T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TRAPEZ GENİŞ BAŞLIKLI SAVAKLARA AİT DEBİ KATSAYISININ YAPAY ZEKA YÖNTEMLERİ İLE BELİRLENMESİ

Abdulkadir ÖZLÜK

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞANLIURFA
2022

T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TRAPEZ GENİŞ BAŞLIKLI SAVAKLARA AİT DEBİ KATSAYISININ YAPAY ZEKA YÖNTEMLERİ İLE BELİRLENMESİ

Abdulkadir ÖZLÜK

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞANLIURFA
2022

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
ÇİZELGELER DİZİNİ v
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ vi
1. GİRİŞ 1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 3
3. MATERYAL ve YÖNTEM 23
3.1. Materyal 23
3.2. Yöntem 25
3.2.1. Sayısal Modelleme 25
3.2.2. Yapay Zekâ Yöntemleri 30
3.2.3. Performans Kriterleri 36
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA 38
4.1. Laboratuvar Deney Sonuçları ve Sayısal Model Doğrulaması 38
4.2. C_d'nin Tahmin Edilmesi 44
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER 51
KAYNAKLAR 53
ÖZGEÇMİŞ 58

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TRAPEZ GENİŞ BAŞLIKLI SAVAKLARA AİT DEBİ KATSAYISININ YAPAY ZEKA YÖNTEMLERİ İLE BELİRLENMESİ

ABDULKADİR ÖZLÜK

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Oğuz ŞİMŞEK
İkinci Danışman: Doç. Dr. Veysel GÜMÜŞ
Yıl: 2022, Sayfa:58

Savaklar, yapay ya da doğal açık kanallarda, çoğunlukla akım debisini ölçmek ve akım seviyesini kontrol etmek için kullanılan en eski hidrolik yapılardır. Savaklar aracılıyla debinin hesaplanması için, gerçek debi ile teorik debinin oranı olan debi katsayısının (C_d) bilinmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, farklı memba ve mansap eğimlerine sahip yedi farklı trapez geniş başlıklı savak üzerinde toplam 91 adet deneysel ölçüm gerçekleştirilmiştir. Deneysel olarak elde edilen akım özellikleri, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemlerine dayanan sayısal modellerin doğrulanmasında kullanılmıştır. Deneysel ölçümü yapılmış savak tiplerine yeni iki savak geometrisi ilave edilmiş ve sayısal modelleme kullanılarak toplamda dokuz savak tipi için 270 tane C_d hesap edilmiştir. Teorik olarak hesaplanan C_d değerleri, Yapay Sinir Ağları (YSA), Destek Vectör Makinaları (DVM) ve M5Tree yöntemleri kullanılarak tahmin edilmiştir. Froude sayısı ve akıma ait boyutsuz parametrelerinin girdi olarak kullanıldığı modellerde sekiz farklı Durum için tahmin yöntemlerinin C_d katsayısını tahmin etme performansları incelenmiştir. Yöntemlerin performanslarının değerlendirilmesinde belirlilik katsayısı (R^2), karekök ortalama karesel hata (KOKH), ortalama mutlak yüzde hata (OMYH) ve Nash–Sutcliffe model verimlilik katsayısı (NSE) değerleri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, Froude sayısının girdi olarak kullanılmadığı modellerin başarısının düşük olurken, Froude sayısının girdi olarak kullanılması ile modellerin performanslarının önemli bir şekilde arttığı görülmüştür. Tüm performans kriterlerine göre ANN yönteminin C_d'yi belirlemede diğer yöntemlere kıyasla daha başarılı olduğu belirlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Debi katsayısı, trapez geniş başlıklı savak, HAD, yapay zeka yöntemleri

ABSTRACT

MSc Thesis

DETERMINING THE DISCHARGE COEFFICIENT OF TRAPEZOIDAL BROAD-CRESTED WEIRS BY ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS

Abdulkadir ÖZLÜK

Harran University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Oğuz ŞİMŞEK
Co-Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Veysel GÜMÜŞ
Year: 2022, Page:58

Weirs are the oldest hydraulic structures mostly used to measure the flow discharge and control the flow level in artificial or natural open channels. The ratio of the actual discharge and the theoretical discharge (Discharge Coefficient- C_d) must be known to calculate the discharge of the channel having the weir. In this study, 91 experimental measurements are carried out on seven trapezoidal broad-crested weirs with different upstream and downstream slopes. Experimentally measured flow properties validate numerical models based on computational fluid dynamics (CFD) methods. Two new weir geometries, not experimentally measured, are added in the numerical modelling, and 270 C_d values are calculated for nine weir geometries using numerical modelling. Theoretical Cd values are estimated using the Artificial Neural Network (ANN), Support Vector Machine (SVM), and M5Tree methods. The Froude number in the upstream region and the flow's dimensionless parameters are input parameters in the models. The performance of these methods has been examined to estimate the C_d coefficient for eight cases. The performances of the methods are evaluated by the coefficient of determination (R^2), root-mean-square error (RMSE), mean absolute percentage error (MAPE), and Nash–Sutcliffe model efficiency coefficient (NSE). The study results show that the Froude number significantly increases the performance of the models in estimating Cd values, and the ANN method is more successful in determining Cd than other methods.

KEYWORDS: Discharge coefficient, Trapezoidal broad crested weir, CFD, artificial intelligence methods

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmama başladığım günden bugüne kadar tüm aşamada bilgisini ve tecrübesini benden esirgemeyen kıymetli hocalarım Sn. Doç. Dr. Oğuz ŞİMŞEK'e ve Doç. Dr. Veysel Gümüş'e teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Hayatımın her anında olduğu gibi tez çalışmalarım sırasında da maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen tüm aileme teşekkürü bir borç bilirim.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. 1. Savak çeşitleri (a) keskin kenarlı savak, (b) dikdörtgen geniş başlıklı savak, (c) trapez geniş başlıklı savak, (d) ogee savağı (Soydan ve ark., 2012). 2
Şekil 3. 1. Deney düzeneği ve şematik görüntüsü 24
Şekil 3. 2. Trapez geniş başlıklı savakların geometrik özellikleri 24
Şekil 3. 3. Çözüm bölgesi, sınır ve başlangıç şartları 29
Şekil 3. 4. Hesaplama ağı tasarımı 30
Şekil 3. 5. Destek vektör makinelerine ait parametreler 31
Şekil 3. 6. Yapay sinir ağının yapısı 34
Şekil 4. 1. Model 1 için fiziksel ve sayısal su yüzü profillerinin karşılaştırılması 38
Şekil 4. 2. Model 2 için fiziksel ve sayısal su yüzü profillerinin karşılaştırılması 39
Şekil 4. 3. Model 3 için fiziksel ve sayısal su yüzü profillerinin karşılaştırılması 39
Şekil 4. 4. Model 4 için fiziksel ve sayısal su yüzü profillerinin karşılaştırılması 39
Şekil 4. 5. Model 5 için fiziksel ve sayısal su yüzü profillerinin karşılaştırılması 40
Şekil 4. 6. Model 6 için fiziksel ve sayısal su yüzü profillerinin karşılaştırılması 40
Şekil 4. 7. Model 7 için fiziksel ve sayısal su yüzü profillerinin karşılaştırılması 40
Şekil 4. 8. Deneysel ve sayısal modeller arasında OMYH değerleri 41
Şekil 4. 9. Debi katsayısının değişimi (a) h/L, (b) ε, and (c) Fr 43
Şekil 4. 10. Girdi ve çıktı parametrelerinin eğitim ve test sürecindeki değişim miktarları 43
Şekil 4. 11. Farklı durumlar için testlerde elde edilen OMYH değerlerinin değişimi 46
Şekil 4. 12. Test periyoduna ait ölçülen ve YSA yöntemiyle elde edilen C_d değerlerinin saçılımları.. 47
Şekil 4. 13. Test periyoduna ait ölçülen ve DVM yöntemiyle elde edilen C_d değerlerinin saçılımları 48
Şekil 4. 14. Test periyoduna ait ölçülen ve M5Tree yöntemiyle elde edilen C_d değerlerinin saçılımları 48
Şekil 4. 15. Farklı model ve yöntemlerle elde edilen C_d değerlerine ait Taylor diyagramları 50

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 4. 1. Tahmin modellerinde kullanılan girdi kombinasyonları 44
Çizelge 4. 2. Farklı yöntemler ve modelleriyle elde edilen R^2, RMSE, MAPE ve NSE değerleri..... 46
Çizelge 4. 3. YSA yönteminde Durum 4 için model parametreleri..... 49
Çizelge 4. 4. YSA yönteminde Durum 8 için model parametreleri..... 49

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

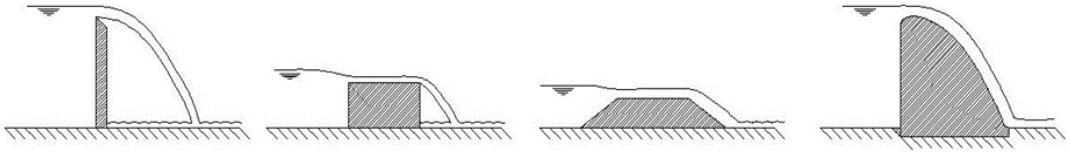
b	Kanal genişliği
C_d	Debi Katsayısı
ÇDR	Çoklu Doğrusal Regresyon
DES	Ayrılmış girdap simülasyonu (Detached Eddy Simulation)
DVM	Destek Vektör Makinaları
Fr	Froude sayısı
g	Yer çekimi ivmesi
h	Memba su derinliği
H	Toplam savak yükü
HAD	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
k	Türbülans kinetik enerji
KOKH	Karekök Ortalama Karasel Hata
KOKF	Karekök Ortalama Karasel Fark
L	Savak kret uzunluğu
LES	Büyük girdap simülasyonu (Large Eddy Simulation)
NSE	Nash–Sutcliffe model verimlilik katsayısı
OKH	Ortalama Karesel Hata
OMGH	Ortalama Mutlak Göreceli Hata
p	Ortalama basınç
P	Savak yüksekliği
RANS	Reynols Ortalamalı Navier Stokes (Reynolds Averaged Navier Stokes) denklemleri
RKE	Realizable k−ε modeli
RNG	Re normalization Grup k- ε modeli
SKE	Standart k- ε modeli
SKW	Standart k-ω modeli
SPH	Düzleştirilmiş parçacık hidrodinamiği (Smoothed Particle Hydrodynamics)
SST	Kayma Gerilmesi Taşınım Modeli (Shear Stress Transport)
u_i	Ortalama hız bileşenleri
URANS	Kararsız Reynolds-Ortalamalı Navier-Stokes denklemleri
YSA	Yapay Sinir Ağları
V	Akım ortalama hızı
VOF	Akışkan hacmi yöntemi (Volume of Fluid)
μ	Akışkanın dinamik viskozitesi
τ_{ij}	Türbülans (Reynolds) gerilmelerini
α	Memba yüz eğimi

β	Mansap yüz eğimi
ε	Türbülans kinetik enerji kayıp miktarı
ω	Türbülans kinetik enerji özgül kayıp oranı

1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun artmasına paralel olarak canlıların yaşamı için en temel madde olan suya daha fazla ihtiyaç duyulmaktadır. Bu artan talebe karşın günden güne kullanılabilir su kaynaklarının azalması, mevcut su kaynaklarının iyi planlanmasını ve etkin kullanımını zorunlu hale getirmektedir. Su kaynaklarının büyük bir kısmının kullanıldığı tarımsal faaliyetlerde, suyun debisinin ölçülmesi, ihtiyaçların yönetilmesi veya farklı bitkilerin yetiştirilmesi gibi konular da oldukça büyük önem arz etmektedir. Bu bağlamda, savaklar; doğal (akarsular) ve yapay (açık kanallar) su iletim yapılarında akım derinliğinin ölçülmesi suretiyle suyun debisinin ölçülmesini sağlayan ve ayrıca suyun derinliğini ve debisini kontrol etmek üzere inşa edilen en eski hidrolik yapılardan biridir. Savakların dışında farklı ölçüm aletleri ve teknikleriyle de akımın debisinin ve derinliğinin ölçülmesi mümkün olsa da savaklar bu özel aletler ve yöntemlere kıyasla daha ekonomik ve pratik olmasından dolayı pratikte oldukça sık tercih edilmektedir (Soydan Oksal ve ark., 2020).

Savakların akım alanına inşa edilmesiyle savak memba bölgesinde su derinliği artmakta, böylece ihtiyaç duyulan suyun su alma yapılarıyla alınması ve suyun ihtiyaç duyulan alana yönlendirilmesi kolaylaşmaktadır. Ayrıca, savaklar (dolusavaklar ve dip savaklar) barajın güvenlik elemanı olarak da memba bölgesinde hazne kapasitesinin üzerinde bir debinin gelmesi veya su tahliyesinin zorunlu olduğu durumlarda (taşkınlarda) görev üstlenmektedir. Savaklar geometrik özelliklerine göre ogee, labirent, piyano, geniş başlıklı (dikdörtgen, eğrisel, trapez, üçgen) ve keskin kenarlı (dikdörtgen, üçgen, trapez) vb. olarak sınıflandırılmaktadır. Bu savak türleri arasında geniş başlıklı savaklar, uygulamada oldukça yaygın kullanımı olan ve kendi içinde uzun veya kısa başlıklı olarak adlandırılan savak türüdür (Şekil 1.1). Kısa veya uzun başlıklı savak türünün belirlenmesinde kret uzunluğunun (L), savak toplam yüküne (H=memba su derinliği (h)+ memba hız yüksekliği ($V^2/2g$; V akım ortalama hızı, g yer çekim ivmesi)) oranı belirleyici bir parametredir. H/L>0.5 ise kısa veya dar, H/L<0.5 ise uzun veya geniş başlıklı olarak adlandırılmaktadır (Bos, 1989; Chanson, 2004).



Şekil 1. 1. Savak çeşitleri (a) keskin kenarlı savak, (b) dikdörtgen geniş başlıklı savak, (c) trapez geniş başlıklı savak, (d) ogee savağı (Soydan ve ark., 2012).

Savakların akım alanına inşa edilmesiyle açık kanal akımında rejim değişikliği meydana gelmekte ve geniş başlıklı savak kreti üzerinde kritik kesitin ($Fr=V/(gh)^{1/2}=1$, burada V akım ortalama hızı, g yer çekim ivmesi, h su derinliği) oluşmasıyla, akımın hızı ve debisi hesaplanabilmektedir. Akımın debisinin hesaplanması, suyun kullanım miktarının belirlenmesi için oldukça önemlidir. Savak yapısının özelliklerine bağlı olarak savak memba ve mansap bölgelerinde veya geniş başlıklı savak kretinde ayrılmalar meydana gelebilmektedir. Ayrıca, kanal tabanı üzerinde ilerleyen akım, savak yapısının etkisine girmesiyle yeni bir sınır tabakası gelişimi başlamakta ve eğri yörüngeli akım durumu oluşabilmektedir. Teorik olarak savaklara ait debinin hesaplanmasında gerçek modellemede akımda meydana gelen bu değişiklikleri ihmal eden kabuller yapılmaktadır. Teorik olarak hesaplanan debi, ihmal edilen özellikler nedeniyle gerçek debi değerinden farklı olmaktadır. Gerçek debi değerinin hesaplanabilmesi için teorik debinin bir katsayı ile çarpılması gerekmektedir. Gerçekte kullanılan debi miktarını hesaplamak için oldukça önemli olan bu katsayı, debi katsayısı (C_d) olarak adlandırılmaktadır. Laboratuvar ortamında fiziksel modeller yardımıyla bu katsayının hesaplanması mümkün olsa da insan gücü, zaman ve maddi olarak bu çalışmalar oldukça yüksek maliyetlidir.

Son yıllarda bilgisayar teknolojisinde meydana gelen gelişmelerden yararlanılarak birçok mühendislik probleminin çözümünde hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) tekniklerine dayalı sayısal modellemelerin yapılması mümkün hale gelmiştir. Sayısal modellemeler yardımıyla çok farklı yapı ve akım kombinasyonuna sahip hidrolik problemin çözümü yapılmakta ve akım ile ilgili birçok parametre özel bir deney düzeneği, ekipman veya cihaz kullanmadan elde edilebilmektedir. Ayrıca, bu sayısal modellemeler fiziksel modellere kıyasla daha az zaman ve maliyet gerektirmesi ve farklı kombinasyonlara kolayca uyarlanabilir olmasından dolayı

fiziksel model çalışmalarına kıyasla oldukça avantajlıdır. Fiziksel modeller yardımıyla doğrulanan sayısal model sonuçları, daha geniş akım ve yapı özelliklerini analiz etmek içinde tercih edilebilmektedir.

Yapay zekâ teknikleri özellikle son yıllarda oldukça geniş uygulama alanı bulmaktadır. Hidrolik ve hidrolojik durumların analiz edilmesi ve tahmin edilmesinde de oldukça yararlanılan tekniklerdir. Fiziksel ve sayısal modellemeler yardımıyla elde edilebilecek olan debi katsayısının ayrıca yapay zekâ teknikleri aracılığıyla farklı girdi kombinasyonlarıyla tahmin edilmesi mümkündür. Akım ile ilgili elde edilmesi kolay özelliklerin boyutsuz girdi parametresi olarak belirlenmesi, önerilen modellerin daha farklı yapı ve akım koşullarında kullanılmasına imkân sunulmasına ve genelleştirilmesini sağlayacaktır. Ayrıca, farklı girdi kombinasyonları oluşturularak girdi parametresinin C_d üzerindeki etki düzeyinin belirlenmesi imkânı da bulunmaktadır.

Bu tez çalışmasında, yedi farklı memba ve mansap eğimlerine sahip trapez geniş başlıklı savağa ait debi katsayısı deneysel olarak 13 farklı akım durumları için elde edilmiştir. Ayrıca, bu fiziksel model sonuçları sayısal modellemenin doğrulanmasında kullanılmıştır. Bunun yanında fiziksel modellemesi yapılmayan farklı 17 akım durumu ve iki farklı savak geometrisiyle 30 adet akım durumu sayısal olarak modellenerek veri sayısı çoğaltılmıştır. Savak özellikleri ve akım durumuna göre debi katsayısına etki eden farklı parametrelerin girdi olarak kullanıldığı yapay zekâ yöntemleriyle debi katsayısının tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Savak ve akım durumlarından bağımsız olarak geliştirilen tahmin modellerinin kullanıcılar tarafından pratik olarak kullanılması için girdi kombinasyonlarında akım ve savak özellikleri boyutsuz olarak kullanılmıştır. Yapay zekâ yöntemlerinin debi katsayısını tahmin etmedeki başarısı farklı başarı ölçütleriyle belirlenmiş ve farklı kombinasyonlarında kullanılan tahmin modellerinin sonuçları değerlendirilmiştir. Ayrıca, deneysel olarak elde edilen sonuçlar sayısal model sonuçlarının doğrulanmasında kullanılmış ve deneysel olarak ele alınmayan debi ve yapı koşulları içinde sayısal model çalışmaları yapılmış ve sonuçları irdelenmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Literatürde savak akımları, savaklara ait debi katsayısı, sayısal modellemeler ve yapay zekâ yöntemleriyle ilgili çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Boiten (1984) tarafından serbest akım koşullarında üçgen savak alt açısının 150° olduğu durumunda üçgen savaklara ait debi ile savak yükü arasındaki ilişkiyi belirlemek için laboratuvar ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Savak yapısının akım alanına inşa edilmesiyle akım %20-30 oranında batmıştır. Deney düzeneğinin maksimum seviyede çalıştırılmasıyla akım maksimum hızı 1.5 m^3/s olarak hesap edilmiş ve bu düzeneğin, küçük ve orta dereceli debiler için uygun olduğunu belirtilmiştir. Çalışma sonucunda, üçgen savaklar için tasarım kuralları ve uygulama limitleri verilmiştir. Boyutlar ve derecelendirme eğrileri, 1 m^3/s kapasite için tasarlanmış bir savak tipi için önerilmiştir.

Keller ve Fong (1989) tarafından trapez savakla etkileşim halindeki akış, eşikte varsayılan bir basınç dağılımı da dahil etmek üzere tek boyutlu momentum denklemi ile analiz edilmiştir. Varsayılan basınç dağılımı, dikdörtgen ve üçgen geometrili açık kanallarda önceki ölçümlere dayandırılmıştır. Çalışma sonucunda, eşik derinliği ve debi arasındaki tahmin edilen ilişki, laboratuvar kanalından alınan deneysel verilerle karşılaştırılmış ve aralarında uyumun mükemmel olduğu belirtilmiştir. Herhangi bir hafif eğimli yamuk kanala uygulanabilen bir kalibrasyon şeması teorik olarak geliştirilmiştir. Bu kalibrasyon şeması, yapılan bu çalışmadan elde edilen verilerle ve önceki çalışmalardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve aralarında oldukça iyi uyum olduğu belirtilmiştir. Eşikteki basınç dağılımının tamamen atmosferik olduğu varsayıldığı önceki tahmin teknikleriyle elde edilen sonuçların karşılaştırılmasından, bu basınç dağılımının analize dahil edilmesinin önemini gösterdiği vurgulanmıştır.

Clemmens ve ark. (1990), dikdörtgen geniş başlıklı bir savakla etkileşim halinde olan akımda giriş ve çıkış koşullarının debi üzerindeki etkilerini ve enerji kaybını belirlemişlerdir. Bunu yaparken, mansap şartlarının kanal kalibrasyonunu etkileyip

etkilemediğini görsel olarak belirlenmesi için bir yöntem geliştirilmiştir. Memba ön yüzünün köşelerinin hafif yuvarlatılması debilerin tahminlerini iyileştirecek olsa da 3:1 ve 2:1 ön yüz eğimlerinin debiyi doğru tahmin etmek için kabul edilebilir olduğu belirlenmiştir. Su yüzeyi profilinin, ön yüz eğiminden savak daralması sonuna kadar sürekli olarak düştüğü sürece, mansap su seviyesinin debi tahminini etkilemediği görülmüştür.

