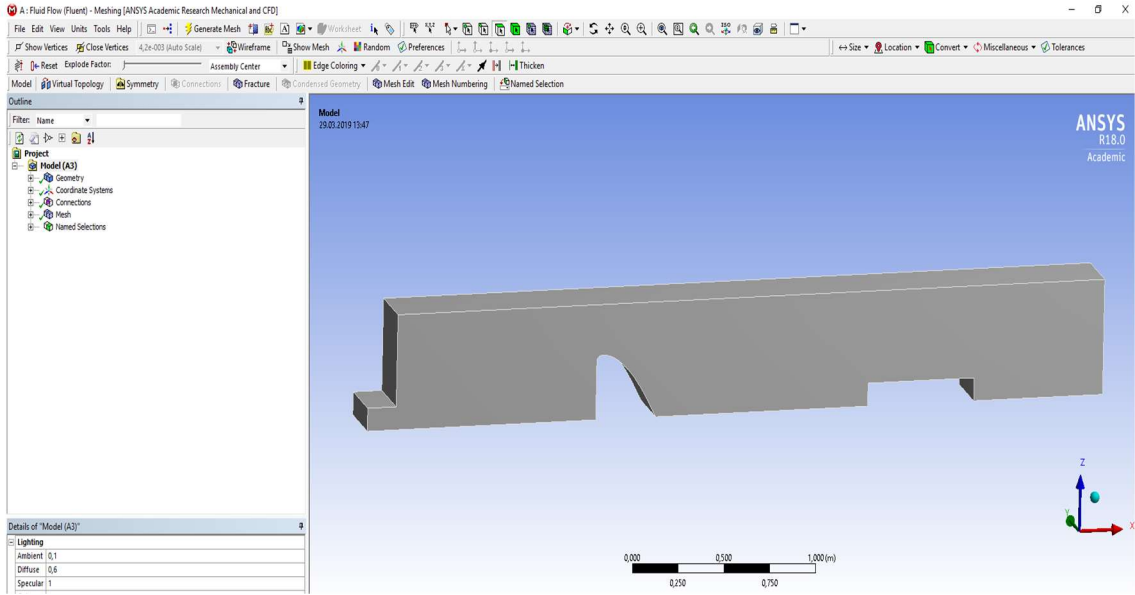


Şekil 4.1. AutoCAD 3 boyutlu model görünümü

İki boyutlu geometrisi ise modelin yalnızca 2 boyutlu ön görünüşü çizilerek ANSYS Fluent'e aktarılmıştır. Şekil 4.2'de ve Şekil 4.3.'de gösterilen aktarımı gerçekleştirilmiş şeklin üzerinde akış hacmi oluşturulup mesh oluşturma işlemine geçilmiştir.



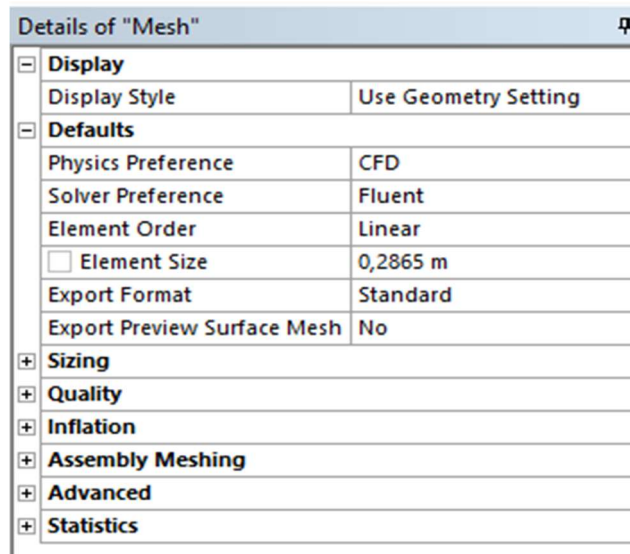
Şekil 4.2. 2 boyutlu model görünümü



Şekil 4.3. 3 boyutlu model görünümü

Mesh hassasiyeti ayarlanması analizin gerçeğe yakın sonuçlar verebilmesi için en önemli bölümdür. Bu nedenle model kurulurken doğru mesh geometrisini ve boyutunu oluşturma aşaması büyük zaman almıştır.

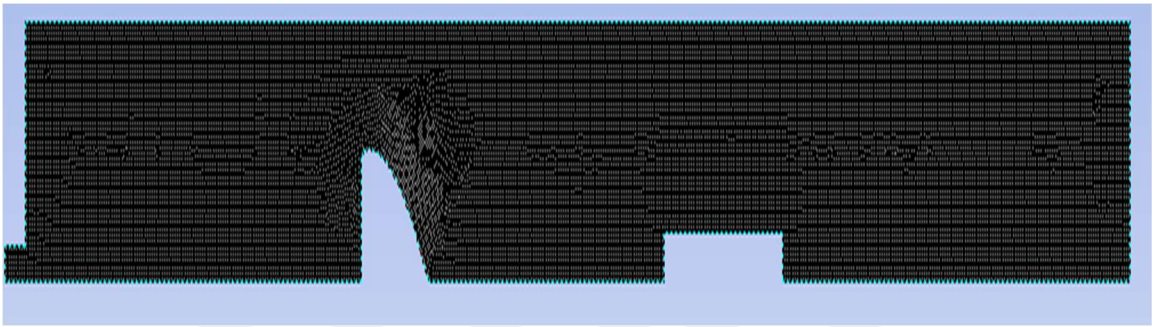
Ansys Meshing'de düzenleme yapılarak mesh oluşturulur. Mesh aşamasında mesh şekli ile ilgili düzenlemeler ve mesh kalitesi ile ilgili yapılan element size, smooting, inflation, grow rate gibi düzenlemelerin hepsi Şekil 4.4'de gösterilmiş olan Mesh araç çubuğu üzerinden yapılmıştır.



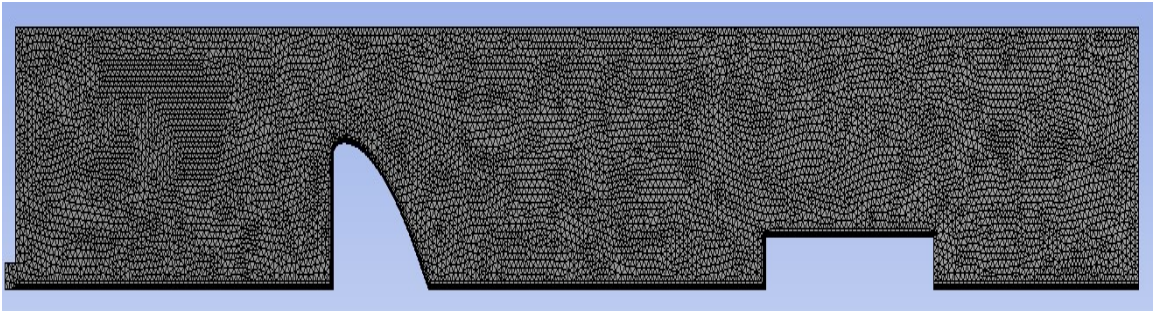
Şekil 4.4. Mesh araç çubuğu görünümü

Akış alanı küçük ızgaralara bölünerek analiz yapılması için hazırlanır. Bölünecek olan ızgara sayısının fazla olması sistemdeki analiz süresini çok fazla arttırırken ızgara sayısının az olması ise hassasiyeti düşürerek doğru sonuçlar elde edilmemesine neden olur. Bu nedenle doğru mesh sayısı seçimi büyük önem taşır.

Mesh geometrisi oluşturulurken mesh türüne karar vermek için Şekil 4.5. ve Şekil 4.6'da görülen tetrahedral ve hekzahedral meshlerden oluşan modeller üzerinde denemeler yapılmıştır. Akış geometrisi basit bir geometriye sahip olması sebebiyle ayrıca hekzahedral mesh ile yapılan sonuçlar olumlu sonuçlar verdiği için hekzahedral mesh tercih edilmiştir.



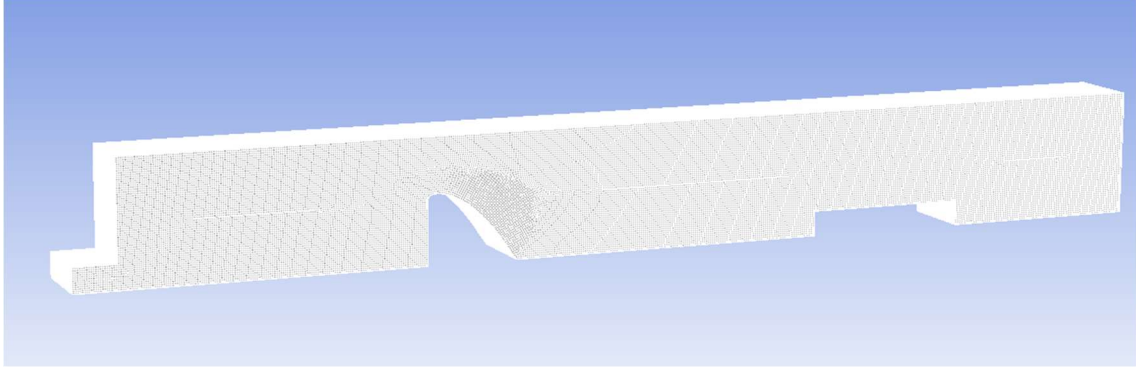
Şekil 4.5. 2 boyutlu model hekzahedral mesh görünümü



Şekil 4.6. 2 boyutlu model tetrahedral mesh görünümü

Mesh kalitesini yükseltebilmek için “fine” mesh kullanılmıştır. Growth rate oranı 1.05 seçilerek ölçümün daha hassas alınması amaçlanmıştır. Mesh ağının daha ince olması kritik su yüzeyi ölçülmesi açısından ve ogee tipi dolusavak önündeki türbülanslı bölümde doğru ölçüm almak açısından önemlidir. Sabit bir akış ve doğru sonuçlar elde edebilmek için relevance center high smooting ayarı yapılmıştır.

Ayrıca 3 boyutlu modellerde mesh sayıları, sonuçların hassasiyetini etkileyeceğinden her iki program için yaklaşık olarak eşit ayarlanmıştır. Şekil 4.7’de 3 boyutlu modelde oluşturulan hekzahedral mesh görünümü gösterilmiştir.



Şekil 4.7. 3 boyutlu model hekzahedral mesh görünümü

4.1.2. Model kalibrasyonu

Mesh kalite analizi yapmak hataları önceden görerek çözümü iyileştirmeyi sağlamasından dolayı büyük önem taşımaktadır. Mesh bağımsızlık analizi model kalibrasyonu sağlamak için farklı mesh sayılarında analizler yapılması sürecinden oluşmaktadır. Bir süre sonra mesh sayısı arttırılsa (elemanların boyutu küçültülürse) dahi sonucun sabitlendiği görülmüştür. Böylece en uygun mesh sayısına (mesh boyutuna) karar verilmiştir. Mesh bağımsızlık analizi; mesh kalitesi, hesaplama ağının doğruluğu ve analizde olabilecek yanlışlardan kaçınmak amacıyla yapılmıştır.

İkinci olarak, mesh şekline karar verildikten sonra her bir şeklin düzgün geometriye sahip olması başka bir deyişle, iki boyutta x, y ve üç boyutta x, y, z , uzaklıkları büyük önem arz etmektedir. Hekzahedral bir mesh de her bir küçük parça kare şekle ne kadar yakınsa çözümün doğruluğu o kadar çok sağlanmış olur. Bu nedenle her bir ızgaranın boyutu uygun hale gelene kadar düzeltmeler yapılmış analiz ideal boyut ve sayıdaki mesh ile çözüm yapmaya hazır hale getirilmiştir.

4.1.3. Verilerin paylaşımı

ANSYS Fluent, programında 2 boyutlu modelde x, y yönlerindeki tek bir mesh in boyutları 0.286 m olup toplam 27800 mesh eleman vardır. 3 boyutlu modelde ise x, y ve

z yönlerinde mesh boyutları 0.008 m'dir. 3 boyutlu analiz için simülasyonda toplam 1770000 mesh hücresi vardır.

4.2. Çözüm (Solving)

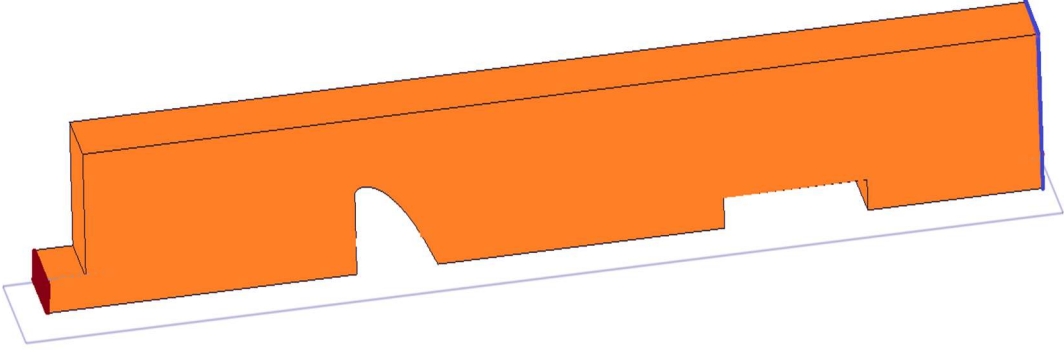
Mesh aşaması tamamlandıktan sonra mesh Ansys Workbench'e aktarılarak çözüm aşamasına geçilir. Çözüm aşamasında akış koşulları için parametre ayarları yapılır. Süreklilik denklemlerini ve Navier-Stokes denklemlerini çözerken uygun sınır koşullarını sisteme tanıtmak gereklidir. Sisteme akış ile ilgili tüm koşullar tanıtıldıktan sonra sistem analiz için hazır hale getirilmiştir.

4.2.1. Sınır koşulları

Model kurulurken akışın başlangıç ve bitiş noktaları, giriş-çıkış koşulları duvar koşulları ve serbest yüzeyli akım olduğu için açık hava basıncı gibi dış etmenler belirtilmelidir. Sınır koşulları doğru sonuçlar elde etmek ve modelin gerçek hayattakine yakın olması için son derece önemlidir. Şekil 4.8'de 2 boyutlu model ve Şekil 4.9'da ise 3 boyutlu model için tanımlanan sınır koşulları renklendirilerek gösterilmiştir. Kırmızı renk ile gösterilen kısım "inlet" turuncu renkte gösterilen kısımlar "wall" ve mavi renk ile gösterilen kısım "outlet" olarak tanımlanmıştır.



Şekil 4.8. 2 boyutlu model sınır koşulları



Şekil 4.9. 3 boyutlu model sınır koşulları

Giriş hızına açık kanal akımını en doğru şekilde ifade eden “velocity-inlet” sınır koşulu tanımlanmıştır. Her farklı debi değeri için giriş kısmındaki debi değeri değiştirilerek analiz tekrar çalıştırılmıştır. Duvarlar açık kanalın üç tarafını çevirecek şekilde tanımlanarak her akış için sabit koşullar oluşturulmuştur. Açık kanalın üst kısmına “air” tanımlaması yaparak açık kanal akımında hava basıncının etkisi göz önünde bulundurulmuştur. Akış alanında bulunan su ve havanın serbestçe çıkabilmesi için çıkış kısmında “pressure outlet” tanımlaması yapılmıştır.

4.2.2. Türbülans modeli

Türbülans modelleri türbülanslı akışların çözümlerini yapmak için kullanılırlar. Açık kanal akımı için türbülanslı akım seçilmiştir. Model kurulurken yaygın olarak kullanılan ve açık kanal akımlarında genellikle olumlu sonuçlar veren k-ε türbülans modeli kullanılmıştır.

4.2.2.1. K-ε türbülans modeli

Klasik türbülans modelleri Reynolds Ortalama Navier-Stokes (RANS) denklemlerine dayanarak çözüm yapar. K-ε türbülans modeli uygulamasının oldukça basit olması, kolayca akımın kararlı hale gelmesini sağlaması ve özellikle açık kanal akışlarında makul sonuçlar vermesi nedeniyle tercih edilen bir modeldir. Standart k-ε türbülans modelini iki denklem temsil etmektedir. Denklemlerden birincisi (Denklem

4.1.) türbülanslı kinetik enerjinin denklemini ve ikincisi (Denklem 4.2.) türbülanslı alanın ölçek uzunluğu özelliğini gösterir.

K-ε modeli, türbülanslı kinetik enerjiyi (birim kütle başına) etkileyen k değerine odaklanır. Türbülanslı bir akışın anlık kinetik enerjisi k (t), ortalama kinetik enerji K ve türbülanslı kinetik enerji k olarak Denklem 4.3.'de gösterilmiştir.

$$K = \frac{1}{2}(u^2+v^2+w^2) \quad (4.1)$$

$$k = \frac{1}{2}(u'^2+v'^2+w'^2) \quad (4.2)$$

$$k(t) = k + K \quad (4.3)$$

ε sembolü k'nın dağılım oranını temsil etmektedir. k ve ε değerleri biliniyorsa türbülans viskozitesini Denklem 4.4'de verilen formülle ifade etmek mümkündür.

$$V_t \propto \nu_1 \propto k^{\frac{1}{2}} \frac{k^{\frac{3}{2}}}{\varepsilon} = \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.4)$$

Ortalama kinetik enerji Denklem 4.5.'de verilmiştir.

$$\frac{d(\rho K)}{dt} + \text{div}(\rho K U) = \text{div}(-P U + 2 \mu U E_{ij} - \rho U u'_i u'_j) - 2 \mu E_{ij} E_{ij} - (\rho u'_i u'_j E_{ij}) \quad (4.5)$$

Burada E_{ij} ortalama deformasyon tensörü oranıdır. Denklem 4.6'da eşitliğin sol tarafındaki 1. ifade K değişme oranını gösterirken 2. ifade konveksiyonla K taşınmasını göstermektedir. Eşitliğin sağ tarafında ise 1. ifade K'nın basınçla taşınmasını, viskoz gerilmelerle taşınmasını ve reynolds gerilmeleriyle taşınmasını, 2. ifade K'nın dağılım oranını 3. ifade ise türbülans göstermektedir. Türbülanslı kinetik enerji k için Denklem 4.6.'da verilmiştir.

$$\frac{d(\rho k)}{dt} + \text{div}(\rho k U) = \text{div}(-p' u' + 2 \mu u' e'_{ij} - \rho^2 u'_i u'_j) - 2 \mu u' e'_{ij} e'_{ij} + (-\rho u'_i u'_j E_{ij}) \quad (4.6)$$

k için model denklemi aşağıda Denklem 4.7'de verilmiştir.

$$\frac{d(\rho K)}{dt} + \text{div}(\rho K U) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad} k \right] - 2 \mu E_{ij} E_{ij} - \rho \varepsilon \quad (4.7)$$

K için denklem bilinmeyen ek türbülans dalgalanma akımlarını içerir. Bu terimler ortalama akışa bağlanabilir. Birim kütle başına dağılım oranı ε 'nin denklemi aşağıda Denklem 4.8'de gösterilmiştir.

$$\varepsilon = 2\nu e'_{ij} e'_{ij} \quad (4.8)$$

ε 'nin analitik denklemi birden fazla bilinmeyen içeren denklem olduğundan dolayı basitleştirilmiş denkleme ihtiyaç duyulur. E için model denklemi k denklemini (ε/k) ile çarparak ve model sabitlerini tanıtarak elde edilir. Sık kullanılan basitleştirilmiş model denklemi aşağıda Denklem 4.9'da verilmiştir.

$$\frac{d(\rho \varepsilon)}{dt} + \text{div}(\rho \varepsilon U) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \text{grad} \varepsilon \right] - C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2 \mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4.9)$$

Buradaki ortalama sabitler $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $k=1$ ve $e=1.3$ olarak kullanılır.

