

## Farklı Geometriye Sahip Savaklarda Nümerik Modeller ile Elde Edilen Debi Katsayılarının İncelenmesi

Şeyma Özdin<sup>1</sup>, Mücella İlkentapar<sup>\*2</sup>, Serhat Akşit<sup>3</sup>, Ahmet Alper Öner<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği, KAYSERİ

<sup>2</sup> Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği, KAYSERİ

<sup>3</sup> Abdullah Gül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği, KAYSERİ

<sup>4</sup> Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği, KAYSERİ

(Alınış / Received: 27.08.2024, Kabul / Accepted: 25.11.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 30.12.2024)

### Anahtar Kelimeler

Debi Katsayısı,  
HAD,  
Açık Kanal,  
Savak,  
FLOW-3D

**Öz:** Farklı tipleri bulunan savaklar, geometrik şekillerine göre geniş başlıklı, keskin kenarlı ve uzun başlıklı olarak sınıflandırılabilirler. Bu çalışmada, geniş başlıklı savak akımına ait deney verileri, sonlu hacimler metoduna dayanan FLOW-3D paket programı kullanılarak modellenmiştir. Çalışma kapsamında farklı ağ yapıları test edilmiş ve türbülans viskozitesinin hesaplanmasında Standart  $k-\epsilon$  ve RNG  $k-\epsilon$  türbülans kapatma modelleri uygulanmıştır. Yapılan çalışmalardan elde edilen uygun ağ yapısı ile savak geometrileri çoğaltılarak; keskin kenarlı, geniş ve uzun başlıklı savaklar için su yüzü profilleri elde edilmiştir. Üç farklı geometriye sahip savaklarda Microsoft Excel ile  $Q_{\text{tahmin}}$  ve  $C_{d\text{ tahmin}}$  değerleri hesaplanarak yeni  $c_d$  debi katsayısı formülleri önerilerek literatürde bulunan formüller ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda debi katsayısı hesabında kullanılacak genel formüller de üretilmiştir. Keskin kenarlı ve geniş başlıklı savaklarda, Standart  $k-\epsilon$  ve RNG  $k-\epsilon$  türbülans kapatma modelleri kullanılarak elde edilen yeni formüllerin; literatürde bulunan formüllere nazaran deney sonuçlarına daha yakın değerler verdiği belirlenmiştir.

## Investigation of Discharge Coefficients Obtained by Numerical Models in Weirs With Different Geometries

### Keywords

Discharge Coefficient,  
CFD,  
Open Channel,  
Weir,  
FLOW-3D

**Abstract:** Weirs, which are available in various types, can be classified according to their geometric shapes as broad-crested, sharp-crested, and long-crested. In this study, experimental data for flow over broad-crested weirs were modeled using the FLOW-3D software, which is based on the finite volume method. Various mesh configurations were tested, and the Standard  $k-\epsilon$  and RNG  $k-\epsilon$  turbulence models were employed for calculating turbulence viscosity. Following the determination of the optimal mesh configuration, weir geometries were replicated to generate water surface profiles for sharp-crested, broad-crested, and long-crested weirs. Discharge ( $Q_{\text{estimate}}$ ) and discharge coefficient ( $c_{d,\text{estimate}}$ ) values for the weirs with three distinct geometries were calculated using Microsoft Excel. Subsequently, new discharge coefficient ( $c_d$ ) formulas were proposed and compared with existing formulas in the literature. As a result, generalized formulas for calculating discharge coefficients were developed. It was determined that the new formulas obtained for sharp-crested and broad-crested weirs using the Standard  $k-\epsilon$  and RNG  $k-\epsilon$  turbulence models provided values that aligned more closely with experimental results compared to the formulas available in the literature.

