

Yuvarlatılmış Burunlu Geniş Başlıklı Savakların Debi Katsayılarının Deneysel, Sayısal ve
Makine Öğrenmesi Destekli Belirlenmesi

Hüseyin Yaban

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran 2022

Determination of Discharge Coefficient for the Rounded-Nose Broad-Crested Weirs by
Experimental, Numerical and Machine Learning Approaches

Hüseyin Yaban

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Civil Engineering

June 2022

Yuvarlatılmış Burunlu Geniş Başlıklı Savakların Debi Katsayılarının Deneysel, Sayısal ve
Makine Öğrenmesi Destekli Belirlenmesi

Hüseyin Yaban

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Hidrolik Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Prof. Dr. Ender Demirel

Haziran 2022

ONAY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi HÜSEYİN YABAN'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Yuvarlatılmış Burunlu Geniş Başlıklı Savakların Debi Katsayılarının Deneysel, Sayısal ve Makine Öğrenmesi Destekli Belirlenmesi” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Ender Demirel

İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye :

Üye :

Üye : -

Üye : -

Üye : -

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. Ender Demirel danışmanlığında hazırlamış olduğum “Yuvarlatılmış Burunlu Geniş Başlıklı Savakların Debi Katsayılarının Deneysel, Sayısal ve Makine Öğrenmesi Destekli Belirlenmesi” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. (27.06.2022)

Hüseyin Yaban

İmza:

ÖZET

Bu tez çalışmasında, yuvarlatılmış burunlu geniş başlıklı savak üzerindeki türbülanslı ve serbest yüzeyli akım deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Laboratuvar kanalına yerleştirilen farklı yuvarlatma yarıçaplarına sahip savaklar kullanılarak gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda akım hızı ve su derinlikleri ölçülmüştür. Açık kaynak kodlu Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) yazılımı OpenFOAM kullanılarak savak üzerindeki akımın sayısal benzetimleri gerçekleştirilmiştir. Türbülans etkileri $k-\omega$ SST türbülans kapanma modeli ile, serbest yüzeyin konumu ise Akışkan Hacmi (VOF) yöntemiyle hesaplanmıştır. Sayısal model sonuçları deneysel ölçüm sonuçları ile karşılaştırılarak sayısal model doğrulanmıştır. Debi katsayısı üzerindeki etkili parametreler boyut analizi ile belirlenmiştir. Savak yuvarlatma yarıçapı R , savak uzunluğu L , kret uzunluğu L' , savak yüksekliği P ve savak üstü su yüksekliği h olmak üzere debi katsayısının R/P , L'/P ve h/P boyutsuz parametrelerine bağlı olduğu belirlenmiştir. Doğrulan sayısal model kullanılarak farklı boyutsuz parametreler ve giriş debileri için toplam 1547 adet sayısal benzetim gerçekleştirilmiştir. Elde edilen geniş sayısal veri seti kullanılarak debi katsayısının tahmini için iki farklı debi denklemi geliştirilmiştir. Buna ilave olarak Lineer Regresyon, Polinomal Regresyon ve Çok Katmanlı Algılayıcı (Multi Layer Perceptron-MLP) yöntemleri kullanılarak debi katsayısı makine öğrenmesi ile tahmin edilmiş, Polinomal Regresyon ve MLP yöntemlerinin tahmin başarısının diğer yöntemlerden yüksek olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Geniş başlıklı savak, Yuvarlatılmış burun, Makine öğrenmesi, CFD, OpenFOAM.

SUMMARY

In this thesis, turbulent flow over rounded-nose broad crested weir is investigated experimentally and numerically. Experimental studies were carried out for the measurement of flow velocity and water depth using broad-crested weirs with different rounding ratios in a laboratory flume. Open-source Computational Fluid Dynamics (CFD) code, OpenFOAM, is employed for the simulation of turbulent flow over the weir. Turbulence effects are considered using k-omega SST turbulence closure model and position of the free-surface is tracked using Volume of Fluid (VOF) method. Numerical model is validated with the comparison of experimental results. Dimensional analysis is performed to determine effective parameters on the flow over rounded-nose broad crested weir. It was found from dimensional analysis that the R/P , L'/P and h/P are effective parameters, where R is the rounding radius, L is the length of the weir, L' is the length of the crest, P is the weir height and h is the water depth over the weir. Numerical simulations are performed for different dimensionless parameters and flow rates using the validated numerical model. Two separate equations were developed based on the extensive data set for the prediction of the stage-discharge relationship. Moreover, Linear Regression (LR), Polynomial Regression (PR) and Multi-Layer Perception (MLP) methods were used for the prediction of the stage-discharge relationship using machine learning algorithms. Test results showed that the PR and MLP could predict the discharge comparison better than the LR method.

Keywords: Broad-crested weir, rounded nose, Machine Learning, CFD, OpenFOAM

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimi boyunca yol göstericiliği ve vizyonu ile çalışmalarım bana rehber ve ilham kaynağı olan kıymetli danışmanım Prof.Dr. Ender DEMİREL'e teşekkürü borç bilirim.

Okul hayatımda bana destek olan kıymetli hocam Doç.Dr. Kamil Bekir AFACAN'a ve sevgili çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde büyük emekleri olan ve hayatım boyunca beni destekleyen aileme teşekkür ederim.

Bu araştırmada yer alan tüm nümerik hesaplamalar TÜBİTAK ULAKBİM, Yüksek Başarım ve Grid Hesaplama Merkezi'nde (TRUBA kaynaklarında) gerçekleştirilmiştir. Bu sebepten TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Son olarak; uzun yıllar boyu hayatımda olan, her koşulda beni destekleyen ve motivasyon kaynağı olan can kardeşim Muhammed TURAN'a teşekkür ederim...

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
3. YÖNTEM.....	8
3.1. Boyut Analizi.....	8
3.2. Deneysel Çalışma	10
3.3. Sayısal Model	12
3.3.1. Hareket Denklemleri.....	12
3.3.2. Hesaplama Ağı ve Sınır Koşulları	14
3.4. Makine Öğrenmesi	19
3.4.1. Lineer Regresyon Yöntemi.....	20
3.4.2. Polinomal Regresyon Yöntemi.....	21
3.4.3. Çok Katmanlı Algılayıcı (Multi Layer Perceptron-MLP).....	21
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	23
4.1. Sayısal Sonuçlar	23
4.1.1. Sayısal Modelin Doğrulanması	23

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.1.2. 2B ve 3B Çözümlerin Karşılaştırılması.....	25
4.1.3. Hassasiyet Analizi	27
4.1.4. Sayısal Benzetimler	29
4.2. Debi-Derinlik Denkleminin Geliştirilmesi	30
4.3. Makine Öğrenmesi Modelinin Geliştirilmesi	32
4.3.1. Lineer Regresyon Sonuçları	33
4.3.2. Polinomal Regresyon Sonuçları	34
4.3.3. MLP Sonuçları.....	35
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	37
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	39

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Savakların sınıflandırılması a) Keskin kenarlı savak b) Geniş başlıklı savak.....	1
1.2. Yuvarlatılmış burunlu geniş başlıklı savak.	2
3.1. Debi katsayısının bağlı olduğu değişkenler.....	8
3.2. Deney düzeneği.	10
3.3. KATflow 200 modeli ultrasonik debimetre.....	11
3.4. WinADV arayüzü.	11
3.5. a) Hesaplama ağı ve sınırlar b) yuvarlatılmış burun etrafında ortogonal ağı görünüşü	15
3.6. ‘fvSchemes’ dosyası.	16
3.7. ‘SLURM’ betik dosyası.....	17
3.8. Farklı ağlar için hız profilleri.....	18
3.9. Makine öğrenmesi akış şeması.	19
3.10. Spyder arayüzü.	20
3.11. Örnek bir MLP yapısının şematik gösterimi.	22
4.1. a) $R/P=0.2$ ve $x/h_0=0.8$, b) $R/P=0.2$ ve $x/h_0=1.5$, c) $R/P=0.5$ ve $x/h_0=0.8$, b) $R/P=0.5$ ve $x/h_0=1.5$	24
4.2. a) $R/P=0.2$ b) $R/P=0.5$ için elde edilen sayısal ve deneysel su yüzü profilleri.....	25
4.3. a) $R/P=0.02$ b) $R/P=0.25$	26
4.4. Yuvarlatılmış burunlu geniş başlıklı savak üzerindeki akımın şematik görünümü..	27
4.5. a) $q=0.0375 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ b) $q=0.3125 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$	29
4.6. Lineer regresyon yöntemi sonuçları.	33
4.7. Polinomal regresyon yöntemi sonuçları.	34
4.8. MLP yöntemi sonuçları.	36

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Sınır koşulları.	15
3.2. Ağların özellikleri.	18
4.1. Hesaplanan RMSE değerleri.	24
4.2. 2B ve 3B benzetimler için kullanılan parametreler ve elde edilen su yükseklikleri.	26
4.3. L, L _{memba} , L _{mansap} ve H _k değişimlerinin su seviyesindeki etkisi.	28
4.4. R, P ve R/P değişimlerinin su seviyesindeki etkisi.	28
4.5. Sayısal benzetimlerde ele alınan parametreler.	30
4.6. 1.bağıntı için korelasyon matrisi.	31
4.7. 2.bağıntı için korelasyon matrisi.	31
4.8. Elde edilen bağıntılar için değerlendirme metriklerinin çıktısı.	32
4.9. Polinomal regresyon için değerlendirme metriklerinin çıktısı.	35

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Açıklama

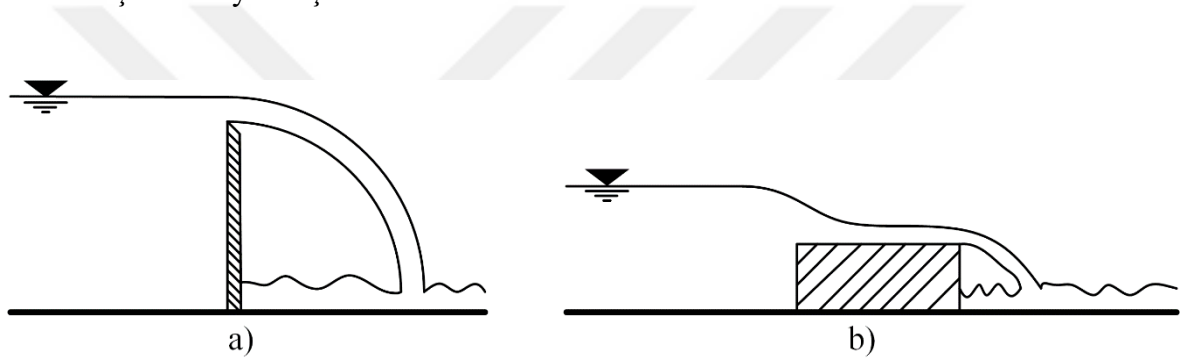
C_d	Debi Katsayısı
C_{dhesap}	Hesaplanan Debi Katsayısı
$C_{dtahmin}$	Tahmin Edilen Debi Katsayısı
kg	Kilogram
Hz	Hertz
m	Metre
cm	Santimetre
I	Türbülans Yoğunluğu
C_μ	Türbülans Model Sabiti
t (s)	Zaman
$g \text{ (m/s}^2\text{)}$	Yerçekimi İvmesi
$q \text{ (m}^3\text{/s/m)}$	Birim Debi
$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	Akışkan Yoğunluğu
$\mu \text{ (kg/m/s)}$	Akışkanın Dinamik Viskozitesi
$\sigma \text{ (kg/s}^2\text{)}$	Yüzey Gerilimi
$k \text{ (m}^2\text{/s}^2\text{)}$	Türbülans Kinetik Enerjisi
p (Pa)	Basınç
$\omega \text{ (s}^{-1}\text{)}$	Spesifik Yayılma Hızı
U (m/s)	Hız
$U_0 \text{ (m/s)}$	Kanal Girişindeki Ortalama Hız
$Q \text{ (m}^3\text{/s)}$	Debi
R (m)	Savak Yuvarlatma Yarıçapı
L (m)	Savak Uzunluğu
L' (m)	Savak Kreti Uzunluğu
P (m)	Savak Yüksekliği
Re	Reynolds Sayısı
Fr	Froude Sayısı
We	Weber Sayısı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
h (m)	Savak Üstü Su Yüksekliği
h_0 (m)	Kanal Girişindeki Su Derinliği
L_{memba} (m)	Savak Membasındaki Kanal Uzunluğu
L_{mansap} (m)	Savak Mansabındaki Kanal Uzunluğu
H_k (m)	Kanal Yüksekliği
H (m)	Savak Üstü Toplam Yük
2B	2 Boyut
3B	3 Boyut
R^2	Determinasyon Katsayısı
Pearson K.K.	Pearson Korelasyon Katsayısı
CFD	Computational Fluid Dynamics
ML	Machine Learning
ADH	Akustik Doppler Hızölçer
RONs	Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes
VOF	Volume of Fluid
MLP	Multi Layer Perceptron
MAE	Mean Absolute Error
MSE	Mean Squared Error
RMSE	Root Mean Squared Error

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Savaklar yaygın olarak kullanılan basit, eski ve güvenli su yapılarındandır. Bilindiği gibi su yapılarının temel amacı sudan maksimum verim elde etmek ve olası tehlikeli durumlarda suyun vereceği zararlardan korunmaktır. Açık kanallarda akım kontrolünü sağlamak, su derinliğinin ölçülmesi ve kontrolü, memba suyunun güvenli bir şekilde tahliye edilmesi gibi birçok noktada kullanılan savaklar büyük önem arz etmektedir. Birçok türü olmakla beraber savaklar, genel olarak a) Keskin kenarlı savak b) Geniş başlıklı savak olarak iki başlıkta incelenebilir (Şekil 1.1). Hidrolik etkilerinin farklı olması sebebiyle bu başlıklar da alt başlıklara ayrılmıştır.



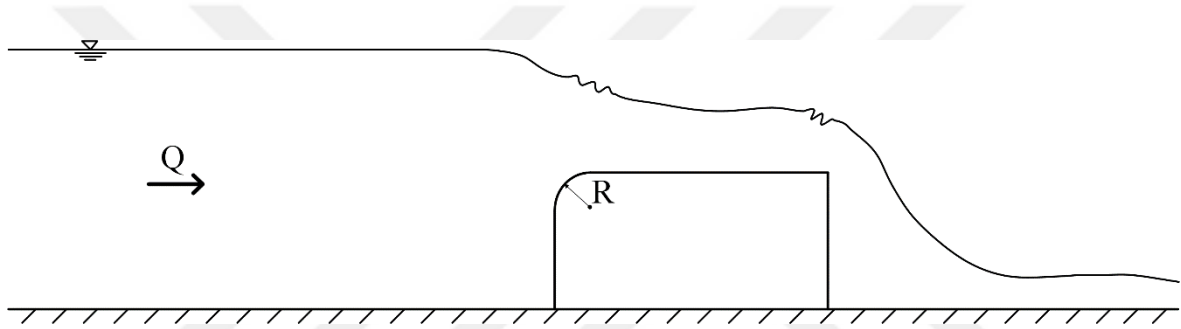
Şekil 1.1. Savakların sınıflandırılması a) Keskin kenarlı savak b) Geniş başlıklı savak.