4.2.3. VOF metodu

VOF modeli Hirt ve Nichols (1981), tarafından önerilen ve sıvı gaz veya farklı iki sıvı arasındaki ara yüzün belirlenebilmesini içeren yöntemdir. Bu model iki ya da daha fazla birbirine karışmayan akışkanın davranışını modelleyebilir. Diğer metotlara göre üstün ara yüz yakalama yeteneği dolayısıyla modellemede VOF metodu tercih edilen metot olmuştur. Hacim kesri için kullanılan değişken sayısı n olarak tanımlanabilir. αn ise hücrenin doluluk oranı olarak tanımlanmaktadır. $\alpha n=0$ ise hücrenin boş olduğunu $\alpha n=1$ ise hücrenin dolu olduğunu, $0 < \alpha n < 1$ olduğunda su ile hava arasındaki ara yüzü temsil etmektedir. Sıvının bileşimi, VOF fonksiyonu için ($F(x, y, z, t)$)'ye bağlıdır (Hirt ve Nichols, 1981). Denklem 4.10., 4.11., ve 4.12.'de verilen her fonksiyon birim hacim başına düşen sıvıyı ifade etmektedir. Burada, P sıvı yoğunluğunu V_F akışın fraksiyonel

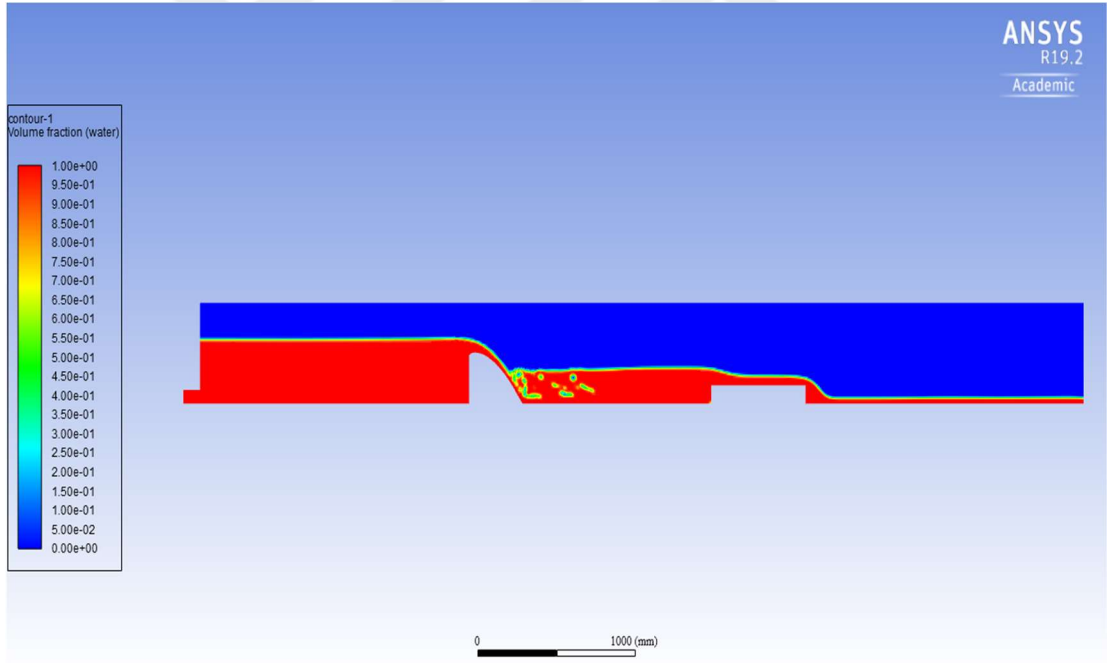
hacimi ve R_{SOR} , kütle kaynağı R_{DIF} türbülanslı bir difüzyon terimidir. (u, v, w) koordinat yönünde (x, y, z) veya (r, R_{SOR} , z) hız bileşenlerini ifade etmektedir.

$$\frac{dF}{dt} + \frac{1}{V_F} \left[\frac{d}{dx} (FA_{xu}) + R \frac{d}{dy} (FA_{yv}) + \frac{d}{dz} (FA_{zw}) + \xi \frac{FA_{xu}}{x} \right] = F_{DI} + F_{SOR} \quad (4.10)$$

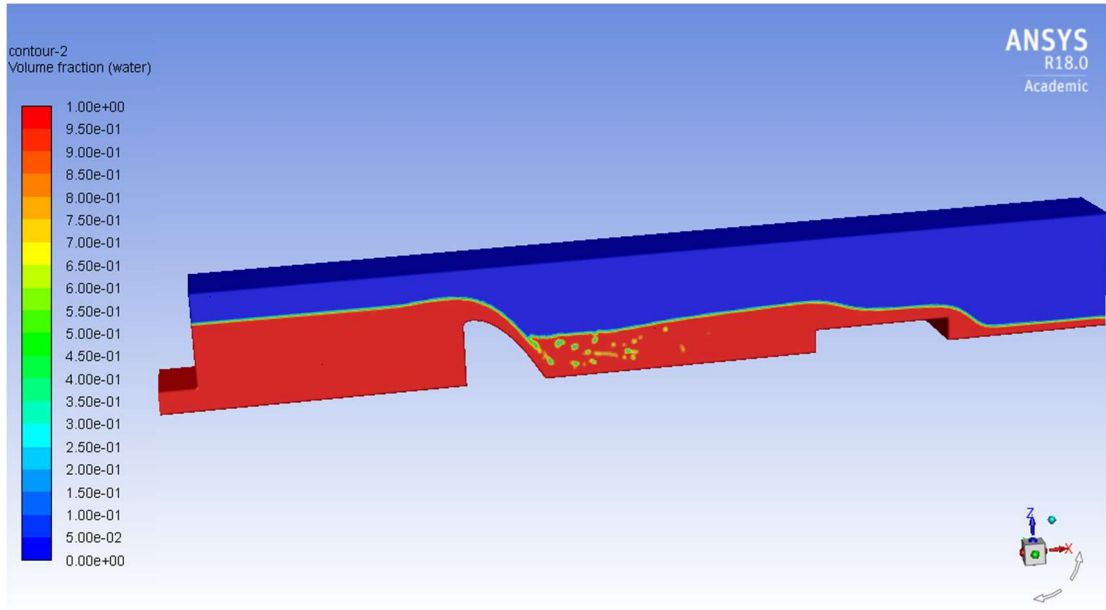
$$F_{DIF} = \frac{1}{V_F} \left\{ \frac{d}{dx} \left(V_F A_x \frac{dF}{dx} \right) + R \frac{d}{dy} \left(V_F A_y R \frac{dF}{dy} \right) + \frac{d}{dz} \left(V_F A_z \frac{dF}{dz} \right) + \xi \frac{FA_{XF}}{x} \right\} \quad (4.11)$$

$$V_F \frac{dp}{dt} + \frac{d}{dx} (\rho u A_x) + R \frac{d}{dy} (\rho v A_y) + \frac{d}{dz} (\rho w A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (4.12)$$

Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de hava ve su fazlarının ayrımları 2 boyut ve 3 boyut için ayrı ayrı görülmektedir. Mavi renk ile gösterilen bölge 0’ı yani havayı temsil ederken kırmızı renk ile gösterilen bölge 1’i yani suyu temsil etmektedir.



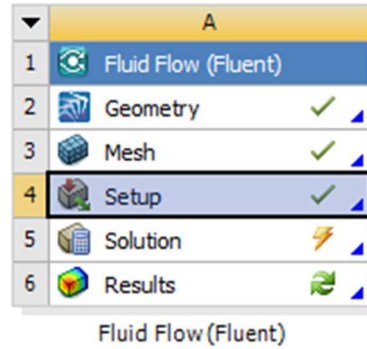
Şekil 4.10. 2 boyutlu hava-su fazlarının görünümü



Şekil 4.11. 3 boyutlu hava-su fazlarının görünümü

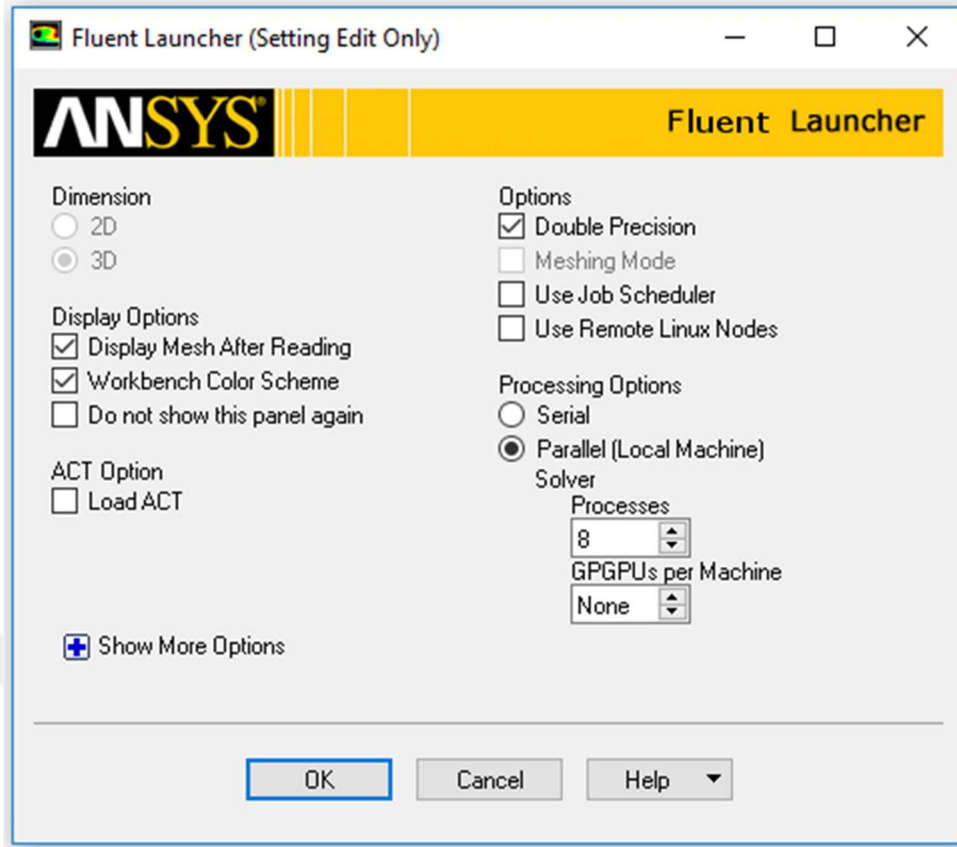
4.3. Model Kurulumu

ANSYS Fluent’de geometri ve mesh oluşturulduktan sonra sıradaki aşama olarak modelin kurulması gelir. Şekil 4.12’de çözüm ekranının açılması için kullanılan araç çubuğu gösterilmiştir.



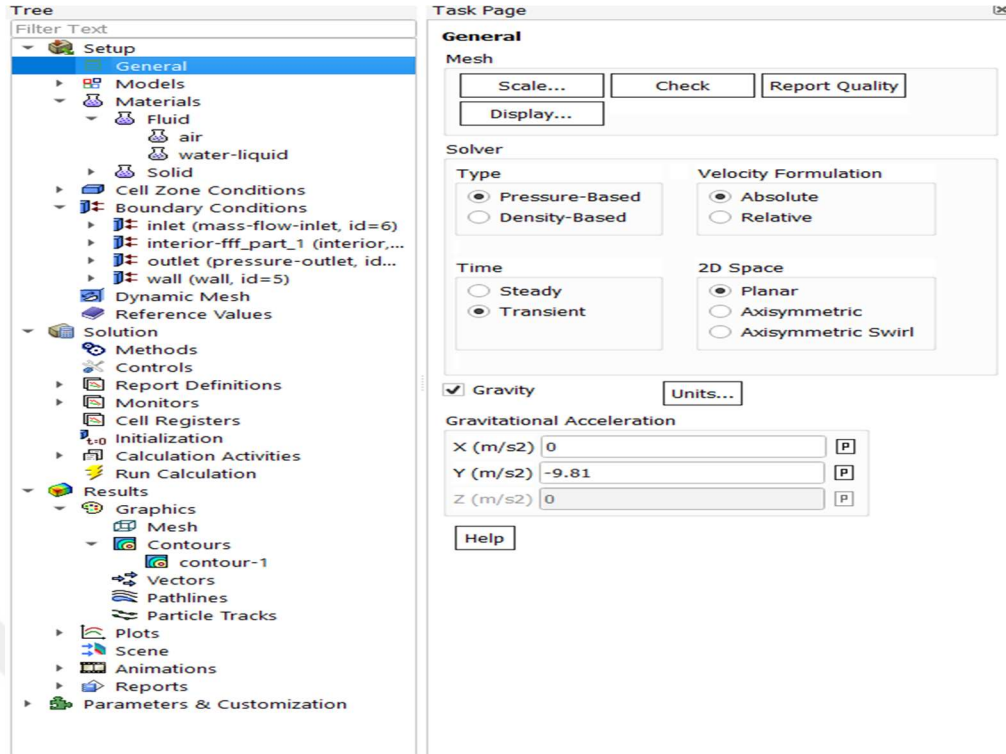
Şekil 4.12. Ansys Workbench’de Fluent araç çubuğu

Şekil 4.13.’de gösterilen Setup ekranı açıldığında ilk olarak bir başlatıcı seçim ekranı açılır. Bu ekranda dimension sekmesinde 2 boyutlu analiz elde etmek için 2D ve 3 boyutlu analiz elde etmek için ise 3D butonu seçilmiştir. Options sekmesinde ise “Double Prediction” seçimi yapılmıştır. Processing Options sekmesinde ise paralel seçeneği seçilerek bilgisayarın işlem yapacak çekirdek sayısı seçilmiştir.



Şekil 4.13. Ansys Fluent başlangıç ekranı

Ekran kapatıldıktan sonra AutoCAD’de oluşturulan geometrinin şekli ve geometri şartları şekle aktarılır. Daha sonra Şekil 4.14’de açılan ekran üzerinden çözümlene için kullanılan Multi Phase Volume of Fluid modeli sisteme tanıtılır. Akış tipi ‘pressure based’ hız formülasyonu mutlak olarak seçilmiştir. Ayrıca zamana bağlı transient çözüm için sistem ayarları yapılmıştır. Yerçekimi ivmesinin büyüklüğünü eksi yönde verilmiştir.

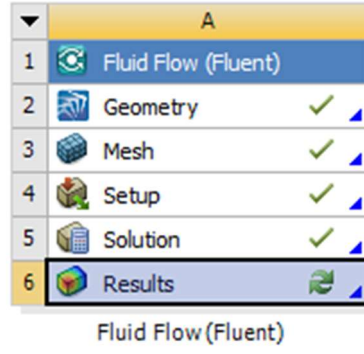


Şekil 4.14. Ansys Fluent general penceresi

İlk faz olarak hava ikinci faz olarak ise su sisteme tanıtılmıştır. Kullanılacak olan k- ϵ türbülans modeli sisteme tanıtılarak türbülanslı akım için çözüm koşulları oluşturulmuştur. Modelin analizi için sabit zaman adımında $\Delta t = 0.005$ sn zaman adımı için maksimum 20 yineleme ile 10000 iterasyon sayısı ile analiz yapılmıştır. Zaman adımlarının sayısı 10000 atılır, bu toplam simülasyon süresinin 50 saniye olduğunu göstermektedir.

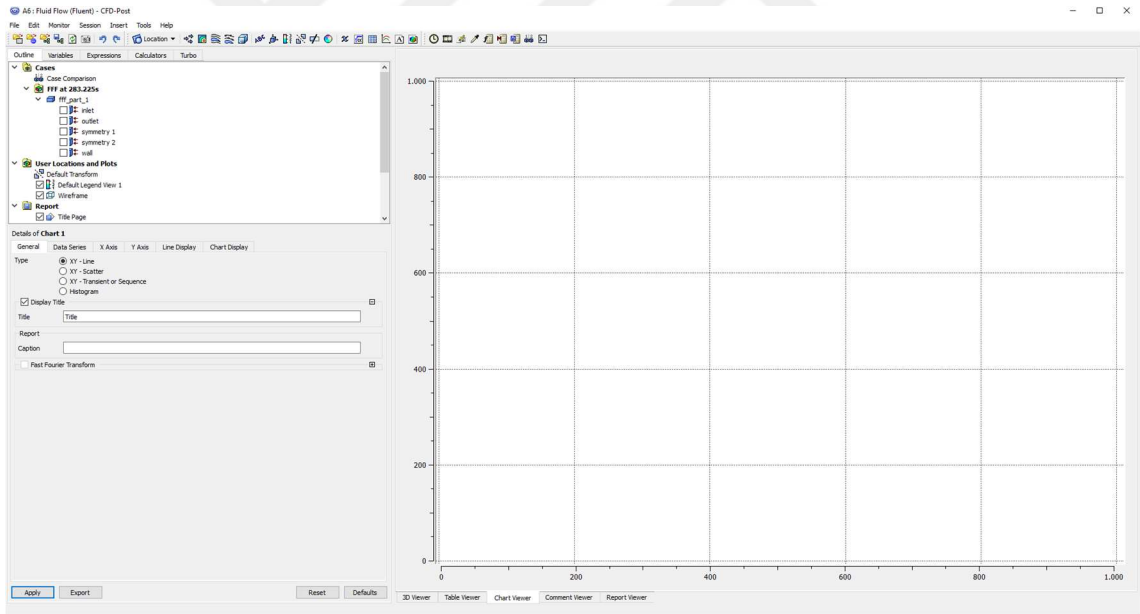
4.4. Çözüm Değerlendirmesi (Post-Processing)

Bu adım nümerik modelin son adımı ve sonuçların alınarak yorumlandığı kısımdır. Ansys Fluent paket programında analiz işlemler bittiğinde sonuçların alınması için programda Workbench'den Şekil 4.15'de gösterilen Results sekmesine geçilerek açılan CDF Post sayfasında analizlerden elde edilen sonuçlar yazdırılabilir.

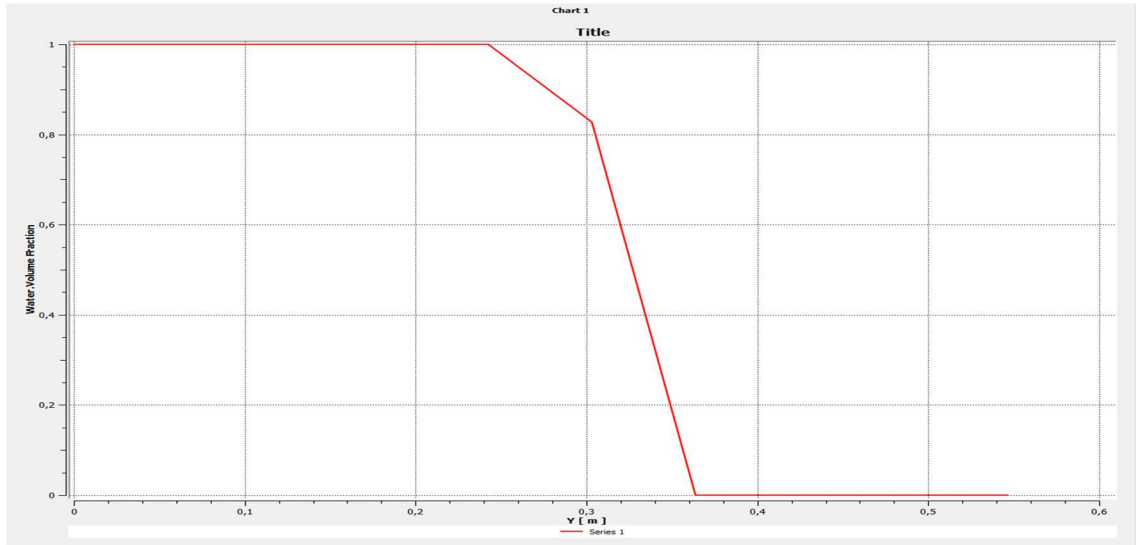


Şekil 4.15. Ansys Workbench'de Fluent araç çubuğu

Ansys Fluent'de akım çizgileri, su yüksekliği, hız, basınç gibi birçok parametre için ölçüm alınabilir. Ayrıca sonuçları görsel olarak alınmasına imkân tanır. Animasyon oluşturularak akıştaki değişimler gözlemlenebilir. Elde edilen veriler Şekil 4.16'da gösterildiği gibi tablo olarak elde edilebilir. Şekil 4.17'de ise belli bir debi için volume fraction yöntemiyle elde edilen su yükseklik eğrisi tablosu görülmektedir.



Şekil 4.16. CDF Post'da oluşturulan tablo gösterimi



Şekil 4.17. CDF Post'da oluşturulan su yüksekliğinin volume fraction yöntemiyle okunması

İki boyutlu analizde her bir debi için yaklaşık yarım gün süren analizler ve üç boyutlu debi için yaklaşık olarak iki gün süren analizler sonucunda elde edilen verilerin tablo gösterimleri ve yorumları sonuçlar ve tartışma bölümünde ayrıntılı olarak incelenmiştir.

5. OPENFOAM NÜMERİK MODELLEME AŞAMALARI

Open Field Operation And Manipulation (OpenFOAM) sonlu hacimler yöntemini kullanarak çeşitli problemleri çözümleyen açık kaynak kodlu bir CFD programıdır. Açık kaynak kodlu oluşu sayesinde önceden oluşturulmuş yazılıma ek olarak, kullanıcılar programa yeni çözümler ve ek olarak yardımcı programlar yazabilir. Ücretsiz bir program oluşu OpenFOAM programının en büyük avantajları arasındadır. Program C++ programlama dili ile çalışır ve kullanıcılar açık kaynak kodlu olmasından dolayı yaptığı her işlemin kontrolünü sağlayarak değişimine istediği şekilde yön verebilir. OpenFOAM kütüphanesi içindeki InterFoam VOF yöntemini kullanarak iki fazlı su hava etkileşimlerini sıkıştırılmaz akımlar için Navier-Stokes denklemlerini kullanarak çözebilen bir çözümdür. Çözücü bu iki fazlı ve sıkıştırılmaz akımların çözümü için ortak bulunan ızgaralarda hacimsel ayrıklaştırma yöntemini kullanmaktadır. Türbülanslı akımı modellemek için InterFoam içinde RANS ya da LES kütüphaneleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada açık kanal üzerindeki iki fazlı su hava etkileşimi incelenmiş ve InterFoam kütüphanesi kullanılarak akış modellemesi yapılmıştır. Modelleme yapılırken üç ana aşama vardır.

1. Ön Hazırlık (Pre-Processing)
2. Çözüm (Solving)
3. Çözüm Değerlendirmesi (Post-Processing)

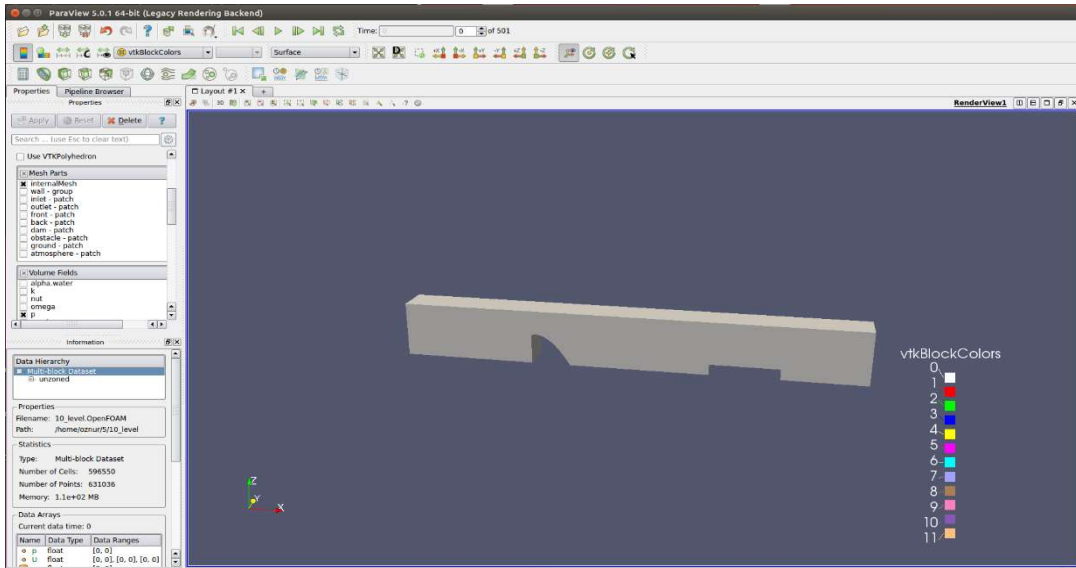
5.1. Ön Hazırlık (Pre-Processing)

Üç boyutlu simülasyonlar, kararsız, türbülanslı, sıkıştırılmaz bir akış varsayılarak gerçekleştirilmiştir. Simülasyon için ön hazırlık aşamasında çözüm alanı belirleme, mesh ızgara alanı boyutlandırılması, uygun mesh türüne karar verilmesi işlemleri birbirini takip etmektedir. Serbest yüzeyin bulunabilmesi için, iki karışmaz sıvı için tasarlanmış bir metot olan VOF metodu InterFoam çözücüsü kullanılarak modellenmiştir. InterFoam çözücüsü hava sürüklenme ve çeşitli akışkan olaylarında doğru bir şekilde çözümlene yapabilen bir çözümdür. InterFoam klasörü içinde çözümlene yaparken sıvının hareketini, Reynolds ortalamalı Navier-Stokes denklemleriyle tanımlamıştır. Bildiğimiz kadarıyla, bu çalışma, ogee tipi dolusavak kullanılarak akış karakteristiklerini incelemek için çözücünün ilk uygulamasıdır.