## 1. Giriş

Hidrolik mühendisleri tarafından akışı kontrol etmek, suyun debisini ölçmek, su seviyelerini düzenlemek ve istenmeyen taşkınları önlemek amacıyla kullanılan kritik yapı elemanları savak olarak isimlendirilmektedir. Kanal eksenine dik olarak yerleştirilen bir ölçüm savağının yaklaşım kanalında ölçülen derinlik ile debi arasında belirlenen ilişki yardımıyla akım tespit edilebilir. Savaklar, farklı geometrik şekillerde uygulanabilir ve keskin kenarlı, geniş başlıklı ve uzun başlıklı savaklar olarak sınıflandırılabilir. [1]. Keskin kenarlı savaklar ince bir düşey levha olup su napı savak üzerinden serbest bir şekilde dökülür. Geniş başlıklı savaklar, akım yönünde yeterli uzunlukta düz bir yüksekliğe sahip olup, bu savaklarda su geniş bir yüzey üzerinde akar. Uzun başlıklı savaklar ise geniş başlıklı savakların uzun bir türüdür ve bu savaklarda su daha uzun bir yüzey üzerinden akar. Her bir savak geometrisinin kendine özgü avantajları bulunmaktadır ve kullanım amacına göre uygun olan geometri seçilerek tasarım yapılmaktadır.

Savaklar üzerindeki akım; serbest yüzey akışı, türbülans ve enerji kayıpları gibi birçok karmaşık faktörü içerir. Uygun tasarım modelini oluşturabilmek için akış profili, hız profili ve basınç alanının hassas bir şekilde öngörülmesi gerekmektedir. Savaklarda akımların analizi fiziksel deneyler ile gerçekleştirilebilmektedir. Ancak deneysel çalışmalar maliyetli ve zaman alıcı olabilmektedir. Günümüzde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, HAD, (Computational Fluid Dynamics - CFD) yöntemlerindeki gelişmeler ile savakların modellenmesi kolaylaşmış zamandan ve maliyetten tasarruf edilmesini sağlamıştır. HAD ile yapılan analizler,  $c_d$  debi katsayısı gibi önemli hidrolik parametrelerinde hassas bir şekilde hesaplanmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca HAD modelleri, savak geometrisinin değiştirilmesi gibi farklı parametrelerin etkisini kolayca analiz etme imkânı tanımaktadır.

Günümüze kadar, savak ve  $c_d$  debi katsayısı ile ilgili çok sayıda deneysel ve nümerik çalışma yapılmıştır. Azimi ve Rajaratnam [1], farklı savak modellerinde literatürden elde ettikleri deneysel verileri sayısal olarak analiz etmişlerdir. Geniş başlıklı savak için  $c_d$  debi katsayısını geniş başlıklı savak uzunluğuna göre incelemişlerdir. Debi katsayısının, savak genişliği ve memba bölgesindeki kret uzunluğuna bağlı olarak değiştiğini ifade etmişlerdir. Savak şekillerine göre  $c_d$  debi katsayısı formüllerini aşağıdaki gibi bulmuşlardır.

Keskin Kenarlı Savaklarda  $C_d$  formülü;

$$C_d = 0.767 + 0.215 \left( \frac{h}{L} \right) \quad (1.1)$$

Uzun Başlıklı Savaklarda  $C_d$  formülü;

$$C_d = 1.02 [h/(h + p)]^{0.12} \quad (1.2)$$

Formüllerdeki  $h$  memba kısmındaki akım yüksekliğini,  $L$  savağın uzunluğunu,  $p$  ise savak yüksekliğini ifade göstermektedir.

Govinda Rao ve Muralidhar [2], Sonlu tepe genişliğine sahip savakların debi özelliklerini ayrıntılı bir şekilde analiz etmişlerdir. Bu analizde, önceki deney sonuçları kullanılarak savaklar keskin kenarlı, uzun ve geniş başlıklı olarak kategorize edilmiştir. Geniş başlıklı savak için debi katsayısı formülünü aşağıdaki gibi bulmuşlardır. Geniş Başlıklı savaklarda  $C_d$  formülü;

$$C_d = 0.913 + 0.049 \left( \frac{h}{L} \right) \quad (1.3)$$

Formüllerdeki  $h$ , savağın memba kısmındaki akım yüksekliğini,  $L$  ise savağın uzunluğunu ifade etmektedir.