Geniş başlıklı savaklar akım rejimini değiştirerek akımın kritik altı rejimden kritik üstü rejime geçmesini sağlarlar. Savak seçimi yapılırken debi deşarj kapasitesi ele alındığı için savak geometrisi çok önemlidir. Bu durum, bu konuyla ilgili birçok araştırma yapılmasına sebebiyet vermiş ve araştırmalar sonucunda savak geometrisi ile debi deşarj kapasitesi arasında birtakım bağıntılar elde edilmiştir. Tüm bu çalışmalara rağmen savaklar için dünyaca kabul görmüş bir biçimde debi deşarj kapasitesini ortaya koyan net bir sonuç yoktur.

Savak-akım etkileşiminin fiziki olarak modellenmesi mümkün olmakla beraber, deneysel çalışmaların zorluğu ve maliyeti ve deneysel hatalar, türbülans ve viskozite etkileri göz önünde bulundurulduğunda teorik çözümler önem kazanmaktadır. Son yıllarda birçok araştırmacının katkılarıyla önemli gelişmelerin yaşandığı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics-CFD) yöntemleri sayesinde, birçok konuda olduğu gibi savakların modellenmesi konusunda da maliyeti az ve güvenilir analizler yapılabilmektedir.

Teknolojinin geldiği nokta itibariyle günümüzde hemen her alanda Makine Öğrenmesi (Machine Learning-ML) yöntemleri kullanılmakta ve yapılan çalışmalar bu yöntemlerin yüksek doğrulukta olduğunu göstermektedir. Hidrolik problemlerde de ML yöntemlerinin kullanılmasıyla elde edilen sonuçlar oldukça güvenilirdir.

Mevcut çalışmada membadaki üst köşesinin yuvarlatılmasıyla elde edilen Yuvarlatılmış Burunlu Geniş Başlıklı Savaklar ele alınmıştır. Deneysel çalışmalarla doğrulanan nümerik model sayesinde elde edilen veriler kullanılarak, geliştirilen ML algoritmalarıyla debi katsayısı C_d 'nin tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Şekil 1.2'de yuvarlatılmış burunlu geniş başlıklı savağın bir örneği verilmiştir.



Şekil 1.2. Yuvarlatılmış burunlu geniş başlıklı savak.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Rao ve Muralidhar (1963), farklı geometrik özelliklere sahip savaklar üzerinde deneysel çalışmalar yapmış ve elde ettikleri sonuçlarla literatürdeki deneysel sonuçları kıyaslamışlardır. Çalışma sonunda geniş başlıklı savak için debi katsayısını veren denklemler türetmişlerdir.

Ramamurthy vd (1988), 600 cm uzunluğunda, 25.4 cm genişliğinde ve 51 cm yüksekliğinde yatay, cam duvarlı, eğimli bir kanalda pleksiglastan imal edilmiş savaklarla deneyler yapmışlardır. P/L'nin sabit tutulduğu savak modelleri üzerinde testler yaparak H/P ve R/P'nin C_d üzerindeki etkilerinin bulunabileceğini göstermişlerdir. Çalışmada basınç dağılımı sebebiyle geniş başlıklı savak için $0.083 \leq H/L \leq 0.4$ kriterine göre çalışmışlardır ki burada H savak üstü su yüksekliğini ve L savak uzunluğunu ifade etmektedir. Ayrıca yuvarlatılmış burunlu geniş başlıklı savak için 3 temel sınıflandırma kriteri ortaya koymuşlardır. R yuvarlatma yarıçapı ve P savak yüksekliği olmak üzere; $0 \leq R/P \leq 0.094$ için hafif yuvarlak, $0.094 \leq R/P \leq 0.250$ için orta derecede yuvarlak, $0.250 \leq R/P \leq 1$ için çok yuvarlak olduğunu ifade etmişlerdir. Hafif yuvarlak sınıfındaki savakların debi deşarj katsayısı C_d üzerinde pek etkili olmadığını ancak orta yuvarlak sınıfındakiler için yuvarlaklık oranının C_d 'yi kademeli olarak arttırdığını ve su yüzü ve statik basınç profillerinin yuvarlatma yarıçapı tarafından belirlendiğini ifade etmişlerdir.

Hargreaves vd (2007), geniş başlıklı savak üzerindeki akımı sayısal olarak ticari bir CFD yazılımı olan ANSYS-Fluent paket programıyla modellemişlerdir. Sayısal modellerinde k-ε, RNG k-ε ve k-ω SST türbülans modelleri kullanmış ve su yüzü profillerini VOF yöntemiyle belirlemişlerdir. Sayısal sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırdıklarında, kullandıkları sayısal modelin başarılı olduğunu ifade etmişlerdir.

Kırkgöz vd (2008), dikdörtgen ve üçgen geniş başlıklı savak üzerindeki akımları sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Sayısal modellerini ANSYS-Fluent paket programında oluşturmuş, su yüzü profillerini VOF yöntemiyle belirlemiş ve k-ε ve k-ω türbülans modellerini kullanmışlardır. Deneysel ve sayısal sonuçlara bakıldığında sayısal

modellerinin başarılı olduğunu ve $k-\omega$ türbülans modelinin hassas sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir.

Kırkgöz vd (2009), açık kanaldaki bir silindir üzerindeki akımı, 2 boyutlu, deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Deneysel ve sayısal verileri kıyaslayınca ANSYS-Fluent paket programında oluşturdukları sayısal modelin, $k-\omega$ ve $k-\omega$ SST türbülans modelleri ile başarılı sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir.

Azimi vd (2009), yaptıkları çalışmada farklı savak türlerini ele almış ve bu savaklara ait literatürdeki deneysel çalışma sonuçlarını sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada debi katsayısının savak geometrisine bağlı olarak değiştiğini ifade etmiş ve debi katsayısı için yeni bağıntılar türetmişlerdir.

Bal (2011), geniş başlık savak içeren açık kanal akımını hem deneysel hem de sayısal olarak incelemiş; RONS (Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes) denklemlerini çözdürdüğü sayısal modelini, sonlu hacimler yöntemine dayalı ANSYS-Fluent paket programıyla oluşturmuş ve su yüzü profillerini Akışkan Hacimleri (Volume of Fluid-VOF) yöntemiyle hesaplamıştır. Kullandığı farklı türbülans modelleri arasında RNG $k-\varepsilon$ modelinin, hız alanı ve su yüzü hesabında diğer modellerden daha başarılı olduğunu ifade etmiştir.

Felder ve Chanson (2012) yuvarlatılmış burunlu geniş başlıklı savak üzerindeki akımın hız ve basınç dağılımlarını ve su yüzü profillerini deneysel olarak incelemişler; debi katsayısını savak üstü toplam yük ve savak uzunluğuna bağlı olarak tarif etmişlerdir.

Afshar ve Hoseini (2013), dikdörtgen geniş başlıklı savaklar üzerindeki akımı deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. CFD modellerinde su yüzü profillerini VOF metoduyla belirlemiş, türbülans modeli olarak Standart $k-\varepsilon$, RNG $k-\varepsilon$ LES (Large Eddy Simulation) kullanmışlardır. Çalışmanın sonucunda deneysel ve sayısal sonuçların uyumlu olduğunu ifade etmişlerdir.

Salmasi vd (2013) farklı debiler için 15 farklı dikdörtgen bileşik kesitli geniş başlıklı savak üzerinde deneyler yapmış ve elde ettikleri sonuçlar üzerinden GP (Genetik Programlama) ve YSA (Yapay Sinir Ağları) yöntemleri ile debi katsayısı C_d 'nin tahmini

için model geliştirmişlerdir. Çalışmalar sonucunda deneysel veri ile GP ve YSA yöntemlerinden elde edilen verileri kıyaslamış ve GP'nin YSA'na göre daha başarılı sonuçlar verdiğini göstermişlerdir. Ayrıca çalışma sonucunda debi katsayısı için yeni bağıntılar önermişlerdir.

Ebtehaj vd (2015), GEP (Gene Expression Programming) yöntemiyle dikdörtgen bir kanaldaki yan savağın debi katsayısını tahmin etmeye çalışmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara bakarak, GEP yönteminin debi katsayısını tahmin etmede oldukça başarılı olduğunu ve mevcut yöntemlere alternatif olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Parsaie (2016), çalışmasında MLP (Multi Layer Perceptron) ve RBF (Radial Basis Function) yöntemlerini kullanarak yan savakların debi katsayısını tahmin etmeye çalışmıştır. Çalışmanın sonucunda MLP yönteminin tahmin başarısının RBF yönteminden daha fazla olduğunu, MLP yönteminin debi katsayısı tahmininde iyi performans ($R^2=0.89$, $RMSE=0.067$) sergilediğini ifade etmiştir.

Roushangar vd (2016), yamuk ve dikdörtgen keskin kenarlı savakların debi katsayısını tahmin etmek için hibrit SVM-GA (support vector machines-genetic algorithm) ve GEP yöntemlerini kullanmışlardır. Çalışma sonucunda hibrit SVM-GA yönteminin debi katsayısı tahmininde daha iyi sonuç verdiğini ifade etmişlerdir.

Roushangar vd (2017), labirent savağın debi katsayısını, debi katsayısının bağlı olduğu etkili parametreleri belirleyerek, ANFIS (adaptive neural-fuzzy inference system) ve GEP yöntemleri ile tahmin etmiş ve sonuçlara bakıldığında her iki modelin de yüksek başarı sergilediğini ifade etmişlerdir.

Al-Hashimi vd (2017) yuvarlak burunlu geniş başlık savağın üzerinde yaptıkları nümerik çalışmada 2B ve 3B çözümler arasında çok küçük farklar olduğunu görmüş ve elde ettikleri sonuçları deneysel sonuçlar ile kıyaslayarak nümerik modellerini doğrulamışlardır. Nihayetinde CFD modeli ile yapılan çalışmanın doğruluğunu ve 2B benzetimlerin yerinde ve çözüm süresi bakımından daha az maliyetli olduğunu göstermişlerdir.

Kızılaslan ve Demirel (2017) OpenFOAM açık kaynak kodlu CFD yazılımını kullanarak yuvarlak burunlu geniş başlık savak üzerinde, $k-\omega$ SST türbülans modeli ile, 3 boyutlu türbülans etkilerini ve çevrinti bölgesinin uzunluğunun farklı R/P oranlarına ve akış hızına bağlı olarak değişimini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda debi derinlik ilişkisi için yüksek debilerde sayısal modellerinin daha hassas olduğunu, tüm debi değerleri için savak membasında sabit bir su derinliği oluştuğunu ve membada dalgalanmaların meydana geldiğini, savağın membasına yakın istasyonlarda ölçülen hız değerlerine bakıldığında su yüzeyine doğru hızın arttığını, ayrışma etkilerinden dolayı ön yüzü köşeli savaklarda dalgalanmanın yüksek olduğunu ve savak membasında türbülans etkilerinin artmasından ötürü bu bölgede dinamik bir çevrintili bölgenin meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca bu çalışmada elde ettikleri deneysel verinin sonraki çalışmalarda nümerik verinin doğrulanması amacıyla kullanılabileceğini öne sürmüşlerdir.

İlkenntapar ve Öner (2017) dikdörtgen geniş başlıklı savak üzerindeki akımı deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Sayısal modellerini sonlu hacimler yöntemine dayalı FLOW-3D paket programı aracılığıyla oluşturmuşlardır. Çalışmada su yüzü profilleri, hız profilleri ve dağılımını hem deneysel hem de sayısal olarak incelenmiş olup sonuçlar kıyaslanınca SKE (Standart $k-\epsilon$) türbülans kapatma modelinin başarılı sonuçlar verdiğini ve sayısal sonuçlar ile deneysel sonuçlar arasında genel bir uyum olduğunu göstermişlerdir.

Karami vd (2018); ELM (Aşırı Öğrenme Makineleri), GP ve YSA yöntemlerini kullanarak üçgen labirent yan savakların debi katsayısını tahmin etmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda tüm yöntemlerin başarılı olduğunu, ELM yönteminin diğer yöntemlere göre daha yüksek performans sergilediğini ifade etmişlerdir.

Özdin (2021), çalışmasında FLOW-3D paket programında geniş başlıklı savak akımını modellemiş ve debi katsayısı için yeni bağıntılar türetmiştir. Sayısal modelinde $k-\epsilon$ ve RNG $k-\epsilon$ türbülans modellerini kullanmış ve su yüzü profilini VOF yöntemiyle hesaplamıştır.

Li vd (2021) keskin kenarlı dikdörtgen savak üzerinde yaptıkları çalışmada, debi katsayısı C_d 'yi makine öğrenmesi yöntemleri ile tahmin etmeye çalışmışlardır. YSA, SVM (Destek Vektör Makineleri) ve ELM (Aşırı Öğrenme Makineleri) yöntemlerini kullanarak

elde ettikleri sonuçları deneysel verilerle kıyaslamış ve tüm yöntemler için yüksek doğruluklu sonuçlar elde etmişlerdir.