5.1.1. Model geometrisinin oluşturulması

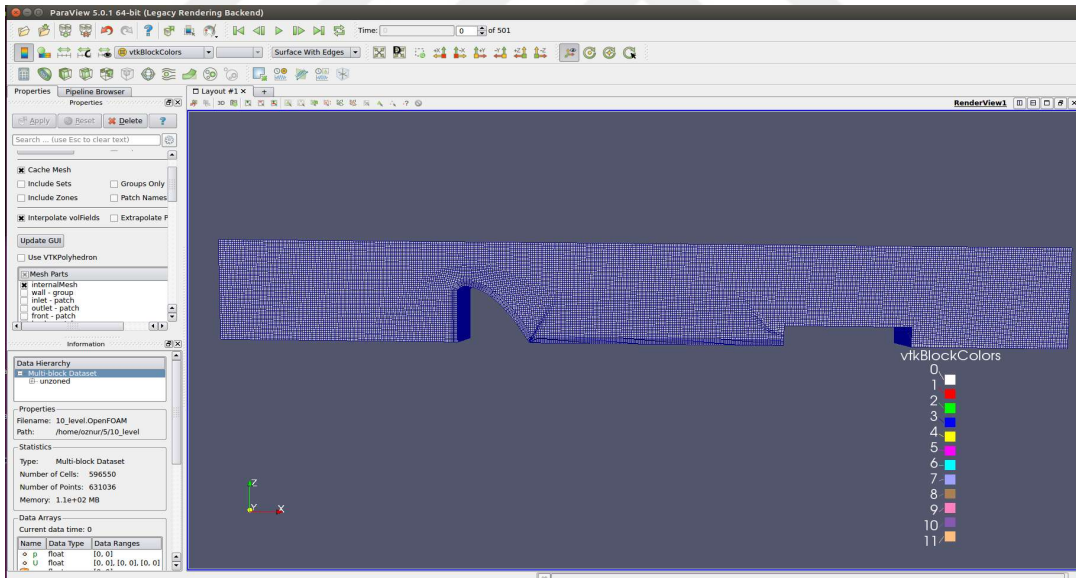
Simulasyonda oluşturulacak olan geometri 4 m uzunluğunda 0.5 m yüksekliğinde ve 0.3 m genişliğindedir. Akımın sınır koşulları belirtilerek model geometrisi oluşturulmuştur. Hesaplama alanı giriş, çıkış, sağ, sol ve alt duvar, kanalın üstü için ise hava olmak üzere 6 ayrı sınır koşulu içermektedir. Bu çalışmada model geometrisinin oluşturulmasında iki farklı yöntem kullanılmıştır. Bunlardan birincisi BlockMeshDict diğeri ise karmaşık geometrilerde modeli sisteme aktarmak için kullanılan SnappyHexMesh'dir. Çalışmada her iki klasör içinde sistem geometrisi oluşturulmuştur. BlokMeshDict Constant/polyMesh dosyasının içinde model geometrisinin boyutları oluşturulmuştur. Simülasyona başlarken unutulmaması gereken önemli faktörlerden biri "convertToMeters" komutunun yardımıyla ölçü biriminin istenilen şekilde ayarlanmasıdır. "vertices" bölümünde model geometrisinin köşeleri belirtilmiştir. Köşelerin başlangıcı sıfırdan başlayarak tanımlanmıştır. Toplam 166 adet köşe numarası kullanılmıştır. "blocks" bölümü altında her köşe için bloklar tanımlanmıştır ve 122 adet blok oluşturulmuştur. Daha sonra mesh bölümünde düzenlemeler yapılmıştır. "SimpleGrading" geometride kullanılan mesh'in eksenlerdeki aralığını düzenlemek için kullanılır. "boundary" bölümünde ise "inlet, outlet, wall, air" gibi sınır koşulları sisteme tanıtılmıştır. Geometri aktarımı anlatıldığı gibi BlockMeshDict içinde yapılabılırken, aktarım için diğeri bir yöntem olan ve ogee profilinin daha düzgün görüntülenmesini sağlayan SnappyHexMesh yöntemi tercih edilerek model geometrisi aktarılmıştır.

SnappyHexMesh yönteminde dosya STL formatına çevrilmiştir. STL formatındaki geometri daima Constant/triSurface klasöründe konumlanmış olarak bulunur. Mesh işlemi SnappyHexMeshDict dosyası içinde yapıldıktan sonra son mesh Constant/polyMesh dosyası içinde konumlanır. SnappyHexMesh dosyasında mesh için oluşturulan alanda yalnızca hegzahedral mesh çeşidi bulunmalıdır. Oluşturulan mesh alanında her bir mesh hücresi en/boy oranının yaklaşık 1 olmasına dikkat edilmiştir. Şekil 5.1'de aktarımı gerçekleştirilmiş olan 3 boyutlu model görülmektedir.



Şekil 5.1. OpenFOAM 3 boyut model görünümü

Bu modellemede yalnızca hexahedral mesh düzeni kullanılmıştır. Şekil 5.2.'de görülen model geometrisinde 1775000 mesh kullanılmıştır.



Şekil 5.2. OpenFOAM mesh görünümü

5.2. Çözüm (Solving)

Geometri sisteme tanıtdıktan sonra sınır şartlarının türü belirtilmelidir. Sınır şartları belirtilirken 0 klasörünün U dosyasında içinde düzenlemeler yapılmıştır. Şekil 5.3'de kullanılmış olan U dosyası gösterilmiştir.

```

/*-----* C++ *-----*/
FoamFile
{
  version      2.0;
  format       binary;
  class        volVectorField;
  location     "0";
  object       U;
}
// ***** //

dimensions    [0 1 -1 0 0 0];
internalField uniform (0 0 0);
boundaryField
{
  inlet
  {
    type          variableHeightFlowRateInletVelocity;
    flowRate      constant 0.02287;
    alpha         alpha.water;
    value         uniform (0 0 0);
  }
  outlet
  {
    type          inletOutlet;
    inletValue    uniform (0 0 0);
    value         uniform (0 0 0);
  }
  front
  {
    type          fixedValue;
    value         uniform (0 0 0);
  }
  back
  {
    type          fixedValue;
    value         uniform (0 0 0);
  }
  dam
  {
    type          fixedValue;
    value         uniform (0 0 0);
  }
  obstacle
  {
    type          fixedValue;
    value         uniform (0 0 0);
  }
  ground
  {

```

Şekil 5.3. OpenFOAM U dosyası

Suyun giriş hızı için ise girişe sabit bir ($U_0,0,0$) m/s sınır koşulu ve türbülans modeli kullanılarak modellenmiştir. Flowrate bölümü istenilen debiler için değiştirilerek simülasyon yenilenmiştir. Çıkış kısmında ise sıfır gradyan koşulu kullanılarak modelleme yapılmıştır. “constant” klasörü içinde bulunan transportproperties dosyası içinde yoğunluk, viskozite, yüzey gerilimi gibi özellikler belirtilmiştir. Şekil 5.4’de kullanılmış olan transportproperties dosyası gösterilmiştir.

```

/*----- C++ -----*/
FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        dictionary;
  object       transportProperties;
}

// ***** //

phases (water air);

water
{
  transportModel Newtonian;
  nu      nu      [0 2 -1 0 0 0 0] 1e-06;
  rho     rho     [1 -3 0 0 0 0 0] 1000;
}

air
{
  transportModel Newtonian;
  nu      nu      [0 2 -1 0 0 0 0] 1.48e-05;
  rho     rho     [1 -3 0 0 0 0 0] 1.2;
}

sigma      sigma [1 0 -2 0 0 0 0] 0.07000000000000001;

// ***** //

```

Şekil 5.4. OpenFOAM Transportproperties dosyası

Simülasyonda iki fazlı sıkıştırılmaz sıvı için VOF yaklaşım modeli türbülanslı akım için modelleme yapıldığından ve $k-\omega$ SST türbülans modeli kullanılmıştır. OpenFoam’da maksimum courant sayısı maxCo seçilirken 1’in altında olan değerler seçilir. MaxCo sayısının büyümesi simülasyon hızını artırırken sonuç kalitesini düşürerek dengesiz simülasyonlara neden olacaktır. Bu nedenle 0.5 ideal bir değer olarak alınmıştır. Maksimum zaman adımları maxDeltaT ile belirlenmiştir. Simülasyon süresince verilerin kaydetme aralıkları “System” klasörü içindeki “controlDict” dosyasında belirtilmiştir. Burada önemli unsurlardan biri simülasyon esnasında herhangi bir kesintide çözümün yeniden başlamaması için “startFrom” bölümünün “latestTime” olarak ayarlanarak simülasyonun kaldığı yerden devam etmesinin sağlanmasıdır. AdjustTimestep “yes” olarak seçilmiştir. Böylece simülasyondaki zaman adımının simülasyon sırasında değiştirilebilmesi sağlanmıştır. Şekil 5.5.’de kullanılan ControlDict dosyası gösterilmiştir.

Bu denklemde, p basınç, ρ sıvı yoğunluk, g yerçekimi ivmesi, τ viskoz basınç tensörünü temsil etmektedir. Süreklilik denklemi 5.2'de gösterilmiştir:

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (5.2)$$

Yüzey gerilim kuvveti iki faz arasında yalnızca ara yüze etki ettiği için Ansys Fluent'de yüzey gerilimi hesaplanarak ara yüz elde edilir. Yüzey gerilimi Denklem 5.3.'de görülen formülle hesaplanır.

$$F_s = \sigma K(x)n \quad (5.3)$$

Denklemde belirtilen $K(x)$ ara yüzeyin eğriliğini, n ise yüzey birim vektörünü temsil etmektedir. Bir hücredeki ara yüz belirlenirken hücre dolu ise $\alpha_n=1$, hücre boş ise $\alpha_n=0$ ve $0 < \alpha_n < 1$ olduğunda su ile hava arasındaki ara yüzü temsil etmektedir. OpenFoam hücrelerdeki ara yüzü belirleme yöntemiyle Ansys Fluent paket programına oldukça benzerlik göstermektedir. Hücrede bulunan sıvı miktarının belirlenmesi için kullanılan Denklem 5.4.'deki gibidir.

$$F_{vol}_n = \alpha_n V_{cell} \quad (5.4)$$

Bu denklemde V_{cell} hücrelerin hacmini temsil etmektedir. OpenFoam programı VOF metodunda kullanılan denklemlere ek olarak Denklem 5.5.'de görülen ayrı bir denklem daha kullanmaktadır. Bu denklem yalnızca ara yüz ile ilgilidir.

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \nabla(\gamma \cdot u) + (u_c \gamma(1 - \gamma)) = 0 \quad (5.5)$$

Bu denklemde, u hız vektörünü temsil ederken γ hücre içindeki sıvının hacim olarak oranını temsil etmektedir. u_c ise ara yüzdeki sıkıştırma oranını temsil eden katsayıdır. VOF metodunda her hücre için sıvı ve gaz arasında çözümlenme yapılmaz.

Gelişmiş sayısal işlemler sayesinde ara yüz tek bir hücrede bulunur. Böylece sayısal işlem sayısı minimuma indirgenmiş olur.

5.2.2. Türbülans modeli

RANS yöntemini kullanarak akışı tahmin eden pek çok farklı türbülans modeli bulunmaktadır. Bu çalışmada ortalama hacimli k- ω SST türbülans modeli kullanılarak türbülanslı akım için çözümleme yapılmıştır.

5.2.2.1. K- ω SST türbülans modeli

K- ϵ türbülans modeli sınır tabaka akışını modellemekte üstün model olarak görülürken k- ω modeli serbest akışın modellenmesinde üstünlük gösteren bir model olarak görülmektedir. K- ω SST modeli her iki türbülans modelini birleştirerek en optimum sonuçları elde etmek için geliştirilmiş türbülans modelidir.

Türbülans dağılım oranı denklem 5.6.'da ve türbülans kinetik enerjisi Denklem 5.7.'de gösterilmiştir.

$$\frac{D}{Dt}(\rho\omega) = \nabla \cdot (\rho D\omega \nabla \omega) + \frac{\rho\gamma G}{v} - \frac{2}{3}\rho\gamma\omega(\nabla \cdot \mathbf{u}) - \rho\beta\omega^2 - \rho(F1-1)CDk\omega + S\omega \quad (5.6)$$

$$\frac{D}{Dt}(\rho k) = \nabla \cdot (\rho Dk \nabla k) + \rho G - \frac{2}{3}k(\nabla \cdot \mathbf{u}) - \rho\beta^* \omega k + Sk \quad (5.7)$$

OpenFoam programında başlangıç ayarı olarak varsayılan model katsayıları Tablo 5.1'de gösterilmiştir.

Tablo 5.1. OpenFOAM başlangıç ayarı model katsayıları

a_{k1}	a_{k2}	a_{w1}	a_{w2}	β_1	β_2	γ_1	γ_2
0.85	1.0	0.5	0.856	0.075	0.0828	5/9	0.44
β^*	a_1	b_1	c_1				
0.09	0.31	1.0	10.0				

OpenFoam'da türbülans modeli Şekil 5.6.'da gösterilen "turbulence properties" dosyasında belirtilerek sisteme tanıtılmıştır.


```

/*-----*- C++ -*-----*/
|=====|
| \ \ \ \ \ | F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
| \ \ \ \ \ | O p e r a t i o n | Version: 4.*
| \ \ \ \ \ | A n d | Web: http://www.OpenFOAM.org
| \ \ \ \ \ | M a n i p u l a t i o n |
|-----|
FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        dictionary;
  object       turbulenceProperties;
}

// *****

simulationType RAS;

RAS
{
  RASModel      kOmegaSST;

  turbulence     on;

  printCoeffs   on;
}

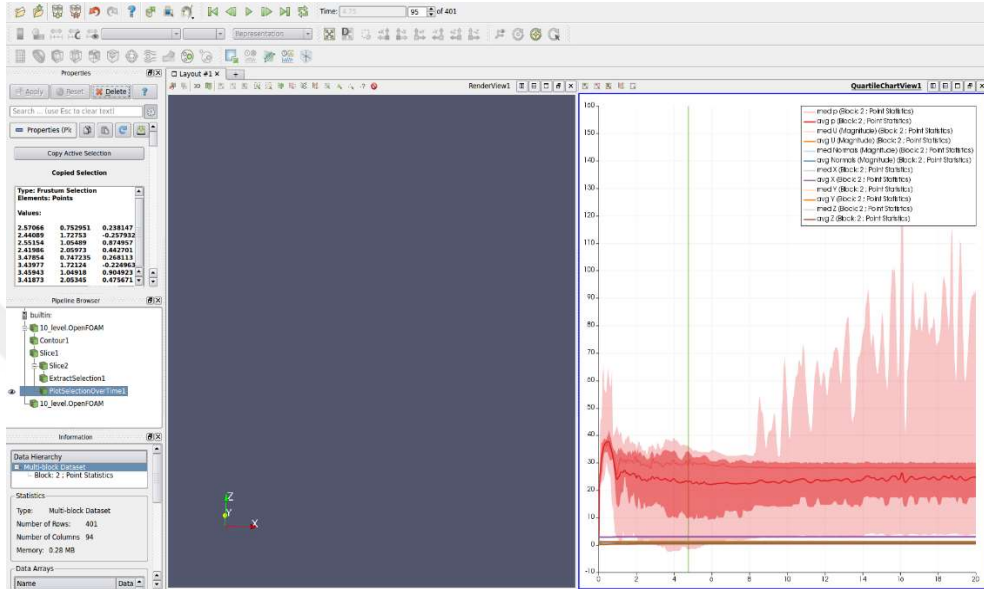
```

Şekil 5.6. OpenFOAM TurbulenceProperties dosyası

5.2.3. Çözücüler

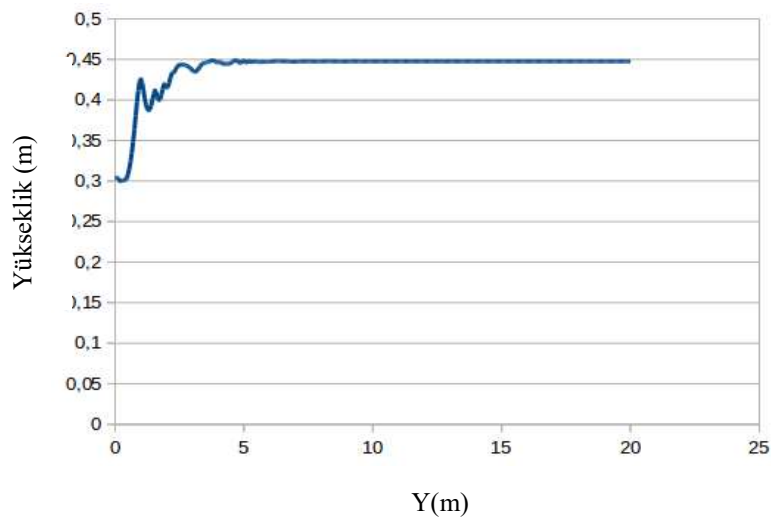
Çözücüler “System” klasörü içinde bulunan “fvsolution” klasöründe tanımlanır. Fvsolution dosyasının içinde belirtilen her komutun başında bir anahtar çözücü kelime vardır. Simülasyon için kullanılan Interfoam klasörünün kullandığı her değişken için ne tür çözücülerin kullanıldığını belirten Pcorr, p_rgh, U değişkenlerini çözen girdiler vardır. Bu çalışmada GAMG metodu kullanılarak çözümlene yapılmıştır. U değişkeni için ise PBiCG yöntemi kullanılmıştır. Diagonal incomplete-LU (DILU) asimetrik matrislerin ön koşullandırma yeteneğinden dolayı tercih edilen bir çözücü olmuştur. Tüm nümerik metotlar iteratif olarak çözülür. Şekil 5.7’de fv-Solution dosyası gösterilmiştir.

Girilen kordinatlar sonucu ‘‘Extract Selection’’ ve ‘‘PilotoverTime’’ komutları kullanılarak veriler elde edilir. ParaView hız, basınç ve su yüzü profili gibi pek çok verinin elde edilebilmesini sağlar. Şekil 5.9’da post processing bölümünde gösterilen sonuç ekranı gösterilmiştir.



Şekil 5.9. ParaView Post Processing

Buradan sonuçlar listeli alınabildiği gibi Şekil 5.10’da gösterildiği şekilde grafiksel olarak da elde edilebilir.



Şekil 5.10. ParaView Post Processing akım derinliğinin ölçülmesi

Tezin Tartışma ve Sonuçlar bölümünde analiz sonuçları hakkında elde edilen bilgiler ayrıntılı olarak sunulmuştur.



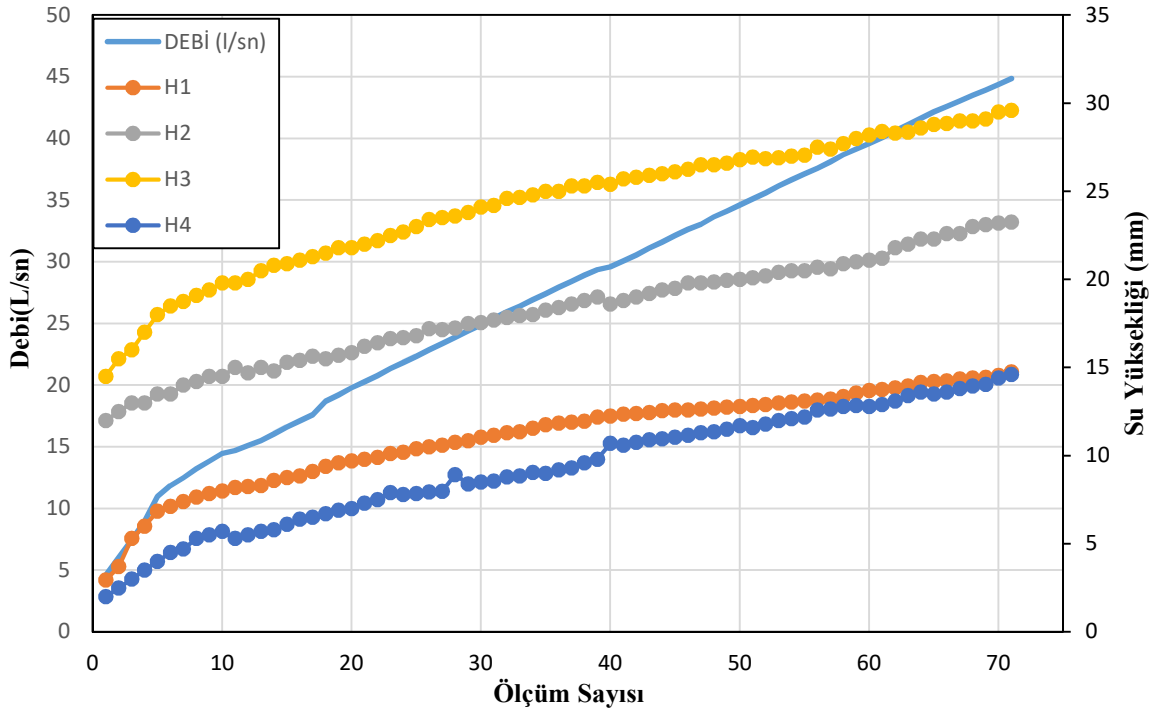
6. ARAŞTIRMA SONUÇLARI

Bu çalışmada ogee tipi dolusavak üzerinden geçen akımın farklı debiler için elde edilen su yüzü yükseklikleri incelenmiştir. Laboratuvar deney sonuçları, OpenFoam açık kaynak kodlu programıyla ve Ansys-Fluent ticari paket programıyla iki farklı şekilde 2 boyutlu ve 3 boyutlu olmak üzere sayısal olarak modellenmiş elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deneysel model ile her iki nümerik model sonuçları arasında yüksek oranda hidrolik benzerlik elde edilmiştir. Ayrıca çalışmanın iyileştirilmesi ve gelecekteki çalışmalara katkı sağlamak amacıyla bazı önerilere yer verilmiştir.