Ramamurthy ve ark. [3], keskin kenarlı savak akımını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında kret bölgesine yakın olan bölgede hız ve basınç dağılımlarını incelemişlerdir. Çalışmalarında,  $c_d$  debi katsayısının  $h/P$  oranına göre değiştiğini belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışmada,  $h$  savağın membandaki akım yüksekliğini,  $P$  ise savağın yüksekliğini belirtmektedir.

El-Alfy [4],  $c_d$  debi katsayısının değişimini deneysel olarak incelemiştir. Dört farklı savak için farklı akım şartlarında 254 adet deney gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında, debi katsayısı  $c_d$ 'nin  $H/Y$  oranına bağlı olarak değiştiğini tespit etmişlerdir. Geliştirdiği formüllerdeki debi katsayısının literatürde bulunan katsayılar ile uyumlu olduğunu belirtmiştir. Keskin kenarlı savaklar ve geniş başlıklı savaklar için aşağıdaki formülleri bulmuştur.

Keskin kenarlı savaklarda 0.375 ile 1.47 arasındaki  $H/Y$  oranı için  $C_d$  formülü;

$$C_d = 0.6184 + 0.1078H/Y \quad (1.4)$$

Geniş başlıklı savaklarda,  $H/Y$  oranı 0.3 ile 1.5 arasında ve  $H/w$  oranı 0.18 ile 0.33 arasında olduğunda  $C_d$  formülü;

$$C_d = 0.5819 + 0.1677H/Y \quad (1.5)$$

Formüllerde,  $H$  savak üstü su yüksekliği,  $Y$  kret yüksekliği ve  $w$  kret kalınlığı olarak ifade edilmektedir.

Doğan [5], deneysel olarak yaptığı çalışmada kret şeklinin  $c_d$  debi katsayısına etkisini incelemiştir. Çalışmasında; 1/4 yuvarlatılmış savak, 1/2 yuvarlatılmış savak, düz savak ve keskin kenarlı savak olmak üzere

dört farklı savak şeklini kullanmıştır. Yapmış olduğu deneyler sonucunda savak kret şeklinin  $c_d$  debi katsayısı değişimi için önemli bir faktör olduğunu ve savağın yüksekliğinin artmasıyla debi katsayısında azalma olduğunu belirtmiştir. Bilhan ve ark. [6], keskin kenarlı dikdörtgen yan savaklarda 843 deneysel veri kullanarak yapay sinir ağlarıyla debi katsayılarını tahmin etmişlerdir. İki farklı sinir ağı tekniğini kullanarak elde ettikleri sonuçları karşılaştırmışlardır. Çalışmalarında, FFNN modelinin debi katsayısını tahmin etmede RBNN modelinden daha iyi performans sergilediğini vurgulamışlardır. Salması ve ark. [7], geniş başlıklı savaklarda  $c_d$  debi katsayısını belirlemek için yapay sinir ağları ve genetik programlama yöntemlerini kullanmışlardır. Yaptıkları çalışmada 15 farklı savak geometrisinde elde edilen deneysel verileri kullanmış ve genetik programlama ile yaptıkları hesaplamaların yapay sinir ağlarına göre deneysel verilerle daha uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Al-Khatip ve ark. [8], geniş başlıklı savaklarda  $c_d$  debi katsayısı ve  $c_v$  hız katsayısının nelere bağlı olarak değiştiğini belirlemek amacıyla deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir. Genel denklemlerden elde edilen  $c_v$  hız katsayısı ve  $c_d$  debi katsayısı değerlerini, deneylerde elde ettikleri veriler ile karşılaştırdıklarında hata oranının %5' ten küçük olduğunu belirtmişlerdir. Hoseini ve ark. [9], geniş başlıklı savaklarda 2 farklı genişlik ve 15 farklı debi kullanarak deneysel çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında debi katsayısını etkileyen parametrelerin savak genişliği, kret üzerindeki toplam enerji yükü ve savak uzunluğu olduğunu belirtmişlerdir. Literatürde bulunan denklemlerle sayısal olarak elde edilen debi katsayılarının ve deneyde elde edilen debi katsayılarına yakın sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir.