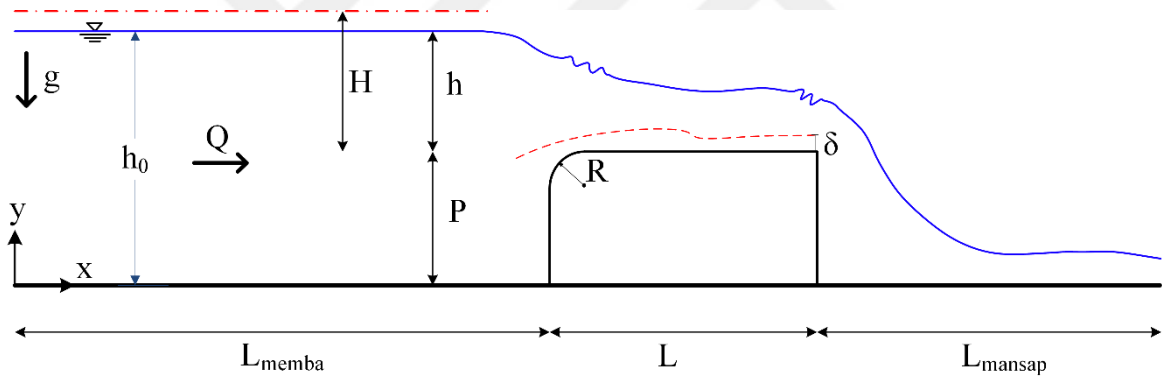
Hu vd (2021), kavisli labirent savağın debi katsayısını; ANFIS, SVM, M5 model tree (M5 model ağacı), LSSVM (least-squares support vector machine) ve LSSVM-BA (least-squares support vector machine–bat algorithm) modellerini kullanarak tahmin etmişlerdir. Çalışma sonucunda LSSVM-BA modellerinin en iyi performansı sergilediğini ve debi katsayısı tahmininde bu modelin kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Gharehbaghi ve Ghasemlounia (2022) keskin kenarlı V-çentikli savak üzerinde çalışmış ve makine öğrenmesi yöntemleri ile debi katsayısını tahmin etmeyi amaçlamışlardır. SVR (Destek Vektör Regresyonu), GEP ve kendi geliştirdikleri hibrit SVR-ACO (SVR-Karınca Kolonisi Optimizasyonu) yöntemleri ile 196 veriden oluşan veri setini %70 eğitim ve %30 test olarak ayırıp sonuçları incelediklerinde, bu yöntemlerin yüksek doğruluklu sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir.

3. YÖNTEM

3.1. Boyut Analizi

Mühendislikte kullanılan temel boyutlar [M] Kütle, [L] Uzunluk ve [T] Zaman büyüklükleri ile ifade edilir. Doğadaki olaylar birim sistemlerinden bağımsız olduklarından bu olayları ifade eden matematik bağıntılarının da birim sistemlerinden bağımsız olması beklenir. Önemli parametreler hakkında bilgi sahibi olmak, problemdeki parametre sayısını azaltmak ve daha az deneyle problemin sonucuna ulaşmak için π (pi) teoremi kullanılarak boyut analizi yapılmıştır. Bu teoreme göre farklı yarıçaplara sahip savakların birim genişliğinden geçen akımın debi katsayısının bağlı olduğu değişkenler aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.



Şekil 3.1. Debi katsayısının bağlı olduğu değişkenler.

Burada R =savak yarıçapı, P =savak yüksekliği, L =savak uzunluğu, h =savak üstü su yüksekliği, g =yerçekimi ivmesi, q =birim debi, ρ =suyun yoğunluğu, μ =suyun dinamik viskozitesi, σ =yüzey gerilmesi ve δ =sınır tabakası kalınlığıdır. Viskoz akımlarda akışkanın hızı katı yüzeye yakın bir bölgede büyük değişimlere uğrar ve bu bölgenin dışında viskozite etkisi neredeyse yok olur. Bu bölgeye sınır tabaka denilir ve sınır tabaka kalınlığı, mevcut noktadaki hızın serbest akım hızının %99'u olduğu yükseklikten katı yüzeye kadar olan mesafe olarak adlandırılır.

Tüm değişkenler ele alındığında:

$$f_1 = (R, P, L, h, g, q, \rho, \mu, \sigma) = 0 \quad (3.1)$$

elde edilir. Bunlardan ρ , q ve P tekerrür eden ana değişkenler olarak seçilirse $m=9-3=6$ olarak bulunur. Yani 6 adet boyutsuz değişken aranır.

$$f_2 = (\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6) = 0 \quad (3.2)$$

Gerekli işlemler yapıldığında debi katsayısının aşağıdaki değişkenlere bağlı olduğu görülür:

$$C_d = f_2 \left(\frac{R}{P}, \frac{L}{P}, \frac{h}{P}, \frac{\mu}{\rho\sigma}, \frac{gh^3}{q^2}, \frac{\sigma h}{\rho q^2} \right) \quad (3.3)$$

Bu denklem de düzenlenirse aşağıdaki hale gelir:

$$C_d = f_3 \left(\frac{R}{P}, \frac{L}{P}, \frac{h}{P}, Re, Fr, We \right) \quad (3.4)$$

Suyun hızı ve yüksekliği birbirinden bağımsız değildir. Bu yüzden savak problemlerinde Froude sayısı kullanılmaz. Reynolds sayısı akımdaki sürtünme, Weber sayısı yüzey gerilmesi etkilerini göstermektedir. Literatürdeki çalışmalar, savak üstü su derinliğinin 5 cm'den fazla olduğu durumlarda, yüzey gerilmesi etkilerinin ihmal edilebileceğini göstermektedir. Dolayısıyla Froude, Reynolds ve Weber sayıları gruptan çıkarıldığında:

$$C_d = f_4 \left(\frac{R}{P}, \frac{L}{P}, \frac{h}{P} \right) \quad (3.5)$$

elde edilir ve debi katsayısı C_d 'nin R/P , L/P ve h/P boyutsuz değişkenlerine bağlı olduğu görülür.

3.2. Deneysel Çalışma

Bu çalışmadaki tüm deneysel çalışmalar Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Hidrolik Laboratuvarı'nda; yan duvarları temperli cam, tabanı paslanmaz çelik, 10 m uzunluğunda, 0.4 m genişliğinde ve 0.6 m yüksekliğindeki deney kanalında gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinin örnek bir görüntüsü Şekil 3.2'de verilmiştir.

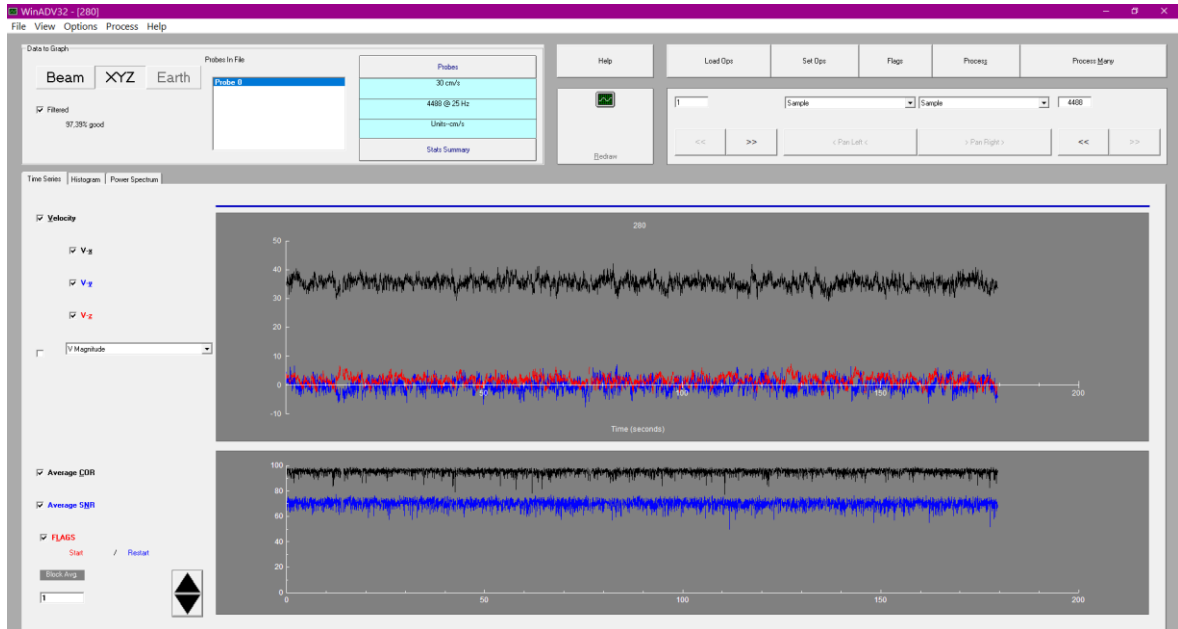


Şekil 3.2. Deney düzeneği.

50 cm uzunluğundaki geniş başlıklı savağın ön yüzü, farklı yuvarlatma yarıçaplarının kullanılması için polietilen malzemeden yapılmıştır. Savağın hareket etmemesi için her biri 250 kg çekme kapasitesine sahip olan dört adet manyetik mıknatıs kullanılmıştır. Kanal girişinde bulunan tanka gelen su, tedrici daralan kesitten geçerek kanala iletilmektedir. KATflow 200 modeli ultrasonik debimetre (Şekil 3.3) kullanılarak debi ölçümleri yapılmış olup kanala verilecek olan suyun debisi, tankın membasında yer alan vana sayesinde ayarlanabilmektedir. Hız ölçümleri, 25 Hz örnekleme frekansına sahip Nortek Vectrino modeli Akustik Doppler Hızölçer (ADH) ile yapılmıştır. Bu ölçümler Vectrino yazılımı aracılığıyla 180 saniye boyunca kaydedilmiş ve elde edilen veriler WinADV yazılımında (Şekil 3.4) filtrelenip incelenmiştir.



Şekil 3.3. KATflow 200 modeli ultrasonik debimetre.



Şekil 3.4. WinADV arayüzü.

3.3. Sayısal Model

Bu çalışmada farklı savak geometrisi ve debiler için, deneysel çalışmalarla-zaman ve finansal açıdan- elde edilmesi çok maliyetli olan büyük bir veri seti sayısal benzetimler sayesinde hazırlanmıştır. Sayısal modelde kullanılan hesaplama ağı, başlangıç ve sınır koşulları ve hareketi idare eden denklemler tanıtılmıştır.

3.3.1. Hareket Denklemleri

Sıkışmaz, türbülanslı ve 3 boyutlu akım için süreklilik ve momentum denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.6)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = \rho g_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.7)$$

Burada u hızı, ρ akışkanın yoğunluğunu, μ akışkanın dinamik viskozitesini, p basıncı, t zamanı, g yerçekimi ivmesini ifade etmektedir. Denklem 3.7'deki gibi Navier-Stokes denklemlerine türbülans dolayısı ile oluşan çalkantı gerilmeleri (Reynolds gerilmeleri) eklenirse Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RONS) denklemleri elde edilir. Zamana bağlı RONS denklemlerindeki türbülans viskozitesini hesaplamak için farklı türbülans modelleri (k - ϵ , RNG k - ϵ , k - ω vb) geliştirilmiş olup, bu çalışmada k - ω SST türbülans modeli kullanılmıştır. Bu modelde türbülans viskozitesi şu şekilde hesaplanır:

$$\mu_t = \rho \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega; \Omega F_2)} \quad (3.8)$$

Burada $a_1=0.3$ ve $\Omega = \frac{\partial u}{\partial y}$ (iki boyutlu akışta) değerlerini ifade etmektedir. F_2 akıllı fonksiyonu ise; sınır tabaka içerisinde 1, dışında 0 değerini alan ve iki değer arasında yumuşak bir geçiş sağlayan bir fonksiyon olup şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2) \quad (3.9)$$

$$\arg_2 = \max\left(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega}; \frac{500\nu}{y^2\omega}\right) \quad (3.10)$$

Burada y , normal yönde duvara olan uzaklık değerini ifade etmektedir. k - ω SST modelinde k (türbülans kinetik enerjisi) ve ω (spesifik kayıp) denklemleri sırasıyla aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}\right) + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta_k \rho k \omega \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right) + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \\ &\quad - \beta_\omega \rho k \omega^2 + 2(1 - F_1)\sigma_{cd} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Denklem 3.12'deki F_1 , Denklem 3.8'deki F_2 gibi bir akıllı fonksiyon olup şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4) \quad (3.13)$$

$$\arg_1 = \min\left[\max\left(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega}; \frac{500\nu}{y^2\omega}\right); \frac{4\rho k}{\sigma_{\omega 2} c d y^2}\right] \quad (3.14)$$

$$cd = \max\left(\frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}; 10^{-20}\right) \quad (3.15)$$

k - ω SST modelinde iki model arasındaki geçişi sağlamak için katsayılar şöyle hesaplanmaktadır:

$$\varphi = \varphi_1 F_1 + \varphi_2 (1 - F_1) \quad (3.16)$$

Menter (1994), katsayılar üzerinde değişiklikler yapmıştır ve sonuçta katsayılar şu şekilde hesaplanmaktadır:

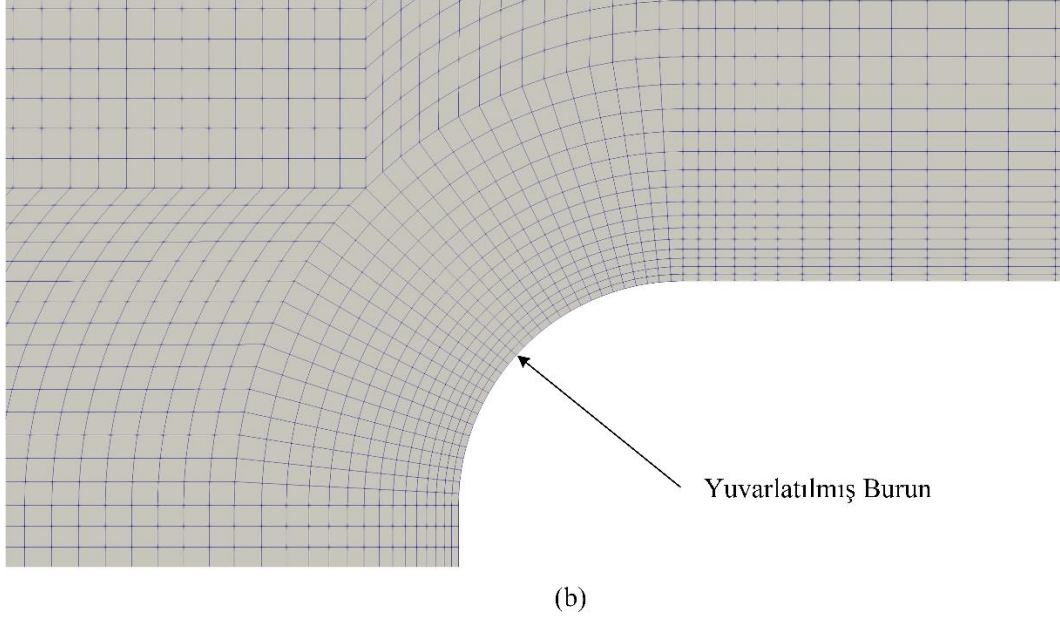
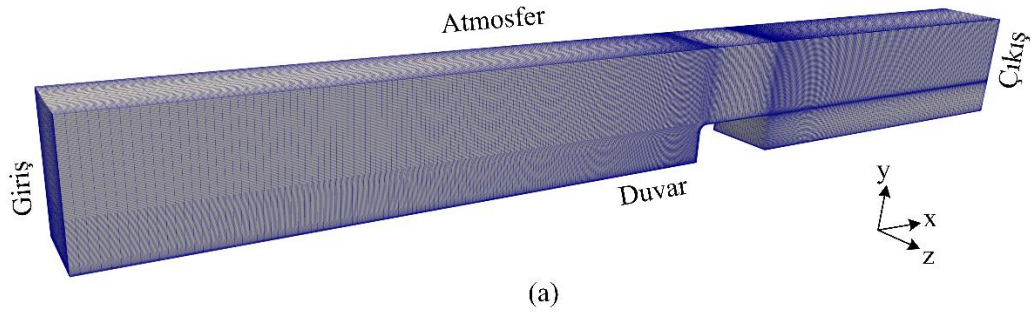
$$\beta_k = 0.09, a_1 = 0.31, \kappa = 0.41, \sigma_{cd} = 0.856 \quad (3.17)$$

$$\sigma_{k1} = 1.176, \sigma_{\omega 1} = 2, \beta_{\omega 1} = 0.075, \gamma_1 = \frac{\beta_{\omega 1}}{\beta_k} - \frac{\sigma_{\omega 1} \kappa^2}{\sqrt{\beta_k}} \quad (3.18)$$

$$\sigma_{k2} = 1, \sigma_{\omega 2} = 1.168, \beta_{\omega 2} = 0.0828, \gamma_2 = \frac{\beta_{\omega 2}}{\beta_k} - \frac{\sigma_{\omega 2} \kappa^2}{\sqrt{\beta_k}} \quad (3.19)$$