6.1. Nümerik Modelleme ve Deneysel Modelleme Sonuçları

6.1.1. Deneysel modelleme sonuçları

Açık kanal üzerinde daha önce belirtilmiş olan H_1 , H_2 , H_3 ve H_4 noktalarından alınan su yüzü ölçümlerine dair 71 debi için sonuç elde edilmiştir. H_1 , H_2 , H_3 ve H_4 noktaları ogee profili boyunca yukarı akıştan aşağı akış yönü boyunca incelenmiştir. Ölçüm alınan noktalardan biri olan H_2 noktasında hidrolik sıçrama olayı meydana gelmektedir. Bu nedenle elde edilen sonuçların güvenilirliğinin diğer noktadaki ölçümlere göre daha düşük olduğu düşünülmektedir. Ölçüm alınan debilere göre su yüzü profili sonuçları Şekil 6.1’de gösterilmiştir. Gösterilen grafikte elde edilen her bir ölçümdeki debiye göre H_1 , H_2 , H_3 ve H_4 noktalarındaki debiler yorumlanabilmektedir. Ek 1, Ek 2, Ek3, Ek 4’de modellerden elde edilmiş olan su yüksekliği grafiği verilmiştir. Ayrıca Ek 5’de deneysel olarak elde edilmiş olan su yükseklikleri sütun grafiği şeklinde verilmiştir.

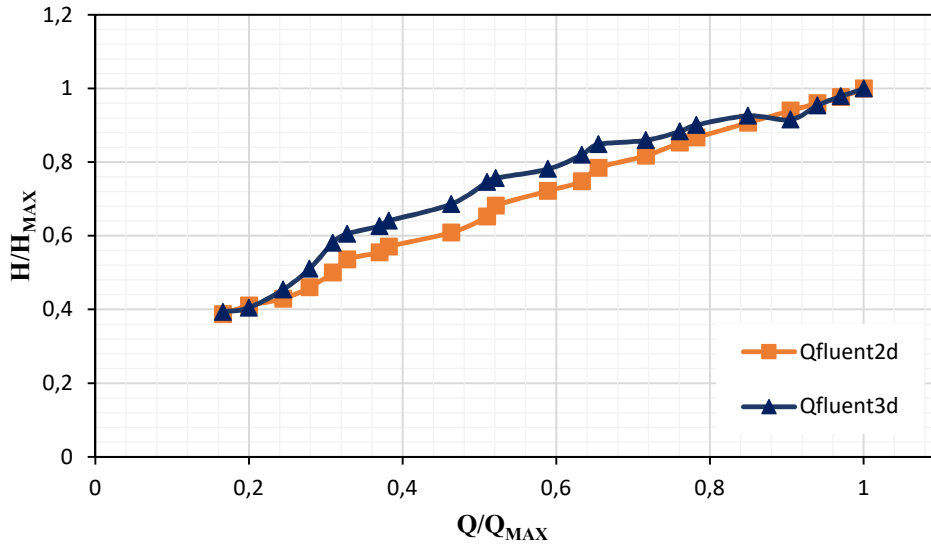


Şekil 6.1. Debi-Su yüksekliği deneysel veri grafiği

6.1.2. 2D Ansys Fluent-3D Ansys Fluent nümerik model sonuçlarının karşılaştırılması

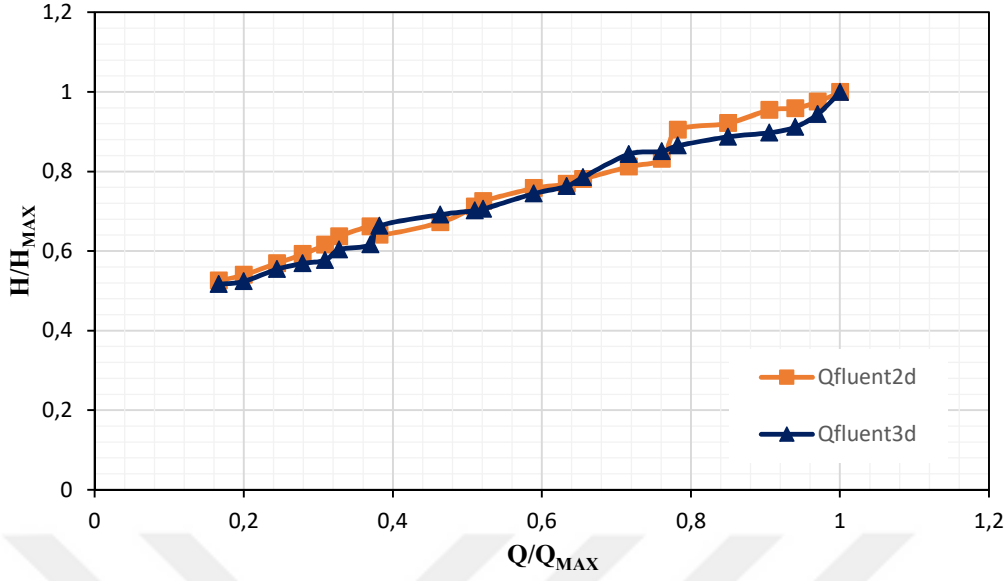
Çalışmada Ansys Fluent programı yardımıyla oluşturulan 2 boyutlu ve 3 boyutlu modellerin sonuçları Şekil 6.2., Şekil 6.3., Şekil 6.4. ve Şekil 6.5.'de gösterilmiştir.

H₁ Noktasında Su Yüksekliklerinin Karşılaştırılması



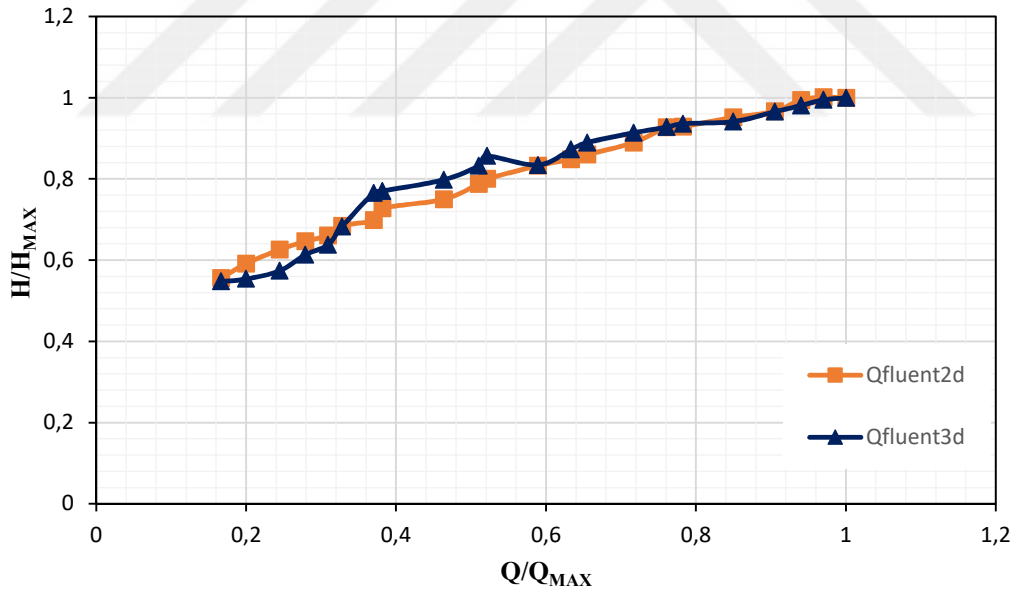
Şekil 6.2. H₁ noktası için Fluent 2D-Fluent 3D nümerik model sonuçlarının karşılaştırılması

H₂ Noktasında Su Yüksekliklerinin Karşılaştırılması

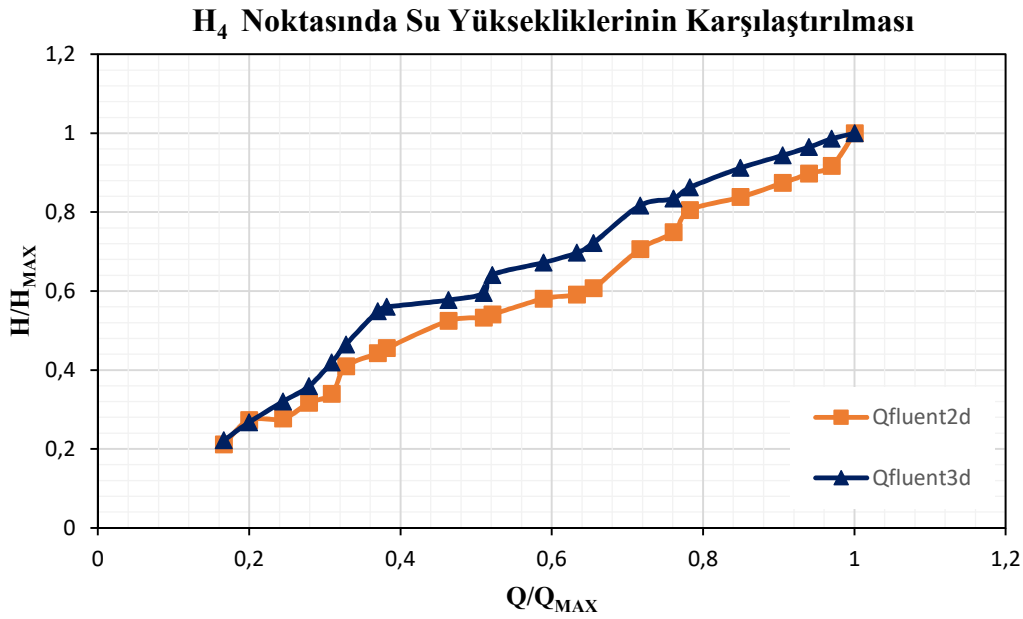


Şekil 6.3. H₂ noktası için Fluent 2D-Fluent 3D nümerik model sonuçlarının karşılaştırılması

H₃ Noktasında Su Yüksekliklerinin Karşılaştırılması



Şekil 6.4. H₃ noktası için Fluent 2D-Fluent 3D nümerik model sonuçlarının karşılaştırılması



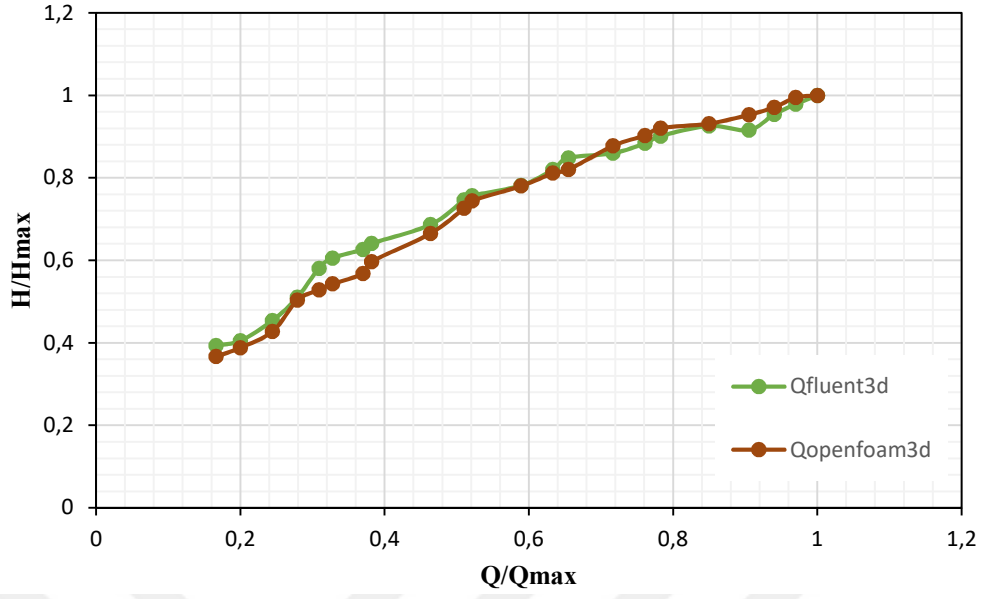
Şekil 6.5. H₄ noktası için Fluent 2D-Fluent 3D nümerik model sonuçlarının karşılaştırılması

Grafiklerden elde edilen sonuçlara göre her iki modelinde birbiriyle oldukça uyumlu sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. 3 boyutlu modelde su seviyesinin genel olarak 2 boyutlu modelden daha yüksek çıkmasının ise 3 boyutlu modelde tanımlanan duvarlardaki adezyon kuvvetinden kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Ayrıca enerji kaybının 2D modele göre daha büyük olmasının da su seviyesinin farklı olmasında etkili olduğu düşünülmektedir. z eksenindeki türbülansların hesaba katılması sebebiyle 3 boyutlu modelde türbülans etkilerinin 2 boyutlu modele göre daha fazla olması iki model arasında gözlemlenen farklılıkların diğer bir nedeni olarak düşünülmektedir.

6.1.3. 3D Ansys Fluent-3D OpenFoam Nümerik Model Sonuçlarının Karşılaştırılması

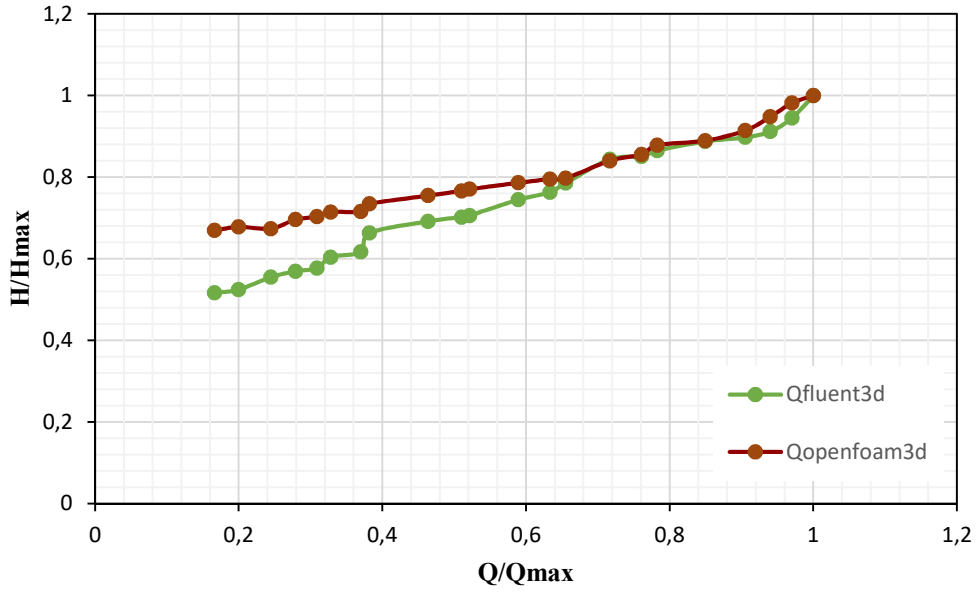
Ansys Fluent ve OpenFoam'da kurulan 3 boyutlu modelden elde edilen sonuçlar Şekil 6.6., Şekil 6.7., Şekil 6.8., ve Şekil 6.9.'da gösterilmiştir.

H₁ Noktasında Su Yüksekliklerinin Karşılaştırılması



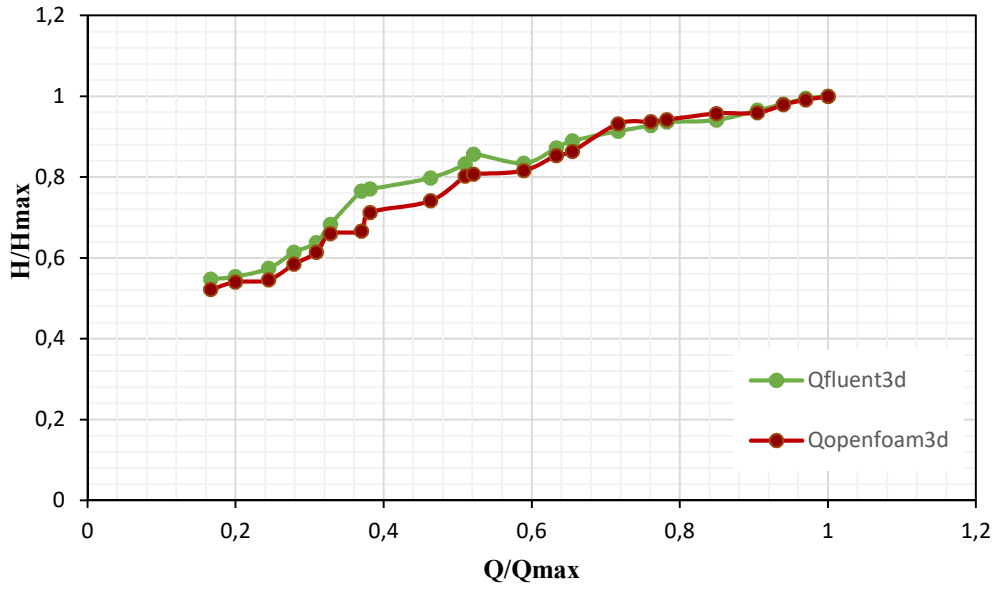
Şekil 6.6. H₁ noktası için Fluent 3D-OpenFoam 3D nümerik model sonuçlarının karşılaştırılması

H₂ Noktasında Su Yüksekliklerinin Karşılaştırılması



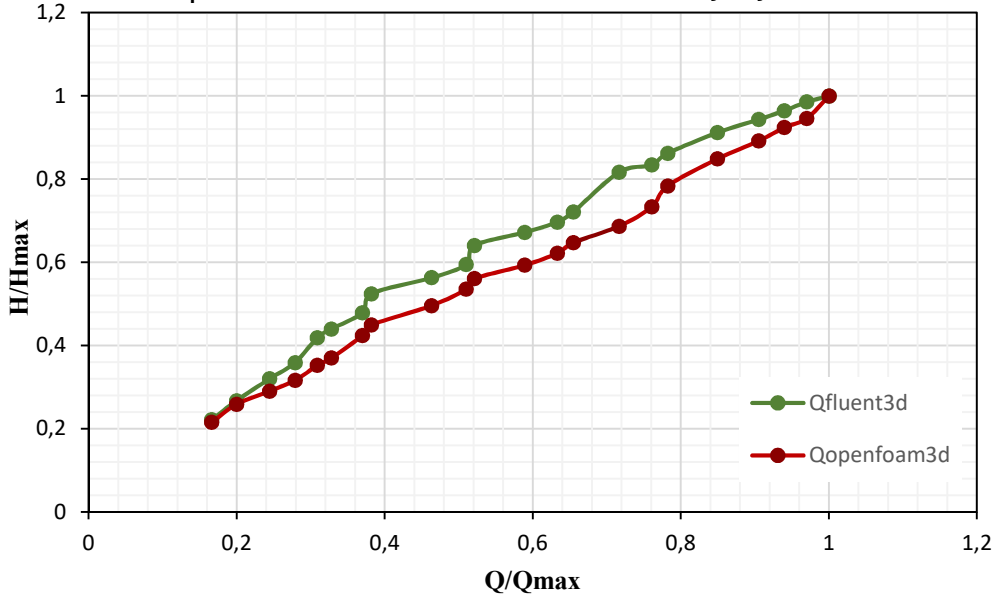
Şekil 6.7. H₂ noktası için Fluent 3D-OpenFoam 3D nümerik model sonuçlarının karşılaştırılması

H₃ Noktasında Su Yüksekliklerinin Karşılaştırılması



Şekil 6.8. H₃ noktası için Fluent 3D-OpenFoam 3D nümerik model sonuçlarının karşılaştırılması

H₄ Noktasında Su Yüksekliklerinin Karşılaştırılması

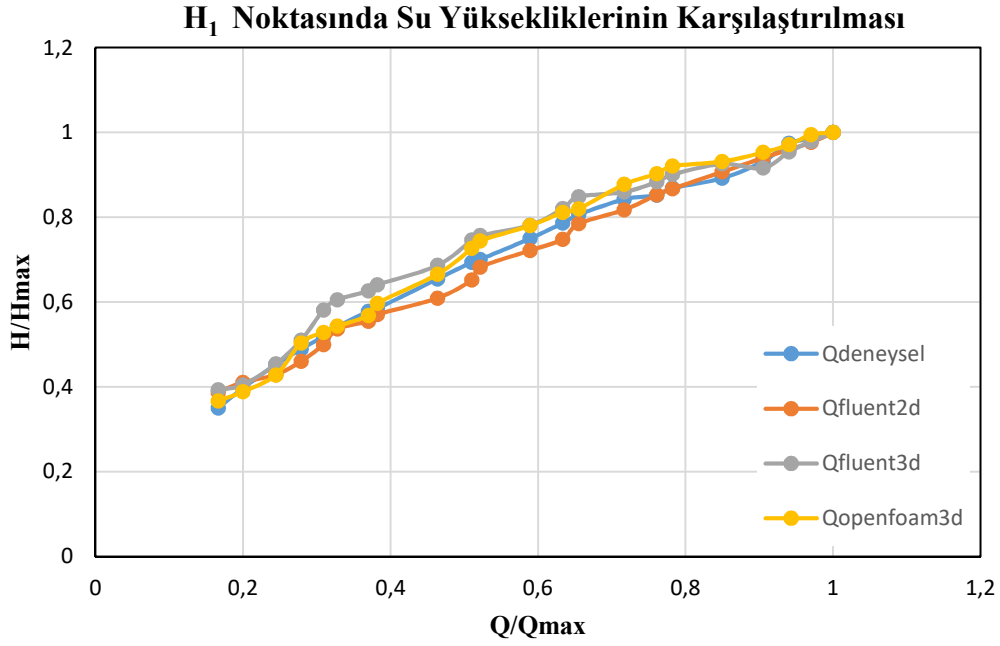


Şekil 6.9. H₄ noktası için Fluent 3D-OpenFoam 3D nümerik model sonuçlarının karşılaştırılması

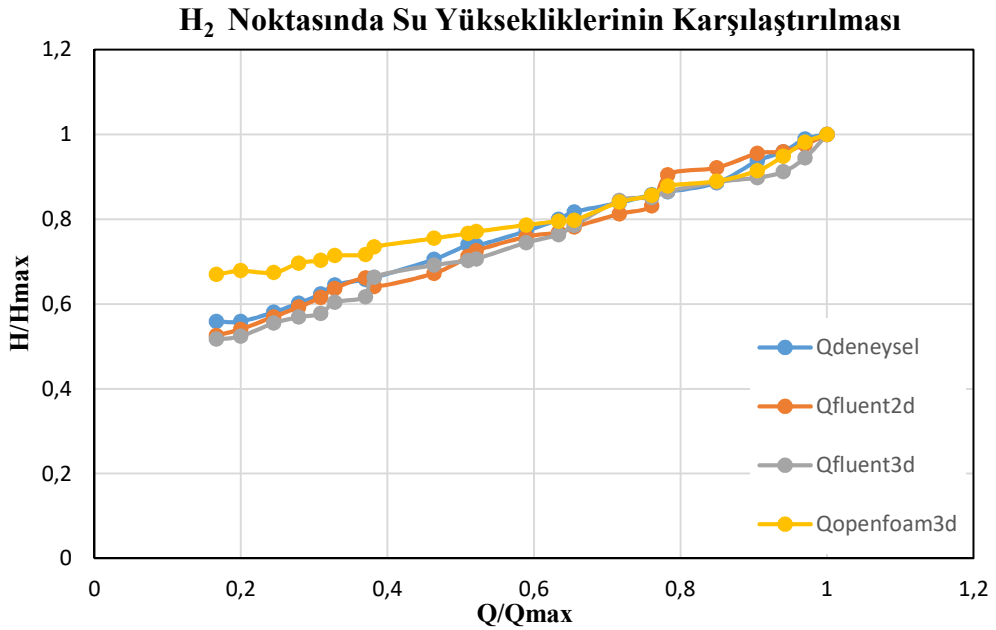
Elde edilen sonuçlara göre H₁ ve H₃ noktalarında sonuçlar oldukça makul bir uyum göstermiştir. Ancak H₂ ve H₄ noktasında sonuçların belli bölgelerde çok yakın olmadığı görülmüştür. Bu durumun nedeni H₂ noktası için 3 boyutlu modellerde farklı türbülans modellerinin kullanılması olarak düşünülmektedir.