El-Alfy (2005) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, savak kret yüksekliğindeki değişime bağlı olarak akım çizgilerinin düşey eğriliğinin debi katsayısı (C_d) üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma, farklı akış koşullarında (keskin kenarlı, geniş başlıklı, üçgen ve trapez savaklar) dört farklı savak türünde 254 deneysel ölçüm yapılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çalışmada, üçgen savaklarda tepe açısının debi katsayısı üzerindeki etkisi irdelenmiştir. Çalışma sonucunda hem keskin hem de geniş başlıklı savaklardaki debi katsayısının (C_d) bağıl kret yüksekliğinden (H/P) etkilendiği görülmüştür. Regresyon analizi aracılığıyla hem keskin hem de geniş başlıklı savaklar için debi katsayısı (C_d) ile boyutsuz tepe yüksekliği (H/P) arasında iki formül sunulmuştur. Geliştirilen formüller ile diğer araştırmacılar tarafından geliştirilen formüller kullanılarak elde edilen sonuçların karşılaştırılmasından, debi katsayısı değerlerinde iyi bir uyum gösterdiği belirtilmiştir. Üçgen savakların debi katsayısını, tepe açısının (θ) etkisinin, rölatif yük (H/P) etkisinden daha fazla olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, deneysel çalışma sonucunda, trapez savakta rölatif yükün (H/P) debi katsayısı (C_d) üzerindeki etkisinin dikkate alınmamasının önemli hatalara neden olmayacağı ifade edilmiştir.

Nguyen (2006) tarafından açık bir kanal içerisine eğik olarak yerleştirilmiş üç farklı tipte savakların debi katsayısının belirlenmesi için deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, araştırmacılar bu çalışmayla eğik savaklar için enerji kaybı ve debi katsayısı hakkında nicel bir görüş sunmayı da amaçlamamışlardır. Dikdörtgen keskin kenarlı savak, dikdörtgen geniş başlıklı savak (her ikisi de akış yönüne 45 derecelik açıyla eğik yerleştirilmiş) ve memba ve mansap eğiminin 1:4 olduğu bent biçimli savak kullanılmıştır. Akustik ve elektro-manyetik tek noktalı hız ölçerlerden ve derinlik ölçümlerinden toplanan deneysel veriler, hidrolik süreci ve

hedeflenen değerleri araştırmak için analiz edilmiştir. Akımın, savağa ulaşıp geçerken akım yönünü savak kretine neredeyse dik olduğu ve bu durumun bend savağın memba ve mansap uç noktalarında su seviyelerindeki farklılığa, savak arkasındaki kanalın bir tarafındaki akış konsantrasyonuna, akış hızı dağılımındaki değişime ve akış boyunca diğer asimetrilere yol açtığı belirtilmiştir. Eğik açısında meydana gelen atış, savağın efektif uzunluğunu önemli ölçüde arttırırken, debi katsayısını küçük bir miktar azaltmıştır. Son olarak, debi katsayısı ve bu araştırmadan elde edilen diğer akış ve geometri parametreleriyle ilişkilerini literatürde bulunan eğik savaklar hakkındaki çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma sonucunda debi katsayısı araştırmaları arasındaki ortak bulgular birbirinin güvenirliliğini artırmış; farklılıklar ise daha sonraki çalışmalar için bir motivasyon olduğu belirtilmiştir.

Zerihun ve Fenton (2006), dar ve geniş başlıklı trapez akımının düzgün hız ve hidrostatik basınç dağılımları kabulüyle önerilen derinlik ortalamalı Saint-Venant denklemlerine dayalı olarak geliştirilen hesaplamalı akış modellerinin, trapez savaklarla etkileşimde bulunan açık kanal akımın modellemesinde kısıtlı olacağı düşünülmüştür. Bu durumun giderilmesi için serbest yüzeyin eğriliğine ve hidrostatik olmayan bir basınç dağılımına izin veren Boussinesq tipi bir momentum denklemiyle birlikte zayıf eğri serbest yüzey akışı için basitleştirilmiş bir denklem geliştirilmiş ve bu denklem kısa ve geniş başlıklı savaklarla etkileşimde bulunan sabit akışın sayısal simülasyonu için incelenmiştir. Bu doğrusal olmayan akış denklemlerini ayrıklaştırmak ve çözmek için sonlu farklar yöntemi kullanılmıştır. Bu tip savaklar için serbest su yüzü profili ve yatak basıncı profilleri hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar ölçülen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, Boussinesq tipi momentum denklemi hem kritik altı hem de geçiş akım durumları için tatmin edici bir performans gösterdiği ifade edilmiştir.

Piratheepan ve ark. (2007) tarafından sulama kanallarında oldukça sık kullanılan bileşik kesin kenarlı savakların farklı geometrilerin birleşim bölgesinde meydana gelen olumsuzlukları aza indirmek adına bir çalışma yapılmıştır. Bir iyileştirme olarak, farklı çentik açılarına sahip iki üçgen parçadan oluşan bir bileşik keskin kenarlı savak tasarlanmış ve deneysel olarak doğrulanmıştır. Yapılan analiz sonucunda herhangi bir

süreksizlik olmadan geniş bir aralıktaki debilerin ölçülmesinde başarılı olduğu kanıtlanmıştır. Çift 'V' çentikli bileşik keskin tepeli savak üzerindeki akışı tahmin etmek için çeşitli yöntemler de önerilmiş ve bir yöntemin en uygun olduğu deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak belirlenmiştir.

Sargison ve Percy (2009), değişen memba ve mansap eğimlerine sahip trapez geniş başlıklı savakla etkileşimde bulunan akımı incelemiştir. Savağın mansap ve memba eğimlerinin (2H:1V, 1H:1V ve düşey) elde edilen veriler üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgulardan, basınç ve su yüzü profillerinin ele alınan akım durumları için birbirine benzer olduğu belirlenmiştir. Memba eğiminin düşeye doğru arttırılmasının, yüzey profilinin yüksekliğini ve dolayısıyla kretin statik basıncını azalttığı, ayrıca bu değişimin debi katsayısını azalttığı ifade edilmiştir. Mansap eğiminin değiştirilmesinin, savak üzerindeki yüzey ve basınç profilleri üzerinde ihmal edilebilir düzeyde bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

Jan ve ark. (2009) tarafından basit dikdörtgen ve/veya üçgen savaklar için geleneksel deşarj denklemlerinin doğrusal bir kombinasyonu, bileşik geniş başlıklı savakların deşarj denklemlerini tanımlamak için önerilmiştir. Çalışmada bileşik geniş başlıklı savakları oluşturur iken dikdörtgen, üçgen ve/veya kesik üçgen savaklar kullanılmıştır. Bu tür bileşik başlıklı savaklar için boyutsuz debi denklemi türetilmiştir. Önerilen deşarj denklemlerini doğrulamak için bu çalışmada dört farklı bileşik geniş başlıklı savak üzerindeki akışlar için deşarj ilişkileri üzerine laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Deneyler, üst ve alt tepelerin üzerindeki su yüklerinin H_1/H_2 oranının 0,54'ten az olduğu ve boyutsuz bir deşarjın 2.174'ten az olduğu koşullarda gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, önerilen denklemler tarafından hesaplanan deşarjlar ile ölçülen deşarjlar arasındaki farkların, mevcut deneysel koşullar altında bu bileşik geniş başlıklı savaklarla etkileşim halindeki akımlar için %3'ten az olduğunu bildirilmiştir.

Wang ve ark. (2010) tarafından yapılan çalışmada, 1V:2H eğimli memba ve mansap yüzlerine sahip trapez geniş başlıklı savakların debi katsayısını araştırmak deneysel ölçümler gerçekleştirilmiştir. Trapez geniş başlıklı savakla etkileşim halinde

olan açık kanal akımının hız profilleri Parçacık Görüntü Hızı (PIV) aleti kullanılarak ölçülmüştür. Farklı akış rejimleri, serbest yüzey profili, ortalama ve anlık hız alanları ve deşarj katsayısı dahil olmak üzere akımın çeşitli hidrodinamik özellikleri tartışılmış ve analiz edilmiştir.

Schmocker ve ark. (2011), memba ve mansap açılarıyla 10 farklı şekilde kombinasyona sahip dairesel başlıklı savakların debi katsayısını iki farklı savak yüksekliği ve dört farklı debi durumu için araştırmışlardır. Debi katsayısını deneysel olarak belirlemek için serbest akış durumundaki akıma ait toplam savak yükü değerini kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, memba yüzü eğiminin debi katsayısı üzerinde oldukça küçük etkilere sahip olduğu belirlenirken, mansap yüzü eğiminin artmasının ise debi katsayısını önemli ölçüde arttırdığı belirlenmiştir. Ayrıca, çalışma sonucunda, memba ve mansap yüzü açılarını içeren yeni bir debi katsayısı formülü önerilmiştir. Ayrıca, kuyruk suyu batıklık durumunun debi katsayısını azalttığı belirlenmiştir.

Dursun ve ark. (2012) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Adaptive-Nöro Fuzzy Inference System (ANFIS), Çoklu Doğrusal Regresyon (ÇDR ve Doğrusal Olmayan Regresyon (NLR) modelleri kullanılarak yarı eliptik kenar savakların debi katsayısı laboratuvar ortamında 675 adet deney verileri kullanılarak tahmin edilmiştir. Çalışma sonucunda 3 farklı yöntemle elde edilen sonuçların karşılaştırılmasından, debi katsayısının modellenmesinde ANFIS tekniğinin kullanılan diğer tahmin modellerine kıyasla daha başarılı olduğu görülmüştür.

Goodarzi ve ark. (2012) tarafından değişen memba eğimlerine sahip (90º, 75º, 60º, 45º, 30º, 22.5º, 15º ve 10º) dikdörtgen geniş başlıklı savakların üzerindeki akımın hidrolik özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Değişen memba eğimlerinin akış yüzeyi deseni, debi katsayısı değerleri, yaklaşma akımın hız profili ve akım ayrılma bölgesi üzerindeki etkilerini araştırmak için bir dizi laboratuvar deneyi gerçekleştirilmiştir. Bunlara ek olarak, su yüzeyi profili için yeni bir matematiksel ilişki ve çeşitli memba eğimli savaklar üzerinden debi katsayısını tahmin etmek için yeni bir düzeltme faktörü önerilmiştir. Çalışma sonucunda, memba eğim değerinin

azalmasının, debi katsayısını arttırdığı ve ayrılma bölgesinin oluşumunun engellendiği belirlenmiştir.

Maghsoodi ve ark. (2012) tarafından batmış savaklarla etkileşimde bulunan üç boyutlu açık kanal akımının sayısal modellemesi Fluent programı kullanılarak yapılmıştır. Akımın üç boyutlu sayısal modellemesinde akımı idare eden temel denklemlerin çözümünde, Reynolds Ortalamalı Navier Stokes (RANS) tabanlı standart k-ε (SKE) türbülans modeli, su hava arakesitinin belirlenmesinde ise akışkan hacimleri yöntemi kullanılmıştır. Sonuç olarak, sıklaştırılmış hesaplama ağları kullanılarak elde edilen sayısal sonuçların deneysel bulgularla uyumlu olduğu belirlenmiştir.

Arvanaghi ve Oskuei (2013) tarafından yapılan çalışmada, açık kanal içerisine yerleştirilmiş üç farklı dikdörtgen keskin kenarlı savak üzerindeki akımın serbest su yüzü profili, yaklaşma hızı ve akış hızı için laboratuvar ölçümleri yapılmıştır. Deneysel olarak aynı koşullara sahip açık kanal akımı Fluent programıyla sayısal olarak modellenmiştir. Deneysel ve sayısal olarak elde edilen bulguların değerlendirilmesinden, sayısal modelleme teknikleriyle elde edilen sonuçların deneysel bulgularla iyi bir uyuma sahip olduğu görülmüştür. Boyutsuz savak yüksekliğinin (H/P), Froude ve Reynolds sayılarının debi katsayısına olan etkileri sayısal ve deneysel olarak araştırılmıştır. Bu parametrelerin belirli aralıkları için debi katsayısının 0.7 olarak sabit kalma eğiliminde olduğu değerlendirilmiştir.

Salmasi ve ark. (2013) tarafından akış yönünde kret uzunluğunun ve dikdörtgen bileşik en kesitli geniş başlıklı savağın basamak yüksekliğinin, deşarj katsayısı üzerindeki potansiyel etkilerini araştırmak için bir dizi laboratuvar deneyi yapılmıştır. Bu amaçla, dikdörtgen bileşik kesitli geniş başlıklı savakların 15 farklı fiziksel modeli üzerinde çok sayıda farklı debi değerlerinde ölçümler yapılmıştır. Debi katsayısının hesaplanması için yapılan inceleme sonuçları, boyutsal analize dayalı çoklu regresyon denklemleri kullanılarak elde edilmiştir. Daha sonra bu yöntemle elde edilen sonuçlar, bu prosedürlerin uygulanabilirliğini, kabiliyetini ve doğruluğunu araştırmak için genetik programlama (GP) ve yapay sinir ağı (YSA) teknikleri ile de karşılaştırılmıştır.

GP ve YSA yöntemleriyle elde edilen sonuçların belirlilik katsayısı (R^2) ve ortalama karekök hatası (OKH) başarı kriterlerine göre karşılaştırılmasından, debi katsayısının belirlenmesinde YSA tekniğinin GP yöntemine kıyasla daha az verimli olduğu açıkça görülmüştür.

Hoseini (2014) tarafından farklı geometriye sahip üçgen geniş başlıklı savaklarla etkileşimde bulunan açık kanal akımının debi katsayısını belirlemek için laboratuvar ölçümleri yapmış ve debi katsayısını belirlemek için yeni bir yaklaşım önermiştir. Elde edilen sonuçlar, h_1/L ve Fr sayısı gibi boyutsuz parametrelerinin üçgen geniş başlıklı savakların debi katsayısının hesaplanmasında kullanılan denklemler üzerinde etkili olduğunu göstermiştir. Ayrıca, deneysel olarak elde edilen değerler ile önerilen denklem kullanılarak hesaplanan değerler arasında iyi bir uyum belirlenmiştir.

Al-Khatib ve Gogus (2014) tarafından farklı geometrilere sahip bileşik geniş başlıklı dikdörtgen savakların debi katsayısını belirlemek için deneysel ölçümler gerçekleştirilmiştir. 9 farklı bileşik dikdörtgen geniş başlıklı savak modeli, çeşitli kret genişliği ve adım yüksekliklerinde gerçekleştirilen deneysel ölçümlere bağlı olarak debi katsayısı tahmin edilmiştir. Modelde kullanılan parametrelerin debi katsayısı ve yaklaşım hızı katsayısına olan etkileri araştırılmıştır. Debi ve hız katsayısını tahmin etmek için geliştirilen tahmin modelleri, deneysel veriler kullanılarak değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda, önerilen tahmin modeli ile memba su yükü h_1'in kullanılmasıyla %5'ten daha küçük bir hata oranıyla debi katsayısı ve hız katsayının tahmin edilebileceği belirlenmiştir.

Madadi ve ark. (2014) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, trapez geniş başlıklı savağın memba yüzü eğiminin debi katsayısına ve su yüzeyi profiline etkisi laboratuvar modelleriyle araştırılmıştır. Ayrıca, gerçekleştirilen bu çalışmada hız ve basınç dağılım profilleri ve kritik kesitin yeri belirlenmiştir. Bunun yanında, farklı trapez savağın farklı memba eğimleri için akımda meydana gelen ayrılma bölgesinin boyutları da ölçülmüştür. Çalışma sonucunda, memba yüzü eğiminin azaltılmasının ayrılma bölgesinin gelişimini engellediği ve bu durumda su yüzeyinde ve basınçta meydana gelen düşüşün azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca, memba yüz eğiminin

azaltılmasının debi katsayısını %10'a kadar arttırdığı ve ayrılma bağıl uzunluğunu ve yüksekliğini sırasıyla %80 ve %95'e kadar azalttığı belirtilmiştir.

Parsaie ve Haghiabi (2015) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, yan savakların debi katsayısının tahmini ve sayısal modellemesi yapılmıştır. Sayısal modelleme sonucunda, yan savaklarla etkileşimde bulunan açık kanal akımının su yüzü profilleri elde edilmiş, ampirik formüller ve yapay zekâ yöntemleri kullanılarak yan savaklara ait debi katsayısı sonuçları karşılaştırılmıştır. Farklı ampirik denklemlerle elde edilen sonuçların karşılaştırılmasından, Borghei ve ark. (1999) tarafından önerilen ampirik denklem en iyi tahminde bulunduğu görülmüştür. Çalışma sonucunda, yan savaklara ait debi katsayısını tahmin etmede çok katmanlı sinir ağları yönteminin kullanılması durumunda, model başarısının yaklaşık %16 oranında arttığı ifade edilmiştir.

Ameri ve ark. (2015) dikdörtgen ve üçgen geometrilerden oluşan bileşik keskin kenarlı yan savakların debi katsayısını belirlemek üzere deneysel ölçümler yapılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçların, debi katsayısının belirlenmesinde memba Froude sayısı (Fr_1), savak ağırlıklı kret yüksekliğinin memba su derinliğine oranının ve savak uzunluğunun memba su derinliğine oranının kullanıldığı ampirik formüllerin sonuçlarıyla uyumlu olduğu belirlenmiştir. Deneysel verilere ve regresyon modellemesine dayalı olarak, debi katsayısının tahmini için boyutsuz bir denklem geliştirilmiştir. Çalışma sonucunda, önerilen debi katsayısı denkleminin deneysel verilerle uyumlu olduğu görülmüştür.

Badr ve Mowla (2014) tarafından dikdörtgen geniş başlıklı savakların memba tarafına yerleştirilen farklı eğimlere sahip rampanın debi katsayısı ve akış karakteristiği üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Memba ön yüz eğiminin 15^0, 30^0, 45^0, 60^0 ve 90^0 olduğu durumlarda debi katsayısı, savak kreti üzerindeki negatif hız ve savak kreti boyunca su yüzeyi profilleri açık kanal modelinde değerlendirilmiştir. Memba yüzü eğiminin azaltılmasının, savak randımanını ve kapasitesini arttırdığı belirlenmiştir. Memba ön eğiminin 15^0 olduğu durumda, standart geniş başlıklı savaklara kıyasla savak randımanının %19.17'ye kadar arttığı görülmüştür. Ayrıca,

memba ön yüz eğiminin azaltılmasıyla kret üzerindeki geri dönüş akımının oluşmadığı gözlenmiştir.

Ebtehaj ve ark. (2015) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, yan savak debi katsayısını tahmin etmek için yeni bir yöntem olarak gen ekspresyon programlaması (GEP) kullanılmıştır. İlk olarak, yan savak debi katsayısının değerlendirilmesinde literatürde bulunan mevcut denklemlerin doğruluğu incelenmiştir. Daha sonra debi katsayısının tahminini etkileyen boyutsuz parametreler ve duyarlılık analizi dikkate alınarak beş farklı model oluşturulmuştur. Modellerin performansını değerlendirmek için belirlilik katsayısı (R^2), karekök ortalama karesel hata (KOKH-RMSE), ortalama mutlak rölatif hata (OMRH-MARE), dağılım indeksi (SI) ve yanlılık (BIAS) parametreleri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre memba Froude sayısı (Fr_1), boyutsuz savak uzunluğu (b/B), savak uzunluğunun memba su derinliğine oranı (b/y_1) ve savak yüksekliğinin uzunluğuna oranının (p/y_1) girdi olarak kullanıldığı model en iyi performansı göstermiştir. Buna göre, GEP aracılığıyla önerilen yeni denklemin, dikdörtgen keskin kenarlı yan savaklarında debi katsayısını tahmin etmek için kullanılabileceği belirtilmiştir.

Mahtabi ve Arvanaghi (2018) serbest akış koşullarında keskin kenarlı savaklar üzerinde debi katsayısının belirlenmesi için deneyler yapılmış ve R^2 ve KOKH kriterleri baz alınarak debi katsayısı denklemini en iyi şekilde belirlemek için bir optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Sayısal modellemeler, ANSYS Fluent paket programı aracılıyla yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, savak yükünün savak yüksekliğine oranının (h/P) artmasıyla debi katsayısının doğrusal olmayan bir şekilde azaldığını ve $h/P > 0.7$ için 0.7 olarak sabit kaldığını göstermiştir. Optimizasyon yapılarak debi katsayısı denkleminden elde edilen sonuçların oldukça başarılı olduğu ve yüzde hata değerlerinin ±%5 hata sınırını aşmadığı belirtilmiştir. Debi katsayısının Reynolds sayıları ile değişimi $h/P > 0,6$ ve $Re > 20.000$ olduğunda debi katsayısının 0.7 sabit değerine ulaştığını göstermiştir.

Roushangar ve ark. (2016) tarafından genetik algoritma ile birleştirilmiş destek vektör makinaları (DVM-GA) ve GEP yöntemleri kullanılarak trapez ve dikdörtgen

keskin kenarlı yan savakların debi katsayısı tahmin edilmeye çalışılmıştır. Tahmin modellerin performanslarının değerlendirilmesi için korelasyon katsayısı (R), ortalama normalleştirme hatası (ONH-MNE) ve Nash-Sutcliffe indeksi (NS) parametreleri başarı kriteri olarak kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlardan, test döneminde trapez ve dikdörtgen yan savakların debi katsayısının belirlenmesinde DVM-GA modelinin GEP'ten daha başarılı sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

Parsaie (2016) tarafından yapılan çalışmada, yan savakların debi katsayının tahmin edilmesinde ampirik formüller ve yapay sinir ağı modellerinden, çok katmanlı algılayıcı (MLP) ve radyal tabanlı (RBF) fonksiyonu kullanılmıştır. Ayrıca elde edilen sonuçları Emiroglu ve ark. (2011) tarafından verilen ampirik formülle uyumlu olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, RBF modelinde gizli katmanda on nöron bulunması durumunda, bu RBF modelinin Emiroğlu formülünden biraz daha iyi olduğunu göstermiştir. Çalışma sonucunda elde edilen MLP fonksiyonuna ait başarı kriterlerinden (R^2 =0.89 ve KOKH =0.067) bu modelin deşarj katsayısını tahmin etmek için RBF modeline kıyasla daha uygun performansa sahip olduğunu göstermiştir.

Mohammadzadeh-Habili ve ark. (2016) sonlu kret uzunluklu ve çeyrek daire kretli savakla ilgili deneysel çalışma gerçekleştirerek iki farklı kret durumunun hidrolik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Toplam savak yükünün savak kret uzunluğuna oranının (H/L) 1.82'den büyük olduğu durumlarda, alt nap bölgesinde akımın savak kretinden ayrıldığı ve savak kreti ile yeniden temas kuramadığı görülmüştür. H/L oranının 2.2'den küçük olduğu durumlarda sonlu kret uzunluğuna sahip savağın üzerindeki akımda meydana gelen ayrılma durumunun oluşmadığı belirlenmiş ve bu durumunda çeyrek daire kretli savaklar kullanılarak elde edilen debi katsayısının diğer modele kıyasla daha büyük olmuştur. Ayrıca, H/L>1.52 ve H/L>2.2 için sonlu kret uzunluğu savak ve çeyrek daire kret bent kret yüzeyinde negatif basınçlar elde edilmiş ve bu sonuçtan çeyrek daire kretli savakların kavitasyon tehlikesine karşı daha az duyarlı olduğunu ifade etmişlerdir.