3.3.2. Hesaplama Ağı ve Sınır Koşulları

Bu çalışmada açık kaynak kodlu bir yazılım olan OpenFOAM yazılımı kullanılmıştır. Kanal geometrisi oluşturulurken OpenFoam uygulamalarından olan blockMesh, çözüm için ise yine OpenFOAM çözücülerinden olan interFoam çözücüsü kullanılmıştır ki bu çözücü RONS denklemlerini çözmekte olup su yüzü belirlenirken VOF yöntemini kullanmaktadır. Kanalın ağ yapısı ve sınırlar Şekil 3.5'te verilmiştir. Kanaldaki akım serbest yüzeyli akım olduğu için kanal üst kısmı atmosfer sınır koşulu olarak; giriş, çıkış ve atmosfer harici tüm yüzeyler duvar olarak tanımlanmış ve duvarlar için duvar sınır koşulları kullanılmıştır. Sınır koşulları Çizelge 3.1'de verilmiştir. İki boyutlu çözümler için, yan duvarlar 'empty' olarak tanımlanmıştır.



Şekil 3.5. a) Hesaplama ağı ve sınırlar b) yuvarlatılmış burun etrafında ortogonal ağı görünüşü

Çizelge 3.1. Sınır koşulları.

	Giriş	Çıkış	Atmosfer	Duvarlar
alpha.water	variableHeight FlowRate	zeroGradient	inletOutlet	zeroGradient
k	fixedValue	inletOutlet	inletOutlet	kqRWallFunction
omega	fixedValue	inletOutlet	inletOutlet	omegaWallFunction
nut	Calculated	calculated	calculated	nutkWallFunction
p_rgh	zeroGradient	zeroGradient	totalPressure	fixedFluxPressure
U	variableHeight FlowRate InletVelocity	zeroGradient	pressureInlet OutletVelocity	noSlip

k- ω SST türbülans modelinde başlangıç koşullarını belirlemek için k ve ω değerleri aşağıdaki denklemlerden hesaplanmıştır:

$$k = \frac{3}{2} (U * I)^2 \quad (3.20)$$

$$\omega = \frac{\sqrt{k}}{C_{\mu}^{0.25} * L} \quad (3.21)$$

Burada k türbülans kinetik enerjisini (m^2/s^2), ω spesifik yayılma hızını (s^{-1}), U girişteki ortalama hızı (m/s), I türbülans yoğunluğunu (%5), L türbülans karışım uzunluğunu (m) ifade etmekte; C_{μ} ise türbülans model sabiti olup CFD problemlerinde genellikle 0.09 olarak ele alınmaktadır.

```
ddtSchemes
{
    default      Euler;
}
gradSchemes
{
    default      Gauss linear;
}
divSchemes
{
    default      none;
    div(rhoPhi,U)  Gauss linearUpwind  grad(U);
    div(phi,alpha)  Gauss vanLeer;
    div(phirb,alpha)  Gauss linear;
    "div(phi,k|omega)"  Gauss upwind;
    div(((rho*nuEff)*dev2(T(grad(U))))) Gauss linear;
}
laplacianSchemes
{
    default      Gauss linear corrected;
}
interpolationSchemes
{
    default      linear;
}
snGradSchemes
{
    default      corrected;
}
wallDist
{
    method meshWave;
}
```

Şekil 3.6. 'fvSchemes' dosyası.

OpenFOAM’da çözüm için kullanılan sayısal şemalar ‘fvSchemes’ dosyasında belirtilir. Bu çalışmada kullanılan ‘fvSchemes’ dosyası Şekil 3.6’da verilmiştir. Mevcut çalışmada OpenFOAM-4.1 sürümü kullanılmış ve çözümler paralel hesaplama teknikleriyle elde edilmiştir. Paralel hesaplamada ağ, makinenin çekirdek sayısı kadar veya daha az parçaya ayrılır. Tüm çekirdekler kendi arasında haberleşir ve eş zamanlı olarak her çekirdek kendi sorumluluğundaki ağ kısmında hesaplamaları yapar. Hesaplama süreci bitince tüm parçalar ve her parçadaki hesaplanmış veriler yeniden birleştirilir. Bu yöntemde ağı parçalara ayırmanın birkaç yolu olup bu çalışmada ‘simple’ metodu kullanılmış ve ağ eşit parçalara ayrılmıştır. Paralel hesaplama sayesinde çözüm süresi önemli derecede azalmaktadır.

Bu çalışmadaki sayısal benzetimler Türk Ulusal Bilim e-Altyapısı (TRUBA) üzerinde paralel hesaplama teknikleri ile 56 çekirdek kullanılarak yapılmıştır. TRUBA’da hesaplama yapılması için kullanılan örnek bir ‘SLURM’ betik dosyası Şekil 3.7’de verilmiştir.

```
#!/bin/bash
#SBATCH -p hamsi
#SBATCH -A hyaban
#SBATCH -J R4
#SBATCH -N 1
#SBATCH --ntasks-per-node=56
#SBATCH --time=03-00:00:0
#SBATCH --workdir=/truba/home/hyaban/R4/
#SBATCH --output=/truba/home/hyaban/R4/slurm-%j.out
#SBATCH --error=/truba/home/hyaban /R4/slurm-%j.err
#SBATCH --mail-user=hyaban02@gmail.com
#SBATCH --mail-type=ALL

source          $HOME/OpenFOAM/OpenFOAM-4.1/etc/bashrc          WM_LABEL_SIZE=64
WM_COMPILER_TYPE=system FOAMY_HEX_MESH=yes

chmod +x *

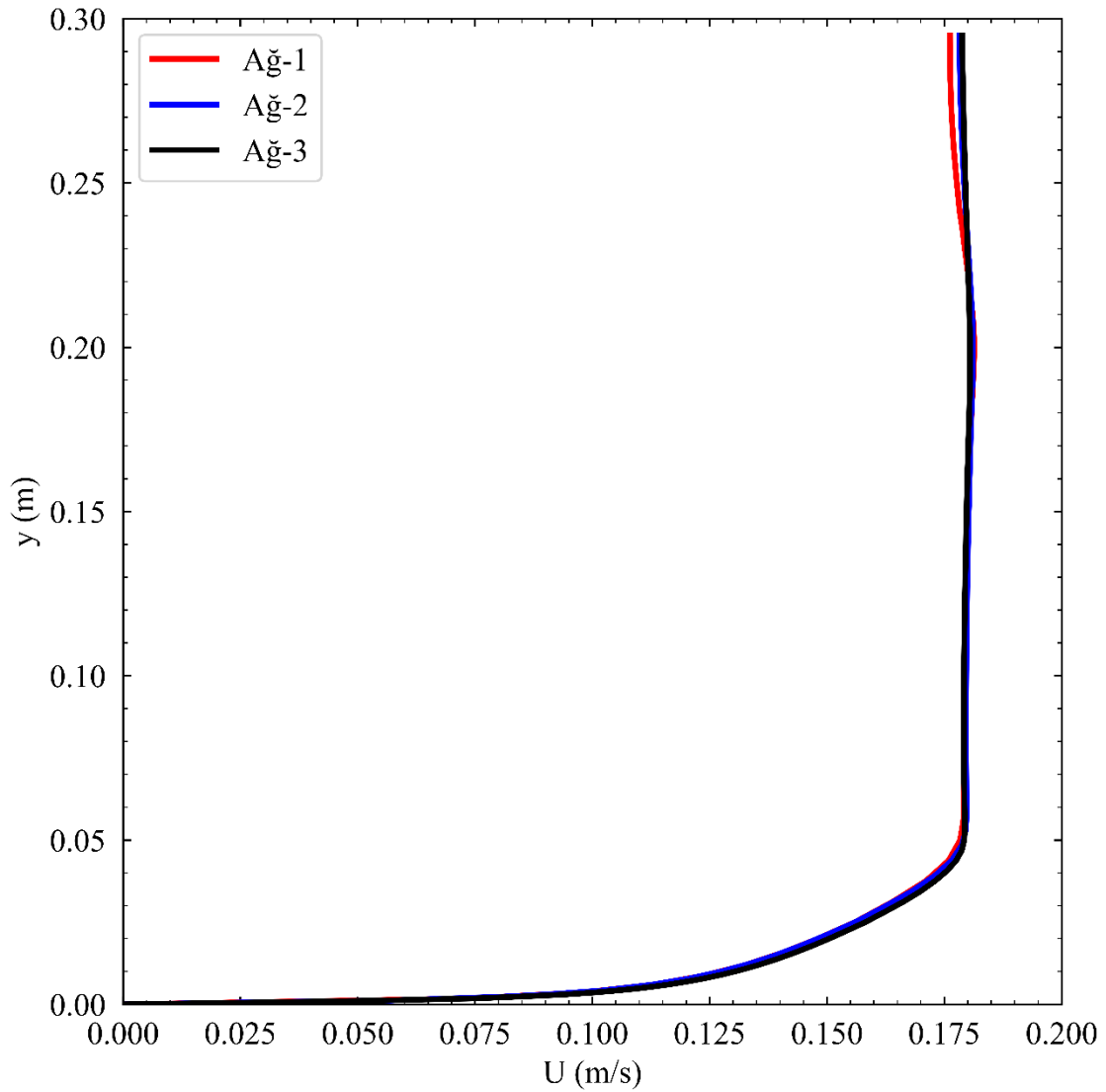
./Allrun
```

Şekil 3.7. ‘SLURM’ betik dosyası.

Hesaplama ağı için 3 farklı ağ yapısı hazırlanmış ve en uygun olanı belirlenmeye çalışılmıştır. Her durum için ağdaki hücre sayısı değiştirilmiş olup hız profilleri ve ağ özellikleri sırasıyla Şekil 3.8 ve Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Ağların özellikleri.

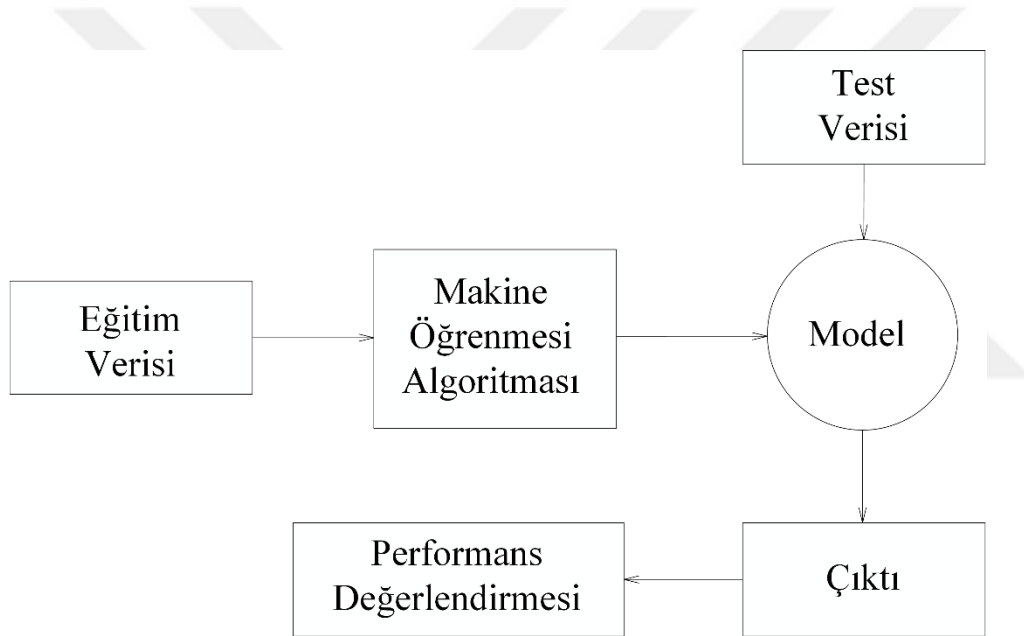
	Ağ-1	Ağ-2	Ağ-3
Hücre Sayısı	484978	1117920	3771450
Minimum Hücre Hacmi	2.22258e-08	1.00125e-08	3.02424e-09
Maksimum Hücre Hacmi	4.34575e-05	1.79323e-05	5.40027e-06
Maksimum Çarpıklık	0.530793	0.528936	0.53368
Maksimum Eğiklik	43.9473	44.1964	44.4664
Hesaplama Süresi (dk)	37.25	135.65	896.2



Şekil 3.8. Farklı ağlar için hız profilleri.

3.4. Makine Öğrenmesi

Son yıllarda hemen her alanda başarılı sonuçlar veren Makine Öğrenmesi (Machine Learning-ML) yöntemleri, herhangi bir veri seti üzerinde hızlı ve başarılı sonuçlar vermesi bakımından etkin bir şekilde kullanılmakta olup hidrolik çalışmalarda da yüksek doğruluklu sonuçlar vermiştir. Makine öğrenmesi sayesinde çok sayıdaki veriler daha kolay analiz edilebilir, eksik veri olması durumunda bu veriler tamamlanabilir, mevcut veriler ele alınarak mevcut olmayan veriler tahmin edilebilir, deneysel çalışmalarla elde edilmesi çok maliyetli olan veya mümkün olmayan verilerin tahmininde bulunulabilir. Makine öğrenmesi için örnek bir akış şeması Şekil 3.9’da verilmiştir.