6.1.4. Nümerik model sonuçlarının karşılaştırılması

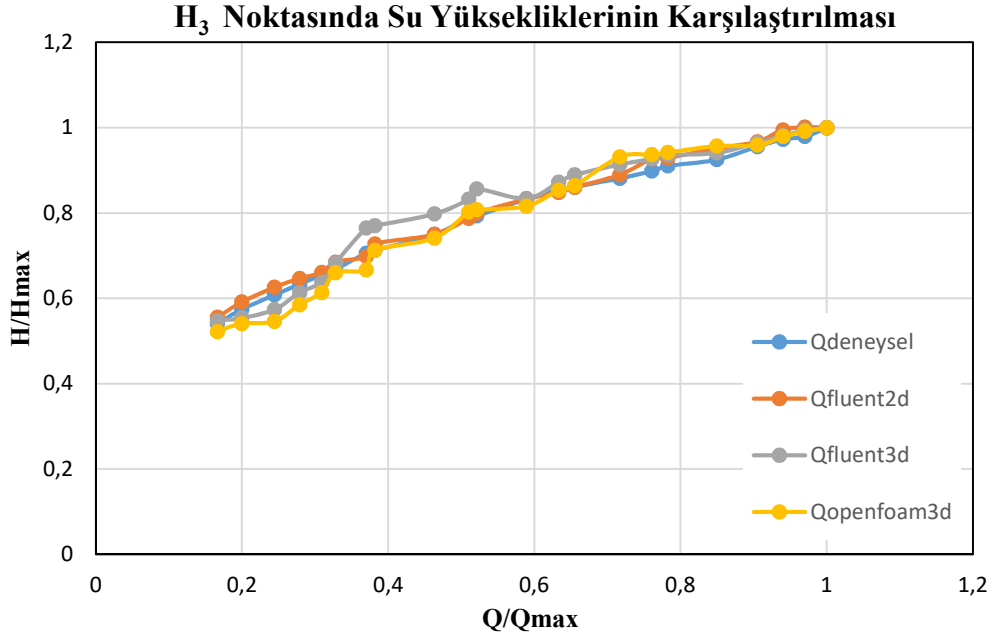
Elde edilen tüm 2 boyutlu ve 3 boyutlu nümerik modellerin ve deneysel modelin sonuçları aşağıda verilmiş olan Şekil 6.10., Şekil 6.11., Şekil 6.12., ve Şekil 6.13.'de gösterilmiştir.



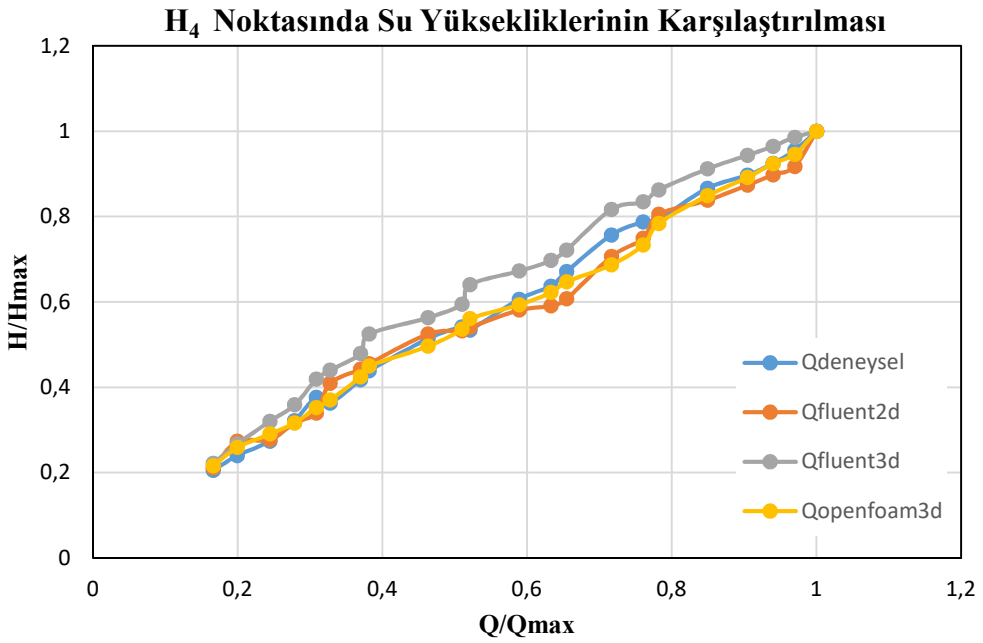
Şekil 6.10. H₁ noktası için Fluent 2D-Fluent3D OpenFoam 3D nümerik model sonuçları



Şekil 6.11. H₂ noktası için Fluent 2D-Fluent3D OpenFoam 3D nümerik model sonuçları



Şekil 6.12. H₃ noktası için Fluent 2D-Fluent3D OpenFoam 3D nümerik model sonuçları



Şekil 6.13. H₄ noktası için Fluent 2D-Fluent3D OpenFoam 3D nümerik model sonuçları

Elde edilen karşılaştırmalı sonuçlara göre yüksek debilerde sonuçların birbirine yakınlık derecesi oldukça fazladır. Ogee tipi dolusavak profilinde debi arttıkça su yüksekliğindeki artış azalır. Bu da ölçümlerin genelinde küçük debilerden büyük debilere gidildikçe sonuçların birbirine benzerlik göstermesinin kanıtı olarak düşünülmektedir.

Savak yükü ölçümlerinde 3 boyutlu nümerik modellerin ölçüm alınan birçok debide birbirine benzer sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

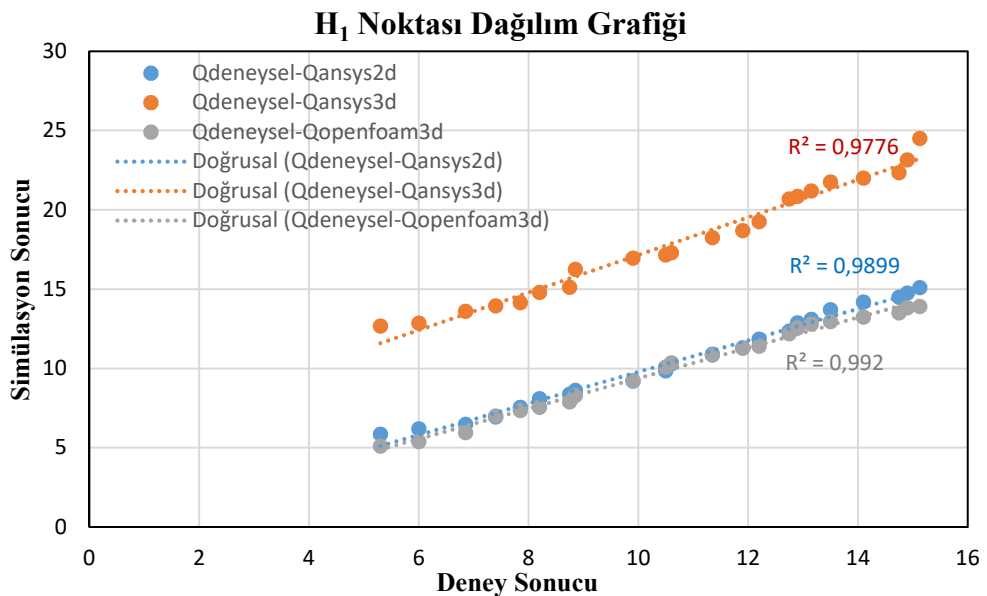
Türbülanslı bölgede k-ε türbülans modeli ile Ansys Fluent’de oluşturulan 3 boyutlu modelin deneysel sonuçlara daha yakın değerler verdiği görülmüştür. OpenFoam’da kullanılan k-ω SST türbülans modelinin ise türbülanslı bölgede özellikle düşük debilerde oldukça farklı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle, açık kanal çalışmasında iki model arasında k-ε türbülans modelinin daha başarılı sonuçlar elde ettiği söylenebilir.

Türbülanssız bölge olan H₃ noktasında alınan ölçümlerde tüm modellerin deneysel modele yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bu da nümerik modellerin deneysel modele yakın bir şekilde oluşturulduğunun ve yüksek bir güvenilirliğe sahip olduğunu kanıtı olarak düşünülebilir.

H₄ noktasında y_{kritik} ’in konum değiştirmiş olduğu düşünülmektedir. Elde edilen verilere göre H₄ noktasında ölçülen sonuçlar farklılık göstermesi buna bağlı olarak açıklanabilir.

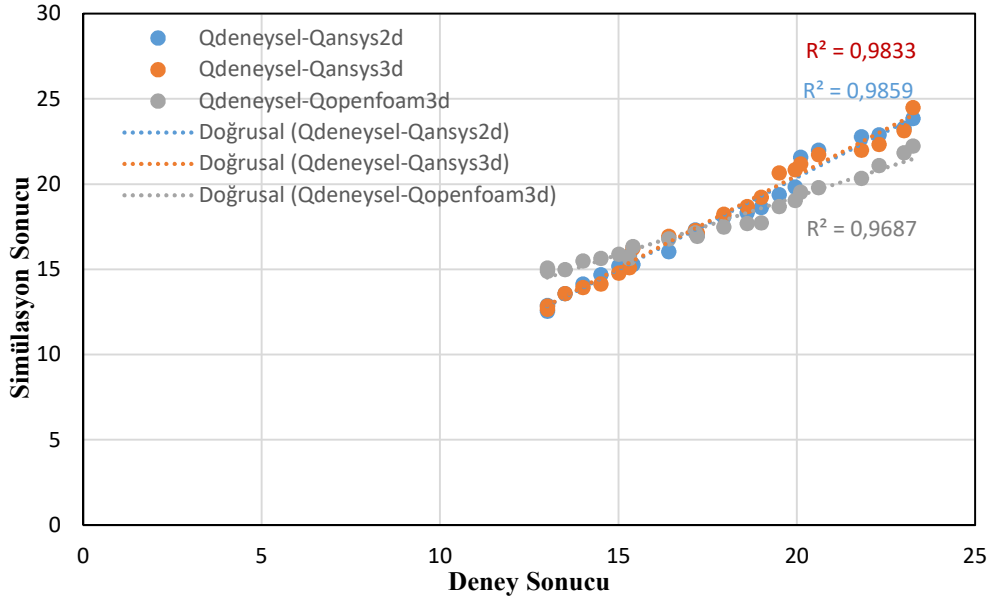
6.1.5. Nümerik model sonuçlarının karşılaştırılması

Elde edilen tüm 2 boyutlu ve 3 boyutlu nümerik modellerin ve deneysel modelin R² sonuçları aşağıda verilmiş olan Şekil 6.14., Şekil 6.15., Şekil 6.16., ve Şekil 6.17.’de gösterilmiştir.



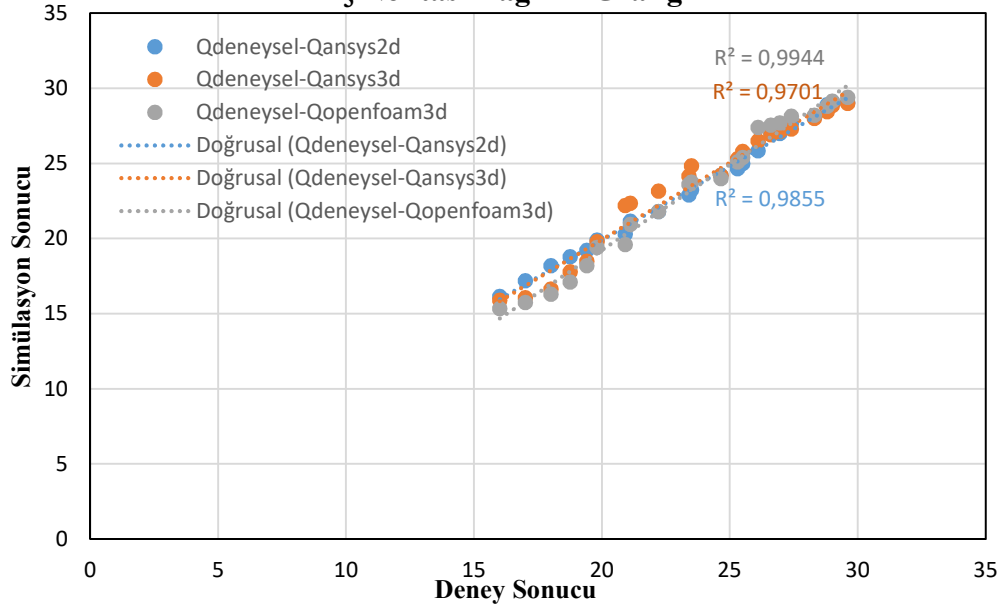
Şekil 6.14. H₁ noktası için Fluent 2D-Fluent3D OpenFoam 3D nümerik model R² sonuçları

H₂ Noktası için Dağılım Grafiği

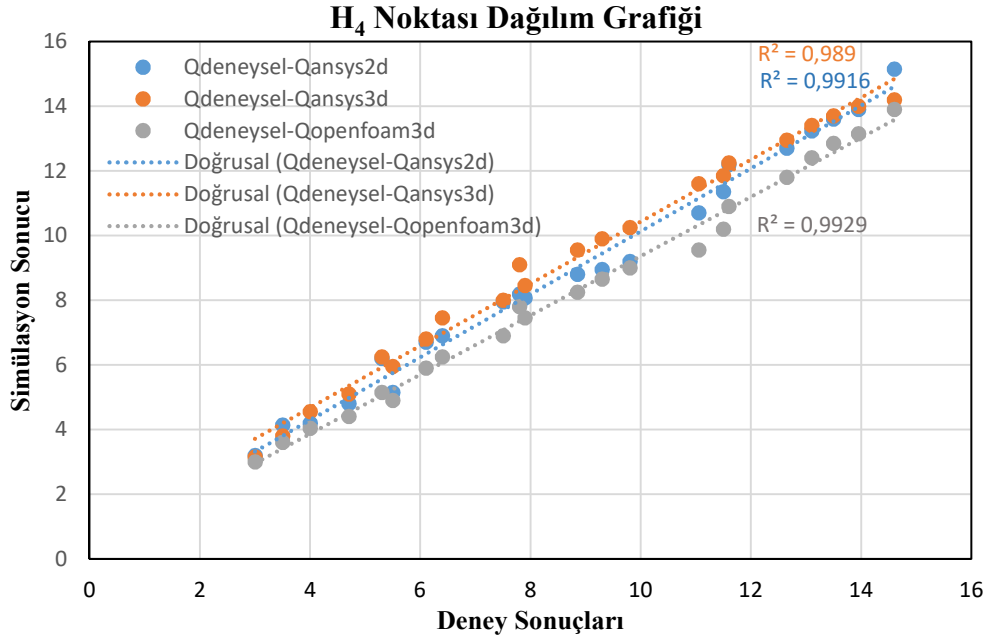


Şekil 6.15. H₂ noktası için Fluent 2D-Fluent3D OpenFoam 3D nümerik model R² sonuçları

H₃ Noktası Dağılım Grafiği



Şekil 6.16. H₃ noktası için Fluent 2D-Fluent3D OpenFoam 3D nümerik model R² sonuçları



Şekil 6.17. H₄ noktası için Fluent 2D-Fluent3D OpenFoam 3D nümerik model R² sonuçları

Elde edilen R² sonuçlarına göre OpenFoam programı ile oluşturulmuş model türbülanslı bölge olan H₂ bölgesi dışında deneysel modele en yakın sonuçları veren nümerik model olmuştur. Ansys Fluent’de 3 boyutlu olarak kurulmuş olan model ise türbülanslı H₂ bölgesinde deneysel modele en yakın sonucu veren nümerik model olmuştur. Sonuçlar OpenFoam programında kullanılan k- ω SST türbülans modelinin açık kanaldaki türbülanslı akış için başarısız bir türbülans modeli olduğunu gösterirken Ansys Fluent’de kullanılan k- ϵ türbülans modelinin açık kanalda türbülanslı akım için uygun bir model olduğunu göstermiştir.

Ayrıca türbülanslı olmayan H₁, H₂ ve H₃ noktalarında OpenFoam programıyla yapılmış olan model ile deneysel model arasındaki yüksek orandaki benzerlik kalibrasyonunun doğru bir şekilde yapılarak başarılı bir model elde edildiğini kanıtlar niteliktedir.

6.1.6. Ansys Fluent ve OpenFoam karşılaştırılması

Çalışmada nümerik model için kullanılan Ansys Fluent ve OpenFoam programları işleyiş bakımından birçok farklı özellik göstermektedir. Bu farklı özellikler şu şekilde sıralanabilir.

- Ansys Fluent akışkanların farklı davranışlarını modellemek için kullanılan ticari paket programdır. OpenFoam ise yine akışkanların farklı davranışlarını modellemek için kullanılan açık kaynak kodlu bir programdır.
- Ansys Fluent tetrahedral ve hekzahedral mesh ile çözüm sunabilir. OpenFoam ise Snappyhexmesh klasörü içinde yalnızca tetrahedral mesh kullanarak çözüm elde eder.
- Ansys Fluent'de geometri aktarma işlemi AutoCAD, Solidworks gibi programlardan doğrudan ya da STL formatı şeklinde aktarılabilirken OpenFoam'da SnappyhexMesh klasöründe geometri aktarımı yalnızca STL formatında yapılır.
- Ansys Fluent'de geometri modellemesi için SpaceClaim, Design Modeler gibi programlar çizim için kullanılabilirken, OpenFoam'da ise BlockMeshDict, SnappyhexMeshDict klasörü içinde geometri kodlarla oluşturulabilir.
- OpenFoam'da su yüksekliği okumak uzun işlemler gerektirirken Ansys Fluent'de su yüksekliği ölçümü daha kısa alınabilmektedir.
- Her iki programda da görsel sonuç elde özellikleri oldukça gelişmiştir.
- Ansys Fluent'de türbülans modelleri hızlı bir şekilde değiştirilebilirken OpenFoam'da değişen türbülans modellerinin özellikleride değiştirilmelidir.
- Çalışmada OpenFoam analiz süreleri Ansys Fluent analizlerine göre daha uzun süre almıştır.

7. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada karşılaştırmalı olarak doğrulanan sonuçlar, CFD tekniklerinin deneysel analizlerle birlikte, hidrolik yapılar için tasarım ve kontrol aracı olarak kullanılabilirliğini kanıtlamıştır. CFD araçları sayesinde basınç, akış hızı, su yüzü profili gibi bilgiler sayısal simülasyonlarla kolaylıkla elde edilebilir. Böylece nümerik modelin deneysel çalışmaların gerçekliğini doğrulaması yönüyle avantajı olduğunu göstermiştir. Ayrıca CFD teknikleri kullanılmadan önce test için kullanılan deneysel yöntemlerin bu çalışmada kullanılması ile çalışmanın güvenliği artırılmıştır.

7.1. Çalışmanın İyileştirilmesi İçin Öneriler

Çalışmanın sonunda uygulamalar için gelecekteki çalışmalar ve kurulan nümerik modellemenin geliştirilerek iyileştirilmesi için öneriler sunulmuştur.

- Ogee tipi dolusavağın üstüne sonuçların daha fazla iyileştirilmesi için “local mesh refinement” uygulaması yapılmalıdır.
- Sonuçların deneysel sonuçlarla daha fazla yakınsaması için daha farklı türbülans modelleri kullanılabilir.
- Bu tez çalışmasında 2 boyutlu olarak ve 3 boyutlu olarak standart k- ϵ türbülans modeli kullanılmış ancak openfoam modelinde k-w SST modeli kullanılmıştır. Karşılaştırma esnasında 3 boyutlu modellerde farklı türbülans modelleri olması 3 boyutlu modellerin yeterince doğru bir kıyaslama yapılamamasına neden olacağından 3 boyutlu modellerde aynı tür türbülans modeli kullanılması tercih edilebilir.
- “Adaptive mesh” gibi çeşitli mesh teknikleri kullanılarak iyileştirme elde edilebilir.

7.2. Gelecek Çalışma İçin Öneriler

Bu bölümde çalışmaya eklenerek daha kapsamlı bir çalışma elde etmek için sunulan öneriler verilmiştir.