Jalil ve ark. (2016) tarafından tek basamaklı geniş başlıklı savakla etkileşimde bulunan açık kanal akımı FLOW-3D programında k-ε türbülans modeli ve HEC-RAS programında düzenli akım modeli kullanılarak sayısal olarak modellenmiştir. Bu sayısal modellemeler sonucunda elde edilen sonuçlar, farklı akış durumlarını içeren laboratuvar ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. Sayısal modellerden memba bölgesinde Flow -3D, savak üzerindeki yavaş değişen akım bölgesinde HEC-RAS paket programı sonuçları diğer modele kıyasla daha başarılı olmuştur. Ayrıca, sayısal modeller kritik derinliği ve bunun eşik derinliği ile ilişkisini tatmin edici bir doğrulukla tahmin etmiştir. Savak kreti ve sonrasındaki basamakta düşü üzerindeki akışının sayısal modellemesinde, HEC-RAS paket programının FLOW-3D'ye kıyasla bu eğimli profilleri dikey yüzleri geçerek üretme konusunda sınırlı kaldığı görülmüştür. Öte yandan, her iki model de hidrolik sıçramadan önceki kritik üstü akışı başarılı bir şekilde tahmin edememiş olsa da hidrolik sıçramanın yerini başarılı tahmin ettiği belirtilmiştir.

Parsaie ve ark. (2016) tarafından yan savakların debi katsayısını tahmininde destek vektör makinesi (DVM) tekniği, yapay sinir ağları (YSA) ve uyarlanabilir nöro bulanık çıkarım (ANFIS) tahmin yöntemleri kullanılmıştır. Tahmin yöntemlerinin sonuçlarının karşılaştırılmasından YSA ve ANFIS modellerinin debi katsayısını tahmin etmede iyi bir performans gösterdiği ve radyal tabanlı çekirdek fonksiyonlu DVM modelinin bu iki modelden daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir. YSA, ANFIS ve DVM modellerinin duyarlılık analizleri, Froude sayısı ve savak uzunluğunun savak membasındaki su derinliğine oranının, debi katsayısının tahmini için en etkili parametreler olduğunu göstermiştir.

Ozgenc Aksoy ve Doğan (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, memba yüz eğiminin geniş başlıklı savak debisinin verimine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Kararlı hal koşulları altında üç farklı deşarj değeri kullanılarak dört farklı yaklaşma açısında ölçümler gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar, debi katsayısının sadece kret uzunluğunun bir fonksiyonu olmadığını, aynı zamanda yaklaşma açısının bir fonksiyonu olduğunu göstermiştir. Debi katsayısının hesabı için yaklaşma açısını içeren modifiye edilmiş yeni boyutsuz ampirik bir ilişki önerilmiştir.

Arvanaghi ve Azimi (2016) tarafından, trapez savaklara ait debi katsayısını arttırmak için deneysel yöntem araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, trapez ve yarım daire geometrilerine sahip savakların birleştirilmesiyle debi katsayısının %15'e kadar arttığını göstermiştir. Çalışma sonucunda, uygun kesitlerin birleştirilmesi ve debi talebine göre optimum şekillerin belirlenmesiyle savaklar için debi katsayısının önemli ölçüde arttırılabileceği ve su kullanım verimliliğinin de artacağı belirlenmiştir.

Kizilaslan ve Demirel (2017) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, memba yüzü ve savak kret bölgesi yuvarlatılmış geniş başlıklı savakların memba bölgesindeki akım yapısı, iki boyutlu Kararsız Reynolds-Ortalamalı Navier-Stokes Simülasyonlarıyla (URANS) sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal simülasyonlar, farklı akış hızları ve savak yuvarlama parametreleri için OpenFOAM programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kanal tabanı ve savak kreti üzerindeki olumsuz basınç gradyanlarını ve ayrılma etkilerini doğru bir şekilde hesaplamak için Kayma Gerilme Taşıma (SST) k-ω türbülans modeli kullanılmıştır. Sayısal model çalışmalarının sonuçlarından, bu yöntemlerin memba bölgesindeki yuvarlanma oranının ayrılma bölgesinin uzunluğu üzerindeki etkisine odaklanılarak debi katsayısının hesap edilmesinde kullanılabileceği belirlenmiştir.

Al-Shukur ve ark. (2017) tarafından farklı akım koşulları altında üçgen savak geometrisinin debi katsayısı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Serbest akım koşullarında beş memba yüz açısında (17^o, 22^o, 27^o, 32^o ve 37^o) ve üç farklı savak yüksekliğinde (10, 15 ve 20 cm) toplam 15 fiziksel model çalışması yapılmıştır. Sonuçlar, artan akım hızının yanı sıra savak yüksekliğinin azalmasıyla debi katsayısı değerinin artacağını ve aynı zamanda debi katsayısının memba eğimi ile doğru orantılı ve mansap eğimi ile ters orantılı olduğunu göstermiştir. Ayrıca, yeni deneysel çalışmalar için Flow-3D programı kullanılmıştır. Farklı yükseklik ve memba eğimleri altında C_d katsayısını tahmin etmek için ampirik bir ilişki elde edilmiştir.

Shaymaa ve ark. (2017), geniş başlıklı savaklar üzerindeki açık kanal akımının su yüzü profilini, deneysel ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği modeli ile iki ve üç

boyutlu olarak modellemişlerdir. Sayısal modellemede, RANS denklemleri SKE türbülans kapatma modeli kullanılarak çözülmüştür. Sayısal modelin savak üzerindeki su yüzeyi profilinin davranışını tanımlama yeteneğini değerlendirmek için sayısal model sonuçları deneysel su yüzü profilleriyle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda, deneysel ve sayısal su yüzü profilleri arasındaki hatanın ortalama %2'den az olmasından dolayı sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu değerlendirilmiştir.

Jiang ve ark. (2018) OpenFOAM programı kullanılarak trapez savakların memba yüz açılarının bu savaklara ait debi katsayısına olan etkisini araştırmışlardır. Debi katsayısının belirlenmesi için, farklı memba yüz açılarına (10^0, 15^0, 22.5^0, 30^0, 450, 60^0, 75^0, 90^0) sahip sekiz trapez geniş başlıklı savak konfigürasyonu serbest akış koşulları altında modellemeler gerçekleştirilmiştir. Sayısal modellemelerde su-hava arakesitinin belirlenmesinde akışkan hacimleri yöntemi ve temel denklemlerin çözümünde SKE ve SST türbülans modelleri kullanılmıştır. Sayısal modelleme sonucunda elde edilen bulgular, literatürde bulunan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sayısal modellerin başarısını değerlendirmek için KOKH ve OMYH kriterleri kullanılmıştır. Karşılaştırma sonucunda, SKE modelinin SST türbülans modeline kıyasla daha başarılı modelleme yaptığı belirlenmiştir. Ek olarak, debi katsayısı ve akış ayırma bölgesi de dahil olmak üzere akış özellikleri üzerindeki memba yüz açısının etkileri de bu çalışmada tartışılmıştır.

Chen ve ark. (2018), dikdörtgen kısa başlıklı bir savakta memba ve mansap eğimlerinin debi katsayısı üzerindeki etkilerini sistematik olarak incelemek için sayısal modellemeler yapmıştır. Sayısal modellemelerde, su yüzü profillerinin elde edilmesinde akışkan hacimleri yöntemi, temel denklemlerin çözümünde ise Renormalization Grup k-ε (RNG) türbülans modeli kullanılmıştır. Deneysel ve sayısal modelleme sonucunda elde edilen debi katsayısı ve serbest su yüzü profilleri karşılaştırılmıştır. Debi katsayıları arasındaki farkın savak yükünün ve memba yüz eğiminin artmasıyla azalacağı ve mansap eğiminin azalmasıyla artacağı belirlenmiştir. Belirli bir H_0 için debi katsayısının memba yüz eğimiyle dışbükey parabolik ilişkisi ve mansap yüz eğimiyle parçasal doğrusallık ilişkisi olduğu tespit edilmiştir. Maksimum debi katsayısı mansap eğiminin 0.8 olduğu durumda elde edilmiştir.

Fathi-moghaddam ve ark. (2018) tarafından çeşitli yan eğimlere sahip üçgen ve geniş başlıklı gabion savaklarla etkileşim halindeki akımın hidrolik parametreleri sayısal olarak incelemiştir. 256 adet sayısal modelin sonuçları, laboratuvar deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak doğrulanmıştır. Ayrıca, üçgen savakların memba eğiminin ve geniş tepeli gabion savakların mansap eğiminin gabion savakların performansı üzerinde oldukça etkili olduğu belirlenmiştir.

Ayaz ve Mansoor (2019), batmış ve serbest akım durumlarında eğik keskin kenarlı savaklara ait debi katsayısını deneysel verileri kullanarak YSA modeliyle tahmin etmişlerdir. Daha sonra YSA ile tahmin edilen debi katsayıları kullanılarak debiler hesaplanmıştır. Bu şekilde tahmin edilen debi değerleri Borghei ve ark. (1999) tarafından önerilen geleneksel regresyon yöntemi sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve hata oranın %±5 olduğu belirlenmiştir. Öte yandan, geliştirilen YSA modelleri debi katsayılarının yanı sıra debileri tahmin etmede ±%1 hata oranına sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, çalışmada yer alan tüm parametreler (savak yüksekliği, eğik savak uzunluğu, savak kret su yükü ve mansap bölgesi savak yükü) için geliştirilen YSA modellerinin duyarlılık analizleri yapılmıştır. YSA-1 modelinde, eğik savak uzunluğunun (L) çok ve savak yüksekliğinin (P) ise en az duyarlı girdi değişkeni olduğu, YSA-2 modelinde ise savak uzunluğu (L) en fazla ve mansap bölgesi savak yükünün (H_d) en az duyarlı girdi değişkeni olduğu belirlenmiştir.

Roushangar ve ark. (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, basamaklı dolusavakların debi katsayısının tahmin edilmesinde GEP ve DVM yöntemleri kullanılmıştır. Tahmin modellerinde girdi olarak, napped ve skimming rejimlerinin verileri ve farklı boyutsuz geometrik ve hidrolik parametreler tercih edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, uygulanan yöntemlerin kademeli dolusavaklar için deşarj katsayısının modellenmesinde yüksek kapasiteye sahip olduğunu göstermiştir. DVM sonuçlarının Çoklu Doğrusal Regresyondan (MLR) elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmasından, MLR modelinin performansının uygun olmadığını göstermiştir. Bu sonucun ortaya çıkmasında, debi katsayısının doğası gereği karmaşık ve doğrusal olmadığının rol oynadığı belirlenmiştir. Önerilen her iki yöntem için duyarlılık analizinin sonuçları,

nap akışındaki Fr_1 ve H/y_1 parametrelerinin ve kaymalı akıştaki Fr_1 ve Re parametrelerinin kademeli dolusavak debi katsayısının modellenmesinde en önemli etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Sonuçlar ayrıca, debi katsayısının modellenmesinde DVM'nin GEP'i nispeten geride bıraktığını ortaya koymuştur. Debi katsayısının tahmin edilmesinde GEP modelinin kullanılması şiddetle tavsiye edilmiştir.

Fulasa (2019), farklı geometrilere sahip geniş başlıklı savakların üzerindeki akımı, hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemlerini (HAD) kullanarak modellemiştir. Keskin kenarlı geniş başlıklı bir savak üzerindeki 14 farklı akımın su yüzeyi profilleri, Hager ve Schwalt (1994) tarafından bir laboratuvarda ölçülmüş ve OpenFOAM kullanılarak doğrulanmıştır. Sayısal modelde duvar bölgelerinin yakınında yüksek konsantrasyona sahip yapılandırılmış bir ağ kullanılmıştır. Beş türbülans modeline sahip Reynolds ortalamalı Navier-Stokes denklemleri: SKE, RNG, Realizable k-ε (RKE), Standart k-ω (SKW) ve SST türbülans modelleri kullanılarak çözülmüş ve sayısal su yüzeyi profilleri elde edilmiştir. Farklı türbülans modelleri kullanılarak elde edilen sayılsa su yüzü profillerinin deneysel su yüzü profilleriyle karşılaştırılmasından SST türbülans modelinin kullanılan diğer modellere kıyasla su yüzü profilini daha iyi tahmin ettiği belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, sayısal ve deneysel su yüzü profillerinin birbiriyle oldukça uyumlu olduğu ve debi katsayısı değerlerinin oldukça küçük hatalarla doğru tahmin edildiği ifade edilmiştir.

Hussein ve Jalil (2020) tarafından dip açıklığı olan birleştirilmiş keskin başlıklı trapez savakların üç farklı fiziksel modeli ve keskin başlıklı trapez savak fiziksel modeli ayrı ayrı kullanılmış ve her model için sekiz farklı akım durumu deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Alt açıklığın üç konfigürasyonunun test edildiği; ilk konfigürasyon dikdörtgen bir kapı olurken, diğer iki konfigürasyon (1V:4H) ve (1V:2H) olmak üzere iki farklı yan eğime sahip yamuk şeklindeki geometrilerden oluşturulmuştur. Savak kapısı sisteminden geçen su yüzeyi profilleri, savak membasında 2.11h mesafede üniform akış gösteren tüm modellerin tüm 32 farklı durum için ölçülmüştür. Akışı sayısal olarak simüle etmek için ANSYS CFX programı kullanılmıştır. Sayısal modelin doğrulanmasında, deneysel olarak elde edilen su

yüzeyi profilleri ve debi değerleri kullanılmıştır. Ayrıca, sonuçlar bu kombinasyonlara sahip savakların debi katsayısının 0.52-0.58 arasında değiştiğini göstermiştir. Ayrıca, trapez kapılı her iki modelin de dikdörtgen kapılı modele göre daha yüksek bir akım debilerini geçirdiği ve trapez kenar eğimleri (1H:2V ve 1H:4V) için sırasıyla ortalama debi yüzde %40.78 ve %19.40 artmıştır. Ek olarak, alt açıklığın daha hafif trapez kenar eğimlerine sahip kombine sistem, geleneksel sisteme kıyasla yaklaşık %40 olan savak akım boşaltmak için daha iyi bir performansa sahip olmuştur.

Abraham ve Salmasi (2020), memba bölgesindeki su derinliğinin, savak memba yüzü eğiminin ve ogee savak tasarım yüksekliğinden farklı olabilen gerçek savak yükünün ogee savakların debi katsayısı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Ogee savakların tasarım için kullanılabilecek pratik denklemleri tanıtmak için uygulanan çoklu doğrusal olmayan regresyon teknikleri ve Gen İfade Programlama (GEP) modelleriyle deneysel veriler kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, debi katsayısını tahmin etmede R^2, RMSE ve MAE başarı kriterlerine göre GEP yönteminin regresyon analizinden üstün olduğu belirlenmiştir.

Mirzaei ve Sheibani (2020), kemerli keskin kenarlı savakların hidrolik davranışını incelemişler ve dikdörtgen savaklarla karşılaştırmışlardır. Bu amaçla, her biri beş farklı yükseklikte dört farklı yay uzunluğuna sahip savaklarla fiziksel model üzerinde laboratuvar çalışması yapılmıştır. Deneyler, serbest akış koşulunda hem havalandırılmış hem de havalandırılmamış savak durumlarında gerçekleştirilmiş, savaktaki debi oranı ve su basma miktarları ölçülmüştür. Sonuçlar, kemerli savak debi katsayısının, ciddi şekilde H/P oranına bağlı olmakla birlikte, savak ark uzunluğunun bir fonksiyonu olduğunu kanıtlamıştır. Bu katsayının, H/P oranına göre değişimlerin doğrusal olmadığı ve dikdörtgen savaktan farklı olduğu belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar, H/P değerlerinin 0.2'den küçük olduğu durumlarda kemerli savaklara ait debi katsayısının dikdörtgen savaklara ait debi katsayısından büyük olduğunu ortaya çıkarmıştır. Ayrıca, kemerli savak debisi aynı durumdaki dikdörtgen savaktan her zaman daha fazla olmuştur. Mevcut deneylerin değerlendirme aralığında, dikdörtgen savaklara göre kemerli savak debi artışları %10'dan %80'e kadar değişmiş ve debi

katsayısının savak kretinin yüksekliğine ve uzunluğuna bağlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Kulkarni ve Hinge (2020) tarafından savak üzerindeki su yüksekliğinden bağımsız olarak sabit bir debi katsayısını koruyarak çok çeşitli debilerde etkili bir şekilde ölçebilen bileşik geniş tepeli savak tasarımına yönelik yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Daha önce gerçekleştirilen deneylerde C_d değeri, 0.518 ile 0.648 arasında değişirken, daha sonra geniş başlıklı savak modeli en iyi sonuçlara uyacak şekilde modifiye edilmiş ve yapılan değişikliklerle daha yüksek debi katsayısı elde edilmiştir.

Alwan ve ark. (2020) tarafından dip menfezleri ile donatılmış dikdörtgen kesitli keskin başlıklı bir savaktan oluşan kombine savağın debi katsayısı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Çeşitli geometrik şekillere sahip on farklı savak modeli önerilmiştir. Sonuçlar, standart savak için debi katsayısı değerinin 0.602 olduğunu, savak deliği için ise 0.605 ile 0.638 arasında değiştiğini göstermiştir. Ayrıca, debi katsayısını modellemek için Çok Katmanlı Algılayıcı Yapay Sinir Ağı (MLP-YSA) ve Çok Katmanlı Doğrusal Olmayan Regresyon (MNLR) teknikleri kullanılmış ve bu modellerin başarısının belirlenmesinde R^2 ve göreceli hata kriterleri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlardan, MLP-YSA modelinin debi katsayısını istatistiksel regresyon tekniğine kıyasla yapay zekâ kullanılarak daha iyi tahmin ettiği bildirilmiştir.

Zerihun (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, batık ve serbest durumda trapez kısa başlıklı savakların debi katsayısı incelenmiştir. Çalışma sonucunda, savak memba ve mansap yüzü eğimlerinin savakların debi katsayısının belirlenmesinde etken parametreler olduğu belirlenmiştir.

Soydan Oksal ve ark. (2020) tarafından memba ve mansap yüz eğiminin 1/5 olduğu trapez savak ile etkileşim halinde olan açık kanal akımının sayısal ve deneysel analizi yapılmıştır. Sayısal modellemelerde temel denklemlerin çözümünde, RANS tabanlı SKE, RKE, Modifiye k-ω (MKW) ve Reynolds Stress Model (RSM) türbülans modelleri, bu modellerin yanında RANS tabanlı olmayan Büyük Girdap (LES) ve Ayrılmış Girdap Simülasyonları (DES) kullanılmıştır. Trapez savakların farklı memba

ve mansap yüzü eğimleri için elde edilen debi katsayısı değerlerini kullanılan trapez savak geometrisiyle karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak, debi katsayısının deneysel ve sayısal karşılaştırmasından, savak yapısının dikliği azaldıkça debi katsayısının arttığını ve sayısal modelleme kullanılarak farklı akış yapısı konfigürasyonları için daha fazla debi katsayısının elde edilebileceğini ve karşılaştırılabileceğini belirlemişlerdir.

Rezazadeh ve ark. (2020), keskin kenarlı savakların üzerindeki akım sayısal ve deneysel olarak modellemiştir. Sayısal modellemelerde, keskin kenarlı savağın geometrik şekillerinin basınç, hız, su yüzü profillerine ve debi katsayısına olan etkisi araştırılmıştır. Sayısal olarak keskin kenarlı savakların üzerindeki akımın üç boyutlu modellenmesinde OpenFOAM programında temel denklemlerin çözümünde RNG türbülans modeli ve su hava arakesitinin belirlenmesinde ise Akışkan Hacmi yöntemi (VOF) kullanılmıştır. Sayısal ve deneysel olarak elde edilen su yüzü profilleri ve akım hızlarında korelasyon değeri 0.96 olarak hesap edilmiştir. Trapez, dikdörtgen ve üçgen keskin kenarlı savaklar için elde edilen debi katsayılarının karşılaştırılmasından maksimum değerin dikdörtgen savakta, en küçük değerin ise üçgen keskin kenarlı savakta elde edildiği belirtilmiştir.

Şimşek ve ark. (2021) tarafından farklı memba ve mansap eğimlerine sahip trapez geniş başlıklı savak akımına ait toplam 91 savak yükü değeri (H_0) deneysel olarak ölçülmüş ve trapez savaklara ait debi katsayısı hesap edilmiştir. Hesaplanan debi katsayısı değerleri, boyutsuz parametreler yardımıyla oluşturulan sekiz farklı girdi kombinasyonu ile Destek Vektör Makineleri yöntemindeki üç farklı çekirdek fonksiyonu (Lineer, Polinom ve Gaussian) kullanılarak tahmin edilmiştir. Oluşturulan modellerin performansını belirlemek için Karekök Ortalama Karesel Hata (KOKH), Ortalama Mutlak Yüzde Hata (OMYH), belirlilik katsayısı (R^2), Nash-Sutcliffe Verimlilik Katsayısı (NSE) ve Yüzde Sapma (PBIAS) değerleri başarı kriteri olarak kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, Gaussian çekirdek fonksiyonunun en başarılı model olduğu ve girdi kombinasyonu olarak savak yükü (H_0) ve kret uzunluğu (L) olmak üzere, H_0/L, ε ($H_0/(H_0+L)$), savak memba eğimi (α) ve savak mansap eğimi (β) parametrelerinin kullanıldığı kombinasyonun debi kaysayısı değerini tahmin etmede başarılı model olduğu belirlenmiştir.

Ismael ve ark. (2021) açık kanal içerisine çeşitli çaplarda silindir savakları farklı açılarda eğimli olarak yerleştirerek, bu savaklara ait debi katsayısını deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel sonuçları, radyal tabanlı yapay sinir ağları (RBFN), geri yayılmalı sinir ağları (BPNN) ve basamaklı ileri sinir ağı (CFNN) yöntemleriyle tahmin etmişlerdir. Tahmin modellerin karşılaştırılmasında KOKH, OKH ve korelasyon katsayısı değerleri ölçüt olarak kullanılmıştır. Karşılaştırma kriterlerine göre RBFN yöntemi çalışmada kullanılan diğer tahmin yöntemlerine kıyasla deneysel debi katsayısı değerlerine daha yakın sonuçlar vermiştir.