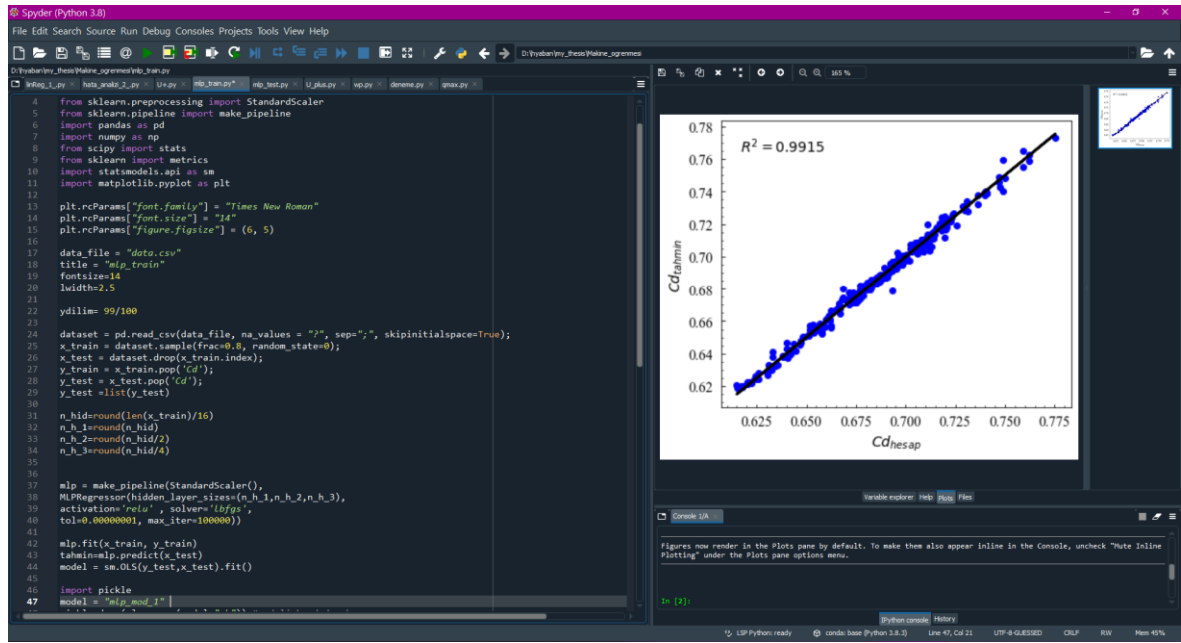
Şekil 3.9. Makine öğrenmesi akış şeması.

Makine öğrenmesinde, veri seti eğitim ve test verisi olmak üzere iki parçaya ayrılır. Ardından eğitim verileri belirlenen makine öğrenmesi yöntemine göre bir süreçten geçirilir ki bu süreçte öğrenme gerçekleşir. Test verileri bu öğrenme sürecinden sonra oluşturulan modele gönderilir ve bir çıktı elde edilir. Alınan bu çıktı sonucunda ML modelinin tahmin başarısı ölçülür.

Bu çalışmada 3 makine öğrenmesi yöntemi kullanılmıştır. Yöntem seçimi yapılırken ele alınan veri tipi önemli olup sayısal çalışmalarda regresyon modelleri ve yapay sinir ağları

çokça kullanılmaktadır. Yapay sinir ağları insan beyninin çalışma şekline esinlenilerek oluşturulmuş yapılardır.

Bu çalışmadaki tüm analiz ve görselleştirmeler, ‘Python 3.8’ sürümünde ve ‘Spyder’ arayüzünde, ‘SciPy’, ‘scikit-learn’, ‘pandas’, ‘NumPy’ ve ‘Matplotlib’ kütüphaneleri kullanılarak yapılmıştır. ‘Spyder’ arayüzünün örnek bir görüntüsü Şekil 3.10’da verilmiştir.



Şekil 3.10. Spyder arayüzü.

3.4.1. Lineer Regresyon Yöntemi

Lineer Regresyon yöntemi, bağımlı değişkenin bağımsız değişkene/değişkenlere göre nasıl değiştiğini gösterir ve tek bir bağımsız değişken olması durumunda Basit Lineer Regresyon, birden çok bağımsız değişken olması halinde Çoklu Doğrusal Regresyon olarak adlandırılır. Bu çalışmada Çoklu Doğrusal Regresyon kullanılmıştır. Ele alınan bağımsız değişkenlere göre bağımlı değişken (C_d) tahmin edilmeye çalışılmış ve değişkenler arasındaki ilişki irdelenmiştir. Lineer Regresyon yönteminde bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında doğrusal bir ilişki olduğu kabul edilir. Kullanımı ve yorumlaması basit

olmakla beraber eğer ki veriler arasında doğrusal bir ilişki söz konusu değilse model performansı düşecektir.

3.4.2. Polinomal Regresyon Yöntemi

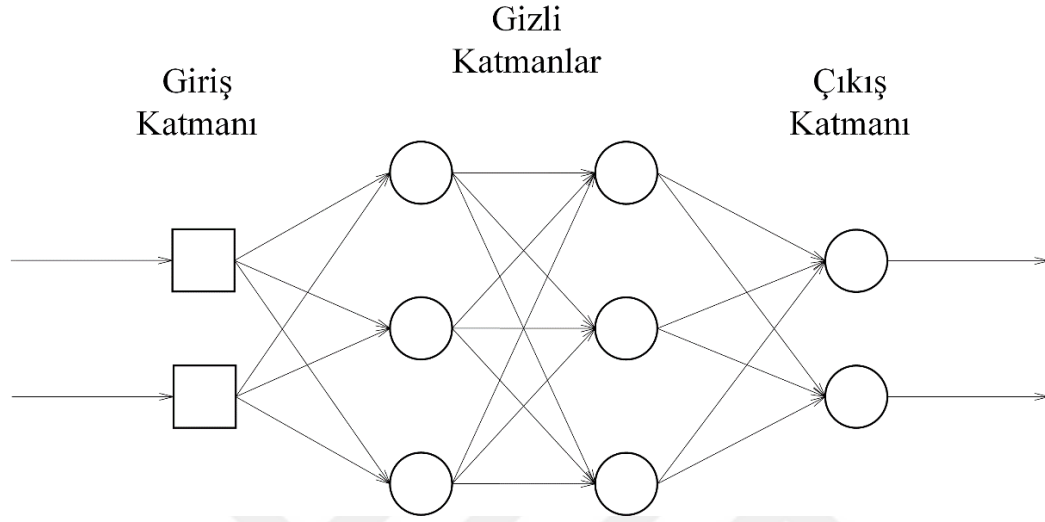
Polinomial regresyon veri setindeki bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkinin eğrisel olarak modellendiği bir regresyon algoritmasıdır. Değişkenler arasındaki doğrusal ilişkinin yeterli seviyede olmadığı verilerde kullanılabilir. Burada bağımsız değişken/değişkenler, önce derecesi kullanıcı tarafından belirtilen bir polinom fonksiyonundan geçirilir ve ardından regresyon analizine tabi tutulur. Bu yöntemde değişkenler arasındaki doğrusal olmayan ilişki incelenir. Değişkenler arasındaki eğrisel ilişki ne kadar güçlüyse model performansı da o kadar yüksek olacaktır. Bu çalışmada 4 farklı polinom derecesi belirlenerek Polinomal Regresyon Yöntemi denenmiştir.

3.4.3. Çok Katmanlı Algılayıcı (Multi Layer Perceptron-MLP)

Çok Katmanlı Algılayıcı (Multi Layer Perceptron-MLP) bir girdi katmanına, bir çıktı katmanına ve en az bir tane de gizli katmana sahip olan yapay sinir ağı türüdür. MLP yönteminde başlangıçta nöronlar arasındaki bağlantılara rastgele ağırlıklar atanır. Her veri bir sonraki katmana bu ağırlıklar ile çarpılarak aktarılır. Daha sonra bu çarpımlar nöronlardaki bir aktivasyon fonksiyonundan geçirilip bir sonraki katmana gönderilir. Çıkış katmanından sonra hatalar incelenip başa dönülür, ağırlıklar güncellenir ve bir önceki aşama tekrarlanır (Geriye yayılım algoritması). Her iterasyonda hata miktarının azalması beklenir ve ağ eğitimi test başarısında iyileşme olmadığında durdurulur. Böylece ağ eğitimi tamamlanmış olur. MLP'nin örnek yapısı Şekil 3.11'de verilmiştir.

MLP yönteminde katman ve nöron sayısı kullanıcı tarafından belirlenip bu konuda herhangi bir kısıtlama yoktur; ancak çözüm süresi bakımından yapılan seçimler, doğruluk ve zaman kavramları açısından değerlendirilip optimum bir düzey yakalanmalıdır. Aktivasyon fonksiyonu ise nörona gelen toplam girdiye bakarak nöronun aktivitesine karar verdiği için önem arz etmektedir. 'Sigmoid', 'ReLU', 'tanh', 'Softmax' gibi birçok

aktivasyon fonksiyonu çeşidi olup seçim yapılırken nelere dikkat edileceği hususunda net bir bilgi ortaya konulmamıştır.



Şekil 3.11. Örnek bir MLP yapısının şematik gösterimi.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde deneysel sonuçlarla sayısal sonuçlar kıyaslanmış, sayısal model doğrulanmış ve sayısal benzetimler yapılarak farklı savak geometrisi ve debiler için savağın debi katsayısı hesaplanmıştır. Debi katsayısı ve savak geometrisi arasındaki ilişki incelenmiş ve 2 yeni bağıntı türetilmiştir. Ayrıca makine öğrenmesi yöntemleriyle de debi katsayısı tahmin edilmeye çalışılmış ve sonuçlar gösterilmiştir.

4.1. Sayısal Sonuçlar

Bu bölümde elde edilen sayısal sonuçlar sunulmuş, sayısal ve deneysel sonuçlar karşılaştırılarak sayısal model doğrulanmış, etkili ve etkisiz parametreler belirlenmiş ve farklı savak geometrisi ve debiler için benzetimler yapılarak debi katsayıları elde edilmiştir.

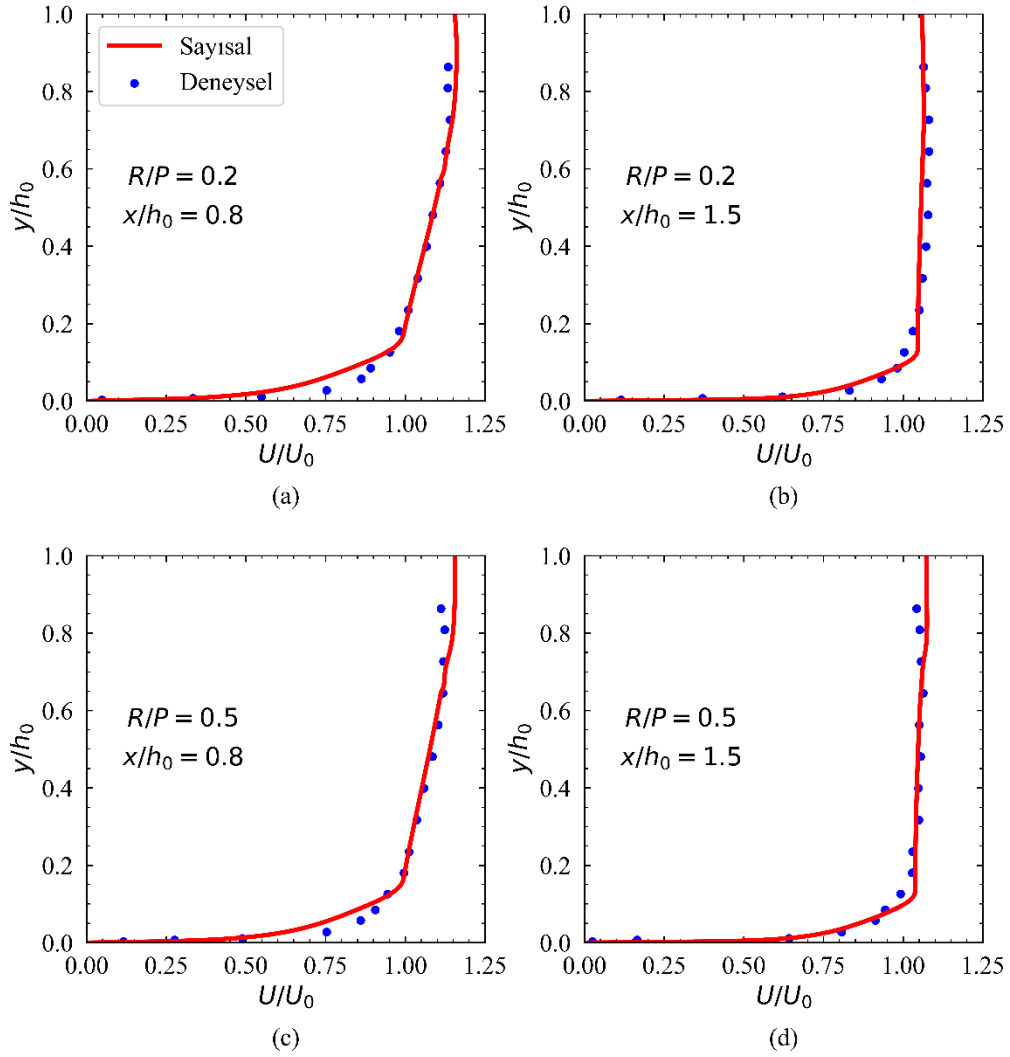
4.1.1. Sayısal Modelin Doğrulanması

Çalışmanın bu kısmında sayısal modelin doğrulanması için deneysel çalışmalar yapılmıştır. $Q=0.0465 \text{ m}^3/\text{s}$ debi, $R/P=0.2$ ve $R/P=0.5$ ($P=20 \text{ cm}$) için yapılan deneylerde su yüzü profilleri çıkarılmış; $x/h_0=0.8$ ve $x/h_0=1.5$ istasyonlarında ADH kullanılarak hız ölçümleri yapılmış ve hızlar U/U_0 bağıntısı ile yükseklikler ise y/h_0 bağıntısı ile boyutsuzlaştırılmıştır. Burada y kanal tabanından yüksekliği, U mevcut noktada 180 saniye boyunca ölçülen hızların ortalamasını, h_0 kanal girişindeki su derinliğini ve $U_0=q/h_0$ bağıntısından (q =birim debi) elde edilen kanal girişindeki ortalama hızı ifade etmektedir. Ayrıca deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki uyumu incelemek adına, farklı R/P oranları ve ölçüm istasyonlarında hız ve su yüzü profilleri için Kök Ortalama Karesel Hata (Root Mean Squared Error-RMSE) değerleri hesaplanmıştır. RMSE, Denklem 4.1'deki gibi hesaplanmakta olup farklı istasyon ve R/P oranlarında hesaplanan RMSE değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Bu çizelgeye bakıldığında hataların sıfıra yakın ve kabul edilebilir düzeyde olduğu görülmüştür. Hız profilleri Şekil 4.1'de, su yüzü profilleri ise Şekil 4.2'de verilmiştir.