- Çalışmada basınç, hız gibi verilerin kontrolü deneysel ve nümerik olarak sağlanabilir.
- Farklı türbülans modelleri kullanılarak akış için en yakın sonuçları veren türbülans modeli tespit edilebilir.
- Ogee tipi dolusavak üzerindeki kavitasyonlar deneysel ve nümerik olarak incelenebilir.
- Ogee tipi dolusavağın boyutlarının optimum tasarımı üzerine çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Alfrink, B. J., Van Rijn, L. C., 1983, Two Equation Turbulence Model for Flow in Trenches. *J. Hydraul. Eng.*, 109., 941-958.
- Ansys Inc., 1970., CFX 12.1, Help, 2010, Solver Theory Guide, Turbulence Models.
- Attari, J., Sarfaraz, M., (2012). Transitional Steps Zone in Steeply Sloping Stepped Spillways, *International Congress on Civil Engineering*.
- Andersson, A., Andreasson, P., Lundström, T., 2013, CFD modelling and validation of free surface flow during spilling of reservoir in down-scale model. *Eng. Appl. Comp. Fluid*, 7, 159–167.
- A. H. Nikseresht, N. Talebbeydokhti, M. J. Rezaei, 2012, Numerical simulation of two-phase flow on steppool spillways, *Scientia Iranica*, 20 222–230.
- Berg, J. R., Ormiston, S. J., Soliman, H. M., 2006, Prediction of the flow structure in a turbulent rectangular free jet. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 33. pp. 552–563.
- Bal H., 2011, Geniş Başlıklı Savak İçeren Açık Kanal Akımının Sayısal Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- C. W. Hirt, B. D. Nichols, 1981, Volume of fluid (VOF) method for dynamics of free boundaries, Los Alamos Scientific Laboratory, Los Alamos, New Mexico
- Chatila J. ve Tabarra M., 2004, Computational Modeling of Flow over an Ogee Spillway. *Computers & Structures*, 82(22): 1805-1812.
- Choi W. ve Kim M. H., 2000, Free-Surface Fluid Flow over Spillway, 4th International Conference Hydro-Science and Engineering, Seoul.
- Date V. Dey T. And Joshi S., 2017, Numerical Modeling of Flow over an Ogee Crested Spillway Under Radial Gate, VOF and MMF Model. *J Appl Mech Eng*, Vol 6(5): 287
- Dursun Ö. F. ve Öztürk M., 2009, Basamaklı Dolusavaklarınchocho Akımın Enerjisini Sönümleme Özelliğinin Sayısal Analizi, *e-Journal of New World Sciences Academy*, 4(2):165 -175.
- Eghbalzadeh A., Javan M., 2012, Comparison of Mixture and VOF Models for Numerical Simulation of Air–entrainment in Skimming Flow over Stepped Spillways, *International Conference on Modern Hydraulic Engineering*, Procedia Engineering 28 (2012) 657 – 660.
- Fadaei-Kermani, E. and Barani, G. A., 2014, Numerical simulation of flow over spillway based on the CFD method, *Scientia Iranica A*, 21, 91–97.
- Ghobadian, R., Fattahi, A., Farmanifard, M., and Ahmadi, A., 2013, Effect of crest roughness on flow characteristics over circular weirs, *Journal of Civil engineering*, 46(2): 199 207
- Gessler, D., 2005, CFD Modeling of Spillway Performance in Proc. of World *Water and Env. Resources Congress*, Anchorage Alaska doi: [http://dx.doi.org/10.1061/40792\(173\)398](http://dx.doi.org/10.1061/40792(173)398).
- Gümüş V., Aköz M. S., 2014, Dolusavak Akımının Farklı Türbülans Kapatma Modelleri ile Sayısal Hesabı, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 29(1), 71-80.
- Ho D., Boyes, K., Donohoo, S. and Cooper, B., 2003, Numerical flow analysis for spillways, 43rd ANCOLD Conference, Hobart, Tasmania.
- Herrera-Granados, O., & Kostecki, S. W., 2016, Numerical and physical modeling of water flow over the ogee weir of the new Niedów barrage, *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 64 (1), 67-74.

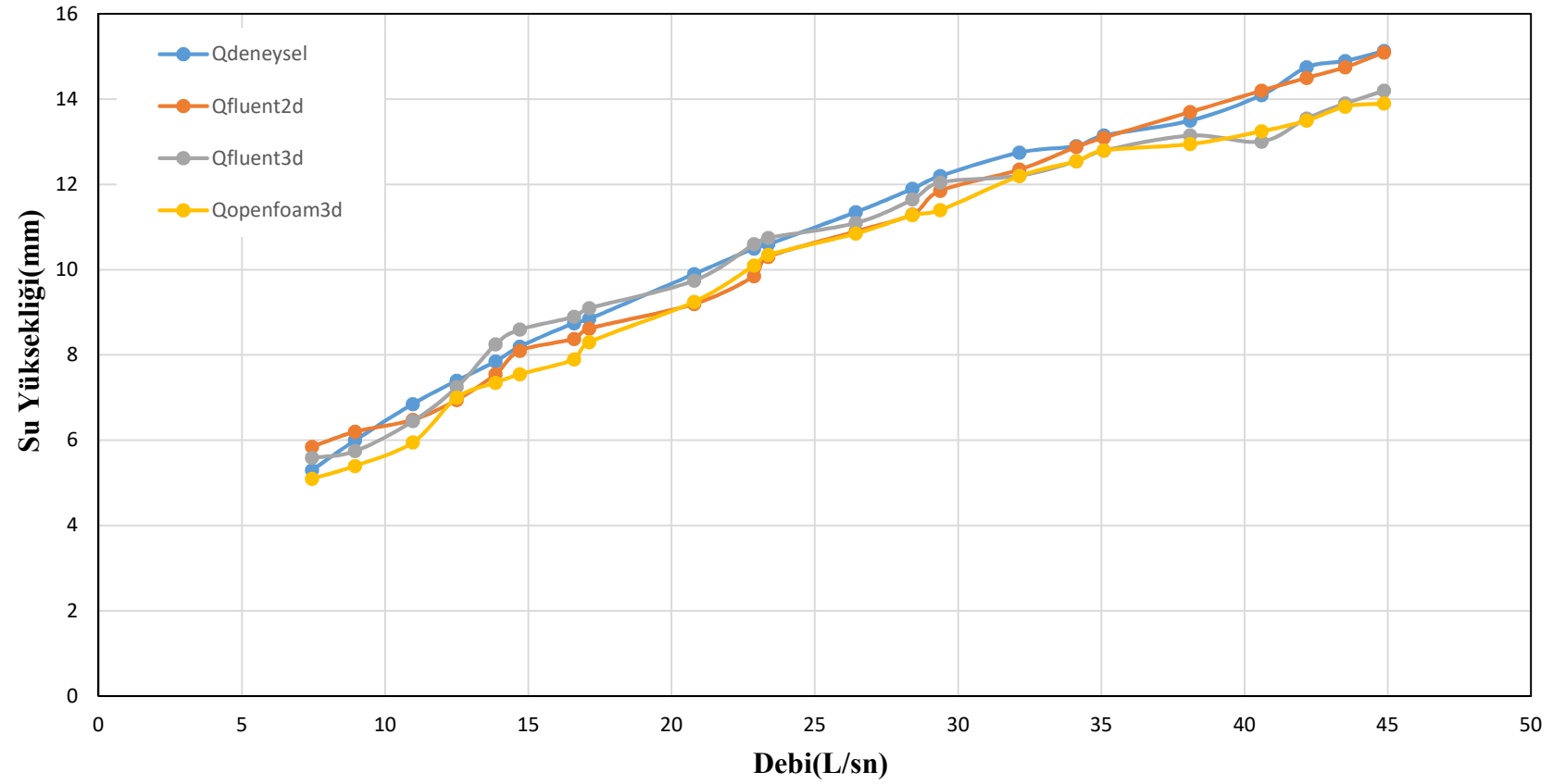
- Kamanbedast A. A., Bahmani M., Aghamajidi R., 2014, The effect of surface roughness on discharge coefficient and cavitations of ogee spillways using physical models. *Journal of Applied Science and Agriculture*.p 2442-2448.
- Kandaswamy, P. K., and Rouse, H., 1957, Characteristics of Flow Over Terminal Weirs and Sills, *Journal of Hydraulics Division*, (83) 4,1-13
- Kanyanujinja N. P., 2015, CFD Modeling of Ogee Spillway Hydraulics and Comparison with Physical Model Tests, MS Graduate of Civil Engineering, Stellenbosch University.
- Kırkgöz, M. S. ve Öner, A. A., 2006, Yatay Bir Dairesel Silindir Etrafındaki Akımda Hız Alanının Deneysel ve Teorik İncelenmesi. *Ç.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21: 85-98.
- Kim D, Park J., 2005, Analysis of flow structure over ogee-spillway in consideration of scale and roughness effects by using CFD model, *KSCE J Civ Eng* 9:161–169
- Kim, S., Lee, H., and An, S., 2010, Improvement of hydraulic stability for spillway using CFD model., *International Journal of the Physical Sciences* 5(6): 774-780.
- Koloseus, Herman J., 1951, Discharge characteristics of submerged spillways. MS Thesis, Colorado Agricultural and Mechanical College, Fort Collins, Colorado, December.
- Kumcu Y. Ş., 2016, Investigation of flow over spillway modeling and comparison between experimental data and CFD analysis, *KSCE Journal of Civil Engineering*,(0000) 00(0):1-10.
- Li, S., Cain, S., Wosnik, M., Miller, C., Kocahan, H. and Wyckoff, R., 2011, Numerical Modeling of Probable Maximum Flood Flowing through a System of Spillways, *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(1), 66–74. doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000279.
- MacDonald, I., Baines, M.J., Nichols, N.K., Samuels, P.G., 1997, Analytic Benchmark Solutions for Open Channel Flows, *J. Hydr. Engrg.* 123(11). 1041-1045.
- Menter, F.R., 1994, Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA J.* 1994, 32, 1598–1605.
- Morales V., Toktay T. E. ve Garcia M., 2012, Numerical Modeling of Ogee Crest Spillway and Tainter Gate Structure of a Diversion Dam on Canar River, *XIX International Conference on Water Resources Ecuador*.
- Peltier Y., Dewals B., Archambeaul P., Piroton M., Erpicum S., 2015, Pressure and velocity on an ogee spillway crest operating at high head ratio: experimental measurements and validation, 2nd International Workshop on Hydraulic Structures.
- Rad I. N., 2016, Application of Numerical Methods in Design of Hydraulic Structures, *Communications on Advanced Computational Science with Applications*, No. 1 (2016) 1-15.
- Rodi, W., 2017, Turbulence Modeling and Simulation in Hydraulics: A Historical Review. *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(5), 1–20. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001288](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001288).
- Sarker, M. A., Rhodes, D. G., 2004, Calculation of free-surface profile over a rectangular broad-crested weir, *Flow measurement and Instrumentation*, 15 , 215–202.
- Soydan, N. G., 2012, Trapez Kesitli Geniş Başlıklı Savak Akımının Deneysel ve Sayısal Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Song, C.C.S., Zhou, F., 1999, Simulation of Free Surface Flow over Spillway, *J. Hydr. Engrg.* 125(9). 959-967.

- Sung-Duk, K., Lee, H.-J. and An, S.-D., 2010, Improvement of hydraulic stability for spillway using CFD model, *International Journal of the Physical Sciences*, 5(6)(June), 774–780.
- Tullis, B., Neilson, J., 2008, Performance of submerged ogee crest weir head-discharge relationships. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134 (4), 486–491. 21.
- Usta E., 2014, Numerical Investigation of hydraulic characteristics of Laleli Dam Spillway and Comparison With Physical Model Study, MS Graduate of Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara.
- U.S. Department of The Interior Bureau of Reclamation, 1987, Design of Small Dams, *USBR A Water Resources Technical Publication*, Washington DC, 365-375.
- Zarrati, A.R., Jin, Y.-C., Shanehsaz-zadah, A., Ahadi, F., 2004, Potential Flow Solution for a Free Surface Flow Past a Sudden Slope Change, *Can. J. Civ. Engr.* 31. 553-560.
- Vinay R. Gopala, Berend G.M. van Wachem, 2008, Volume of fluid methods for immiscible-fluid and free-surface flows, Department of Applied Mechanics, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.
- Vischer, D.; Rutschmann, P., 1988, Spillway facilities—Typology and General Safety Questions, Q-63, R-23, *Proc. 16th ICOLD*:. San Francisco.
- Wilcox, D.C. (1988), "Re-assessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models", *AIAA Journal*, vol. 26, no. 11, pp. 1299-1310.
- Zarrati, A.R., Jin, Y.-C., Shanehsaz-zadah, A., Ahadi, F. (2004) Potential Flow Solution for a Free Surface Flow Past a Sudden Slope Change. *Can. J. Civ. Engr.* 31. 553-560
- Z. Qian, X. Hu, W. Huai, A. Amador, 2009, Numerical Simulation and Analysis of Water Flow over Stepped Spillways, *Science in China Series E: Technological Sciences*, 52 (7) 1958-1965. <http://dx.doi.org/10.1007/s11431-009-0127-z>.
- Zhenwei, M. U., Zhang Zhiyan, and Z. H. A. O. Tao., 2012, Numerical simulation of 3-D flow field of spillway based on VOF method, *Procedia Engineering* 28 (2012): 808-812.

EKLER

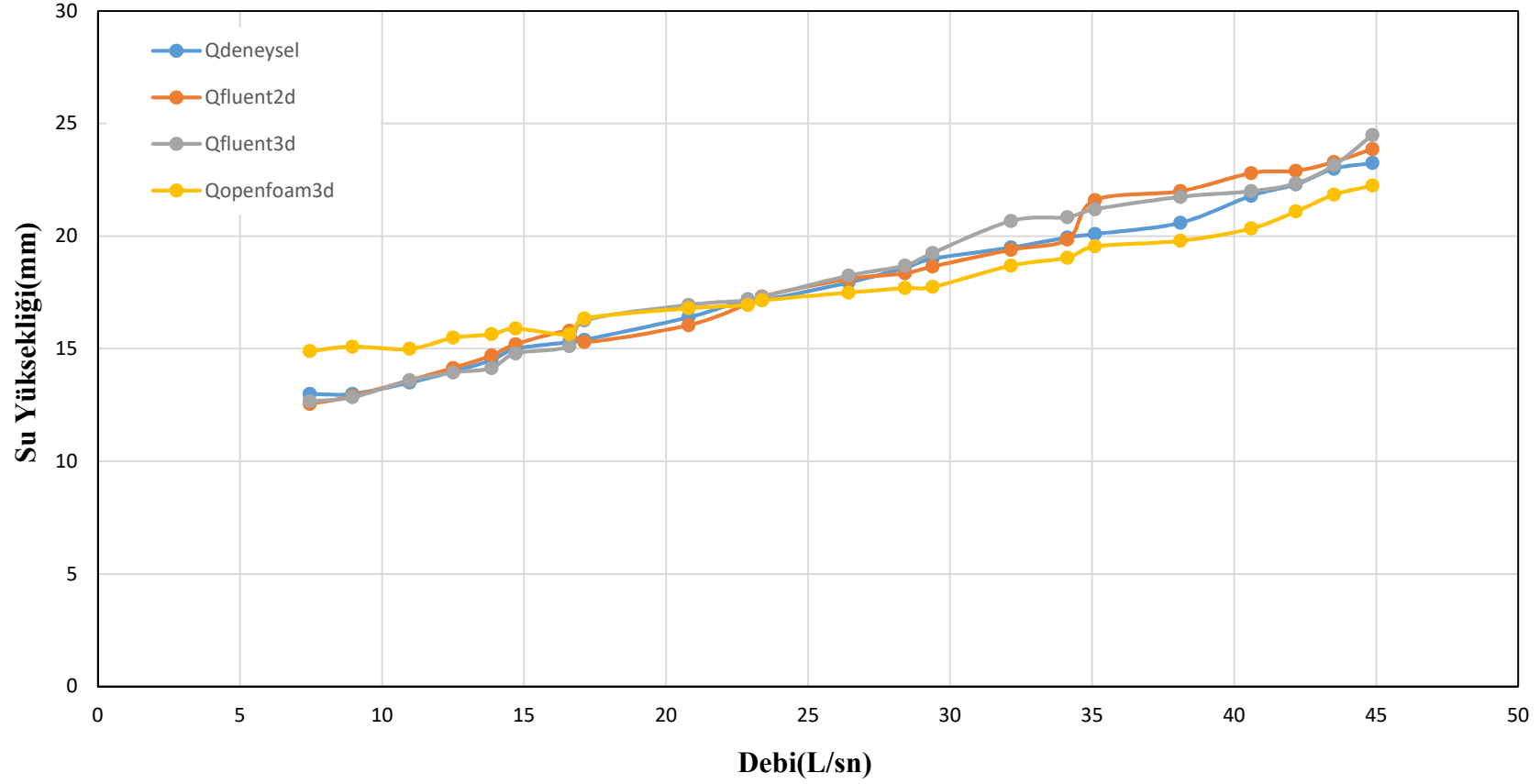
EK-1 H₁ Noktası için Nümerik Model ve Deneysel Modelden Elde Edilmiş Olan Su Yükseklik Grafiği

H₁ Noktasında Su Yüksekliklerinin Karşılaştırılması



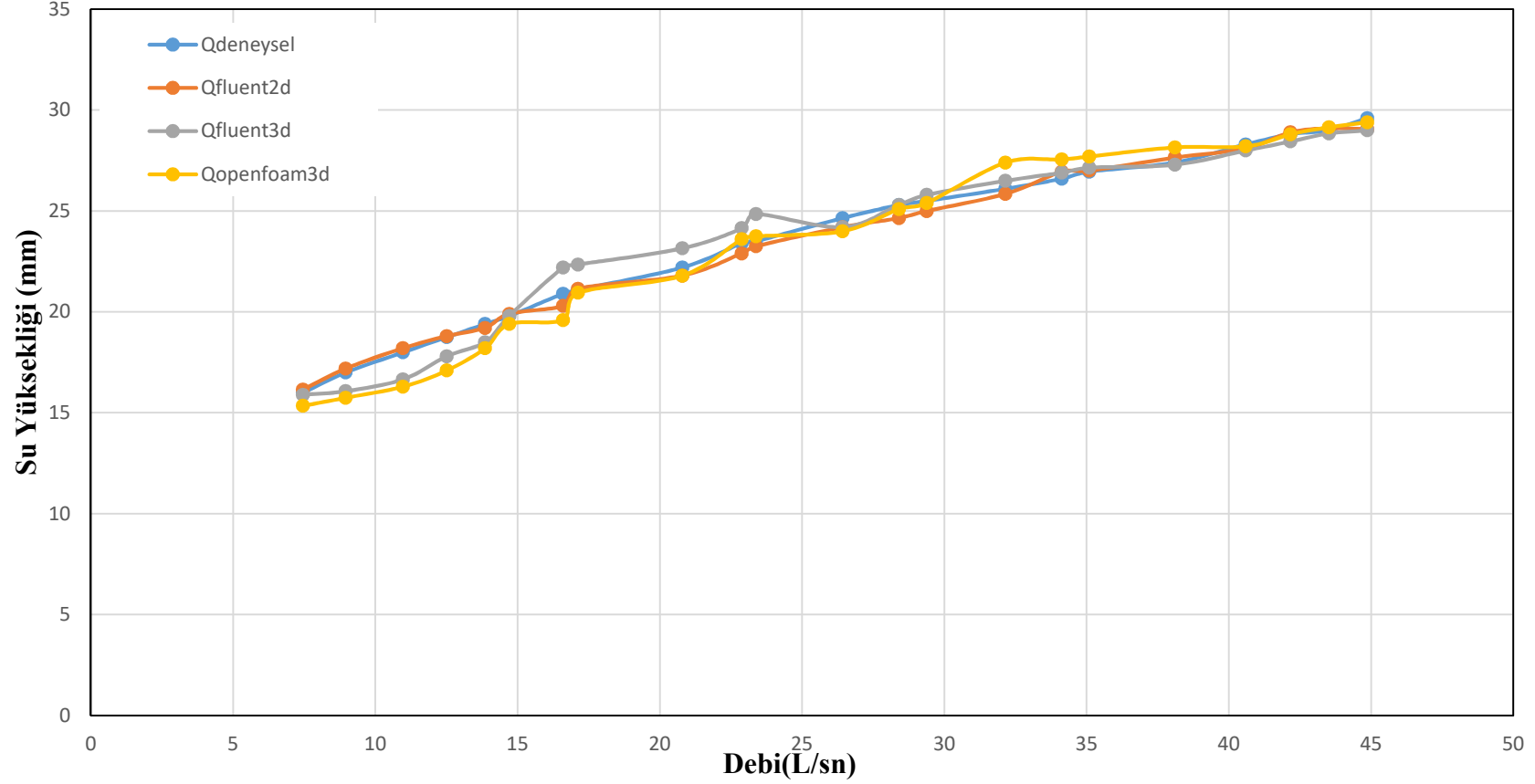
EK-2 H₂ Noktası için Nümerik Model ve Deneysel Modelden Elde Edilmiş Olan Su Yükseklik Grafiği

H₂ Noktasında Su Yüksekliklerinin Karşılaştırılması



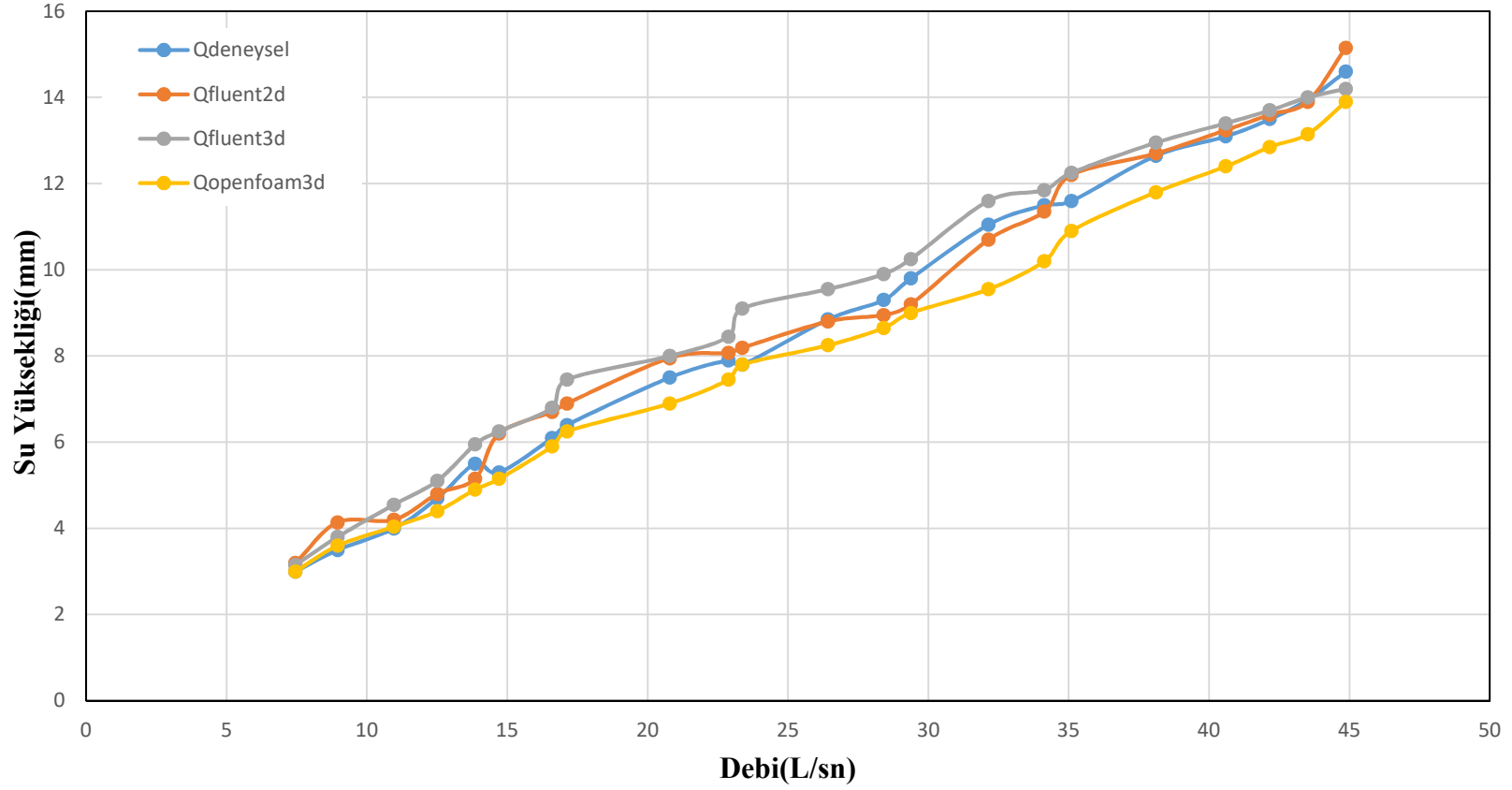
EK-3 H₃ Noktası için Nümerik Model ve Deneysel Modelden Elde Edilmiş Olan Su Yükseklik Grafiği