Ali ve ark. (2021) tepe açısı 30°, 45°, 60°, 75° ve 90° olan savak yüksekliğinin 15 cm, 18 cm ve 20 cm olduğu üçgen keskin kenarlı savakların debi katsayısı yapay zekâ yöntemiyle analiz edilmiştir. Yapay zekâ yöntemlerinde eğitim periyodunda The Levenberg–Marquardt algoritması kullanılmıştır. Elde edilen YSA sonuçlarının değerlendirilmesinde MSE ve R değerleri kullanılmıştır. Eğitim, doğrulama ve test periyotlarında elde edilen MSE değerlerinin oldukça küçük olmasının yanında R değerlerinin 0.99 değerinden büyük olduğu belirlenmiştir. Deneysel ve tahmin edilen debi katsayısı değerleri arasındaki hatanın ±% 5 aralığında kaldığı görülmüştür. Çalışma sonucunda, YSA yönteminin, keskin kenarlı üçgen savaklara ait debi değerlerinin tahmininde tatmin edici derecede başarılı olduğu belirtilmiştir.

Li ve ark. (2021), dikdörtgen keskin kenarlı savakların debisinin tahmin edilmesi için deneysel ölçümler gerçekleştirmişler ve YSA, DVM ve ekstrem öğrenme makinaları (ELM) yöntemleriyle tahmin etmişlerdir. Tahmin modellerinde farklı girdi kombinasyonları oluşturularak, parametrelerin debi katsayısı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Kullanılan tahmin yöntemleri arasında DVM yönteminin diğer yöntemlere kıyasla daha başarılı olduğu belirlenmiştir. Reynolds sayısının ve daralma oranının debinin tahmin edilmesinde etkin parametreler olduğu görülmüştür. Ayrıca, literatürde bulunan ampirik denklemlerin sonuçlarıyla makine öğrenme modelleri karşılaştırılmıştır. Literatürde bulunan Vatankhah tarafından önerilen ampirik formülle oldukça uyumlu olduğu belirtilmiştir.

Yukarıda özetlenen çalışmalar genel olarak değerlendirildiğinde, trapez geniş başlıklı savakların debi katsayısının belirlenmesine yönelik çalışmalarda deneysel çalışmalar oldukça sık yapılmıştır. Bu çalışmaların yanında debi katsayısının belirlenmesinde farklı tahmin yöntemlerinin kullanıldığı ve bu yöntemlerin başarısının çeşitli niceliksel kriterlerine göre değerlendirildiği görülmektedir. Ayrıca, trapez geniş başlıklı savakların deneysel olarak elde edilen su yüzü profilleri ve debi katsayısı değerleri sayısal model sonuçlarının doğrulanması için de kullanılmıştır. Bunun yanında, çok kısıtlı çalışmada sayısal model deneyleri gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar koşullarının, açık kanal ve pompa kapasitesinin yetersizliklerinden dolayı daha geniş debi aralığının ve yapısal kombinasyonların deneysel olarak incelenme imkânı bulunulmamaktadır. Bu çalışmada, farklı geometrik özelliklere sahip trapez geniş başlıklı savaklara ait debi katsayısının deneysel ölçümlerle elde edilmiş ve deneysel olarak elde edilen sonuçlar sayısal modelin doğrulanmasında kullanılmıştır. Sayısal model doğrulamasından sonra laboratuvarda ölçümü yapılmayan daha geniş debi değerleri için sayısal model deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, deneysel ve sayısal model sonucunda elde edilen debi katsayısı değerleri farklı girdi kombinasyonlarında farklı yapay zekâ yöntemleri ve makine öğrenme teknikleriyle tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmanın mevcut çalışmalardan farkı, deneysel olarak belirli sınırlar içerisinde kalan veri setinin sayısal modeller yardımıyla daha geniş bir aralığa sahip olması sağlanmış olmasıdır. Ayrıca, deneysel olarak ölçülme imkânı olmayan savak tipleri de sayısal olarak değerlendirilebilmiştir. Oldukça geniş bir veri seti kullanılarak, farklı yapay zekâ yöntemleri yardımıyla boyutsuz girdi parametrelerine bağlı olarak trapez geniş başlıklı savaklara ait debi katsayısı tahmin edilmiştir.

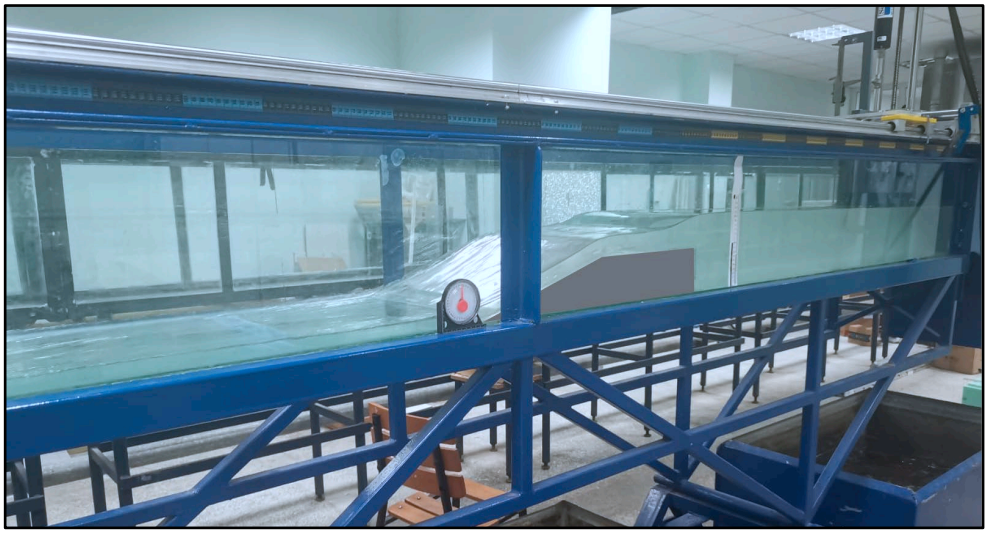
3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu tez çalışmasında farklı memba ve mansap eğimlerine sahip trapez geniş başlıklı savakların debi katsayısı deneysel ve sayısal modellemeler sonucunda elde edilen bulgular ile hesap edilmiştir. Bu elde edilen bulgular yapay zekâ yöntemleri kullanılarak tahmin edilmeye çalışmıştır. Çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlere ait detaylı bilgi aşağıda sunulmuştur.

3.1. Materyal

Bu tez çalışmasında, farklı memba ve mansap eğimlerine sahip trapez geniş başlıklı savağın debi katsayısının belirlenmesi için çok sayıda deneysel ölçümler gerçekleştirilmiştir. Deneyler, Harran Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Hidrolik Laboratuvarında bulunan dikdörtgen kesitli açık kanal modelinde yapılmıştır (Şekil 3.1.). Bu açık kanal modelinin uzunluğu 4 m, genişliği (b) ve yüksekliği 0.35 m'dir. Trapez geniş başlıklı savakla etkileşimde bulunan açık kanal akımın derinliği 0.1 mm hassasiyetine sahip dijital limnimetreyle, akım debisi ise kanal giriş bölgesindeki boru üzerinde bulunan 0.01 m^3/saat hassasiyetli ultrasonik debi metre kullanılarak ölçülmüştür. Deneyler gerçekleştirilirken farklı zamanlarda çok sayıda debi ve yükseklik okuması yapılmış ve bu değerlerin ortalaması alınarak elde edilen ortalama değerler debi katsayısının hesabında kullanılmıştır.

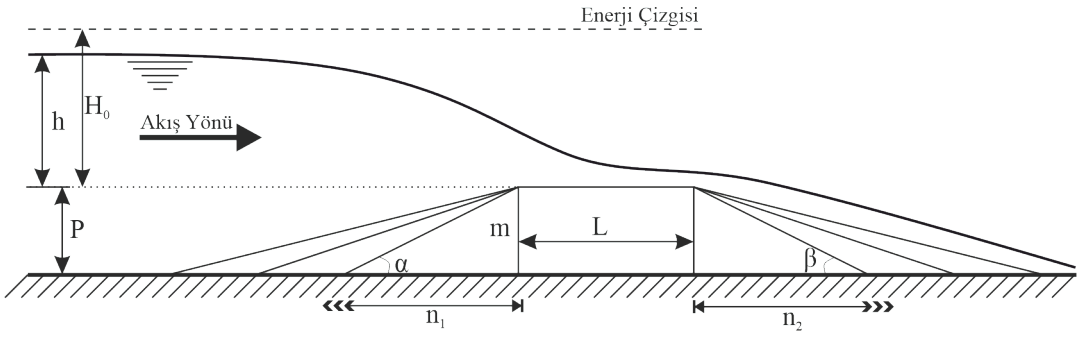
Trapez geniş başlıklı savak yapısı modüler olarak tasarlanmış olup dikdörtgen ve üçgen elamanlar kullanılarak farklı eğimlerin elde edilmesi pratikleştirilmiştir. Trapez savağın teşkil edilmesinde kullanılan dikdörtgen parça, açık kanal içerisine kanal başlangıcından itibaren 1.40 m uzağa yerleştirilmiştir. Böylelikle, kanal girişinden itibaren akımın düzenli olması sağlanmıştır.



Şekil 3. 1. Deney düzeneği ve şematik görüntüsü

Laboratuvar ortamında Şekil 3.2.'de verilen savak modellerinde 91 adet ölçüm gerçekleştirilmiş ve bu deneysel veriler kullanılarak Hager ve Schwalt (1994) tarafından önerilen Denklem 3.1'de verilen debi katsayısı hesaplanmıştır .

$$C_d = \frac{Q_{gerçek}}{b\sqrt{2gH_0^{\,3}}} \tag{3.1}$$



Şekil 3. 2. Trapez geniş başlıklı savakların geometrik özellikleri

Laboratuvar ortamında yapılan deneysel ölçümler sayısal modellerin doğrulanmasında kullanılmış ve bu veriler dışında her bir savak geometrisi için 17 adet sayısal model yapılmıştır. Ayrıca, deneysel olarak ölçüm yapılmayan α=β=45° ve

α=β=11.3° durumlarında 30 adet sayısal model yapılarak, sayısal modellemenin başarısı değerlendirilmiştir.

3.2. Yöntem

3.2.1. Sayısal Modelleme

Bilgisayar teknolojinde meydana gelen gelişmelerin sağlamış olduğu avantajlardan yararlanılarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği tekniklerine dayalı geliştirilen sayısal modelleme yazılımları su yapı etkileşiminin bulunduğu akım problemlerinin çözümünde oldukça sık tercih edilmektedir. Bu tez çalışmasına konu olan, trapez geniş başlıklı savak ile etkileşimde bulunan açık kanal akımı; zamana ve yere bağlı, iki-boyutlu, sıkışmayan, türbülanslı ve serbest yüzeyli akım özelliklerine sahiptir. Bu tür açık kanal akımının çözümü için akımın hareketini idare eden Denklem 3.2, 3.3 ve 3.4'te sırasıyla verilen süreklilik ve momentum denklemlerinin *x* ve *y* doğrultusundaki bileşenlerinin çözülmesi gerekmektedir.

Süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial \overline{u}}{\partial x}+\frac{\partial \overline{v}}{\partial y}=0 \tag{3.2}$$

Momentumun korunumu denkleminin *x* doğrultusundaki bileşeni:

$$\rho\left(\frac{\partial \overline{u}}{\partial t}+\overline{u}\frac{\partial \overline{u}}{\partial x}+\overline{v}\frac{\partial \overline{u}}{\partial y}\right)=\rho X-\frac{\partial \overline{p}}{\partial x}+\mu\left(\frac{\partial^2 \overline{u}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 \overline{u}}{\partial y^2}\right)+\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \tag{3.3}$$

Momentumun korunumu denkleminin *y* doğrultusundaki bileşeni:

$$\rho\left(\frac{\partial \overline{v}}{\partial t}+\overline{u}\frac{\partial \overline{v}}{\partial x}+\overline{v}\frac{\partial \overline{v}}{\partial y}\right)=\rho Y-\frac{\partial \overline{p}}{\partial y}+\mu\left(\frac{\partial^2 \overline{v}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 \overline{v}}{\partial y^2}\right)+\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} \tag{3.4}$$

Yukarıdaki denklemlerde bulunan $\overline{u}$ ve $\overline{v}$ sırasıyla x ve y doğrultusundaki zamansal ortalama hız bileşenini, X ve Y sırasıyla x ve y doğrultusunda birim kütleye gelen kütlesel kuvvet bileşenini, $\overline{p}$ zamansal ortalama basıncı, μ dinamik viskoziteyi, ρ akışkan yoğunluğunu ve τ_{xx}, τ_{xy} ve τ_{yy} türbülans (Reynolds) gerilmelerini ifade etmektedir.

Yukarıdaki denklemlerde bilinmeyen altı adet olmaktadır. Buna karşılık bu bilinmeyenlerin çözümü için kullanılabilecek denklem sayısı ise üç adettir. Bu denklemlerin kullanılmasıyla bilinmeyenlerin çözümü mümkün değildir. Denklemin çözümünün mümkün olması için bilinmeyen türbülans kayma gerilmelerinin çözümünde türbülans kapatma modellerinin kullanılması zorunluluktur. Doğrusal bünye denklemleri kullanılarak, türbülans kayma gerilmeleri, sıkışmayan akımlar için Boussinesq'in türbülans viskozitesi yaklaşımına göre aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$\tau_{xx} = -\rho\overline{u'u'} = \mu_t\left(\frac{\partial\overline{u}}{\partial x}+\frac{\partial\overline{u}}{\partial x}\right)-\frac{2}{3}\rho k \tag{3.5}$$

$$\tau_{xy} = -\rho\overline{u'v'} = \mu_t\left(\frac{\partial\overline{v}}{\partial x}+\frac{\partial\overline{u}}{\partial y}\right) \tag{3.6}$$

$$\tau_{yy} = -\rho\overline{v'v'} = \mu_t\left(\frac{\partial\overline{v}}{\partial y}+\frac{\partial\overline{v}}{\partial y}\right)-\frac{2}{3}\rho k \tag{3.7}$$

Burada, u' yatay doğrultudaki türbülans hız sapıncını ve v' düşey doğrultudaki türbülans hız sapıncını, μ_t türbülans viskozitesini ve k ($=\overline{u_i'u_i'}/2$) türbülans kinetik enerjisini temsil etmektedir.

Deneysel ve sayısal olarak gerçekleştirilen modellere ait savak memba ve mansap eğimleri, su yükü *(h)*, toplam savak yükü *(H_o)* değerleri ve *ε (H_o/(H_o+L))* değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Tablodan da görüleceği üzere α açısı 11.3° ile 90° aralığında yani m:n_1 değeri dik olan kısım dışında, 1/1, ½, 1/3, ¼ ve 1/5, β ise 90° dışında memba ön yüz eğimi ile aynı aralıkta değişmekte, diğer bir ifade ile m:n_2 değeri 1/1, ½, 1:3, 1:4 ve 1:5 olmaktadır. Memba bölgesinde su yüksekliği 2.47 cm

≤h≤11.76 cm değişirken, savak yükü ise 2.49 cm ≤ H_o ≤12.25 cm aralığında değişmektedir. Savak yükünün, savak kreti ile olan ilişkisini tanımlayan ε ifadesi ise tüm modeller için 0.08 ile 0.27 arasında değişmektedir.

Çizelge 3. 1. Savak modellerine ait parametreler ve kullanılan akım özellikleri

			h		H_o		ε	
Model	**α (°)**	**β (°)**	**Min. (cm)**	**Mak. (cm)**	**Min. (cm)**	**Mak. (cm)**	**Min.**	**Mak.**
Model 1	26.6	26.6	2.57	10.67	2.58	11.19		
Model 2	18.4	18.4	2.67	10.93	2.69	11.46		
Model 3	14.0	14.0	2.47	10.98	2.49	11.51		
Model 4	90.0	18.4	2.93	11.76	2.95	12.25		
Model 5	26.6	18.4	2.80	11.06	2.82	11.58	0.08	0.27
Model 6	26.6	14.0	2.73	11.59	2.75	12.09		
Model 7	18.4	14.0	2.80	11.46	2.78	10.94		
Model 8	45.0	45.0	2.78	10.95	2.79	11.46		
Model 9	11.3	11.3	2.61	11.32	2.60	10.80		

Son yıllarda bilgisayar teknolojisinde yaşanan gelişmeler, farklı mühendislik disiplinlerinde karmaşık problemlerinin çözümünün bilgisayarlar aracılığı ile yapılabilmesi imkânı sunmaktadır. Bu gelişmelerden dolayı, hesaplamalı akışkanlar dinamiğine dayalı yazılımların sayısının artmasıyla akım yapı etkileşiminin bulunduğu hidrolik problemlerinin ve su kaynaklarının sayısal modellemesinde bu yazılımlar araştırmacılar tarafından oldukça sık kullanılmaya başlanmıştır. Sayısal model çalışmaları, fiziksel model çalışmalarına kıyasla ekonomik olması, tekrar edilme yeteneğine sahip olması ve daha az insan gücü gerektirmesi gibi birçok avantaja sahiptir. Ayrıca, fiziksel model çalışmalarında akım özellikleri veya yapı ile ilgili detayların elde edilmesinde gereksinim duyulan özel ölçüm sistemleri ve ekipmanları, sayısal model çalışmalarında gerekmemektedir. Bunun gibi birçok avantaja sahip olan sayısal modelleme çalışmalarının sonuçlarının güvenirliliğinin arttırılması için fiziksel model çalışmalarının sonuçlarıyla doğrulanması gerekmektedir. Bu şekilde, daha fazla problemle ilgili doğrulamanın olması halinde fiziksel model çalışmalarının yerine sayısal model çalışmaları yapılabilecektir.

Bu tez çalışmada, trapez geniş başlıklı savakla etkileşimde bulunan iki boyutlu, düzenli, türbülanslı ve sıkışmayan açık kanal akımının hareketini yöneten denklemler

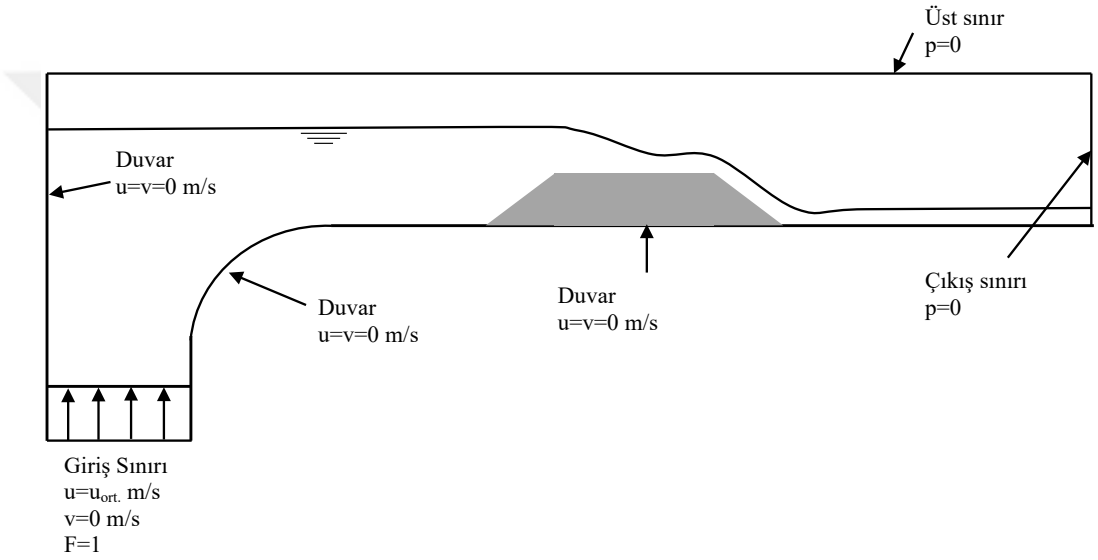
(süreklilik ve momentum) sonlu hacimler yöntemine dayalı çözüm yapan ANSYS–Fluent paket programı ile çözülmüştür. Temel denklemlerde bilinmeyen olarak bulunan türbülans gerilmesinin modellemesinde Boussinesq yaklaşımına dayalı çözüm yapan Re normalization Group (RNG) türbülans modeli kullanılmıştır. Bu modelde türbülans gerilmelerinin hesaplanmasında türbülans kinetik enerji (k) ve türbülans kinetik enerji kayıp oranı (ε) denklemleri kullanılarak denklem takımının çözümü yapılmıştır. RNG modelinin sınır tabakası ayrılmalarının ve ikincil akımların mevcut olduğu açık kanal akımlarının modellenmesinde başarılı olduğu belirtilmiştir. Birçok araştırmacı tarafından RNG modelinin trapez başlıklı savakların sayısal modellemesinde de başarılı olduğu bildirilmiştir.

Sayısal modellemelerde su hava arakesitinin belirlenmesi için Akışkan hacimleri Yöntemi farklı araştırmacılar tarafından kullanılmış ve bu yöntemin oldukça başarılı olduğu belirtilmiştir. Bu yöntemde "*F*" ile ifade edilen hesaplama ağı elemanın hacimsel doluluk oranı tanımlanmaktadır (Denklem 3.8). Hesaplama ağı elemanının su ile dolu olması durumunda F=1, hesaplama ağı elemanın hava ile tamamen dolu olması durumunda ise F=0'dir. Su ile havanın ara kesitinin bulunduğu bölgede ise F değeri hücrenin doluluk oranına göre sıfır ile bir arasında değişen bir değer almaktadır (0<F<1). "Geo-Reconstruct" yaklaşımı, akışkan hacimleri yöntemi ile su-hava arakesitinin hesaplanmasında kullanılmıştır (ANSYS, 2022).