Bu çalışmada; İlkentapar [10]' ın Erciyes Üniversitesi Hidrolik Laboratuvarında bulunan 0.6x0.6x9.5 m ölçülerindeki açık kanal sisteminde deneysel olarak elde ettiği su yüzü profilleri ile FLOW-3D paket programında gerçekleştirilen analizlerden elde edilen su yüzü profilleri karşılaştırılarak uygun ağ yapısı belirlenmiştir. Belirlenen uygun ağ yapısında Standart k- $\epsilon$  ve RNG k- $\epsilon$  türbülans kapatma modelleri kullanılarak farklı geometrik boyutlarda ve farklı debilerde analizler gerçekleştirilerek veriler çoğaltılmıştır. Geniş başlıklı, uzun başlıklı ve keskin kenarlı olarak sınıflandırılabilir savaklarda Microsoft Excel ile  $Q_{\text{tahmin}}$  ve  $c_{d\text{ tahmin}}$  değerleri hesaplanmış ve yeni  $c_d$  debi katsayısı formülleri elde edilmiştir. Elde edilen formüllerden hesaplanan sonuçlar ile literatürde bulunan formüllerden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada geliştirilen  $c_d$  debi katsayısı formüllerinin doğruluğu, MARE, MSE, MAE, NSE,  $R^2$  ve RMSE gibi farklı performans değerlendirme kriterleriyle test edilmiştir. Burada MARE ortalama mutlak bağıl hatayı, MSE ortalama karesel hatayı, MAE ortalama mutlak hatayı, NSE Nash-Sutcliffe verimlilik katsayısını, RMSE kök ortalama karesel hatayı,  $R^2$  ise belirleme katsayısını ifade etmektedir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1 Deneysel Veriler

Çalışmada kullanılan deney verileri; İlkentapar [10]'ın Erciyes Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bünyesindeki Hidrolik Laboratuvarında bulunan 0.6x0.6x9.5 m boyutlarındaki açık kanal düzeneğinde (Şekil 1) gerçekleştirdiği çalışmadan alınmıştır. Deneylerde 0.6x0.6x0.10 m, 0.6x0.3x0.10 m, 0.6x0.2x0.10 m, 0.6x0.15x0.10 m ölçülerine sahip 4 farklı yüksekliğe sahip geniş başlıklı savak kullanılmıştır. Deneylerde her savak geometrisi için 5 farklı debi ile çalışılmış ve su yüzü ölçümü yapılmıştır.



Şekil 1 ERÜ Mühendislik Fakültesi İnşaat Müh. Böl. Hidrolik Laboratuvarı Açık Kanal Düzeneği

## 2.2 FLOW-3D

Çalışma kapsamında sayısal çözümler FLOW-3D programı ile gerçekleştirilmiştir. FLOW-3D serbest yüzey akışlarını modellemek için geliştirilen akışkan hacmi (VOF Volume of Fluid) yöntemini kullanarak analiz yapmaktadır. Hesaplamalar, dikdörtgen hücrelerden oluşan üniform olmayan bir çözüm ağı üzerinde yapılmaktadır. Akışkana ait viskozite, yoğunluk, basınç gibi skaler büyüklükler kontrol hacminin (hücre) merkezinde yer alırken sadece hızlar (u, v, w) kontrol hacminin yüzeyinde hesaba katılmaktadır. VOF yöntemi ile serbest yüzeyin izlenmesi üç kısımdan oluşur. İlk olarak serbest yüzeyin yeri bulunur. Daha sonra bu yüzey, hava ve su arasında keskin bir arakesit olarak belirlenir. Son olarak bu arakesite sınır şartları uygulanır. Arakesit üzerinde sabit basınç sınır koşulları ve sıfır kayma gerilmesi uygulanmaktadır. Akışkan hacmi fonksiyonu F' nin değişimi diferansiyel olarak ifade edilmektedir. Standart k-ε, RNG k-ε, LES (Large Eddy Simulation) gibi çeşitli türbülans modelleri içeren programda analizler Standart k-ε ve RNG k-ε türbülans kapatma modelleri kullanılarak yapılmıştır.