H₃ Noktasında Su Yüksekliklerinin Karşılaştırılması



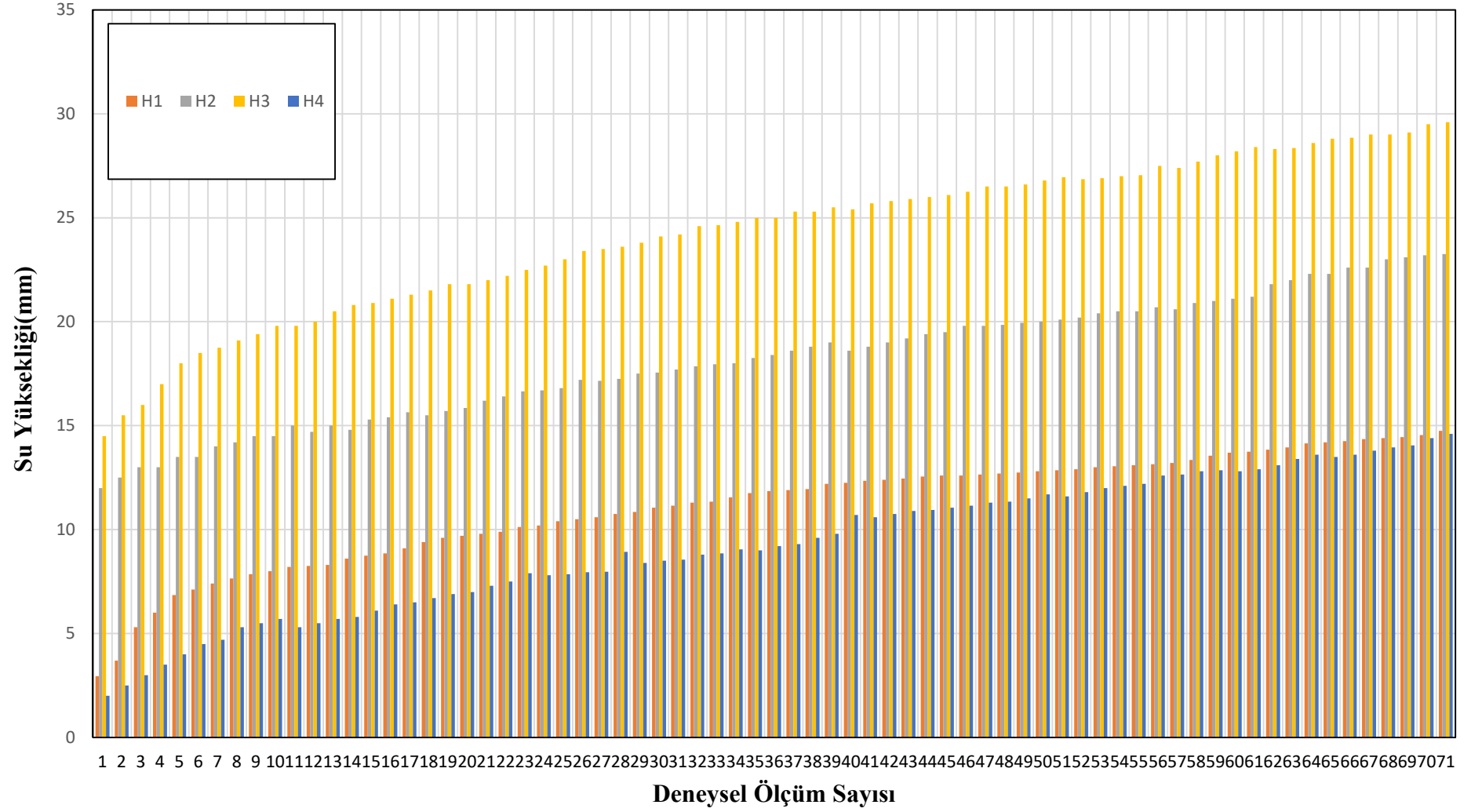
EK-4 H₄ Noktası için Nümerik Model ve Deneysel Modelden Elde Edilmiş Olan Su Yükseklik Grafiği

H₄ Noktasında Su Yüksekliklerinin Karşılaştırılması



EK-5 Deneysel Ölçüm Sonuç Grafiği

Deneysel Ölçüm Sonuç Grafiği



EK-6 BlockMeshDict Kodları

```

/*-----*- C++ -*-----*\
|=====|
|\ / Field | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
|\ / Operation | Version: 2.3.1 |
| \ / And | Web: www.OpenFOAM.org |
| \ / Manipulation |
\*-----*/
FoamFile
{
    version 2.0;
    format ascii;
    class dictionary;
    object blockMeshDict;
}
// ***** //

changeCom(//)changeQuote([,])
define(calc, [esyscmd(perl -e 'print ($1)'))]
define(VCOUNT, 0)
define(vlabel, [[// ]Vertex $1 = VCOUNT define($1, VCOUNT)define([VCOUNT],
incr(VCOUNT))])

convertToMeters 0.01;

//x axis parameters
define(nx1,40)
define(nx2,60)
define(nxw,20)
define(nx16,20)
define(nxwo,100)
define(nxwo1,60)
define(nxwo2,60)
define(nz1,30)

//y axis parameters
define(ny1,20)
define(ncy,20)
define(ny2,20)
define(ny3,20)
define(ny4,20)
define(ny5,20)
define(ny6,15)
define(ny7,15)
define(ny8,10)
define(ny9,8)
define(ny10,5)
define(ny11,5)

```

```
define(ny12,5)
define(ny13,5)
define(ny14,5)
define(ny15,10)
define(ny16,10)
define(ny17,15)

vertices

(

//back
//bottom vertices
(-124.06 -28 0)
(-84.06 -28 0)
(-24.06 -28 0)
(-4.06 -28 0)
(30 -28 0)
(50 -28 0)
(150 -28 0)
(210 -28 0)
(270 -28 0)

//2rd floor vertices

(-124.06 -24.96 0)
(-84.06 -24.96 0)
(-24.06 -24.96 0)
(-4.06 -24.96 0)
(28.20 -24.96 0)
(48.20 -24.96 0)
(150 -24.96 0)
(210 -24.96 0)
(270 -24.96 0)

//3th floor vertices

(-124.06 -22.10 0)
(-84.06 -22.10 0)
(-24.06 -22.10 0)
(-4.06 -22.10 0)
(26.40 -22.10 0)
(46.40 -22.10 0)
(150 -22.10 0)
(210 -22.10 0)
(270 -22.10 0)
```

//4th floor vertices

(-124.06 -20.42 0)
(-84.06 -20.42 0)
(-24.06 -20.42 0)
(-4.06 -20.42 0)
(25.30 -20.42 0)
(45.30 -20.42 0)
(150 -20.42 0)
(210 -20.42 0)
(270 -20.42 0)

//5th floor vertices

(-124.06 -18 0)
(-84.06 -18 0)
(-24.06 -18 0)
(-4.06 -18 0)
(23.62 -18 0)
(43.62 -18 0)
(150 -18 0)
(210 -18 0)
(270 -18 0)

//6th floor vertices

(-124.06 -15.24 0)
(-84.06 -15.24 0)
(-24.06 -15.24 0)
(-4.06 -15.24 0)
(21.60 -15.24 0)
(41.60 -15.24 0)
(150 -15.24 0)
(210 -15.24 0)
(270 -15.24 0)

//7th floor vertices

(-124.06 -14.22 0)
(-84.06 -14.22 0)
(-24.06 -14.22 0)
(-4.06 -14.22 0)
(20.80 -14.22 0)
(40.80 -14.22 0)
(150 -14.22 0)
(210 -14.22 0)
(270 -14.22 0)

//8th floor vertices

(-124.06 -13.22 0)
(-84.06 -13.22 0)
(-24.06 -13.22 0)
(-4.06 -13.22 0)
(20 -13.22 0)
(40 -13.22 0)
(150 -13.22 0)
(210 -13.22 0)
(270 -13.22 0)

//9th floor vertices

(-124.06 -11.10 0)
(-84.06 -11.10 0)
(-24.06 -11.10 0)
(-4.06 -11.10 0)
(18.20 -11.10 0)
(38.20 -11.10 0)
(150 -11.10 0)
(210 -11.10 0)
(270 -11.10 0)

//10th floor vertices

(-124.06 -8.10 0)
(-84.06 -8.10 0)
(-24.06 -8.10 0)
(-4.06 -8.10 0)
(15.35 -8.10 0)
(35.35 -8.10 0)
(150 -8.10 0)
(210 -8.10 0)
(270 -8.10 0)

//11th floor vertices

(-124.06 -4.98 0)
(-84.06 -4.98 0)
(-24.06 -4.98 0)
(-4.06 -4.98 0)
(11.80 -4.98 0)
(31.80 -4.98 0)
(150 -4.98 0)
(210 -4.98 0)
(270 -4.98 0)

//12th floor vertices

(-124.06 -1.96 0)
(-84.06 -1.96 0)
(-24.06 -1.96 0)
(-4.06 -1.96 0)
(7.125 -1.96 0)
(27.125 -1.96 0)
(150 -1.96 0)
(210 -1.96 0)
(270 -1.96 0)

//13th floor vertices

(-124.06 -1.66 0)
(-84.06 -1.66 0)
(-24.06 -1.66 0)
(-4.06 -1.66 0)
(6.516 -1.66 0)
(26.516 -1.66 0)
(150 -1.66 0)
(210 -1.66 0)
(270 -1.66 0)

//14th floor vertices

(-124.06 -0.80 0)
(-84.06 -0.80 0)
(-24.06 -0.80 0)
(-4.06 -0.80 0)
(4.40 -0.80 0)
(24.40 -0.80 0)
(150 -0.80 0)
(210 -0.80 0)
(270 -0.80 0)

//15th floor vertices

(-124.06 -0.33 0)
(-84.06 -0.33 0)
(-24.06 -0.33 0)
(-4.06 -0.33 0)
(2.70 -0.33 0)
(22.70 -0.33 0)
(150 -0.33 0)
(210 -0.33 0)
(270 -0.33 0)

//16th floor vertices

(-124.06 0 0)
(-84.06 0 0)
(-24.06 0 0)
(0 0 0)
(48.65 0 0)
(150 0 0)
(210 0 0)
(270 0 0)

//17th floor vertices

(-124.06 7.7 0)
(-84.06 7.7 0)
(-24.06 7.7 0)
(0 7.7 0)
(48.65 7.7 0)
(150 7.7 0)
(210 7.7 0)
(270 7.7 0)

//18th floor vertices

(-124.06 15.4 0)
(-84.06 15.4 0)
(-24.06 15.4 0)
(0 15.4 0)
(48.65 15.4 0)
(150 15.4 0)
(210 15.4 0)
(270 15.4 0)

//19th floor vertices

(-124.06 33 0)
(-84.06 33 0)
(-24.06 33 0)
(0 33 0)
(48.65 33 0)
(150 33 0)
(210 33 0)
(270 33 0)

//front

//bottom vertices

(-124.06 -28 30)
(-84.06 -28 30)
(-24.06 -28 30)
(-4.06 -28 30)
(30 -28 30)
(50 -28 30)
(150 -28 30)
(210 -28 30)
(270 -28 30)

//2rd floor vertices

(-124.06 -24.96 30)
(-84.06 -24.96 30)
(-24.06 -24.96 30)
(-4.06 -24.96 30)
(28.20 -24.96 30)
(48.20 -24.96 30)
(150 -24.96 30)
(210 -24.96 30)
(270 -24.96 30)

//3th floor vertices

(-124.06 -22.10 30)
(-84.06 -22.10 30)
(-24.06 -22.10 30)
(-4.06 -22.10 30)
(26.40 -22.10 30)
(46.40 -22.10 30)
(150 -22.10 30)
(210 -22.10 30)
(270 -22.10 30)

//4th floor vertices

(-124.06 -20.42 30)
(-84.06 -20.42 30)
(-24.06 -20.42 30)
(-4.06 -20.42 30)
(25.30 -20.42 30)
(45.30 -20.42 30)
(150 -20.42 30)
(210 -20.42 30)
(270 -20.42 30)

//5th floor vertices

(-124.06 -18 30)
(-84.06 -18 30)
(-24.06 -18 30)
(-4.06 -18 30)
(23.62 -18 30)
(43.62 -18 30)
(150 -18 30)
(210 -18 30)
(270 -18 30)

//6th floor vertices

(-124.06 -15.24 30)
(-84.06 -15.24 30)
(-24.06 -15.24 30)
(-4.06 -15.24 30)
(21.60 -15.24 30)
(41.60 -15.24 30)
(150 -15.24 30)
(210 -15.24 30)
(270 -15.24 30)

//7th floor vertices

(-124.06 -14.22 30)
(-84.06 -14.22 30)
(-24.06 -14.22 30)
(-4.06 -14.22 30)
(20.80 -14.22 30)
(40.80 -14.22 30)
(150 -14.22 30)
(210 -14.22 30)
(270 -14.22 30)

//8th floor vertices

(-124.06 -13.22 30)
(-84.06 -13.22 30)
(-24.06 -13.22 30)
(-4.06 -13.22 30)
(20 -13.22 30)
(40 -13.22 30)
(150 -13.22 30)
(210 -13.22 30)
(270 -13.22 30)

//9th floor vertices

(-124.06 -11.10 30)
(-84.06 -11.10 30)
(-24.06 -11.10 30)
(-4.06 -11.10 30)
(18.20 -11.10 30)
(38.20 -11.10 30)
(150 -11.10 30)
(210 -11.10 30)
(270 -11.10 30)

//10th floor vertices

(-124.06 -8.10 30)
(-84.06 -8.10 30)
(-24.06 -8.10 30)
(-4.06 -8.10 30)
(15.35 -8.10 30)
(35.35 -8.10 30)
(150 -8.10 30)
(210 -8.10 30)
(270 -8.10 30)

//11th floor vertices

(-124.06 -4.98 30)
(-84.06 -4.98 30)
(-24.06 -4.98 30)
(-4.06 -4.98 30)
(11.80 -4.98 30)
(31.80 -4.98 30)
(150 -4.98 30)
(210 -4.98 30)
(270 -4.98 30)

//12th floor vertices

(-124.06 -1.96 30)
(-84.06 -1.96 30)
(-24.06 -1.96 30)
(-4.06 -1.96 30)
(7.125 -1.96 30)
(27.125 -1.96 30)
(150 -1.96 30)
(210 -1.96 30)
(270 -1.96 30)

//13th floor vertices

(-124.06 -1.66 30)
(-84.06 -1.66 30)

(-24.06 -1.66 30)
(-4.06 -1.66 30)
(6.516 -1.66 30)
(26.516 -1.66 30)
(150 -1.66 30)
(210 -1.66 30)
(270 -1.66 30)

//14th floor vertices

(-124.06 -0.80 30)
(-84.06 -0.80 30)
(-24.06 -0.80 30)
(-4.06 -0.80 30)
(4.40 -0.80 30)
(24.40 -0.80 30)
(150 -0.80 30)
(210 -0.80 30)
(270 -0.80 30)

//15th floor vertices

(-124.06 -0.33 30)
(-84.06 -0.33 30)
(-24.06 -0.33 30)
(-4.06 -0.33 30)
(2.70 -0.33 30)
(22.70 -0.33 30)
(150 -0.33 30)
(210 -0.33 30)
(270 -0.33 30)

//16th floor vertices

(-124.06 0 30)
(-84.06 0 30)
(-24.06 0 30)
(0 0 30)
(48.65 0 30)
(150 0 30)
(210 0 30)
(270 0 30)

//17th floor vertices

(-124.06 7.7 30)
(-84.06 7.7 30)
(-24.06 7.7 30)
(0 7.7 30)

```
(48.65 7.7 30)
(150 7.7 30)
(210 7.7 30)
(270 7.7 30)
```

```
//18th floor vertices
```

```
(-124.06 15.4 30)
(-84.06 15.4 30)
(-24.06 15.4 30)
(0 15.4 30)
(48.65 15.4 30)
(150 15.4 30)
(210 15.4 30)
(270 15.4 30)
```

```
//19th floor vertices
```

```
(-124.06 33 30)
(-84.06 33 30)
(-24.06 33 30)
(0 33 30)
(48.65 33 30)
(150 33 30)
(210 33 30)
(270 33 30)
```

```
);
```

```
blocks
```

```
(
```

```
//1st floor blocks
```

```
hex (0 1 10 9 167 168 177 176) (nx1 ny1 nz1) simpleGrading (1 1 1) //1
```

```
hex (1 2 11 10 168 169 178 177) (nx2 ny1 nz1) simpleGrading (1 1 1) //2
```

```
hex (2 3 12 11 169 170 179 178) (nxw ny1 nz1) simpleGrading (1 1 1) //3
```

```
hex (4 5 14 13 171 172 181 180) (nx16 ny1 nz1) simpleGrading (1 1 1) //4
```

```
hex (5 6 15 14 172 173 182 181) (nxwo ny1 nz1) simpleGrading (1 1 1) //5
```

```
hex (7 8 17 16 174 175 184 183) (nxwo1 ny1 nz1) simpleGrading (1 1 1) //6
```

```
//2nd floor blocks
```

```
hex (9 10 19 18 176 177 186 185) (nx1 ncy nz1) simpleGrading (1 1 1) //7
```

hex (10 11 20 19 177 178 187 186) (nx2 ncy nz1) simpleGrading (1 1 1) //8
 hex (11 12 21 20 178 179 188 187) (nxw ncy nz1) simpleGrading (1 1 1) //9
 hex (13 14 23 22 180 181 190 189) (nx16 ncy nz1) simpleGrading (1 1 1) //10
 hex (14 15 24 23 181 182 191 190) (nxwo ncy nz1) simpleGrading (1 1 1) //11
 hex (16 17 26 25 183 184 193 192) (nxwo1 ncy nz1) simpleGrading (1 1 1) //12

//3rd floor blocks

hex (18 19 28 27 185 186 195 194) (nx1 ny2 nz1) simpleGrading (1 1 1) //13
 hex (19 20 29 28 186 187 196 195) (nx2 ny2 nz1) simpleGrading (1 1 1) //14
 hex (20 21 30 29 187 188 197 196) (nxw ny2 nz1) simpleGrading (1 1 1) //15
 hex (22 23 32 31 189 190 199 198) (nx16 ny2 nz1) simpleGrading (1 1 1) //16
 hex (23 24 33 32 190 191 200 199) (nxwo ny2 nz1) simpleGrading (1 1 1) //17
 hex (25 26 35 34 192 193 202 201) (nxwo1 ny2 nz1) simpleGrading (1 1 1) //18

//4th floor blocks

hex (27 28 37 36 194 195 204 203) (nx1 ny3 nz1) simpleGrading (1 1 1) //19
 hex (28 29 38 37 195 196 205 204) (nx2 ny3 nz1) simpleGrading (1 1 1) //20
 hex (29 30 39 38 196 197 206 205) (nxw ny3 nz1) simpleGrading (1 1 1) //21
 hex (31 32 41 40 198 199 208 207) (nx16 ny3 nz1) simpleGrading (1 1 1) //22
 hex (32 33 42 41 199 200 209 208) (nxwo ny3 nz1) simpleGrading (1 1 1) //23
 hex (34 35 44 43 201 202 211 210) (nxwo1 ny3 nz1) simpleGrading (1 1 1) //24

//5th floor blocks

hex (36 37 46 45 203 204 213 212) (nx1 ny4 nz1) simpleGrading (1 1 1) //25
 hex (37 38 47 46 204 205 214 213) (nx2 ny4 nz1) simpleGrading (1 1 1) //26
 hex (38 39 48 47 205 206 215 214) (nxw ny4 nz1) simpleGrading (1 1 1) //27

hex (40 41 50 49 207 208 217 216) (nx16 ny4 nz1) simpleGrading (1 1 1) //28
hex (41 42 51 50 208 209 218 217) (nxwo ny4 nz1) simpleGrading (1 1 1) //29
hex (42 43 52 51 209 210 219 218) (nxwo1 ny4 nz1) simpleGrading (1 1 1) //30
hex (43 44 53 52 210 211 220 219) (nxwo2 ny4 nz1) simpleGrading (1 1 1) //31

//6th floor blocks

hex (45 46 55 54 212 213 222 221) (nx1 ny5 nz1) simpleGrading (1 1 1) //32
hex (46 47 56 55 213 214 223 222) (nx2 ny5 nz1) simpleGrading (1 1 1) //33
hex (47 48 57 56 214 215 224 223) (nxw ny5 nz1) simpleGrading (1 1 1) //34
hex (49 50 59 58 216 217 226 225) (nx16 ny5 nz1) simpleGrading (1 1 1) //35
hex (50 51 60 59 217 218 227 226) (nxwo ny5 nz1) simpleGrading (1 1 1) //36
hex (51 52 61 60 218 219 228 227) (nxwo1 ny5 nz1) simpleGrading (1 1 1) //37
hex (52 53 62 61 219 220 229 228) (nxwo2 ny5 nz1) simpleGrading (1 1 1) //38

//7th floor blocks

hex (54 55 64 63 221 222 231 230) (nx1 ny6 nz1) simpleGrading (1 1 1) //39
hex (55 56 65 64 222 223 232 231) (nx2 ny6 nz1) simpleGrading (1 1 1) //40
hex (56 57 66 65 223 224 233 232) (nxw ny6 nz1) simpleGrading (1 1 1) //41
hex (58 59 68 67 225 226 235 234) (nx16 ny6 nz1) simpleGrading (1 1 1) //42
hex (59 60 69 68 226 227 236 235) (nxwo ny6 nz1) simpleGrading (1 1 1) //43
hex (60 61 70 69 227 228 237 236) (nxwo1 ny6 nz1) simpleGrading (1 1 1) //44
hex (61 62 71 70 228 229 238 237) (nxwo2 ny6 nz1) simpleGrading (1 1 1) //45