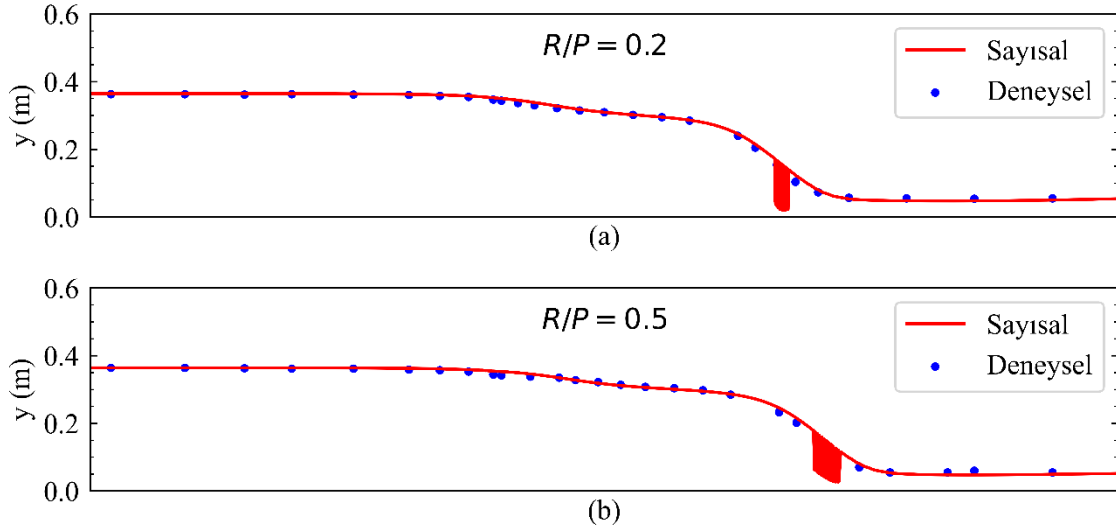
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |U_{deneysel} - U_{sayisal}|^2} \quad (4.1)$$

Çizelge 4.1. Hesaplanan RMSE değerleri.

	Hız profilleri		Su yüzü profilleri
	x/h ₀ =0.8	x/h ₀ =1.5	
R/P=0.2	0.021316	0.022018	0.007195
R/P=0.5	0.017688	0.040848	0.006472



Şekil 4.1. a) R/P=0.2 ve x/h₀=0.8, b) R/P=0.2 ve x/h₀=1.5, c) R/P=0.5 ve x/h₀=0.8, d) R/P=0.5 ve x/h₀=1.5



Şekil 4.2. a) $R/P=0.2$ b) $R/P=0.5$ için elde edilen sayısal ve deneysel su yüzü profilleri.

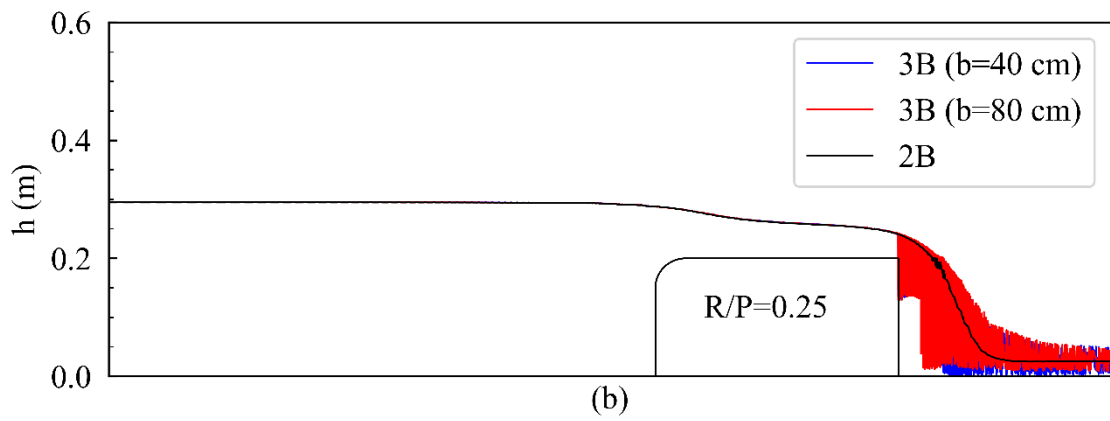
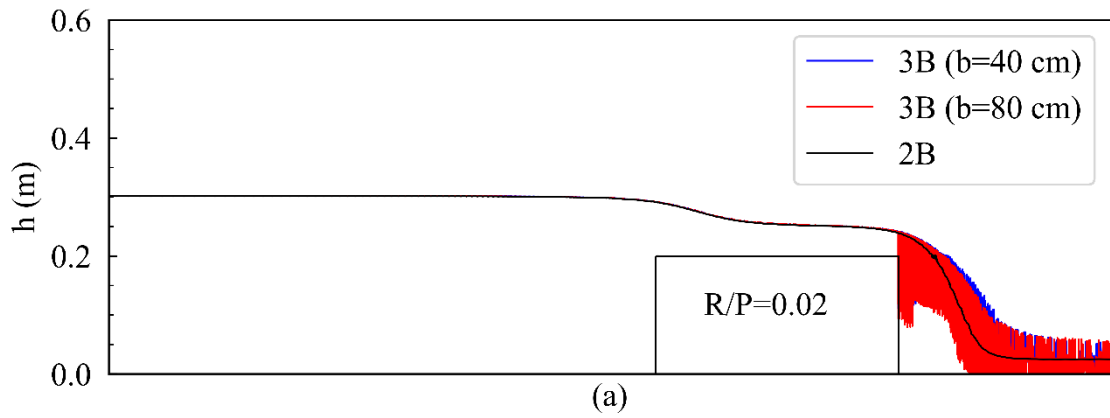
Elde edilen sonuçlara bakıldığında; sayısal sonuçların deneysel sonuçlarla oldukça uyumlu olduğu, sayısal ve deneysel hız profilleri arasındaki uyumun kanal tabanından uzaklaştıkça arttığı, kanal tabanına yakın bölgelerde ise daha az uyum olduğu görülmüştür. Debi katsayısının doğrudan savak üstü su yüksekliğiyle ilişkili olduğu da göz önünde bulundurulduğunda mevcut sayısal modelin savak üstü su yüksekliğini ve dolayısıyla debi katsayısını hesaplamadaki başarısının yüksek olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca savağın mansabında bir çevrinti bölgesi olduğu görülmüştür. Sayısal su yüzü profillerinde savak mansabındaki bu etkiler Şekil 4.2’de görülmektedir.

4.1.2. 2B ve 3B Çözümlerin Karşılaştırılması

Bu bölümde farklı R/P oranları ve kanal genişlikleri ele alınarak 2 boyut (2B) ve 3 boyut (3B) kıyaslaması yapılmıştır. Su yüzü profilleri Şekil 4.3’te parametreler ve elde edilen su yükseklikleri Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda memba su yüksekliğinin kanal genişliğinden etkilenmediği, 2B ve 3B benzetimlerde elde edilen su yükseklikleri arasında ihmal edilebilir (10^{-4} m mertebelerinde) bir fark olduğu görülmüş ve çalışmaya 2B benzetimler ile devam edilebileceği kanaatine varılmıştır.

Çizelge 4.2. 2B ve 3B benzetimler için kullanılan parametreler ve elde edilen su yükseklikleri.

R (cm)	P (cm)	R/P	L (cm)	q (m ³ /s/m)	B (cm)	h (m)
0.4	20	0.02	0.4	0.05	-	0.1012
0.4	20	0.02	0.4	0.05	0.4	0.1015
0.4	20	0.02	0.4	0.05	0.8	0.1013
5	20	0.25	0.4	0.05	-	0.0950
5	20	0.25	0.4	0.05	0.4	0.0952
5	20	0.25	0.4	0.05	0.8	0.0953



Şekil 4.3. a) R/P=0.02

b) R/P=0.25

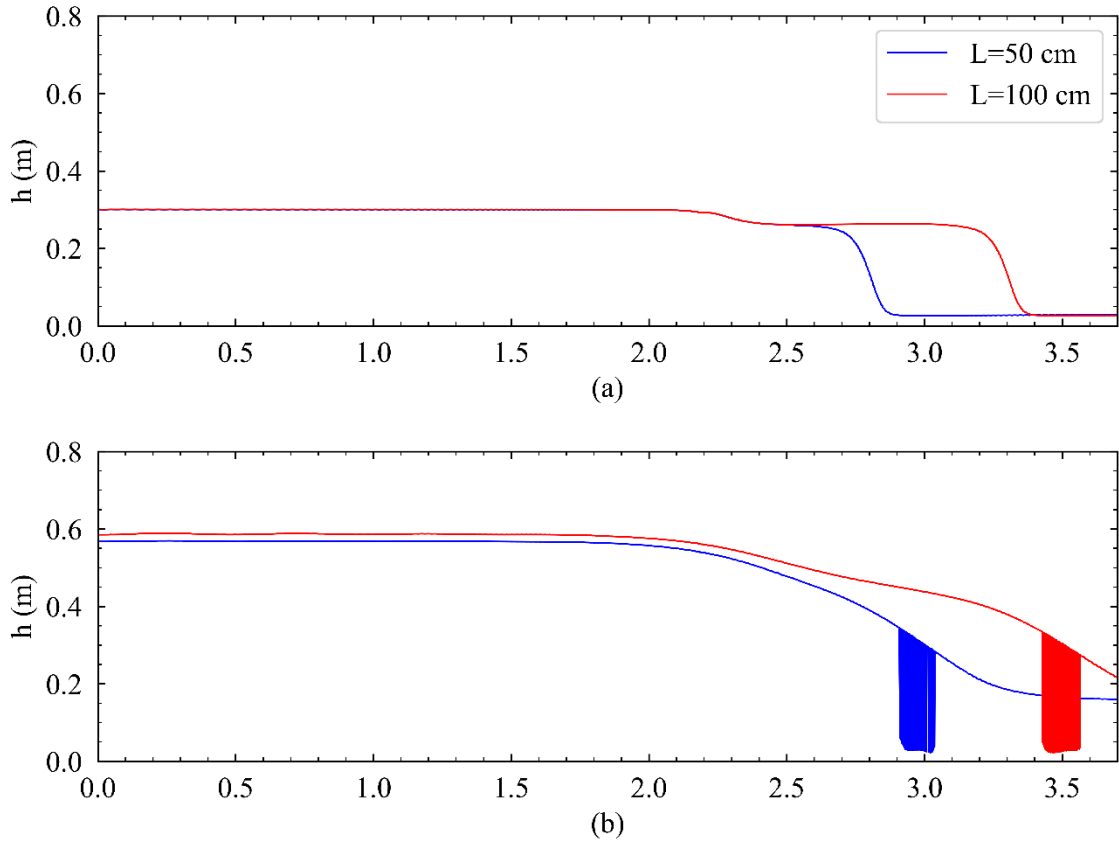
Çizelge 4.3. L, L_{memba}, L_{mansap} ve H_k değişimlerinin su seviyesindeki etkisi.

L (m)	L _{memba} (m)	L _{mansap} (m)	H _k (m)	q (m ³ /s/m)	h (m)
0.4	1.75	1	0.85	0.3125	0.3783
0.4	1.75	1	1	0.3125	0.3780
0.4	1.75	1.3	1	0.3125	0.3781
0.4	2	1.3	1	0.3125	0.3781
0.4	2.2	1.3	1	0.3125	0.3780
0.75	2.2	1.3	1	0.3125	0.3990
0.8	2.2	1.3	1	0.3125	0.3994
0.85	2.2	1.3	1	0.3125	0.3998
0.9	2.2	1.3	1	0.3125	0.4006

Çizelge 4.4. R, P ve R/P değişimlerinin su seviyesindeki etkisi.

R (cm)	P (cm)	R/P	q (m ³ /s/m)	h (m)
5	20	0.25	0.0625	0.1401
7.5	30	0.25	0.0625	0.1416
7.5	15	0.5	0.0625	0.1380
10	15	0.667	0.0625	0.1381
10	20	0.5	0.0625	0.1400
1	15	0.067	0.2375	0.3311
2	30	0.067	0.2375	0.3445
10	30	0.333	0.2375	0.3314

Kanaldan minimum debi ($q=0.0375 \text{ m}^3/\text{s/m}$) geçerken, savak uzunluğunun $L=40 \text{ cm}$ ve $L=80 \text{ cm}$ olması durumunda su seviyesinde değişiklik gözlenmemiştir. Ancak maksimum debi ($q=0.3125 \text{ m}^3/\text{s/m}$) için savak uzunluğundaki bu değişiklik su seviyesinde belirgin bir fark yaratmaktadır. Ayrıca büyük debiler için su yüzünde dalgalanmalar görülmüştür. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.5'te verilmiştir (Bu kısımda $R=0.75 \text{ cm}$ ve $P=20 \text{ cm}$ alınmıştır).



Şekil 4.5. a) $q=0.0375 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ b) $q=0.3125 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

4.1.4. Sayısal Benzetimler

Bu bölümde boyut analizi ve daha önceki çalışmaların sonuçları da göz önünde bulundurularak debi katsayısı için önemli olan parametrelerin kombinasyonlarından oluşan bir veri seti hazırlanmış ve sayısal benzetimler yapılarak her kombinasyon için debi katsayısı hesaplanmıştır. Farklı debiler, savak uzunluğu L , savak yüksekliği P ve yuvarlatma yarıçapı R için seçilen değerler Çizelge 4.5'te verilmiştir. Her parametre için 7 değer belirlenmiş ve tüm kombinasyonları içeren bir veri seti hazırlanmıştır ($7^4=2401$ adet). Bu benzetimlerde kararlı akım koşullarını sağlamak amacıyla kanal girişinde parabolik hız tanımlanmış ve bu sayede hesaplama maliyeti düşürülmüştür.