### 2.2.1 Standart k-ε Türbülans Kapatma Modeli

Standart k-ε türbülans modeli, özellikle yüksek Reynolds sayılı akışlarda daha iyi performans göstermekte ve sınır tabakası dışındaki bölgelerde geçerli olmaktadır. Standart k-ε türbülans kapatma modelinde kinetik enerji k ve kinetik enerji kayıp oranı ε için ayrı taşınım denklemleri yazılır. Standart k-ε modelinde, Reynolds gerilmesini hesaplayan türbülans viskozitesi formül 2.1 kullanılarak bulunur.

$$\mu_t = \frac{\rho C_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (2.1)$$

Bu denklemde  $C_\mu$  türbülans modeli sabitini ifade etmektedir. Türbülans kinetik enerjisi ile enerji kayıp oranını tanımlayan türbülans denklemleri, denklem 2.2 ve 2.3 ile tanımlanır. Bu denklemlerde, G türbülans kinetik enerjisi üretim miktarını ifade eder. Difüzyon terimleri ise denklem 2.4' te belirtilmiştir

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R \quad (2.3)$$

$$\Gamma_\varepsilon = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}, \Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (2.4)$$

### 2.2.2 RNG k-ε Türbülans Kapatma Modeli

RNG k-ε türbülans kapatma modeli, Standart k-ε türbülans kapatma modeli gibi, türbülans kinetik enerjisi k ve kinetik enerji kayıp oranı ε için iki ayrı kısmi diferansiyel taşıma denkleminin kullanılmasını gerektirir. Taşıma denklemlerinin şekli Standart k-ε türbülans kapatma modeline benzerdir. RNG k-ε türbülans kapatma modeli ile Standart k-ε türbülans kapatma modeli arasındaki temel farklar, kullanılan sabitlerin değerleri ve eklenen ilave terimlerdir. RNG (Renormalization Group) yöntemi, türbülans viskozitesinin daha geniş bir türbülans aralığında hesaplanmasını sağlamak amacıyla türetilmiştir ve bu nedenle Standart k-ε modeline kıyasla daha hassas sonuçlar verebilmektedir. Özellikle RNG modeli, düşük Reynolds sayılarında ve dönel akışlarda daha iyi performans göstermektedir. Modeldeki ilave terimlerden biri, türbülans viskozitesinin hesaplanmasında yer alan geri dönüşüm (reynolds-stress) etkilerini temsil eden bir düzeltme terimidir. Bu düzeltme, türbülans kinetik enerjinin hızla dağıldığı bölgelerde modelin doğruluğunu artırır. Ayrıca, RNG modeli, türbülans kinetik enerji ve dağılım oranları için farklı bir eşitlik seti içerir. Bu farklılık, özellikle girdap çözünürlüğünün önemli olduğu akışlarda, daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesine olanak tanır. Standart k-ε modeli ise daha basitleştirilmiş sabit değerler kullanarak genel mühendislik uygulamalarında kabul edilebilir doğruluk sağlamayı hedefler. RNG k-ε türbülans kapatma modelinde 2.2 ve 2.3 eşitliklerinde bulunan difüzyon terimleri 2.5'teki gibi olur.

$$\Gamma_\varepsilon = \alpha_\varepsilon \mu_e, \Gamma_k = \alpha_k \mu_e \quad (2.5)$$

Akışkanın viskozitesi ( $\mu$ ) ile türbülans viskozite ( $\mu_t$ )' nin toplamı, efektif viskozite ( $\mu_e$ ) değerini verir. RNG k-ε türbülans kapatma modeli, Standart k-ε türbülans kapatma modeli ile karşılaştırıldığında aralarındaki en büyük fark, ε denkleminde ilave olarak gelen R terimidir. Bu fark ile formül, 2.6'teki gibi olmaktadır.