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u\frac{\partial F}{\partial x} + v\frac{\partial F}{\partial y} + w\frac{\partial F}{\partial z} = 0 \tag{3.8}$$

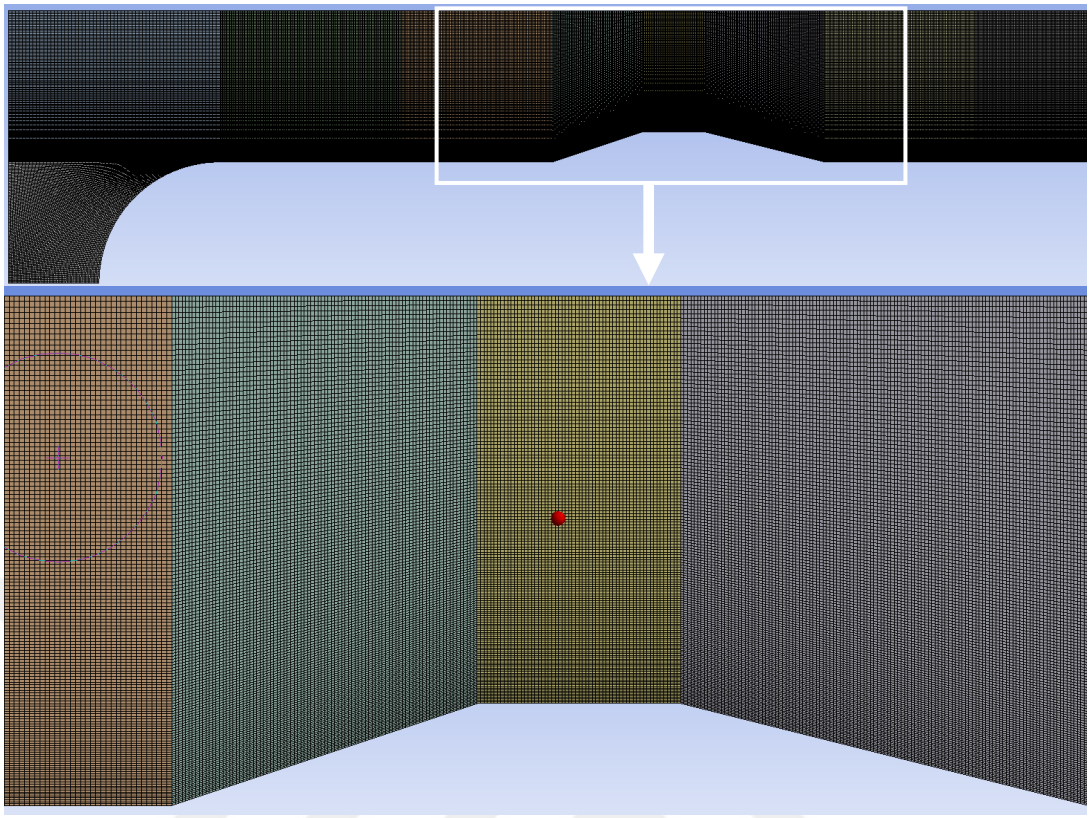
Sayısal modellemelerde problemin çözülebilmesi için çözüm bölgesinin, sınır şartlarının ve başlangıç şartlarının tanımlanması gerekmektedir. Trapez geniş başlıklı savak ile etkileşim halinde bulunan açık kanal akımının sayısal modellemesinde kullanılan çözüm bölgesi, sınır ve başlangıç şartları Şekil 3.3.'te verilmiştir. Çözüm bölgesinin tamamında akışkan hacimler yönteminde belirtilen hacimsel doluluk oranı olan F değeri sıfır olarak yani çözüm bölgesi hava ile dolu olarak tanımlanmıştır. F değeri sadece suyun kanala giriş kesiti olan velocity inlet sınırında 1 değerine sahiptir. Ayrıca, inlet sınırında deneysel verilerden elde edilen akım ortalama akım hızı düşey

hız bileşeni olarak, yatay hız bileşeni ise 0 olarak tanımlanmıştır. Kanal yüzeyleri ve savak yapısı wall (u=v=0 m/s) olarak, çözüm bölgesinin üst sınırı pressure outlet ve çıkış sınırında outlet olarak yani p=0 olarak tanımlanmıştır. Sayısal modelleme süresi, açık kanal akımının düzenli olduğu koşulların oluşması durumu (t=50 sn) olarak belirlenmiştir. Sayısal modellemelerde her bir iterasyon adımında en az 10 iterasyon yapılarak iterasyon atıklarının azaltılması amaçlanmıştır. Sayısal modellemede hesap adımı, Courant sayısı ≤2 koşulu sağlanacak şekilde kullanılan program tarafından otomatik olarak belirlenmiştir.



Şekil 3. 3. Çözüm bölgesi, sınır ve başlangıç şartları

Şekil 3.4.'te, sayısal modellemelerde kullanılan hesaplama ağı verilmiştir. Çözüm bölgesinde VOF yönteminin su hava arakesitini daha keskin ve doğru belirlemesi ve sayısal modellemede temel denklemlerin çözümünde iterasyon kayıplarının azaltılması için oldukça küçük dikdörtgen ağ elemanları oluşturulmuştur. Katı sınırla akımın etkileşim bölgesinde sınır tabakasının gelişiminin ve viskoz alt tabakanın hassas belirlenmesi için bu bölgede ağ elemanlarında sıklaştırma yapılmıştır. Trapez geniş başlıklı savağın memba ve mansap eğimlerinde ağ tasarımının düzenli olması için bu bölgelerde 8 alt bölümler tanımlanmıştır.



Şekil 3. 4. Hesaplama ağı tasarımı

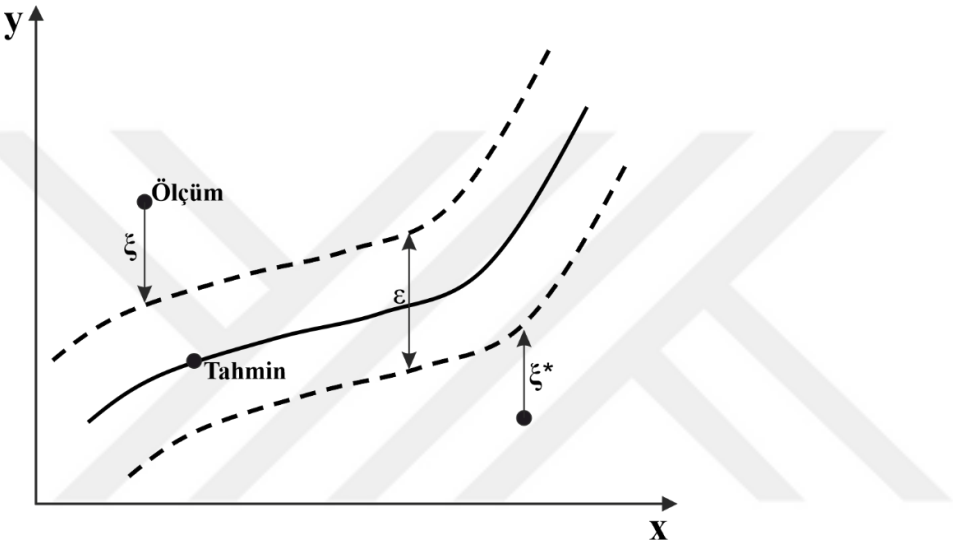
3.2.2. Yapay Zekâ Yöntemleri

Destek Vektör Makineleri (DVM)

Destek Vektör Makineleri (DVM), hem sınıflandırma hem de regresyon için kullanılabilen bir makine öğrenme modelidir (Kabacoff, 2015; Smola ve Schölkopf, 2004). Sınıflandırma, regresyon, dönüştürme ve yenilik tespiti gibi farklı öğrenme problemlerini çözmede başarılı bir yöntem olarak kabul edilmektedir (Magoulès ve Zhao, 2016). DVM teorisi başlangıçta sınıflandırma amacıyla geliştirilmiştir, daha sonra girdi değerlerine göre nicel bir çıktı tahmini yapan DVR yöntemi ortaya çıkmıştır (James ve ark., 2013). DVM ile regresyon yöntemi, ilk olarak giriş verilerini çekirdek işlevi tarafından tanımlanan yüksek boyutlu bir özellik uzayına eşler ve eğitim verilerini maksimum marjla ayıran optimum hiper düzlemi elde eder (Yu-Wei, 2015). SVR ise, aykırı değerlerin regresyon denklemleri üzerindeki etkisini en aza indirmek için katsayılar arar; ancak, yalnızca mutlak değerde bazı pozitif sabitlerden

daha büyük artıklar kayıp fonksiyonunda dikkate alınır (James ve ark., 2013; Kuhn ve Johnson, 2013).

DVR yöntemi, Denklem 3.9'da gösterildiği gibi ε-duyarsız kayıp fonksiyonları kullanır ($\varepsilon \geq 0$) (Vapnik, 2013). Böylece, Şekil 3.5.'te verilen, tahmin edilen ve gözlemlenen değerler arasındaki fark ε'dan küçükse kayıp sıfırdır ve yalnızca mutlak farkı ε'dan yüksek olan veri noktaları kayıp olarak değerlendirilir.



Şekil 3. 5. Destek vektör makinelerine ait parametreler

$$\left|y - f(x)\right|_{\varepsilon} = \begin{Bmatrix} 0, \; eğer \left|y - f(x)\right| \leq \varepsilon \\ \left|y - f(x)\right| - \varepsilon, \; yoksa \end{Bmatrix} \tag{3.9}$$

Çok boyutlu veriler için $(x_1, y_1),\ldots,(x_n, y_n)$ ($x_i \in X \subseteq Rm$, $y_i \in Y \subseteq R$). n eğitim örnek sayısıdır. Yaklaşılan çok değişkenli regresyon fonksiyonu Denklem 3.10'da gibi yazılabilir (Awad ve Khanna, 2015).

$$f(x) = w.\phi(x) + b \tag{3.10}$$

Burada $\phi(x)$, öznitelikten çekirdek uzayına dönüşümdür. DVR, tahmin edilen ve istenen çıktılar arasındaki farkı en aza indirirken epsilon değerini de minimize etmeye çalışmaktadır. Fonksiyon yaklaşım problemi, Denklem 3.11'de gösterilen bir optimizasyon problemine dönüştürülür:

$$\min \frac{1}{2}\|w\|^2 + C\sum_{i=1}^{n}\left(\xi_i + \xi_i^*\right) \tag{3.11}$$

$$\begin{aligned} &y_i - w\cdot\phi(x_i) - b \le \varepsilon + \xi_i^* && i = 1,.....,n \\ &w\cdot\phi(x_i) + b - y_i \le \varepsilon + \xi_i && i = 1,.....,n \\ &\xi_i, \xi_i^* \ge 0 && i = 1,.....,n \end{aligned}$$

Burada, ξ_i ve ξ_i^* aykırı değerlere karşı koruma sağlamak ve yumuşak geçiş için ortaya çıkan değerlerdir ($\xi_i, \xi_i^* \ge 0$). C, hatayı en aza indiren değişken bir ağırlık parametresidir.

Denklem 5'teki ikinci dereceden optimizasyon problemi, λ, λ*, α ve α* değerleri pozitif gerçek sayılar olmak üzere, Denklem 3.12'de gösterilen Lagrangian denklemi ile çözülür.

$$\begin{aligned} L(w,b,\xi_i,\xi_i^*,\lambda,\lambda^*,\alpha,\alpha^*) = {} & \frac{1}{2}\|w\|^2 + C\sum_{i=1}^{n}\left(\xi_i + \xi_i^*\right) \\ & + \sum_{i=1}^{n}\alpha_1^*\left(y_i - w.\phi(x) - b - \varepsilon - \xi_i^*\right) \\ & + \sum_{i=1}^{n}\alpha_i\left(-y_i + w.\phi(x) + b - \varepsilon - \xi_i\right) \\ & - \sum_{i=1}^{n}\left(\lambda_i\xi_i + \lambda_i^*\xi_i^*\right) \end{aligned} \tag{3.12}$$

Doğrusal olmayan regresyon için, çekirdek fonksiyonları k (…), ham veriyi daha yüksek bir doğruluk elde etmek için doğrusal hale getirmek üzere daha yüksek boyutlu bir alana eşlemek için kullanılır (Denklem 3.13). Fonksiyon yaklaşımı Denklem 3.14'te gösterilmektedir.

$$k(x_i, x) = \phi(x_i)\bullet\phi(x) \tag{3.13}$$

$$f(x) = \sum_{i=1}^{N_{SV}}\left(\alpha_i^* - \alpha_i\right)k(x_i, x) + b \tag{3.14}$$

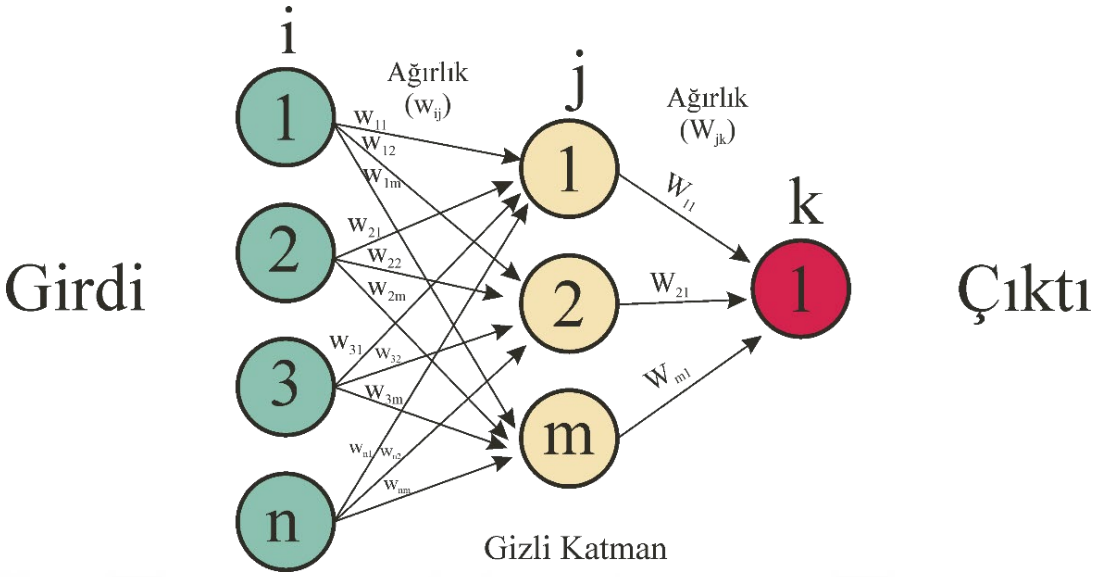
Denklem (3.14)'te bulunan çekirdek fonksiyonu teriminim, $k(x_i, x)$, tanımlanmasında Gausssian çekirdek fonksiyonu (Denklem 3.15) kullanılmıştır (Hornik ve ark., 2006).

$$\text{DVM}_{\text{Gau}}: \; k(x_i, x) = \exp\left(-\sigma \left\| x_i - x \right\|^2\right) \tag{3.15}$$

Denklem 3.13'te verilmiş olan çekirdek fonksiyon parametreleri Bayesian optimizasyon algoritması ile belirlenmiştir (Hornik ve ark. 2006).

Yapay Sinir Ağları (YSA)

Yapay sinir ağları, farklı bilim dallarında yaygın olarak kullanılan kavramsal bir tekniktir. YSA modelleri, analitik ilişkileri içermeden problemleri modellemedeki kolaylıkları nedeniyle araştırmacılar tarafından sıklıkla tercih edilmektedir (Naseri ve Othman, 2012; Zamaniyan ve ark., 2013; Shams ve ark., 2021; Nourani ve ark., 2021). YSA modelleri, parametreler arasındaki içsel doğrusal olmayan ilişkiyi karmaşık bir problemle eşleştirmeye çalışır. Şekil 3.6.'da giriş katmanında (i) n sayıda nöron, gizli katmanda (j) m sayıda nöron ve çıkış katmanında (k) bir nöron olan tipik bir YSA modeli gösterilmiştir. Şekil 3.6.'da verilmiş olan W_{ij} ve W_{jk} terimleri ise hücre katmanları arasındaki bağlantı ağırlıklarıdır ve bu değerler model kurulma esnasında rastgele değerler alırlar. Ancak, eğitme sürecinde hesaplanan çıktı değerlerinin gözlenen değerlerle karşılaştırılması sonucunda sürekli olarak değiştirilirler. Son olarak da hataları minimuma düşürecek bağlantı ağırlık değerlerine yakınsayana kadar hatalar geriye doğru yayılır. Bu çalışmada ağırlıkların ayarlanması için Levenberg-Marquardt algoritması kullanılmıştır (Marquardt, 1963).



Şekil 3. 6. Yapay sinir ağının yapısı

Bağlantı ağırlıkları, her katmanın nöronunu bir sonraki katmanın nöronlarına bağlamak için kullanılır. Gizli katmandaki ve çıktı katmanındaki aktivasyon fonksiyonuna net girdi olarak ağırlıklı girdiler ve sapmanın toplamı aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$o_j = f(net_j) = f\left(\sum_{i=1}^{n} \omega_{ji} in_i + \beta_i\right) \tag{3.16}$$

$$Out = f(net_{out}) = f\left(\sum_{i=1}^{m} \omega_{ji} io_j + \beta_j\right) \tag{3.17}$$

O_j gizli katmanın çıktısı, Out gizli katmanın çıktısı, wji girdi katmanı ile gizli katman arasındaki bağlantı ağırlıkları, w_{ji} gizli katman ile girdi katmanı arasındaki bağlantı ağırlıkları, β_j ve β_i ise çıktı katmanındaki ve gizli katmandaki bias değerleri, f aktivasyon fonksiyonu (Sigmoid), m çıktı katmanındaki nöron sayısı ve n gizli katmandaki nöron sayısıdır. Sigmoid aktivasyon fonksiyonu ise Denklem 3.18'de görülmektedir.

$$f\left(net_j\,(or)\,net_{out}\right) = \frac{1}{1+e^{-net_j\,(or)\,net_{out}}} \tag{3.18}$$

M5Tree Yöntemi

Genel bilinen adı ile M5-Tree olan M5-Karar Ağacı modeli (Quinlan, 1992) temelde bağımlı değişkenleri kullanarak bağımsız değişkeni tahmin etmek amacıyla kullanılır. M5-Karar Ağacı modelinin, belli kategorilerdeki veriler için kullanılan klasik karar ağacı (İngilizcede decision tree) modelinden farklı olarak sadece kategorik verilere değil aynı zamanda nicel veriler için de kullanılabilmesidir (Quinlan, 1992).Geleneksel regresyon modelleri tüm veriyi tanımlamak için sadece bir denklem verirken, M5Tree regresyon ağacı modelinde ise veriler alt bölgelere bölünür ve ardından yaprak etiketleri atanır.

M5 Karar Ağacı modeli, verilerdeki sayısal öznitelikleri tahmin etmesi veya düğümlerdeki ilişkiyi gösterebilmek için doğrusal regresyon denklemi (Quinlan, 1992). M5 Karar Ağacı modelinin temel yapısı bir ağaçtakine benzer olarak, kök, dallar, düğümler ve yapılardan oluşur. Kök, ilk düğüm olarak en üst seviyede yer alır ve yapraklara kadar uzanan dallar ve düğümler zinciridir. Modelde bulunan düğüm, bir tahmin değişkeninindir ve her düğümde yeni bir dallanma oluşur. Dallar, bir alt düğüme ulaşmak için bir üst düğümden ayrılan sayısal bir aralık içerir ve her bir üst düğüm alta doğru ikiye ayrılır.

M5-Karar Ağacı modelini oluşturabilmek için iki aşamalı bir süreç gereklidir. İlk adımda, açık veri tanım verilerini bölerek karar ağacı modeli oluşur. M5 modeli için bölme kriteri, alt düğümdeki verilerin standart sapmasının azaltılmasını en üst düzeye çıkarır. Standart sapma daha fazla düşürülemediğinde, ana düğüm bölünmez ve son düğüm veya yaprak elde edilir (Pal ve Deswal, 2009). İlgili eşitlilikler Denklem 3.19 ve 3.20'de gösterilmiştir.

$$\sigma_r = \sigma(t) - \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{t_i}{t} \right) \sigma(t_i) \tag{3.19}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n}\left[\sum_{i=1}^{n} Y_i^2 - \frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n} Y_i^2\right)\right]} \tag{3.20}$$

Burada, σ_r alt düğümdeki standart sapmanın azaltılmasıdır, t ana düğüme giriş veri kümesidir, t_i üst düğüme giriş verilerinin bir alt kümesidir ve σ standart sapmayı temsil etmektedir. Bölme işlemi nedeniyle, alt düğümdeki standart sapma, ana düğümdekinden daha azdır ve daha fazla homojenliğe yol açar. Bu denklemde n, kullanılan veri kümesi sayısıdır.

3.2.3. Performans Kriterleri

Modellerin C_d değerlerini tahmin etme performanslarını değerlendirmek için belirlilik katsayısı (R^2), Karekök Ortalama Karesel Hata (KOKH), Ortalama Mutlak Yüzde Hata (OMYH) ve Nash–Sutcliffe model verimlilik katsayısı (NSE) parametreleri kullanılmıştır. R^2, KOKH, OMYH ve NSE parametrelerinin denklemleri sırasıyla Denklem 3.21, 3.22, 3.23 ve 3.24'te verilmiştir.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(T_i - \overline{T_i}\right)\left(P_i - \overline{P_i}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(T_i - \overline{T_i}\right)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(P_i - \overline{P_i}\right)^2}} \right)^2 \tag{3.21}$$

$$KOKH = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(T_i - P_i\right)^2} \tag{3.22}$$

$$OMYH = \frac{100}{n}\sum_{i}^{n}\frac{\left|T_i - P_i\right|}{\left|T_i\right|} \tag{3.23}$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(T_i - P_i\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(T_i - \overline{T}_i\right)^2} \tag{3.24}$$

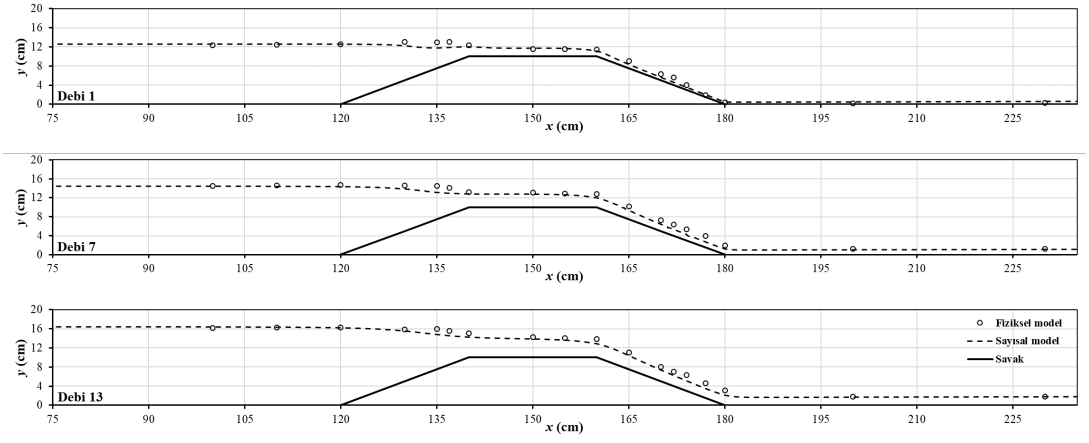
Burada, T teorik C_d değerini, P tahmin edilen C_d değerini ve n ise toplam veri sayısını ifade etmektedir. R^2 ve NSE değerinin bire, KOKH ve OMYH değerlerinin

sıfıra yakınsaması ilgili tahmin modelinin performansının yüksek olduğu anlamına gelmektedir.