Çizelge 4.5. Sayısal benzetimlerde ele alınan parametreler.

q (m ³ /s/m)	R (cm)	L (cm)	P (cm)
0.0375	0.5	50	15
0.0625	1	55	17.5
0.0875	2	65	20
0.125	3.5	77.5	25
0.1875	5	85	30
0.2375	7.5	92.5	35
0.3125	10	100	37.5

Savağın geniş başlıklı savak olabilmesi için, savak üstü su yüksekliğinin savak uzunluğuna oranının $0.083 \leq h/L \leq 0.4$ aralığını sağlaması gerekir. Ayrıca R/P oranlarına göre savaklar $0 \leq R/P \leq 0.094$ için hafif yuvarlak, $0.094 \leq R/P \leq 0.250$ için orta derecede yuvarlak, $0.250 \leq R/P \leq 1$ için çok yuvarlak olarak sınıflandırılabilirler (Ramamurthy vd., 1988). Tüm kombinasyonlar için benzetimler yapıp savağın geniş başlıklı sayılması kriterine göre kusurlu sonuçlar ayıklanınca geriye 1547 adet sonuç kalmıştır. Kalan sonuçlar, içerisinde tüm yuvarlaklık derecelerini barındırmakta olup geniş başlıklı savak kriterini karşılamaktadır ($0.083 \leq h/L \leq 0.4$).

4.2. Debi-Derinlik Denkleminin Geliştirilmesi

Çalışmanın bu bölümünde $0.0133 \leq R/P \leq 0.6667$, $1.4038 \leq L'/P \leq 10.1888$ ve $0.2672 \leq h/P \leq 2.6087$ aralıkları için elde edilen C_d 'lerden yola çıkarak Python 3.8'de Regresyon Analizi yapılmış ve bu analiz sonucunda R/P, L'/P ve h/P parametrelerine dayalı 2 yeni C_d bağıntısı türetilmiştir. Teorik olarak C_d , Denklem 4.2'deki formülden hesaplanmıştır. Burada q birim debiyi, g yerçekimi ivmesini ve h savak üstü su yüksekliğini ifade etmektedir.

$$C_d = \frac{q}{\sqrt{\frac{8}{27} * g * h^3}} \quad (4.2)$$

Çalışmanın sonunda elde edilen her iki bağıntıda da R yuvarlatma yarıçapını, P savak yüksekliğini, h savak üstü su yüksekliğini, $L' = L - R$ değerini (L=savak uzunluğu) ifade etmektedir.

$$C_d = 0.12 \frac{R}{P} - 0.003 \frac{L'}{P} + 0.05 \frac{h}{P} + 0.635 \quad (4.3)$$

Denklem 4.3'te verilen 1.bağıntı için korelasyon matrisi Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6. 1.bağıntı için korelasyon matrisi.

Parametre	R/P	L'/P	h/P	C _d
R/P	1.0000	0.2023	0.1675	0.6777
L'/P	0.2023	1.0000	0.6916	0.4272
h/P	0.1675	0.6916	1.0000	0.6599
C _d	0.6777	0.4272	0.6599	1.0000

Denklem 4.4'te ise 2.bağıntı görülmekte olup bu bağıntı için korelasyon matrisi Çizelge 4.7'de verilmiştir. 2. bağıntıda etkili parametrelerin üsleri iteratif yöntemle belirlenmiştir.

$$C_d = 2.29 \left(\frac{R}{P} \right)^{0.01} - 0.23 \left(\frac{L'}{P} \right)^{0.05} + 0.05 \frac{h}{P} - 1.35 \quad (4.4)$$

Çizelge 4.7. 2.bağıntı için korelasyon matrisi.

Parametre	$(R/P)^{0.01}$	$(L'/P)^{0.05}$	h/P	C _d
$(R/P)^{0.01}$	1.0000	0.1624	0.1350	0.7980
$(L'/P)^{0.05}$	0.1624	1.0000	0.6748	0.4105
h/P	0.1350	0.6748	1.0000	0.6599
C _d	0.7980	0.4105	0.6599	1.0000

Elde edilen bu bağıntıların doğruluğu, çeşitli yöntemlerle hesaplanan hatalar üzerinden irdelenmiştir. Denklem 4.5-4.6 ve 4.7'da sırasıyla Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error-MAE), Ortalama Karesel Hata (Mean Squared Error-MSE) ve Kök Ortalama Karesel Hata (Root Mean Squared Error-RMSE) verilmiştir. Tüm denklemlerde $C_{d\text{hesap}}$ hesaplanan C_d 'yi, $C_{d\text{tahmin}}$ yeni bağıntıdan elde edilen C_d 'yi, n ise toplam veri sayısını ifade etmektedir.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |C_{d_{hesap}} - C_{d_{tahmin}}| \quad (4.5)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |C_{d_{hesap}} - C_{d_{tahmin}}|^2 \quad (4.6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |C_{d_{hesap}} - C_{d_{tahmin}}|^2} \quad (4.7)$$

Ayrıca hesaplanan ve tahmin edilen C_d 'ler arasında Pearson korelasyon katsayısı (Pearson K.K.) ve R^2 değerleri de değerlendirme metrikleri olarak kullanılmış ve her iki bağıntı için elde edilen sonuçlar Çizelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Elde edilen bağıntılar için değerlendirme metriklerinin çıktısı.

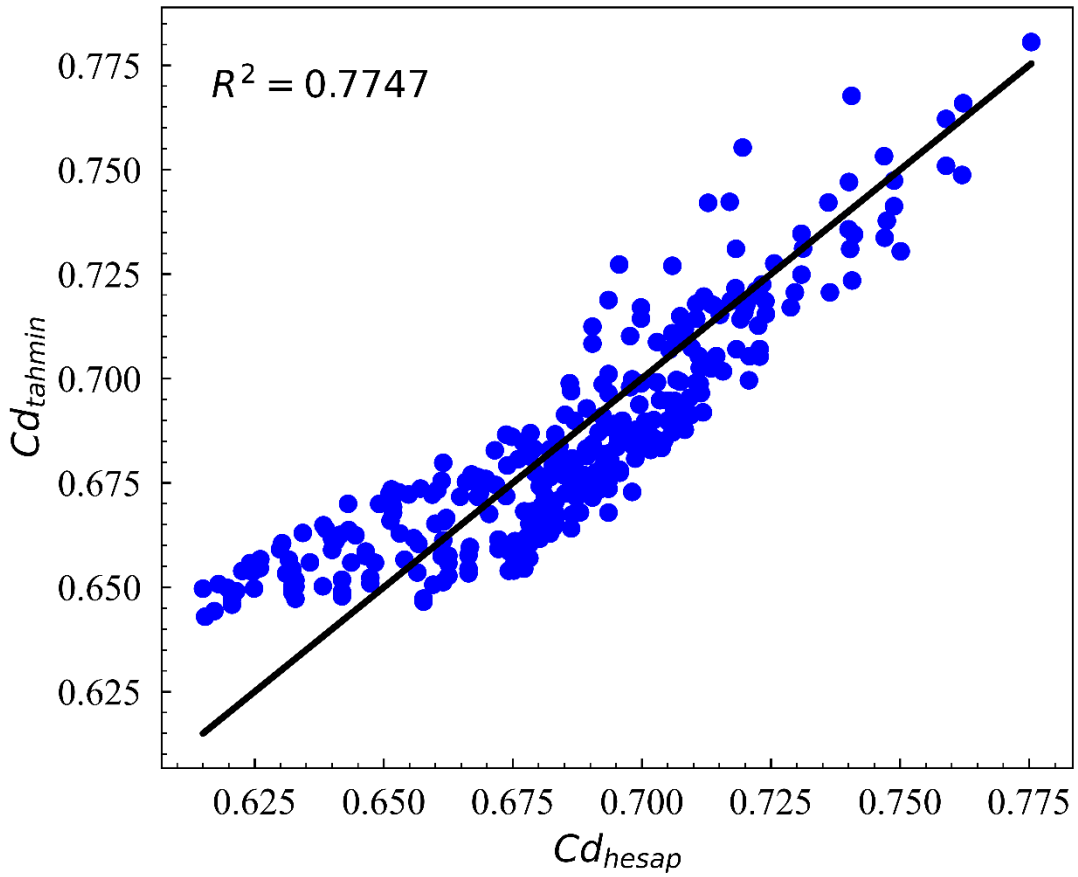
	1.Bağıntı	2.Bağıntı
MAE	0.012972	0.005516
MSE	0.000234	0.000045
RMSE	0.015283	0.006701
Pearson K.K.	0.882093	0.980474
R^2	0.776503	0.957037

4.3. Makine Öğrenmesi Modelinin Geliştirilmesi

Bu kısımda, 1547 adetlik veri seti üzerinde, makine öğrenmesi yöntemleriyle tahmin edilen ve hesaplanan debi katsayıları arasındaki ilişki incelenmiş, yöntemlerin tahmin etmedeki başarısı bazı metrikler sayesinde ölçülmüş ve sonuçlar sunulmuştur. Debi katsayısı tahmininde, tüm yöntemlerde, girdi olarak R/P, L'/P ve h/P boyutsuz parametreleri kullanılmıştır.

4.3.1. Lineer Regresyon Sonuçları

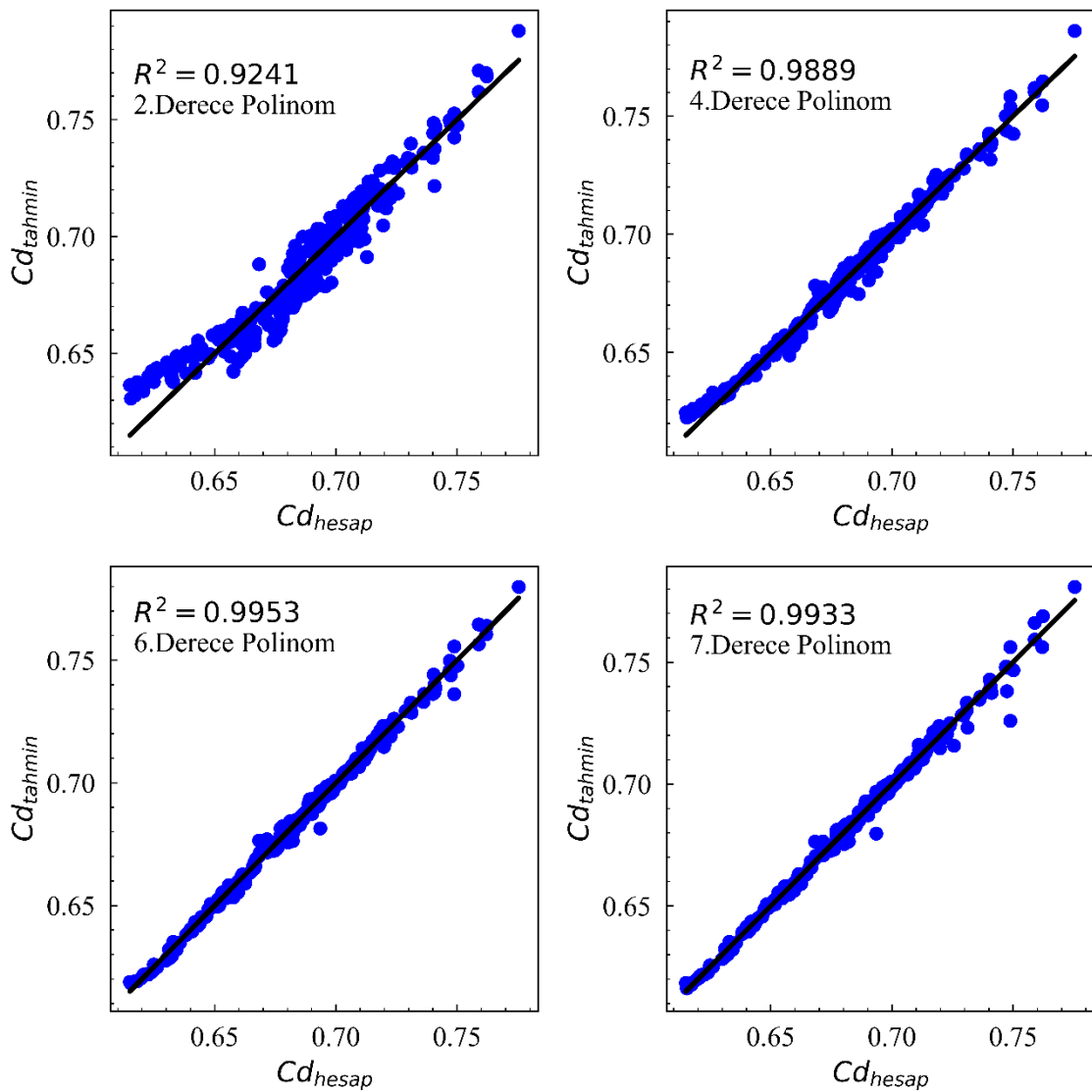
Bu bölümde veri setinin %80'i eğitim, %20'si test için ayrılmış olup Lineer Regresyon yöntemiyle debi katsayısı tahmin edilmeye çalışılmıştır (Şekil 4.6). Analiz sonucunda $R^2=0.7747$, $MAE=0.0127$, $MSE=0.0002$ ve $RMSE=0.0149$ olarak bulunmuştur. Bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkinin doğrusal olması Lineer Regresyon yönteminin başarısını artıracaktır. Lineer Regresyon çıktısına ve performans sonuçlarına bakıldığında değişkenler arasındaki ilişkinin doğrusal olmadığı görülmüştür.



Şekil 4.6. Lineer regresyon yöntemi sonuçları.

4.3.2. Polinomal Regresyon Sonuçları

Bu bölümde veri seti %80'i eğitim, %20'si test olarak ayrılmış ve farklı dereceye sahip polinom fonksiyonlarından geçirilip regresyon analizi yapılmıştır. Sonuçlara bakıldığında (Şekil 4.7 ve Çizelge 4.9) en iyi tahminin 6.dereceden polinomal regresyon sonucunda yapıldığı görülmektedir. Bu durumda değişkenler arasında eğrisel bir ilişki olduğu görülmektedir.