//8th floor blocks

hex (63 64 73 72 230 231 240 239) (nx1 ny7 nz1) simpleGrading (1 1 1) //46
hex (64 65 74 73 231 232 241 240) (nx2 ny7 nz1) simpleGrading (1 1 1) //47

hex (65 66 75 74 232 233 242 241) (nxw ny7 nz1) simpleGrading (1 1 1) //48
hex (67 68 77 76 234 235 244 243) (nx16 ny7 nz1) simpleGrading (1 1 1) //49
hex (68 69 78 77 235 236 245 244) (nxwo ny7 nz1) simpleGrading (1 1 1) //50
hex (69 70 79 78 236 237 246 245) (nxwo1 ny7 nz1) simpleGrading (1 1 1) //51
hex (70 71 80 79 237 238 247 246) (nxwo2 ny7 nz1) simpleGrading (1 1 1) //52
//9th floor blocks
hex (72 73 82 81 239 240 249 248) (nx1 ny8 nz1) simpleGrading (1 1 1) //53
hex (73 74 83 82 240 241 250 249) (nx2 ny8 nz1) simpleGrading (1 1 1) //54
hex (74 75 84 83 241 242 251 250) (nxw ny8 nz1) simpleGrading (1 1 1) //55
hex (76 77 86 85 243 244 253 252) (nx16 ny8 nz1) simpleGrading (1 1 1) //56
hex (77 78 87 86 244 245 254 253) (nxwo ny8 nz1) simpleGrading (1 1 1) //57
hex (78 79 88 87 245 246 255 254) (nxwo1 ny8 nz1) simpleGrading (1 1 1) //58
hex (79 80 89 88 246 247 256 255) (nxwo2 ny8 nz1) simpleGrading (1 1 1) //59
//10th floor blocks
hex (81 82 91 90 248 249 258 257) (nx1 ny9 nz1) simpleGrading (1 1 1) //60
hex (82 83 92 91 249 250 259 258) (nx2 ny9 nz1) simpleGrading (1 1 1) //61
hex (83 84 93 92 250 251 260 259) (nxw ny9 nz1) simpleGrading (1 1 1) //62
hex (85 86 95 94 252 253 262 261) (nx16 ny9 nz1) simpleGrading (1 1 1) //63
hex (86 87 96 95 253 254 263 262) (nxwo ny9 nz1) simpleGrading (1 1 1) //64
hex (87 88 97 96 254 255 264 263) (nxwo1 ny9 nz1) simpleGrading (1 1 1) //65
hex (88 89 98 97 255 256 265 264) (nxwo2 ny9 nz1) simpleGrading (1 1 1) //66
//11th floor blocks
hex (90 91 100 99 257 258 267 266) (nx1 ny10 nz1) simpleGrading (1 1 1) //67
hex (91 92 101 100 258 259 268 267) (nx2 ny10 nz1) simpleGrading (1 1 1) //68

hex (92 93 102 101 259 260 269 268) (nxw ny10 nz1) simpleGrading (1 1 1) //69
hex (94 95 104 103 261 262 271 270) (nx16 ny10 nz1) simpleGrading (1 1 1) //70
hex (95 96 105 104 262 263 272 271) (nxwo ny10 nz1) simpleGrading (1 1 1) //71
hex (96 97 106 105 263 264 273 272) (nxwo1 ny10 nz1) simpleGrading (1 1 1) //72
hex (97 98 107 106 264 265 274 273) (nxwo2 ny10 nz1) simpleGrading (1 1 1) //7
//12th floor blocks
hex (99 100 109 108 266 267 276 275) (nx1 ny11 nz1) simpleGrading (1 1 1) //74
hex (100 101 110 109 267 268 277 276) (nx2 ny11 nz1) simpleGrading (1 1 1) //75
hex (101 102 111 110 268 269 278 277) (nxw ny11 nz1) simpleGrading (1 1 1) //76
hex (103 104 113 112 270 271 280 279) (nx16 ny11 nz1) simpleGrading (1 1 1) //77
hex (104 105 114 113 271 272 281 280) (nxwo ny11 nz1) simpleGrading (1 1 1) //78
hex (105 106 115 114 272 273 282 281) (nxwo1 ny11 nz1) simpleGrading (1 1 1) //79
hex (106 107 116 115 273 274 283 282) (nxwo2 ny11 nz1) simpleGrading (1 1 1) //80
//13th floor blocks
hex (108 109 118 117 275 276 285 284) (nx1 ny12 nz1) simpleGrading (1 1 1) //81
hex (109 110 119 118 276 277 286 285) (nx2 ny12 nz1) simpleGrading (1 1 1) //82
hex (110 111 120 119 277 278 287 286) (nxw ny12 nz1) simpleGrading (1 1 1) //83
hex (112 113 122 121 279 280 289 288) (nx16 ny12 nz1) simpleGrading (1 1 1) //84
hex (113 114 123 122 280 281 290 289) (nxwo ny12 nz1) simpleGrading (1 1 1) //85
hex (114 115 124 123 281 282 291 290) (nxwo1 ny12 nz1) simpleGrading (1 1 1) //86
hex (115 116 125 124 282 283 292 291) (nxwo2 ny12 nz1) simpleGrading (1 1 1) //87
//14th floor blocks
hex (117 118 127 126 284 285 294 293) (nx1 ny13 nz1) simpleGrading (1 1 1) //88
hex (118 119 128 127 285 286 295 294) (nx2 ny13 nz1) simpleGrading (1 1 1) //89

hex (119 120 129 128 286 287 296 295) (nxw ny13 nz1) simpleGrading (1 1 1) //90

hex (121 122 131 130 288 289 298 297) (nx16 ny13 nz1) simpleGrading (1 1 1) //91

hex (122 123 132 131 289 290 299 298) (nxwo ny13 nz1) simpleGrading (1 1 1) //92

hex (123 124 133 132 290 291 300 299) (nxwo1 ny13 nz1) simpleGrading (1 1 1) //93

hex (124 125 134 133 291 292 301 300) (nxwo2 ny13 nz1) simpleGrading (1 1 1) //94

//15th floor blocks

hex (126 127 136 135 293 294 303 302) (nx1 ny14 nz1) simpleGrading (1 1 1) //95

hex (127 128 137 136 294 295 304 303) (nx2 ny14 nz1) simpleGrading (1 1 1) //96

hex (128 129 138 137 295 296 305 304) (nxw ny14 nz1) simpleGrading (1 1 1) //97

hex (130 131 139 138 297 298 306 305) (nx16 ny14 nz1) simpleGrading (1 1 1) //98

hex (131 132 140 139 298 299 307 306) (nxwo ny14 nz1) simpleGrading (1 1 1) //99

hex (132 133 141 140 299 300 308 307) (nxwo1 ny14 nz1) simpleGrading (1 1 1) //100

hex (133 134 142 141 300 301 309 308) (nxwo2 ny14 nz1) simpleGrading (1 1 1) //101

//16th floor blocks

hex (135 136 144 143 302 303 311 310) (nx1 ny15 nz1) simpleGrading (1 1 1) //102

hex (136 137 145 144 303 304 312 311) (nx2 ny15 nz1) simpleGrading (1 1 1) //103

hex (137 138 146 145 304 305 313 312) (nxw ny15 nz1) simpleGrading (1 1 1) //104

hex (138 139 147 146 305 306 314 313) (nx16 ny15 nz1) simpleGrading (1 1 1) //105

hex (139 140 148 147 306 307 315 314) (nxwo ny15 nz1) simpleGrading (1 1 1) //106

hex (140 141 149 148 307 308 316 315) (nxwo1 ny15 nz1) simpleGrading (1 1 1) //107

hex (141 142 150 149 308 309 317 316) (nxwo2 ny15 nz1) simpleGrading (1 1 1) //108

//17th floor blocks

hex (143 144 152 151 310 311 319 318) (nx1 ny16 nz1) simpleGrading (1 1 1) //109

hex (144 145 153 152 311 312 320 319) (nx2 ny16 nz1) simpleGrading (1 1 1) //110

```

hex (145 146 154 153 312 313 321 320) (nxw ny16 nz1) simpleGrading (1 1 1) //111
hex (146 147 155 154 313 314 322 321) (nx16 ny16 nz1) simpleGrading (1 1 1) //112
hex (147 148 156 155 314 315 323 322) (nxwo ny16 nz1) simpleGrading (1 1 1) //113
hex (148 149 157 156 315 316 324 323) (nxwo1 ny16 nz1) simpleGrading (1 1 1) //114
hex (149 150 158 157 316 317 325 324) (nxwo2 ny16 nz1) simpleGrading (1 1 1) //115

//18th floor blocks

hex (151 152 160 159 318 319 327 326) (nx1 ny17 nz1) simpleGrading (1 1 1) //116
hex (152 153 161 160 319 320 328 327) (nx2 ny17 nz1) simpleGrading (1 1 1) //117
hex (153 154 162 161 320 321 329 328) (nxw ny17 nz1) simpleGrading (1 1 1) //118
hex (154 155 163 162 321 322 330 329) (nx16 ny17 nz1) simpleGrading (1 1 1) //119
hex (155 156 164 163 322 323 331 330) (nxwo ny17 nz1) simpleGrading (1 1 1) //120
hex (156 157 165 164 323 324 332 331) (nxwo1 ny17 nz1) simpleGrading (1 1 1) //121
hex (157 158 166 165 324 325 333 332) (nxwo2 ny17 nz1) simpleGrading (1 1 1) //122

);

edges

(

arc 101 110 (-24.015 -1.81 0)
arc 102 111 (-4.015 -1.81 0)
arc 268 277 (-24.015 -1.81 30)
arc 269 278 (-4.015 -1.81 30)
arc 110 119 (-23.615 -1.23 0)
arc 111 120 (-3.615 -1.23 0)
arc 277 286 (-23.615 -1.23 30)
arc 278 287 (-3.615 -1.23 30)
arc 119 128 (-23.11 -0.565 0)
arc 120 129 (-3.11 -0.565 0)
arc 286 295 (-23.11 -0.565 30)
arc 287 296 (-3.11 -0.565 30)
arc 128 137 (-22.03 -0.165 0)
arc 129 138 (-2.03 -0.165 0)
arc 295 304 (-22.03 -0.165 30)
arc 296 305 (-2.03 -0.165 30)
arc 138 130 (1.35 -0.165 0)

```

arc 139 131 (48.65 -0.165 0)
arc 305 297 (1.35 -0.165 30)
arc 306 298 (48.65 -0.165 30)
arc 130 121 (2.2 -0.565 0)
arc 131 122 (47.8 -0.565 0)
arc 297 288 (2.2 -0.565 30)
arc 298 289 (47.8 -0.565 30)
arc 121 112 (3.258 -1.23 0)
arc 122 113 (46.742 -1.23 0)
arc 288 279 (3.258 -1.23 30)
arc 289 280 (46.742 -1.23 30)
arc 112 103 (3.5625 -1.81 0)
arc 113 104 (46.4375 -1.81 0)
arc 279 270 (3.5625 -1.81 30)
arc 280 271 (46.4375 -1.81 30)
arc 103 94 (5.9 -3.47 0)
arc 104 95 (44.1 -3.47 0)
arc 270 261 (5.9 -3.47 30)
arc 271 262 (44.1 -3.47 30)
arc 94 85 (7.675 -6.54 0)
arc 95 86 (42.325 -6.54 0)
arc 261 252 (7.675 -6.54 30)
arc 262 253 (42.325 -6.54 30)
arc 85 76 (9.1 -9.6 0)
arc 86 77 (40.9 -9.6 0)
arc 252 243 (9.1 -9.6 30)
arc 253 244 (40.9 -9.6 30)
arc 76 67 (10 -12.16 0)
arc 77 68 (40 -12.16 0)
arc 243 234 (10 -12.16 30)
arc 244 235 (40 -12.16 30)
arc 67 58 (10.40 -13.72 0)
arc 68 59 (39.6 -13.72 0)
arc 234 225 (10.40 -13.72 30)
arc 235 226 (39.6 -13.72 30)
arc 58 49 (10.8 -14.73 0)
arc 59 50 (39.2 -14.73 0)
arc 225 216 (10.8 -14.73 30)
arc 226 217 (39.2 -14.73 30)
arc 49 40 (11.81 -16.62 0)
arc 50 41 (38.19 -16.62 0)
arc 216 207 (11.81 -16.62 30)
arc 217 208 (37.35 -16.62 30)
arc 40 31 (12.65 -19.21 0)
arc 41 32 (37.35 -19.21 0)
arc 207 198 (12.65 -19.21 30)
arc 208 199 (37.35 -19.21 30)
arc 31 22 (13.2 -21.26 0)
arc 32 23 (36.8 -21.26 0)
arc 198 189 (13.2 -21.26 30)

```

arc 199 190 (36.8 -21.26 30)
arc 22 13 (14.1 -23.53 0)
arc 23 14 (35.9 -23.53 0)
arc 189 180 (14.1 -23.53 30)
arc 190 181 (35.9 -23.53 30)
arc 13 4 (15 -26.48 0)
arc 14 5 (35 -26.48 0)
arc 180 171 (15 -26.48 30)
);

```

```

boundary
(

```

```

inlet

```

```

{
type patch;
faces
(
(0 167 176 9)
(9 176 185 18)
(18 185 194 27)
(27 194 203 36)
(36 203 212 45)
(45 212 221 54)
(54 221 230 63)
(63 230 239 72)
(72 239 248 81)
(81 248 257 90)
(90 257 266 99)
(99 266 275 108)
(108 275 284 117)
(117 284 293 126)
(126 293 302 135)
(135 302 310 143)
(143 310 318 151)
(151 318 326 159)

```

```

);
}

```

```

outlet

```

```

{
type patch;
faces
(
(8 17 184 175)
(17 26 193 184)
(26 35 202 193)

```

```
(35 44 211 202)
(44 53 220 211)
(53 62 229 220)
(62 71 238 229)
(71 80 247 238)
(80 89 256 247)
(89 98 265 256)
(98 107 274 265)
(107 116 283 274)
(116 125 292 283)
(125 134 301 292)
(134 142 309 301)
(142 150 317 309)
(150 158 325 317)
(158 166 333 325)
);
}
atmosphere
{
type patch;
faces
(
(159 326 327 160)
(160 327 328 161)
(161 328 329 162)
(162 329 330 163)
(163 330 331 164)
(164 331 332 165)
(165 332 333 166)
);
}
bottom1
{
type wall;
faces
(
(0 1 168 167)
(1 2 169 168)
(2 3 170 169)
);
}
bottom2
{
type wall;
faces
(
(4 5 172 171)
```

```

(5 6 173 172)

);
}
bottom3
{
type wall;
faces
(
(7 8 175 174)
);
}
weir_left
{
type wall;
faces
(
(3 170 179 12)
(12 179 188 21)
(21 188 197 30)
(30 197 206 39)
(39 206 215 48)
(48 215 224 57)
(57 224 233 66)
(66 233 242 75)
(75 242 251 84)
(84 251 260 93)
(93 260 269 102)

);
}
weir_top
{
type wall;
faces
(

(137 304 305 138)
(138 305 306 139)

);
}
weir_leftc
{
type wall;
neighbourPatch weir_left;
faces
(

```

```
(102 269 278 111)
(111 278 287 120)
(120 287 296 129)
(129 296 305 138)
);
```

```
}
weir_rightc
{
type wall;
faces
(
(4 171 180 13)
(13 180 189 22)
(22 189 198 31)
(31 198 207 40)
(40 207 216 49)
(49 216 225 58)
(58 225 234 67)
(67 234 243 76)
(76 243 252 85)
(85 252 261 94)
(94 261 270 103)
(103 270 279 112)
(112 279 288 121)
(121 288 297 130)
(130 297 305 138)

```

```
);
}
back
{
type wall;
faces
(
(0 9 10 1)
(1 10 11 2)
(2 11 12 3)
(4 13 14 5)
(5 14 15 6)
(7 16 17 8)
(9 18 19 10)
(10 19 20 11)
(11 20 21 12)
(13 22 23 14)

```


(14 23 24 15)
(16 25 26 17)
(18 27 28 19)
(19 28 29 20)
(20 29 30 21)
(22 31 32 23)
(23 32 33 24)
(25 34 35 26)
(27 36 37 28)
(28 37 38 29)
(29 38 39 30)
(31 40 41 32)
(32 41 42 33)
(34 43 44 35)
(36 45 46 37)
(37 46 47 38)
(38 47 48 39)
(40 49 50 41)
(41 50 51 42)
(42 51 52 43)
(43 52 53 44)
(45 54 55 46)
(46 55 56 47)
(47 56 57 48)
(49 58 59 50)
(50 59 60 51)
(51 60 61 52)
(52 61 62 53)
(54 63 64 55)
(55 64 65 56)
(56 65 66 57)
(58 67 68 59)
(59 68 69 60)
(60 69 70 61)
(61 70 71 62)
(63 72 73 64)
(64 73 74 65)
(65 74 75 66)
(67 76 77 68)
(68 77 78 69)
(69 78 79 70)
(70 79 80 71)
(72 81 82 73)
(73 82 83 74)
(74 83 84 75)
(76 85 86 77)
(77 86 87 78)
(78 87 88 79)
(79 88 89 80)
(81 90 91 82)

(82 91 92 83)
(83 92 93 84)
(85 94 95 86)
(86 95 96 87)
(87 96 97 88)
(88 97 98 89)
(90 99 100 91)
(91 100 101 92)
(92 101 102 93)
(94 103 104 95)
(95 104 105 96)
(96 105 106 97)
(97 106 107 98)
(99 108 109 100)
(100 109 110 101)
(101 110 111 102)
(103 112 113 104)
(104 113 114 105)
(105 114 115 106)
(106 115 116 107)
(108 117 118 109)
(109 118 119 110)
(110 119 120 111)
(112 121 122 113)
(113 122 123 114)
(114 123 124 115)
(115 124 125 116)
(117 126 127 118)
(118 127 128 119)
(119 128 129 120)
(121 130 131 122)
(122 131 132 123)
(123 132 133 124)
(124 133 134 125)
(126 135 136 127)
(127 136 137 128)
(128 137 138 129)
(130 138 139 131)
(131 139 140 132)
(132 140 141 133)
(133 141 142 134)
(135 143 144 136)
(136 144 145 137)
(137 145 146 138)
(138 146 147 139)
(139 147 148 140)
(140 148 149 141)
(141 149 150 142)
(143 151 152 144)
(144 152 153 145)

```
(145 153 154 146)
(146 154 155 147)
(147 155 156 148)
(148 156 157 149)
(149 157 158 150)
(151 159 160 152)
(152 160 161 153)
(153 161 162 154)
(154 162 163 155)
(155 163 164 156)
(156 164 165 157)
(157 165 166 158)
);
```

```
front
{
type wall;
faces
(
```

```
//front
(167 168 177 176)
(168 169 178 177)
(169 170 179 178)
(171 172 181 180)
(172 173 182 181)
(174 175 184 183)
(176 177 186 185)
(177 178 187 186)
(178 179 188 187)
(180 181 190 189)
(181 182 191 190)
(183 184 193 192)
(185 186 195 194)
(186 187 196 195)
(187 188 197 196)
(189 190 199 198)
(190 191 200 199)
(192 193 202 201)
(194 195 204 203)
(195 196 205 204)
(196 197 206 205)
(198 199 208 207)
(199 200 209 208)
(201 202 211 210)
(203 204 213 212)
(204 205 214 213)
(205 206 215 214)
(207 208 217 216)
```

(208 209 218 217)
(209 210 219 218)
(210 211 220 219)
(212 213 222 221)
(213 214 223 222)
(214 215 224 223)
(216 217 226 225)
(217 218 227 226)
(218 219 228 227)
(219 220 229 228)
(221 222 231 230)
(222 223 232 231)
(223 224 233 232)
(225 226 235 234)
(226 227 236 235)
(227 228 237 236)
(228 229 238 237)
(230 231 240 239)
(231 232 241 240)
(232 233 242 241)
(234 235 244 243)
(235 236 245 244)
(236 237 246 245)
(237 238 247 246)
(239 240 249 248)
(240 241 250 249)
(241 242 251 250)
(243 244 253 252)
(244 245 254 253)
(245 246 255 254)
(246 247 256 255)
(248 249 258 257)
(249 250 259 258)
(250 251 260 259)
(252 253 262 261)
(253 254 263 262)
(254 255 264 263)
(255 256 265 264)
(257 258 267 266)
(258 259 268 267)
(259 260 269 268)
(261 262 271 270)
(262 263 272 271)
(263 264 273 272)
(264 265 274 273)
(266 267 276 275)
(267 268 277 276)
(268 269 278 277)
(270 271 280 279)
(271 272 281 280)

(272 273 282 281)
(273 274 283 282)
(275 276 285 284)
(276 277 286 285)
(277 278 287 286)
(279 280 289 288)
(280 281 290 289)
(281 282 291 290)
(282 283 292 291)
(284 285 294 293)
(285 286 295 294)
(286 287 296 295)
(288 289 298 297)
(289 290 299 298)
(290 291 300 299)
(291 292 301 300)
(293 294 303 302)
(294 295 304 303)
(295 296 305 304)
(297 298 306 305)
(298 299 307 306)
(299 300 308 307)
(300 301 309 308)
(302 303 311 310)
(303 304 312 311)
(304 305 313 312)
(305 306 314 313)
(306 307 315 314)
(307 308 316 315)
(308 309 317 316)
(310 311 319 318)
(311 312 320 319)
(312 313 321 320)
(313 314 322 321)
(314 315 323 322)
(315 316 324 323)
(316 317 325 324)
(318 319 327 326)
(319 320 328 327)
(320 321 329 328)
(321 322 330 329)
(322 323 331 330)
(323 324 332 331)
(324 325 333 332)
);

}

);

```
mergePatchPairs
```

```
(
```

```
);
```

```
//
```

```
*****
```

```
*** //
```



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Öznur KOCAER
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Kastamonu/18.06.1994
Telefon :
e-mail : okocaer@bartin.edu.tr

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Üniversite	: Selçuk Üniversitesi, Selçuklu, Konya	2017
Yüksek Lisans	:	
Doktora	:	

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2018-Halen	Bartın Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

UZMANLIK ALANI

Hidrolik

YABANCI DİLLER

İngilizce

BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

YAYINLAR

ULUSLARARASI BİLDİRİLER

The Effect of Tosya Sarıkılıç Rice Shell Concrete Additive to The Tensile Strength of Concrete, 2018, *Icens 5. International Conferance On Engineerin And Natural Science*, Ukrayna-Kiev.

Comparison of Numerical Modeling and Experimental Results of Flow on A Ogee Spillway, 2019, *ISMS V. Uluslararası Multidisipliner Çalışmaları Sempozyumu*, Ankara.