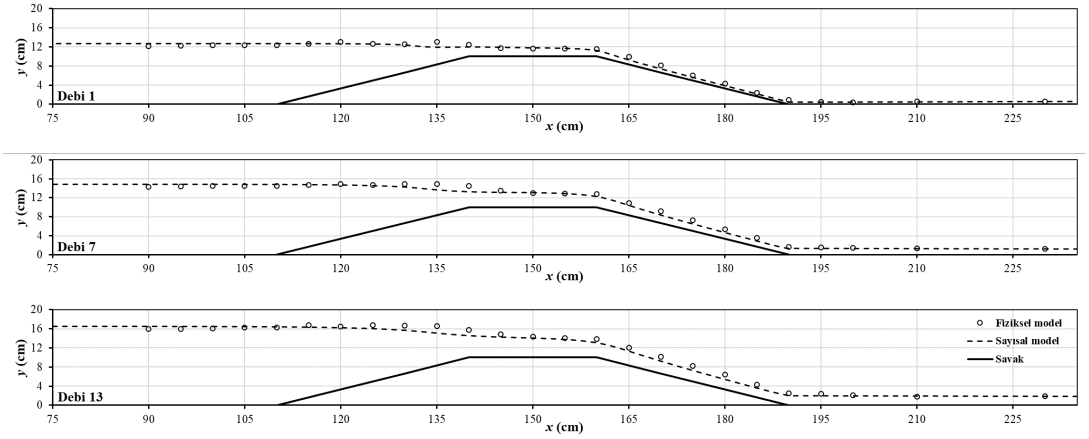
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Laboratuvar Deney Sonuçları ve Sayısal Model Doğrulaması

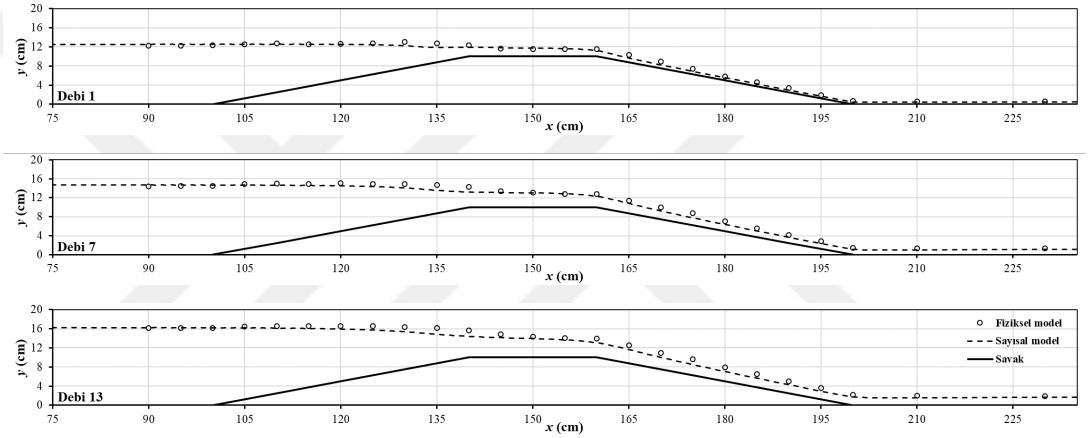
Farklı savak durumlarına ait sayısal model sonuçlarının doğrulanması için en büyük, en küçük ve orta debi koşullarında deneysel su yüzü profillerinin sayısal yüzü profilleriyle karşılaştırılmıştır. Şekilsel değerlendirmenin anlaşılır olması için 13 adet profilin karşılaştırılmaması tercih edilmiştir. Model 1, 2, 3, 4, 5, 6 ve 7 için elde edilen fiziksel model ve sayısal model sonucunda elde edilen su yüzü profillerinin karşılaştırılması sırasıyla Şekil 4.1., 4.2., 4.3., 4.4., 4.5., 4.6. ve 4.7.'de verilmiştir. Fiziksel ve sayısal modelleme sonucunda elde edilen su yüzü profillerinin oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Özelikle kritik üstü akım koşullarının oluştuğu savak kreti ve savak mansap bölgesinde fiziksel ve sayısal modelle elde edilen su yüzü profilleri arasındaki uyum artmaktadır. Sonuç olarak, yedi farklı savak durumunda üç farklı akım koşulunda elde edilen fiziksel ve sayısal modelleme sonucunda elde edilen su yüzü profillerinin birbirine oldukça yakın olmasından, RNG türbülans modelinin ve akışkan hacimler yönteminin bu tür savak ile etkileşimde bulunan açık kanal akımlarının sayısal modellemesinde başarılı olduğu söylenebilir.



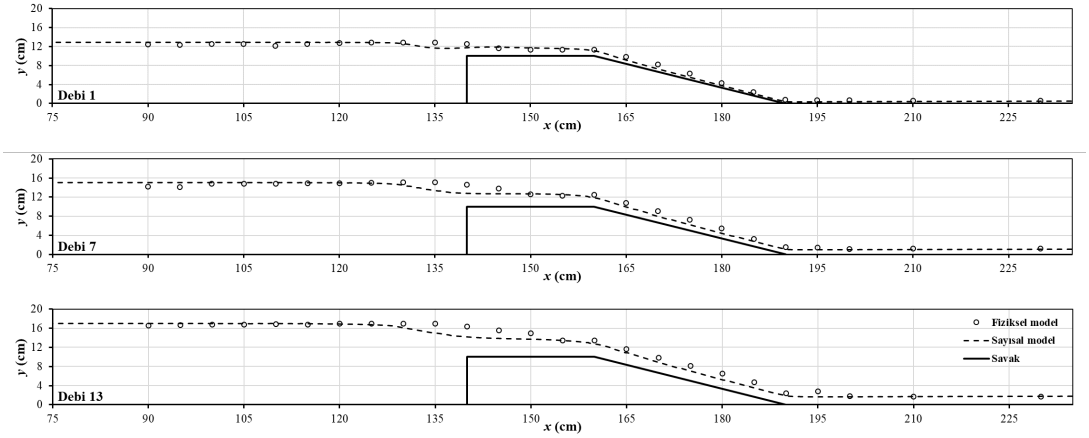
Şekil 4. 1. Model 1 için fiziksel ve sayısal su yüzü profillerinin karşılaştırılması



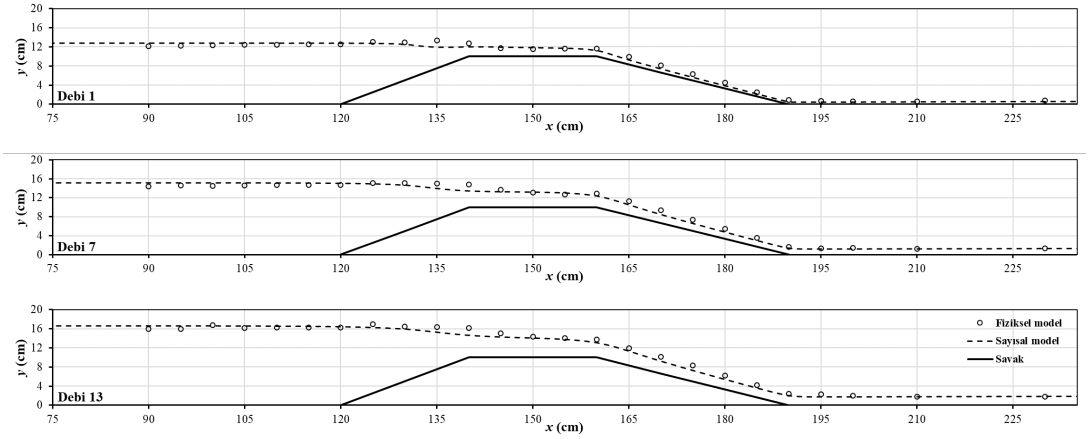
Şekil 4. 2. Model 2 için fiziksel ve sayısal su yüzü profillerinin karşılaştırılması



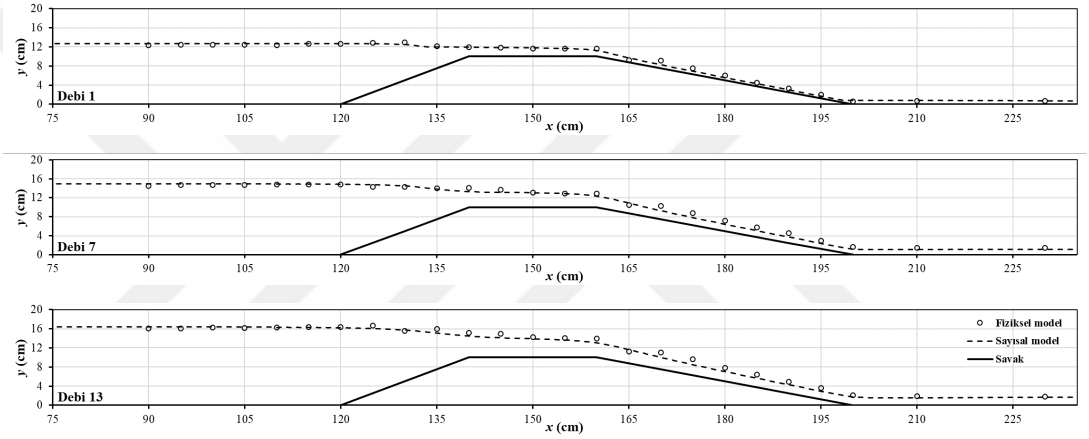
Şekil 4. 3. Model 3 için fiziksel ve sayısal su yüzü profillerinin karşılaştırılması



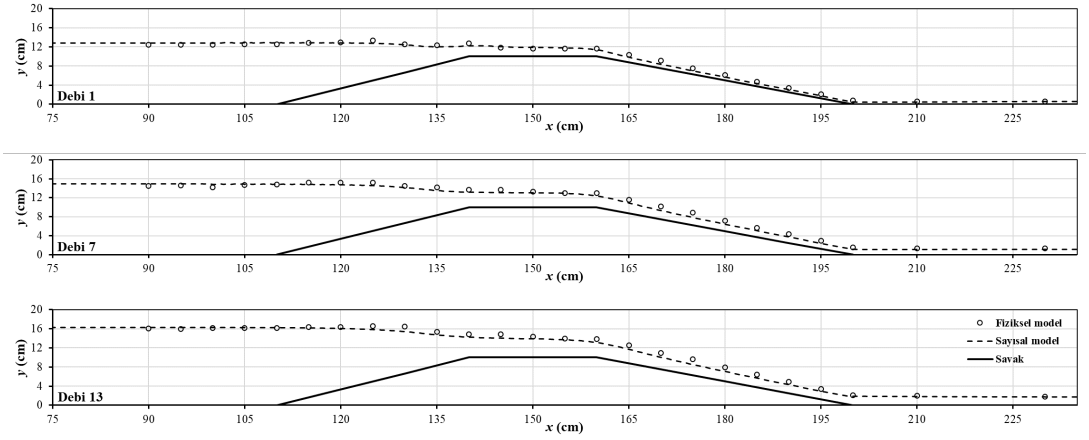
Şekil 4. 4. Model 4 için fiziksel ve sayısal su yüzü profillerinin karşılaştırılması



Şekil 4. 5. Model 5 için fiziksel ve sayısal su yüzü profillerinin karşılaştırılması

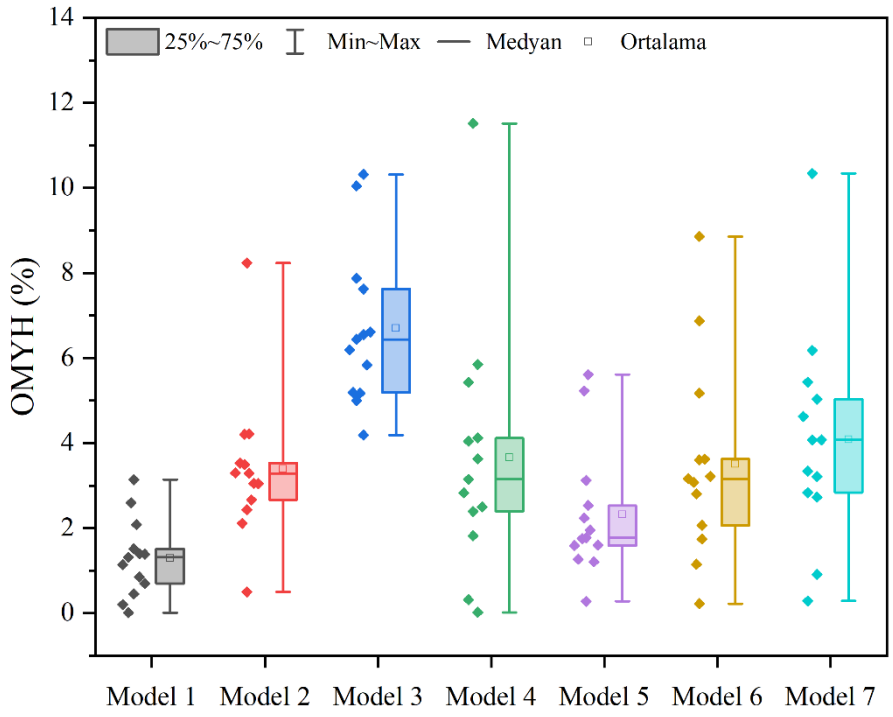


Şekil 4. 6. Model 6 için fiziksel ve sayısal su yüzü profillerinin karşılaştırılması



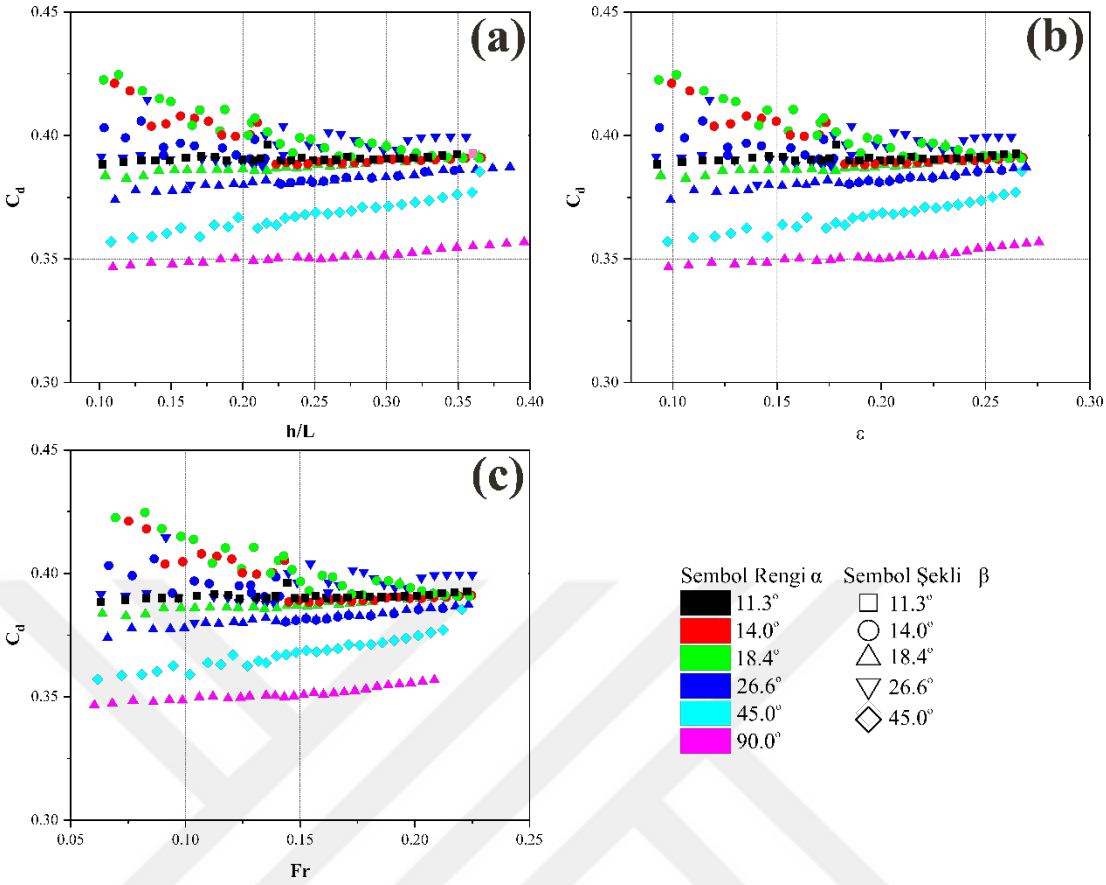
Şekil 4. 7. Model 7 için fiziksel ve sayısal su yüzü profillerinin karşılaştırılması

Deneysel olarak ölçülen tüm savak ve akım durumlarının (her bir savak modeli için 13 adet debi) sayısal modellemesi yapılarak sayısal model doğrulanmıştır. Yedi farklı savak geometrisinin her biri için 13 farklı akıma ait C_d değerleri deneysel verilere göre hesaplanmıştır. Deneyler ile aynı özellikteki akım türü sayısal olarak modellenmiş ve sayısal verilere bağlı olarak C_d değerleri belirlenmiştir. Deneysel ve sayısal verilere bağlı olarak hesaplanmış C_d değerlerinin birbirleri arasındaki uyumun belirlenmesi için ortalama mutlak yüzde hata (OMYH) parametresi kullanılmıştır. Her bir savak geometrisinde (Model) elde edilen OMYH değerlerinin box plot'ı Şekil 4.8.'de verilmiştir. Deneysel ve sayısal model sonuçlarına dayalı hesaplanan C_d'lere ait OMYH değerleri genel olarak %10'dan küçüktür. Her bir model için hesaplanan ortalama OMYH değerlerinin Model 3 dışında %5'in altında kaldığı görülmektedir. Model 3'te ise ortalama OMYH %6.8 olarak belirlenmiştir. Sayısal ve deneysel C_d değerlerine ait OMYH değerlerinin farklı savak ve akım durumları için çoğunlukla %5'ten az olması, sayısal model sonuçlarıyla deneysel sonuçların uyumlu olduğu anlamına gelmektedir.

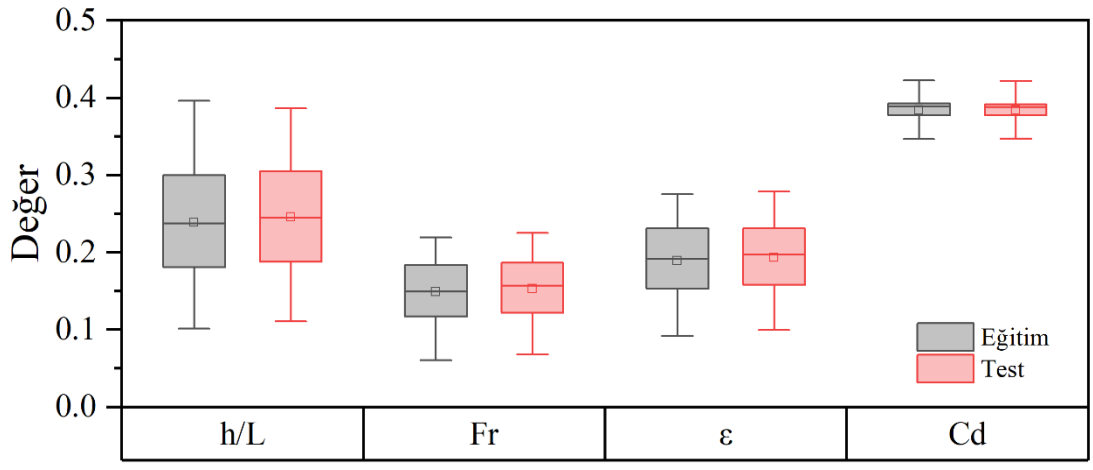


Şekil 4. 8. Deneysel ve sayısal modeller arasında OMYH değerleri

C_d değerinin h/L, ε ve Fr değerlerine göre değişimi sırasıyla Şekil 4.9.-a, b ve c'de verilmiştir. Verilen şekillerde, simgelerin renkleri memba yüz eğimini (α), şekilleri ise mansap yüzü eğimini (β) temsil etmektedir. En küçük C_d değeri Model 4'te (α=90º ve β=18.4º), en büyük C_d değeri ise Model 6'da elde edilmiştir. h/L, Fr ve ε parametrelerinin artmasıyla C_d değerinin Model 3, 6 ve 7'de azalmakta, Model 1, 2, 4, 5, 8 ve 9'da artmaktadır. Mansap eğiminin aynı kaldığı durumda, memba eğiminin azalmasıyla C_d katsayısında artma olmuştur. Ayrıca, debi değerinin artmasıyla büyüyen h/L değerinin 0.3 ile 0.35 arasında değiştiği durumda Model 1'in daha büyük C_d değerlerine sahiptir. Aynı durum, Froude sayısının 0.20 ile 0.25 arasında, ε değerinin 0.23 ile 0.28 arasında değiştiği durumda da gerçekleşmektedir. Bu sonuçlar Hager ve Schwalt (1994), Sargison ve Percy (2009) ve Madadi ve ark. (2014) tarafından yapılmış olan deneysel sonuçlar ile de uyumludur. Bu sonuçlar, sayısal olarak elde edilen C_d değerleri, fiziksel deneyler ile elde edilen C_d değerleri gibi değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır. Bu yüzden, daha fazla akım özelliğine sahip olan ve farklı savak türleri de ele alınmıştır. Bu amaçla, ilk olarak fizik olarak ölçümü yapılmış yedi savak türünün yanına iki savak türü daha eklenmiştir. Dahası, her bir savak tipi için 13 olan deney sayısı sayısal olarak 30'a çıkarılmıştır. Böylece, 91 olan fiziksel deney sayısının yanına sayısal deneyler de eklendikten sonra çalışmada değerlendirilen C_d sayısı 270 olmuştur. Farklı savak modelleri için fiziksel ve sayısal olarak elde edilen verilerden C_d katsayısını YSA, DVM ve M5Tree yöntemleri ile tahmin etmek için veri seti oluşturulmuştur. Bu veri setinin %70'i eğitim surecinde, %30'u ise test sürecinde kullanılmıştır. Her bir modelden aynı sayıda eğitim ve test verisi alınmıştır. Tahmin modellerinde kullanılan girdi (h/L, Fr, ε) ve çıktı (C_d) parametrelerinin eğitim ve testteki dağılımları Şekil 4.10'da verilmiştir. Eğitim ve test dataları oluşturulurken girdi ve çıktı verilerin dağılımlarının birbirlerine yakın olmasına özellikle dikkat edilmiştir. Örneğin, h/L, ε, Fr ve C_d parametrelerinin eğitim sürecinde ortalamaları sırasıyla 0.239, 0.149, 0.189 ve 0.384 olmuştur. Test süresince ise, h/L, ε, Fr ve C_d parametrelerinin ortalaması sırasıyla 0.246, 0.153, 0.193ve 0.384 olarak elde edilmiştir. Medyan, maksimum ve minimum değerlerde de benzer bir durum vardır. Böylece h/L, Fr, ε ve C_d değerlerinin eğitim ve testte homojen dağılım sergilediği görülmektedir.