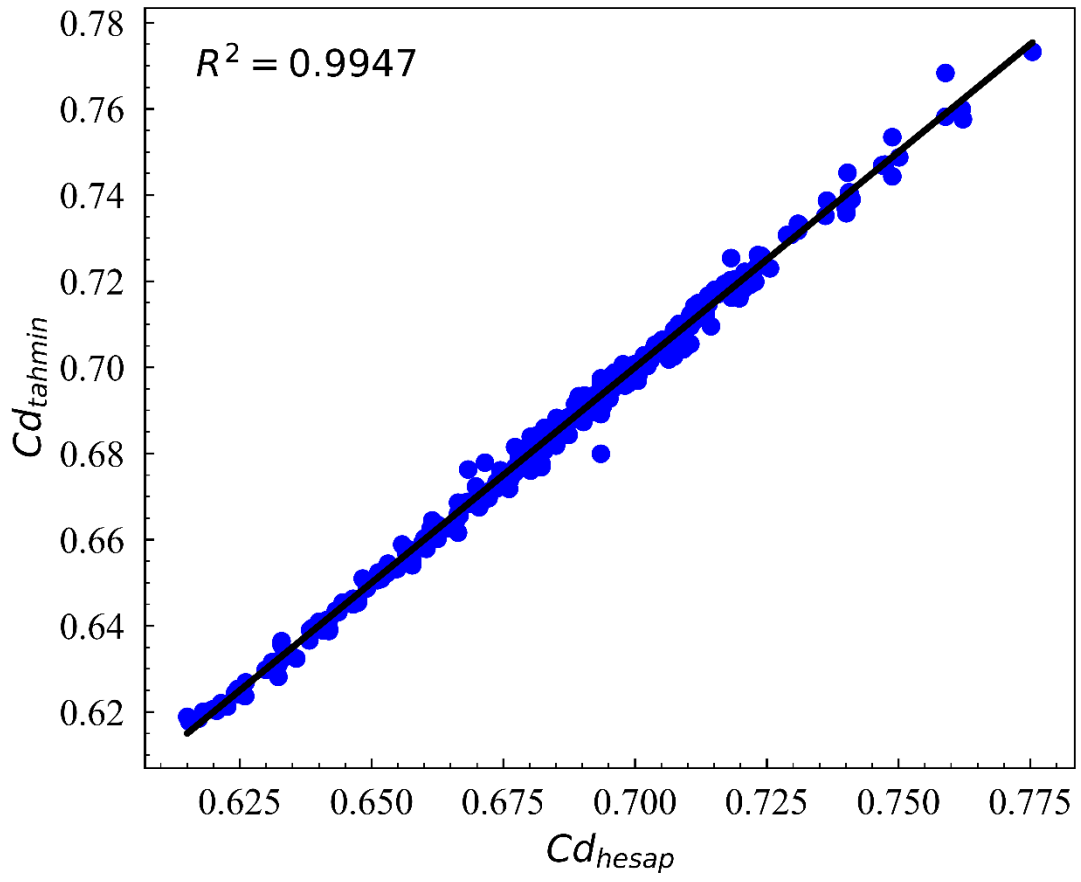
Şekil 4.7. Polinomal regresyon yöntemi sonuçları.

Çizelge 4.9. Polinomal regresyon için değerlendirme metriklerinin çıktısı.

	2.Derece Pol.	4.Derece Pol.	6.Derece Pol.	7.Derece Pol.
MAE	0.0071	0.0024	0.0015	0.0015
MSE	0.000075	0.000011	0.000005	0.000007
RMSE	0.0087	0.0033	0.0022	0.0026
R ²	0.9241	0.9889	0.9953	0.9933

4.3.3. MLP Sonuçları

MLP yöntemiyle debi tahmini yapılırken veri setinin %80'i eğitim %20'si test için kullanılmıştır. MLP yöntemi için aktivasyon (activation) fonksiyonu olarak “relu”, optimizasyon algoritması (solver) olarak “lbfgs”, tolerans değeri (tol) 10^{-8} ve maksimum iterasyon sayısı (max_iter) 10^5 seçilmiştir. Gizli katman sayısı 3 olarak ayarlanmış ve 1.katmanda, eğitim için kullanılan veri sayısının %4'ü kadar nöron kullanılmıştır. Diğer iki katman ise, her katmandaki nöron sayısı bir önceki katmanın nöron sayısının yarısı olacak şekilde ayarlanmıştır (1.katman=77 nöron, 2.katman=38 nöron, 3.katman=19 nöron). Neticede MAE=0.0017, MSE=0.000005, RMSE=0.0023 ve $R^2=0.9947$ olarak bulunmuştur. Şekil 4.8'de test sonuçları gösterilmiştir. MLP yöntemi, her iterasyonda çıktı ile hedef değerleri arasındaki farka bakarak geriye dönüp ağırlıkları güncellediği ve veriler arasında doğrusal olmayan bir ilişki olduğu için yüksek performans göstermiştir.



Şekil 4.8. MLP yöntemi sonuçları.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada yuvarlatılmış burunlu geniş başlıklı savaklar ele alınmıştır. Π teoremi ile boyut analizi yapılarak etkili parametreler belirlenmiş ve bu parametreler ışığında açık kaynak kodlu CFD yazılımı olan OpenFOAM'da sayısal bir model hazırlanmıştır. Hazırlanan bu modelde $k-\omega$ SST türbülans modeli kullanılmıştır. OpenFOAM'un uygulamalarından olan blockMesh ile geometri oluşturulup RONS denklemlerini çözen interFoam çözücüsü kullanılarak benzetimler yapılmış ve su yüzü profilleri VOF metoduyla elde edilmiştir. Sayısal model deneysel verilerle doğrulanmış ve bu model kullanılarak TRUBA aracılığıyla yapılan sayısal benzetimler sonucunda farklı debiler ve savak geometrilerinden oluşan bir veri seti (2401 adet) elde edilmiştir. Elde edilen tüm veriler değerlendirme kriterlerine göre ayıklanarak geriye kalan 1547 adet verinin debi katsayısı hesaplanmıştır. Debi katsayısı ile R/P , L/P ve h/P parametreleri arasındaki korelasyonlar incelenmiş ve debi derinlik ilişkisi için yeni bağıntılar elde edilmiştir. Debi katsayısı, makine öğrenmesi yöntemlerinden olan Lineer Regresyon, Polinomal Regresyon ve Multi Layer Perceptron yöntemleri ile tahmin edilmiştir. Tüm çalışmalar sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. Yapılan boyut analizi sonucunda debi katsayısının savak yuvarlatma yarıçapı R , savak yüksekliği P , savak uzunluğu L ve savak üstü su yüksekliği h ile ilişkili olduğu anlaşılmış ve etkili parametreler R/P , L/P ve h/P olarak belirlenmiştir.
2. Sayısal modelde $k-\omega$ SST türbülans modeli kullanılmış ve sonuçlar deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır. Hız ve su yüzü profilleri incelendiğinde mevcut modelin başarılı sonuçlar verdiği görülmüş ve bu modelin açık kanal akımlarında kullanılabileceği kanaatine varılmıştır.
3. Kanal genişliğinin memba su seviyesi üzerinde neredeyse hiç etkili olmadığı; debi katsayısı C_d 'nin, doğrudan debi ve su yüksekliğiyle ilişkili olması sebebiyle kanal genişliğinden bağımsız olduğu görülmüştür.

4. Kanal geometrisindeki tüm parametreler değiştirilerek memba su seviyesindeki değişim incelenmiş ve sonuç olarak savak uzunluğu L , savak yüksekliği P ve savak yuvarlatma yarıçapı R 'nin değişmesiyle memba su seviyesinde değişiklikler olduğu görülmüştür.
5. Savak yarıçapı R , savak yüksekliği P , savak uzunluğu L , savak üstü su yüksekliği h ve birim debi q parametrelerinden 7'ser adet seçilerek; tüm bu parametrelerin kombinasyonlarını içeren 2401 adetlik bir veri seti oluşturulmuştur. Sayısal benzetimler yapılarak her kombinasyon için C_d hesaplanmış, bu veriler geniş başlıklı savak kriterine ($0.083 \leq h/L \leq 0.4$) göre kusurlu sonuçlardan arındırılmış ve geriye kalan 1547 adet temiz veri kullanılmıştır.
6. Etkili parametrelerden yola çıkarak debi-derinlik ilişkisi için iki yeni bağıntı türetilmiştir. Bu bağıntılar R/P , L'/P ve h/P boyutsuz büyüklükleri ($L' = L - R$) ile C_d arasındaki ilişkiyi ifade etmektedir. Birinci bağıntı Denklem 4.3'te, ikinci bağıntı ise Denklem 4.4'te verilmiştir. Her iki bağıntı için değerlendirme metriklerine bakıldığında 2.bağıntının daha doğru sonuçlar verdiği görülmüş ve bu bağıntının debi katsayısı hesabında kullanılabileceği kanaatine varılmıştır.
7. Makine öğrenmesi yöntemleri ile debi katsayısı tahmininde, en düşük başarıyı Lineer Regresyon yöntemi göstermiş olup Polinomal Regresyon ve MLP yöntemlerinin yüksek başarı sergilediği görülmüştür. Polinomal Regresyon, polinom derecesi 6 olarak seçildiğinde en yüksek başarıyı sergilemiş olup MLP yöntemine nazaran nispeten daha iyi sonuç vermiştir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Afshar, H., Hoseini, S. H., 2013, Experimental and 3-D numerical simulation of flow over a rectangular broad-crested weir, *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 2(6), 214-219.
- Al-Hashimi, S. A., Madhloom, H. M., Khalaf, R. M., Nahi, T. N., & Al-Ansari, N. A., 2017, Flow over broad crested weirs: Comparison of 2D and 3D models, *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 11(8), 769-779.
- Anonim, Numpy and Scipy Documentation, <https://docs.scipy.org/doc/>, erişim tarihi: 24.06.2022.
- Anonim, Scikit Learn User Guide, https://scikit-learn.org/stable/user_guide.html, erişim tarihi: 24.06.2022.
- Anonim, Pandas User Guide, https://pandas.pydata.org/docs/user_guide/index.html, erişim tarihi: 24.06.2022.
- Azimi, A. H., Rajaratnam, N., & Zhu, D., 2009, Discharge characteristics of weirs of finite crest length, *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(12), 1081.
- Bal, H., 2011, Geniş başlıklı savak içeren açık kanal akımının sayısal modellenmesi, Yüksek lisans tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, Türkiye.
- Ebtehaj, I., Bonakdari, H., Zaji, A. H., Azimi, H., & Sharifi, A., 2015, Gene expression programming to predict the discharge coefficient in rectangular side weirs, *Applied Soft Computing*, 35, 618-628.
- Felder, S., & Chanson, H., 2012, Free-surface profiles, velocity and pressure distributions on a broad-crested weir: A physical study, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(12), 1068-1074.
- Gharehbaghi, A., & Ghasemlounia, R., 2022, Application of AI Approaches to Estimate Discharge Coefficient of Novel Kind of Sharp-Crested V-Notch Weirs, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 148(3), 04022001.
- Govinda Rao, N., & Muralidhar, D., 1963, Discharge characteristics of weirs of finite-crest width, *La Houille Blanche*, 49(5), 537-545.
- Hargreaves, D. M., Morvan, H. P., Wright, N. G., 2007, Validation of the volume of fluid method for free surface calculation: the broad-crested weir, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 1(2), 136-146.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Hu, Z., Karami, H., Rezaei, A., DadrasAjirlou, Y., Piran, M. J., Band, S. S., Chau, K.-W., & Mosavi, A., 2021, Using soft computing and machine learning algorithms to predict the discharge coefficient of curved labyrinth overflows, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 15(1), 1002-1015.
- İlkentapar, M., & ÖNER, A. A., 2017, Geniş Başlıklı Savak Etrafındaki Akımın İncelenmesi, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(2), 615-626.
- Karami, H., Karimi, S., Bonakdari, H., & Shamshirband, S., 2018, Predicting discharge coefficient of triangular labyrinth weir using extreme learning machine, artificial neural network and genetic programming, *Neural Computing and Applications*, 29(11), 983-989.
- Kızılaslan, M. A., & Demirel, E., 2017, Numerical investigation of the recirculation zone length upstream of the round-nosed broad crested weir, *Proceedings of the International Conference on Urban Design, Transportation, Architectural and Environmental Engineering*, Istanbul, Turkey.
- Kirkgoz, M. S., Akoz, M. S., Oner, A. A., 2008, Experimental and theoretical analyses of two dimensional flows upstream of broad-crested weirs, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 35(9), 975-986.
- Kirkgoz, M. S., Oner, A. A., Akoz, M. S., 2009, Numerical modeling of interaction of a current with a circular cylinder near a rigid bed, *Advances in Engineering Software*, 40(11), 1191-1199.
- Li, S., Yang, J., & Ansell, A., 2021, Discharge prediction for rectangular sharp-crested weirs by machine learning techniques, *Flow Measurement and Instrumentation*, 79, 101931.
- Menter, F. R., 1992, Influence of Freestream Values on K-Omega Turbulence Model Predictions, *Aiaa Journal*, 306, 1657-1659.
- Menter, F. R., 1992, Performance of Popular Turbulence Models for Attached and Separated Adverse Pressure-Gradient Flows, *Aiaa Journal*, 308, 2066-2072.
- Menter, F. R., 1994, 2-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications, *Aiaa Journal*, 328, 1598-1605.
- Özdin, Ş., 2021, Geniş başlıklı savaklarda sayısal modellemeler ile elde edilen debi katsayısının incelenmesi, Yüksek lisans tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, Türkiye.
- Parsaie, A., 2016, Predictive modeling the side weir discharge coefficient using neural network, *Modeling Earth Systems and Environment*, 2(2), 1-11.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ramamurthy, A. S., Tim, U. S., & Rao, M., 1988, Characteristics of square-edged and round-nosed broad-crested weirs, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 114(1), 61-73.
- Roushangar, K., Khoshkanar, R., & Shiri, J., 2016, Predicting trapezoidal and rectangular side weirs discharge coefficient using machine learning methods, *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 22(3), 254-261.
- Roushangar, K., Alami, M. T., Majedi Asl, M., & Shiri, J., 2017, Modeling discharge coefficient of normal and inverted orientation labyrinth weirs using machine learning techniques, *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 23(3), 331-340.
- Salmasi, F., Yıldırım, G., Masoodi, A., & Parsamehr, P., 2013, Predicting discharge coefficient of compound broad-crested weir by using genetic programming (GP) and artificial neural network (ANN) techniques, *Arabian Journal of Geosciences*, 6(7), 2709-2717.
- Wilcox, D. C., 1988, Multiscale Model for Turbulent Flows, *Aiaa Journal*, 26(11), 1311-1320.
- Wilcox, D. C., 1991, A Half Century Historical Review of the k-w Model, Reno, Nevada, USA, American Institute of Aeronautics and Astronautics Paper, AIAA.
- Wilcox, D. C., 1998, Turbulence Modeling for CFD, DCW Industries, Inc., California.