Şekil 4. 9. Debi katsayısının değişimi (a) h/L, (b) ε, and (c) Fr



Şekil 4. 10. Girdi ve çıktı parametrelerinin eğitim ve test sürecindeki değişim miktarları

4.2. C_d'nin Tahmin Edilmesi

Tahmin yöntemlerinde kullanılmak üzere oluşturulan durumların girdi ve çıktı parametreleri Çizelge 4.1.'de verilmiştir. Tüm durumlarda h/L parametresi girdi olarak kullanılmıştır. C_d parametresinin tahmin edilmesinde oluşturulan modellerde h/L parametresine ek olarak, trapez savağın memba (α) ve mansap bölgesi eğimleri (β) eklenerek savağın geometrik özelliklerin debi katsayının tahmini üzerindeki etkisi incelenmiştir. Son dört durumda (Durum 5'ten 8'e) girdi parametresi olarak h/L parametresinin yanında memba bölgesine ait Froude sayısı kullanılmıştır. Bu parametrelerin yanında girdi parametresi olarak sırasıyla ε, α ve β parametresi eklenerek C_d tahmin edilmiştir.

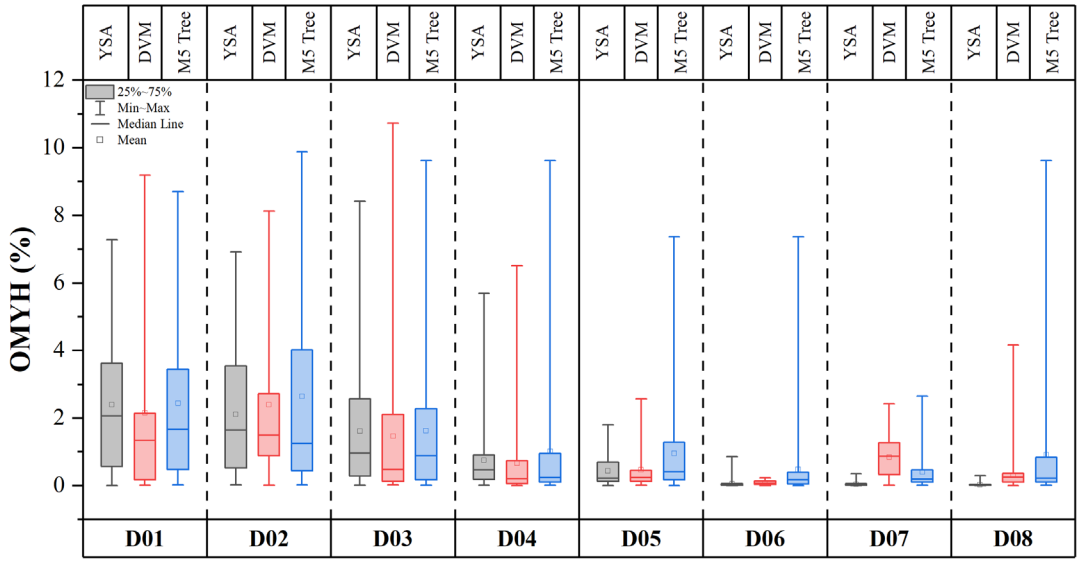
Çizelge 4. 1. Tahmin modellerinde kullanılan girdi kombinasyonları

Durum	Girdi	Çıktı
Durum 1 (D01)	h/L, β	C_d
Durum 2 (D02)	h/L, β, ε,	
Durum 3 (D03)	h/L, α	
Durum 4 (D04)	h/L, β, α	
Durum 5 (D05)	h/L, Fr	
Durum 6 (D06)	h/L, Fr, ε	
Durum 7 (D07)	h/L, Fr, ε, α	
Durum 8 (D08)	h/L, Fr, ε, α, β	

C_d katsayısını tahmin etmede kullanılan üç yöntemin (YSA, DVM ve M5Tree) sekiz girdi durumundaki eğitim ve test süreçlerindeki R^2, OMYH, KOKH ve NSE değerleri Çizelge 4.2.'de verilmiştir. Model başarısı değerlendirilirken, eğitim ve test süreçlerinde elde edilen parametrelerinin birbirleri ile tutarlı olması, ayrıca tüm kriterlere göre de bu başarının desteklenmesi beklenmektedir. Bunun yanında, test sürecinde elde edilen parametrelere göre yöntem başarısı değerlendirilmiştir. Çizelge 4.2., tüm modellerde Durum 1 ve 2'nin R^2 ve NSE değerlerinin düşük olduğu, yani C_d'yi tahmin etmede kullanılmalarının uygun olmadığını göstermektedir. Bunun yanında, C_d'yi tahmin etmede en kötü performans M5Tree yöntemine ait Durum 2'dir. Memba eğiminin girdi olarak kullanıldığı Durum 3'te ise en yüksek NSE ile R^2 ve en düşük KOKH ve OMYH değerleri YSA yönteminde elde edilmiştir. Durum 3'te,

DVM ve M5Tree modelleri birbirlerine yakın sonuçlar vermiştir. Durum 4'te ise özellikle YSA ve DVM modellerinde R^2 ve NSE değerleri 0.9'un üzerine çıkmakta ve OMYH değeri ise %1'in altına düşmektedir. M5Tree'de ise Durum 5'e ait performans değerleri, diğer iki yönteme kıyasla daha kötüdür. Fr sayısının dahil edildiği durumlar (Durum 5-8) değerlendirildiğinde ortaya dikkat çekici sonuçlar çıkmaktadır. Tüm yöntemlerde, sadece Fr ve h/L değerlerinin girdi olduğu Durum 5, Fr sayısının girdi olmadığı ilk dört duruma göre oldukça iyi sonuçlar vermiştir. Durum 5'te en yüksek NSE ve R^2 sırasıyla 0.9816 ve 0.9811 ile YSA yönteminde elde edilmiştir. DVM yöntemi de az da olsa düşük değerler verse de sonuçları YSA yöntemine benzerdir. Ancak, M5Tree yöntemi ile Durum 5 için yapılan tahmin modellemesi sonucunda elde edilen NSE ve R^2 değerleri 0.9'un (Yaklaşık olarak 0.87) altında kalmıştır. h/L ve Fr'un yanına ε parametresinin eklenmesi ile hazırlanan Durum 6'da en başarılı yöntem DVM olmuştur. YSA yöntemi ile arasında çok az bir fark olsa da R^2 ve NSE değerleri hem eğitim hem de test süreçlerinde 0.999 gibi bir değerle oldukça başarılıdır. Durum 7 ise DVM yönteminin performansının düştüğü, fakat, YSA ve M5Tree yöntemlerinin ise tahmin performansının arttığı görülmüştür. Tüm modeller ve durumlar içerisinde C_d değerlerini en iyi tahmin eden durum ise YSA yöntemine ait Durum 8'dir. Durum 8'de YSA yöntemi, tüm performans kriterlerine göre C_d değerlerini neredeyse mükemmel tahmin etmiştir.

Farklı durumlar için YSA, DVM ve M5 Tree yöntemleriyle test periyodunda elde edilen C_d değerlerinin hesaplanan C_d değerleri arasındaki OMYH değerlerinin dağılımı Şekil 4.11.'de verilmiştir. Şekilden tüm yöntemlerde Fr sayısının olmadığı durumlarda hata yüzdesinin yüksek olduğu, Fr sayısının dahil olduğu durumlarda ise YSA ve DVM yöntemlerinde ortalamasının düşük olduğu gibi dağılımının da oldukça sınırlı bir aralıkta olduğu net bir şekilde anlaşılmaktadır. Özellikle, Durum 6'da DVM ve Durum 7 ve 8'de YSA yöntemlerinde en büyük hata yüzdesi % 0.5'in altında kalmaktadır.

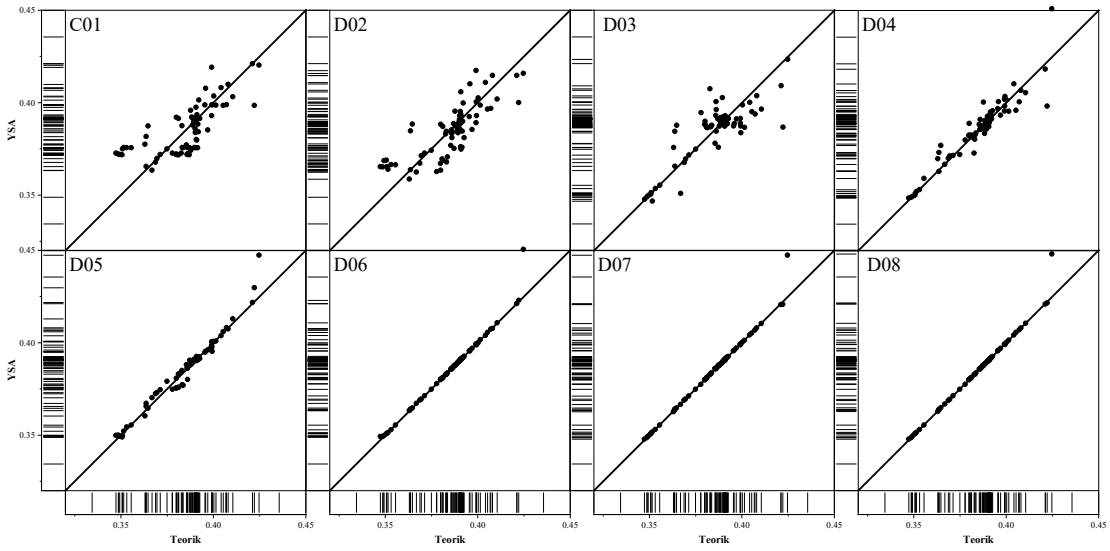


Şekil 4. 11. Farklı durumlar için testlerde elde edilen OMYH değerlerinin değişimi

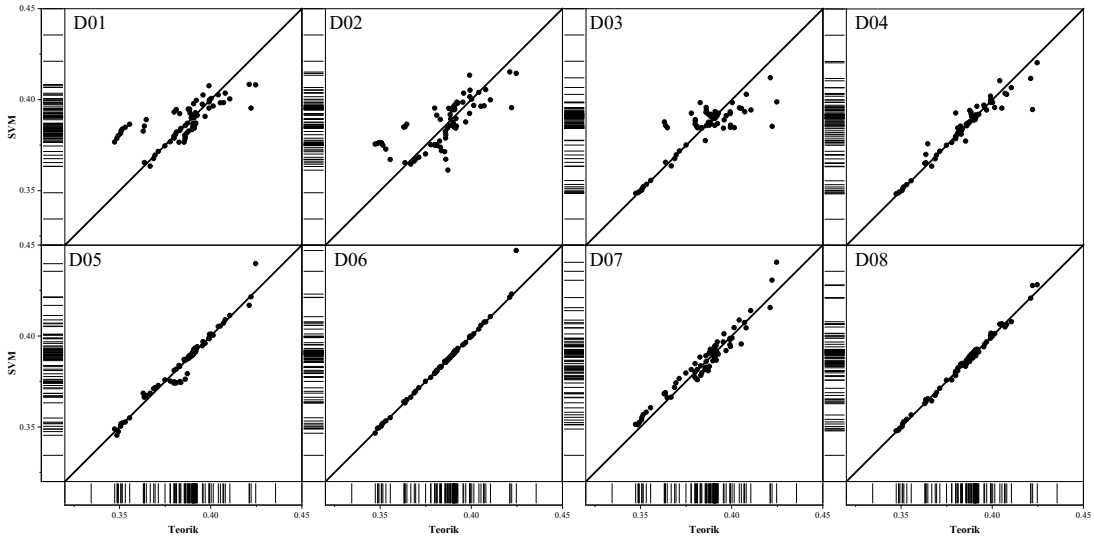
Çizelge 4. 2. Farklı yöntemler ve modelleriyle elde edilen R^2, RMSE, MAPE ve NSE değerleri

		R^2		KOKH		OMYH (%)		NSE	
Metod	**Durum**	**Eğitim**	**Test**	**Eğitim**	**Test**	**Eğitim**	**Test**	**Eğitim**	**Test**
YSA	D01	0.5169	0.5449	0.0135	0.0118	2.1369	2.3865	0.5169	0.5444
	D02	0.6456	0.6352	0.0116	0.0106	1.7292	2.1131	0.6454	0.6322
	D03	0.7601	0.7118	0.0095	0.0094	1.2775	1.6086	0.7601	0.7108
	D04	0.8306	**0.9273**	0.0080	**0.0047**	0.7858	**0.7552**	0.8306	**0.9270**
	D05	0.9866	0.9816	0.0023	0.0024	0.3882	0.4304	0.9865	0.9811
	D06	0.9997	0.9992	0.0003	0.0005	0.0434	0.0547	0.9997	0.9991
	D07	0.9999	0.9998	0.0002	0.0003	0.0340	0.0408	0.9999	0.9998
	D08	0.9999	**0.9999**	0.0002	**0.0002**	0.0270	**0.0298**	0.9999	**0.9999**
DVM	D01	0.4527	0.4899	0.0147	0.0130	1.9717	2.1562	0.4251	0.4479
	D02	0.5318	0.5264	0.0134	0.0121	2.1075	2.3883	0.5241	0.5216
	D03	0.6067	0.6713	0.0123	0.0101	1.2763	1.4607	0.6002	0.6662
	D04	0.7384	**0.9084**	0.0100	**0.0055**	0.6067	**0.6557**	0.7356	**0.9022**
	D05	0.9806	0.9729	0.0027	0.0029	0.4271	0.4682	0.9800	0.9721
	D06	0.9997	**0.9995**	0.0003	**0.0004**	0.0751	**0.0877**	0.9997	**0.9995**
	D07	0.9705	0.9550	0.0035	0.0038	0.8009	0.8393	0.9669	0.9521
	D08	0.9975	0.9807	0.0010	0.0025	0.2290	0.3090	0.9974	0.9800
M5 Tree	D01	0.5517	0.4830	0.0130	0.0126	2.0142	2.4365	0.5517	0.4785
	D02	0.6272	0.3827	0.0119	0.0143	1.6521	2.6392	0.6272	0.3282
	D03	0.6346	0.6432	0.0117	0.0105	1.3261	1.6231	0.6346	0.6424
	D04	0.7033	**0.7822**	0.0106	**0.0082**	0.7937	**1.0160**	0.7033	**0.7815**
	D05	0.9771	0.8757	0.0029	0.0063	0.5179	0.9567	0.9771	0.8717
	D06	0.9852	0.9432	0.0024	0.0043	0.3607	0.4762	0.9852	0.9406
	D07	0.9931	**0.9788**	0.0016	**0.0026**	0.2721	**0.3951**	0.9931	**0.9779**
	D08	0.7128	0.7961	0.0104	0.0079	0.7074	0.9131	0.7128	0.7959

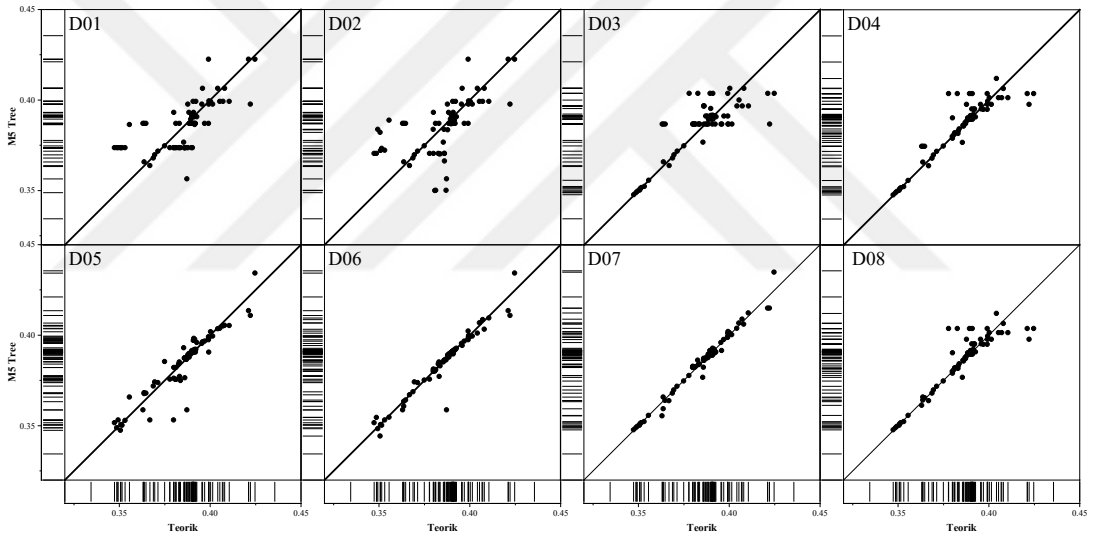
8 farklı durum için YSA, DVM ve M5Tree yöntemleriyle test periyodunda tahmin edilen Cd değerlerinin teorik olarak hesaplanan C_d değerleriyle saçılımları sırasıyla Şekil 4.12., 4.13. ve 4.14.'te verilmiştir. YSA yöntemi ile Durum 1 ve 2'de düşük C_d (<0.36), Durum 3'te 0.40'tan büyük olanların tahmin etmede yeterli düzeyde olmadığı görülmüştür. Durum 4'te ise diğer üç duruma göre nispeten daha iyi tahmin etse de 0.40 civarındaki C_d'ler de çok yeterli sonuçlar vermediği belirlenmiştir. Durum 5'te tahmin edilen değerlerin birkaç değer dışında ölçülen değerlere yakınsadığı, Durum 6, 7 ve 8'de ise neredeyse tüm C_d değerlerinin oldukça yakın bir şekilde tahmin edildiği görülmektedir. Şekil 4.13.'te verilen DVM sonuçları ise genel olarak YSA'ya benzer olmuştur. Ancak, özellikle Durum 6'da C_d değerlerini oldukça başarılı bir tahmin eden DVM, Durum 7'de tahmin performansı düşmüştür. Sonradan eklenen memba eğimi (α) parametresinin DVM için tahmin başarısını azalttığı görülmüştür. M5Tree ile elde edilmiş olan saçılım grafikleri ise Çizelge 4.2.'deki sayısal değerler ile ve Taylor diyagram sonuçları ile uyumlu çıkmıştır. M5Tree yöntemini en başarılı sonuçları Durum 7'de vermiştir (Şekil 4.14.). Ancak burada, özellikle C_d değerlerini çoğunlukla teorik değerden daha yüksek tahmin etmiştir.



Şekil 4. 12. Test periyoduna ait ölçülen ve YSA yöntemiyle elde edilen C_d değerlerinin saçılımları



Şekil 4. 13. Test periyoduna ait ölçülen ve DVM yöntemiyle elde edilen C_d değerlerinin saçılımları



Şekil 4. 14. Test periyoduna ait ölçülen ve M5Tree yöntemiyle elde edilen C_d değerlerinin saçılımları

Genel olarak, C_d'nin tahmin edilmesinde, memba eğiminin girdi olarak kullanılmasının model başarısını arttırdığı belirlenmiştir. Ancak, mansap eğiminin, memba eğimi kadar model başarısının artmasına katkısının olmadı görülmüştür. Fr sayısının hesaplanmasının mümkün olmadığı durumlarda YSA yöntemi ile Durum 4'ün, olması durumunda ise yine YSA yöntemi ile Durum 8'in kullanılması daha uygun olacaktır. YSA yapısı gereği kapalı bir yöntemdir, ancak, ağırlık ve bias değerlerinin bilinmesi durumunda uygulaması mümkündür. Bu amaçla, Durum 4 ve

Durum 8'e ait YSA yönteminin ağırlık ve bias değerleri sırasıyla Çizelge 4.3. ve Çizelge 4.5.'te verilmiştir. Tablolardaki j gizli katmanı, w, W ve β değerleri ise Denklem 10 ve Denklem 11'deki terimleri ifade etmektedir.

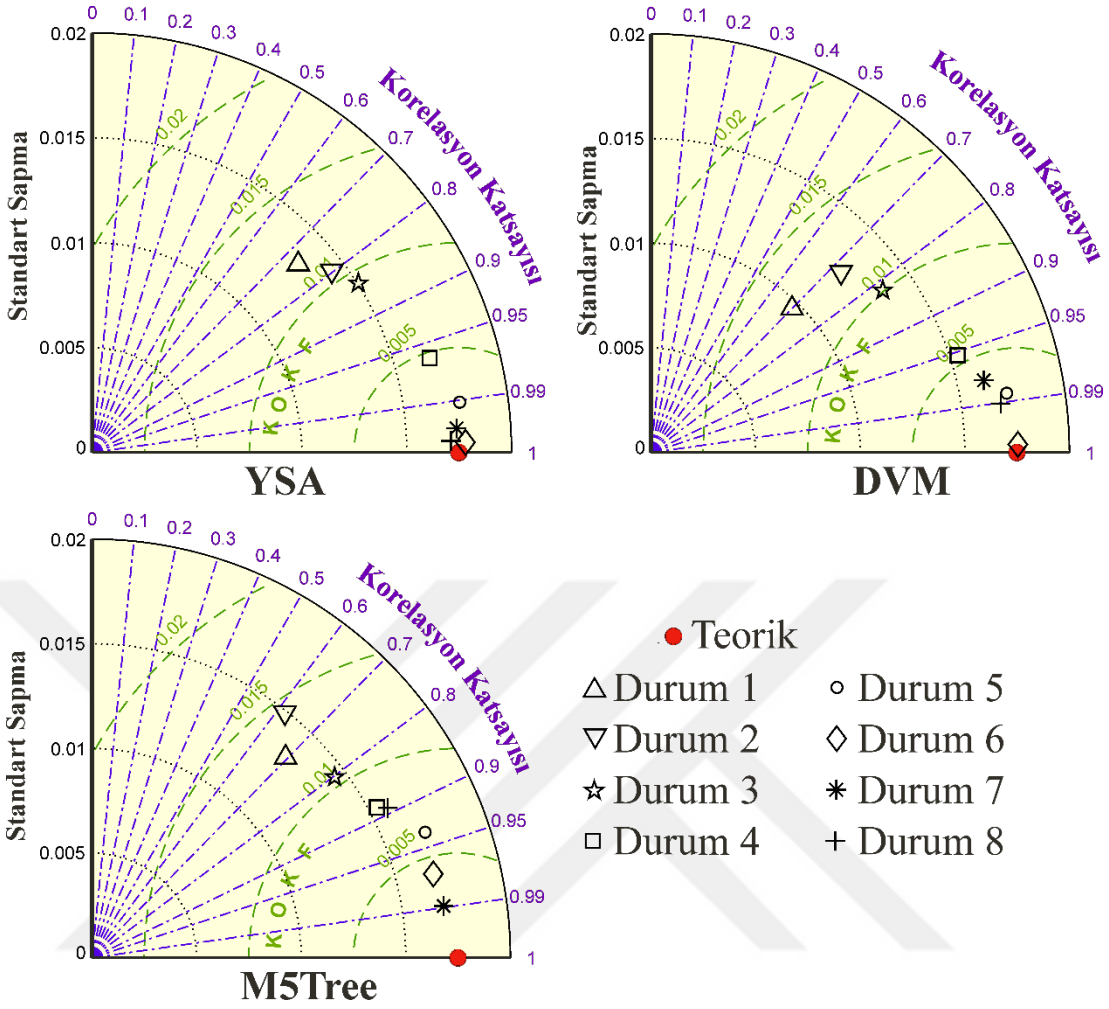
Çizelge 4. 3. YSA yönteminde Durum 4 için model parametreleri

j	w (1, j)	w (2, j)	w (3, j)	W (j, 1)	β (1, j)	β (çıktı)
1	-6.14	-1.03	-6.30	-0.53	4.56	-0.33
2	-0.07	1.01	-2.31	3.04	-1.87	
3	-0.53	2.00	-5.52	-0.47	-1.47	
4	15.78	-16.10	0.73	-0.37	1.14	
5	0.37	6.24	-4.07	-1.31	-0.37	
6	-4.39	5.82	8.57	1.27	2.66	
7	14.92	-12.82	-9.63	0.39	-4.25	
8	2.73	-3.82	-3.92	1.63	-1.09	
9	-0.44	1.74	-6.71	-1.46	-5.56	
10	-2.75	-1.06	-1.63	0.20	-3.31	

Çizelge 4. 4. YSA yönteminde Durum 8 için model parametreleri

j	w (1, j)	w (2, j)	w (3, j)	W (j, 1)	β (1, j)	β (çıktı)
1	-0.32	1.20	-0.55	0.14	0.18	-1.14
2	-0.29	2.07	-0.17	0.04	-1.92	
3	-0.40	-0.43	-0.17	0.04	0.32	
4	-0.77	-6.63	-0.32	0.03	8.20	
5	-3.17	-4.82	0.15	0.01	5.83	

Taylor diyagramı, farklı modellerin bir referans noktası ile karşılaştırmalı değerlendirmesini sağlayan bir grafiksel gösterim biçimidir. Diyagram, tahmin değerinin ve referans değerle olan istatistiksel ilişkisini ortaya koymaktadır. Diyagramda aynı anda korelasyon, standart sapma ve Karekök Ortalama Karesel Fark (KOKF) olmak üzere üç farklı istatistik parametresi birlikte görülebilmektedir. En başarılı model, referans noktasıyla çakışan ya da en yakın olandır. Şekil 4.15., YSA, DVM ve M5Tree yöntemleriyle farklı durumlarda elde edilen C_d değerlerine ait Taylor diyagramlarını göstermektedir. Şekil 4.15.-a'da, YSA yöntemine ait Taylor grafiğinden Durum 6, 7 ve 8 kullanılarak tahmin edilen C_d değerlerinin teorik C_d değerine oldukça yakın olduğu, ancak Durum 8'in neredeyse referans değerle çakıştığı görülmektedir. DVM yöntemine ait sonuçlardan Durum 6'nin diğer durumlara kıyasla teorik C_d değerine oldukça yakın tahminde bulunmuştur (Şekil 4.15.-b). M5Tree yönteminde ise Model 7 en başarılı durum olarak belirlenmiştir (Şekil 4.15.-c).



Şekil 4. 15. Farklı model ve yöntemlerle elde edilen C_d değerlerine ait Taylor diyagramları

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmada trapez geniş başlıklı savaklara ait debi katsayısı deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Yedi farklı savak geometrisinde 13 farklı akım durumunda toplam 91 adet deneysel sonuç kullanılarak sayısal model çalışması doğrulanmıştır. Daha sonra, deneysel modellemede kullanılmayan iki yeni farklı savak tipi ilave edilerek dokuz farklı savak tipinde toplam 270 adet sayısal model çalışması gerçekleştirilmiştir. Sayısal modellemelerde su yüzü profilinin belirlenmesinde akışkan hacimleri yöntemi, akımı idare eden temel denklemlerin çözümünde ise k-ε tabanlı RNG modeli kullanılmıştır. Deneysel ve sayısal model sonuçları kullanılarak teorik olarak elde edilen C_d değerleri YSA, DVM ve M5Tree yöntemleriyle sekiz farklı girdi kombinasyonunda tahmin edilmiştir. Tahmin yöntemlerinin başarısı R^2, KOKH, OMYH ve NSE değerlerine göre değerlendirilmiştir. Eğitim ve test verisi olarak ayrılan verilerin model performansları değerlendirilmiş ve aşağıdaki ana sonuçlar elde edilmiştir.

- Yedi farklı savak geometrisinde 13 farklı akım koşulunda gerçekleştirilen fiziksel model çalışmaları sonucunda elde edilen su yüzü profilleri, RNG modeli kullanılarak elde edilen sayısal su yüzü profilleriyle oldukça uyumlu çıkmıştır.
- Akışkan hacimleri yönteminin, farklı savak kombinasyonlarıyla etkileşimde bulunan açık kanal akımının sayısal su yüzü profilini oldukça yüksek başarılı ile tahmin etmiştir.
- Fiziksel ve sayısal modelleme sonucunda elde edilen savak katsayısı değerleri arasında hata payı %10'dan küçük olmuştur.
- YSA, DVM ve M5Tree yöntemlerinde, memba bölgesinde hesaplanan Froude sayısının girdi olarak kullanılmadığı durumda D04'ün tüm yöntemlerde en başarılı olduğu belirlenmiştir.
- Froude sayısının girdi olarak kullanıldığı durumlarda ise YSA yönteminde D08 (girdiler: h/L, α, β, ε ve Fr) DVM yönteminde D06 (girdiler: h/L, ε ve Fr) ve M5Tree yönteminde D07 (girdiler: h/L, α, ε ve Fr) en başarılı olmuştur.

- h/L parametresinin yanında, savak memba bölgesi eğiminin (α) girdi olarak kullanılması savak mansap bölgesi eğimine (β) göre modellerin başarısını daha fazla arttırmıştır.
- Tahmin yöntemlerinin performans kriterlerine göre başarı sıralaması YSA, DVM ve M5Tree şeklinde oluşmuştur.

Çalışma sonucunda, eğer memba bölgesi Froude sayısının belirlenemeyeceği durumlarda girdi parametresi olarak h/L, β ve α, Froude sayısının bilinmesi durumunda ise Fr, h/L, β, α ve ε parametrelerinin girdi olarak kullanılmasıyla C_d değerinin rahatlıkla hesaplanabileceği belirlenmiştir.

Ayrıca, bu çalışmadan sonraki yapılacak çalışmalarda sadece geniş başlıklı savaklar değil keskin kenarlı ve farklı geometrilere sahip geniş başlıklı savaklara ait debi katsayılarının sayısal modellemeler yardımıyla araştırılması ve elde edilen bulguların farklı yapay zekâ yöntemleri kullanılarak tahmin edilmesi önerilmektedir. Sonuç olarak, yaygın olarak kullanılan ölçme savaklarına ait debi katsayının tahmin edilmesinde boyutsuz parametrelere bağlı formüller yardımıyla genelleştirilmiş bir debi katsayısı formülü önerilebilecektir.

KAYNAKLAR

ABRAHAM, J. ve SALMASI, F., 2020. Discharge coefficients for ogee weirs including the effects of a sloping upstream face. Water Supply, 20(4): 1493-1508.

AL-KHATIB, I. A. ve GOGUS, M., 2014. Prediction models for discharge estimation in rectangular compound broad-crested weirs. Flow Measurement and Instrumentation, 36: 1-8.

AL-SHUKUR, A., AL-JUMAILY, M. ve SHAKER, Z., 2017. Experimental investigation of flow characteristics over crump weir with Different conditions. Saudi Journal of Engineering and Technology, 2(10): 373-379.

ALI, M. S., AYAZ, M. ve MANSOOR, T., 2021. Prediction of discharge through a sharp-crested triangular weir using ANN model trained with Levenberg–Marquardt algorithm. Modeling Earth Systems and Environment, 8(1): 1405-1417.

ALWAN, H. H., SALEH, L., AL-MOHAMMED, F. M. ve ABDULREDHA, M., 2020. Experimental prediction of the discharge coefficients for rectangular weir with bottom orifices. Journal of Engineering Science and Technology, 15(5): 3265-3280.

AMERI, M., AHMADI, A. ve DEHGHANI, A. A., 2015. Discharge coefficient of compound triangular–rectangular sharp-crested side weirs in subcritical flow conditions. Flow Measurement and Instrumentation, 45: 170-175.

ANSYS. 2022. Fluent Theory Guide. USA.

ARVANAGHI, H. ve AZIMI, V., 2016. Determination of Semicircular-Trapezoidal Weir Discharge Coefficient. Agriculture Science Developments, 5(2): 22-27.

ARVANAGHI, H. ve OSKUEI, N. N., 2013. Sharp-crested weir discharge coefficient. Journal of Civil Engineering and Urbanism, 3(3): 87-91.

AWAD, M. ve KHANNA, R., 2015. Efficient learning machines: theories, concepts, and applications for engineers and system designers, Springer nature, s.

AYAZ, M. ve MANSOOR, T., 2019. Discharge coefficient of oblique sharp crested weir for free and submerged flow using trained ANN model. Water Science, 32(2): 192-212.

BADR, K. ve MOWLA, D., 2014. Development of rectangular broad-crested weirs for flow characteristics and discharge measurement. KSCE Journal of Civil Engineering, 19(1): 136-141.

BOITEN, W., 1984. V-Shaped Short-Crested Weir With Semicircular Cross Section. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 110(4): 315-330.

BORGHEI, S. M., JALILI, M. R. ve GHODSIAN, M., 1999. Discharge Coefficient for Sharp-Crested Side Weir in Subcritical Flow. Journal of Hydraulic Engineering, 125(10): 1051-1056.

BOS, M., 1989. Discharge measurement structures. Wageningen, s.

CHANSON, H., 2004. Hydraulics of open channel flow, Elsevier, Burlington, s.

CHEN, Y., FU, Z., CHEN, Q. ve CUI, Z., 2018. Discharge Coefficient of Rectangular Short-Crested Weir with Varying Slope Coefficients. Water, 10(2): 1-18.

CLEMMENS, A. J., REPLOGLE, J. A. ve REININK, Y., 1990. Field Predictability of Flume and Weir Operating Conditions. Journal of Hydraulic Engineering, 116(1): 102-118.

DURSUN, O. F., KAYA, N. ve FIRAT, M., 2012. Estimating discharge coefficient of semi-elliptical side weir using ANFIS. Journal of Hydrology, 426-427: 55-62.
EBTEHAJ, I., BONAKDARI, H., ZAJI, A. H., AZIMI, H. ve SHARIFI, A., 2015. Gene expression programming to predict the discharge coefficient in rectangular side weirs. Applied Soft Computing, 35: 618-628.
EL-ALFY, K. S., Effect of vertical curvature of flow at weir crest on discharge coefficient. Ninth International Water Technology Conference. Egypt, 249-262.
EMIROGLU, M. E., AGACCIOGLU, H. ve KAYA, N., 2011. Discharging capacity of rectangular side weirs in straight open channels. Flow Measurement and Instrumentation, 22(4): 319-330.
FATHI-MOGHADDAM, M., SADRABADI, M. T. ve RAHMANSHAHI, M., 2018. Numerical simulation of the hydraulic performance of triangular and trapezoidal gabion weirs in free flow condition. Flow Measurement and Instrumentation, 62: 93-104.
FULASA, B. F., 2019. Investigation on Different Shapes of Broad-crested Weirs by Means of CFD. Norwegian University of Science and Technology, 64s.
GOODARZI, E., FARHOUDI, J. ve SHOKRI, N., 2012. Flow Characteristics of Rectangular Broad-Crested Weirs with Sloped Upstream Face. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 60(2): 87-100.
HAGER, W. H. ve SCHWALT, M., 1994. Broad-crested weir. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 120(1): 13-26.
HORNIK, K., MEYER, D. ve KARATZOGLOU, A., 2006. Support vector machines in R. Journal of statistical software, 15(09): 1-28.
HOSEINI, S. H., 2014. Experimental investigation of flow over a triangular broad-crested weir. ISH Journal of Hydraulic Engineering, 20(2): 230-237.
HUSSEIN, B. ve JALIL, S., 2020. Hydraulic Performance for Combined Weir-Gate Structure. Tikrit Journal of Engineering Sciences, 27(1): 40-50.
ISMAEL, A. A., SULEIMAN, S. J., AL-NIMA, R. R. O. ve AL-ANSARI, N., 2021. Predicting the discharge coefficient of oblique cylindrical weir using neural network techniques. Arabian Journal of Geosciences, 14(16): 1-8.
JALIL, S., QASIM, J. ve JALIL, S., 2016. Numerical Modelling of Flow over Single-Step Broad-Crested Weir Using FLOW-3D and HEC-RAS. Polytechnic General Sciences Journal/Erbil Polytechnic University, 6: 435-448.
JAMES, G., WITTEN, D., HASTIE, T. ve TIBSHIRANI, R., 2013. An introduction to statistical learning, Springer, s.
JAN, C.-D., CHANG, C.-J. ve KUO, F.-H., 2009. Experiments on Discharge Equations of Compound Broad-Crested Weirs. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 135(4): 511-515.
JIANG, L., DIAO, M., SUN, H. ve REN, Y., 2018. Numerical Modeling of Flow Over a Rectangular Broad-Crested Weir with a Sloped Upstream Face. Water, 10(11).
KABACOFF, R., 2015. R in action: data analysis and graphics with R,, Manning Publications Co., Shelter Island, New York, s.
KELLER, R. J. ve FONG, S. S., 1989. Flow Measurement with Trapezoidal Free Overfall. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 115(1): 125-136.
KIZILASLAN, M. A. ve DEMIREL, E., 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, 8-10.
KUHN, M. ve JOHNSON, K., 2013. Applied predictive modeling, Springer, s.
KULKARNI, K. H. ve HINGE, G. A., 2020. Experimental study for measuring discharge through compound broad crested weir. Flow Measurement and Instrumentation, 75.
LI, S., YANG, J. ve ANSELL, A., 2021. Discharge prediction for rectangular sharp-crested weirs by machine learning techniques. Flow Measurement and Instrumentation, 79: 1-9.
MADADI, M. R., HOSSEINZADEH DALIR, A. ve FARSADIZADEH, D., 2014. Investigation of flow characteristics above trapezoidal broad-crested weirs. Flow Measurement and Instrumentation, 38: 139-148.
MAGHSOODI, R., ROOZGAR, M. S., SARKARDEH, H. ve AZAMATHULLA, H. M., 2012. 3d-Simulation of Flow over Submerged Weirs. International Journal of Modelling and Simulation, 32(4): 237-243.
MAGOULÈS, F. ve ZHAO, H., 2016. Data mining and machine learning in building energy analysis, Wiley Online Library, s.
MAHTABI, G. ve ARVANAGHI, H., 2018. Experimental and numerical analysis of flow over a rectangular full-width sharp-crested weir. Water Science and Engineering, 11(1): 75-80.
MARQUARDT, D. W., 1963. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, 11(2): 431-441.
MIRZAEI, K. ve SHEIBANI, H. R., 2020. Experimental Investigation of Arched Sharp-Crested Weir Flow and Comparing it with Rectangular Weir. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 45(2): 1039-1048.
MOHAMMADZADEH-HABILI, J., HEIDARPOUR, M. ve HAGHIABI, A., 2016. Comparison the hydraulic characteristics of finite crest length weir with quarter-circular crested weir. Flow Measurement and Instrumentation, 52: 77-82.
NASERI, M. ve OTHMAN, F., 2012. Determination of the length of hydraulic jumps using artificial neural networks. Advances in Engineering Software, 48: 27-31.
NGUYEN, B., 2006. Flow over oblique weirs. Civil Engineering and Geosciences Delft University of Technology, Hydraulic Engineering Faculty, Master of Science Thesis, The Netherlands, 49s.
NOURANI, V., PAKNEZHAD, N. J. ve TANAKA, H., 2021. Prediction Interval Estimation Methods for Artificial Neural Network (ANN)-Based Modeling of the Hydro-Climatic Processes, a Review. Sustainability, 13(4).
OZGENC AKSOY, A. ve DOĞAN, M., 2016. Experimental Investigation of the Approach Angle Effects on the Discharge Efficiency for Broad Crested Weirs. Anadolu University Journal of Science and Technology-A Applied Sciences and Engineering, 17(2): 279-286.
PAL, M. ve DESWAL, S., 2009. M5 model tree based modelling of reference evapotranspiration. Hydrological Processes, 23(10): 1437-1443.
PARSAIE, A., 2016. Predictive modeling the side weir discharge coefficient using neural network. Modeling Earth Systems and Environment, 2(2): 1-11.

PARSAIE, A. ve HAGHIABI, A., 2015. The effect of predicting discharge coefficient by neural network on increasing the numerical modeling accuracy of flow over side weir. Water resources management, 29(4): 973-985.

PARSAIE, A., HAGHIABI, A. H. ve AZAMATHULLA, H. M., 2016. Prediction of side weir discharge coefficient by support vector machine technique. Water Supply, 16(4): 1002-1016.

PIRATHEEPAN, M., WINSTON, N. E. F. ve PATHIRANA, K. P. P., 2007. Discharge Measurements in Open Channels using Compound Sharp-Crested Weirs. Engineer: Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka, 40(3): 31-38.

QUINLAN, J. R., 1992. Learning with continuous classes. . In *In Proceedings of the Fifth Australian Joint Conference on Artificial Intelligence*. Singapore:World Scientific: Hobart, Australia; 343–348.

REZAZADEH, S., MANAFPOUR, M. ve EBRAHIMNEJADIAN, H., 2020. Three-Dimensional Simulation of Flow Over Sharp-Crested Weirs Using Volume of Fluid Method. Journal of Applied Engineering Sciences, 10(1): 75-82.

ROUSHANGAR, K., ALAMI, M. T., SHIRI, J. ve ASL, M. M., 2018. Determining discharge coefficient of labyrinth and arced labyrinth weirs using support vector machine. Hydrology Research, 49(3): 924-938.

ROUSHANGAR, K., KHOSHKANAR, R. ve SHIRI, J., 2016. Predicting trapezoidal and rectangular side weirs discharge coefficient using machine learning methods. ISH Journal of Hydraulic Engineering, 22(3): 254-261.

SALMASI, F., YıLDıRıM, G., MASOODI, A. ve 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.

SARGISON, J. E. ve PERCY, A., 2009. Hydraulics of broad-crested weirs with varying side slopes. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 135(1): 115-118.

SCHMOCKER, L., HALLDÓRSDÓTTIR, B. R. ve HAGER, W. H., 2011. Effect of Weir Face Angles on Circular-Crested Weir Flow. Journal of Hydraulic Engineering, 137(6): 637-643.

SHAMS, S. R., JAHANI, A., KALANTARY, S., MOEINADDINI, M. ve KHORASANI, N., 2021. The evaluation on artificial neural networks (ANN) and multiple linear regressions (MLR) models for predicting SO2 concentration. Urban Climate, 37: 100837.

SHAYMAA, A. M. A.-H., HUDA, M. M., RASUL, M. K., THAMEEN, N. N. ve NADHIR, A. A.-A., 2017. Flow over Broad Crested Weirs: Comparison of 2D and 3D Models. Journal of Civil Engineering and Architecture, 11(8): 769-779.

SMOLA, A. J. ve SCHÖLKOPF, B., 2004. A tutorial on support vector regression. Statistics and computing, 14(3): 199-222.

SOYDAN, N. G., AKOZ, M. S., ŞIMŞEK, O. ve GÜMÜŞ, V., 2012. Trapez Kesitli Geniş Başlıklı Savak Akımının ke Tabanlı Türbülans Modelleri ile Sayısal Modellenmesi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 27(2): 47-58.

SOYDAN OKSAL, N. G., AKOZ, M. S. ve SIMSEK, O., 2020. Numerical modelling of trapezoidal weir flow with RANS, LES and DES models. Sādhanā, 45(1): 1-18.

ŞIMŞEK, O., GÜMÜŞ, V. ve ÖZLÜK, A., 2021. Trapez Geniş Başlıklı Savakların Debi Katsayısının Destek Vektör Makineleri ile Tahmini. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 9(3): 533-547.

VAPNIK, V., 2013. The nature of statistical learning theory, Springer science & business media, New York, s.

WANG, X.-K., HAO, Z.-Y. ve TAN, S. K., 2010. Hydrodynamics of trapezoidal embankment weirs. Journal of Hydrodynamics, 22(S1): 375-379.

YU-WEI, C. D. C., 2015. Machine learning with R cookbook, Packt Publishing Ltd, s.

ZAMANIYAN, A., JODA, F., BEHROOZSARAND, A. ve EBRAHIMI, H., 2013. Application of artificial neural networks (ANN) for modeling of industrial hydrogen plant. International Journal of Hydrogen Energy, 38(15): 6289-6297.

ZERIHUN, Y. T., 2020. Free Flow and Discharge Characteristics of Trapezoidal-Shaped Weirs. Fluids, 5(4): 1-13.

ZERIHUN, Y. T. ve FENTON, J. D., 2006. One-dimensional simulation model for steady transcritical free surface flows at short length transitions. Advances in Water Resources, 29(11): 1598-1607.