$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon_i u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon}^* \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.6)$$

$$C_{2\varepsilon}^* = C_{2\varepsilon} + \frac{C_{\mu}\eta^3(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3} \quad (2.7)$$

Burada  $\eta$ , türbülans kinetik enerjisinin üretim ve kayıp oranlarına dayanan bir fonksiyon olarak tanımlanır.

$$\eta = S \frac{k}{\varepsilon} \quad (2.8)$$

$S_{ij}$  ; şekil değiştirme hızı tansörüdür.

$$S = \sqrt{S_{ij}S_{ij}} \quad (2.9)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) \quad (2.10)$$

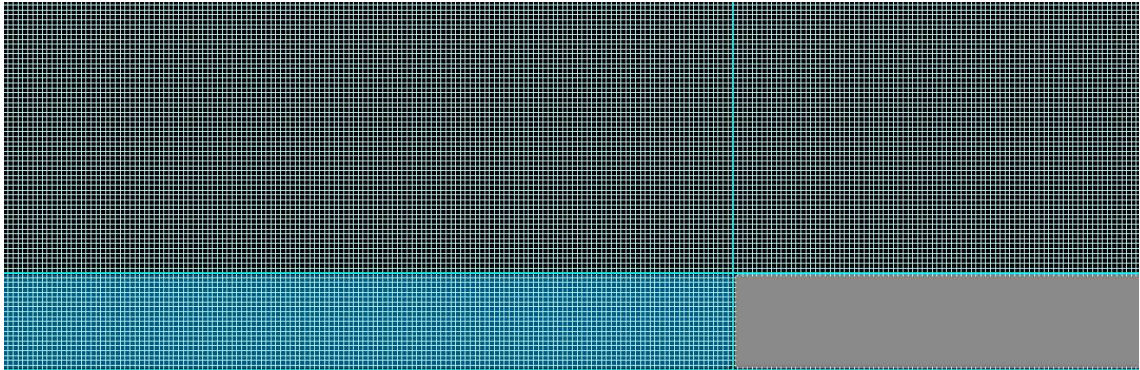
### 2.3 Performans Değerlendirme Kriterleri

Bu çalışmada kapsamında üretilen  $c_d$  debi katsayısı formüllerinin doğruluğu MSE, MARE, MAE,  $R^2$ , NSE, RMSE performans değerlendirme ölçütlerine göre hesaplanmıştır. MSE, MARE değerlerinin en küçük olması durumu ve  $R^2$  değerinin 1'e en yakın olması, tahminlerin son derece doğru ve güvenilir olduğunu işaret eder. Literatürde, NSE değerinin 0.3 ile 0.5 arasında olması düşük tahmin başarısını, 0.5 ile 0.7 arasında olması kabul edilebilir bir başarıyı, 0.7 ile 0.9 arasında olması yüksek tahmin başarısını ve 0.91'in üzerinde olması ise mükemmel tahmin başarısını ifade etmektedir [11]. RMSE değerinin sıfıra yakın olması durumu tahminin en iyi olduğunu belirtmektedir.

### 2.4 Hesaplama Ağının Tasarımı

Sayısal hesaplamalarda, tüm çözüm bölgesinde tek tip ağ sıklığı kullanılmıştır. Analiz üzerindeki ağ aralığının etkisini incelemek amacıyla, 2 cm, 1 cm, 0.5 cm ve 0.25 cm olmak üzere dört farklı ağ aralığı ile çözümler gerçekleştirilmiştir. Bu farklı ağ yoğunlukları ile elde edilen su yüzeyleri, deneysel olarak ölçülen su yüzeyleriyle karşılaştırılmış ve ortalama karesel hatalar (OKH) denklem (2.11) aracılığıyla hesaplanmıştır. Sonuç olarak, OKH değerleri 2 cm'lik ağ aralığı için 0.00148, 1 cm'lik ağ aralığı için 0.000639, 0.5 cm'lik ağ aralığı için 0.000145 ve 0.25 cm'lik ağ aralığı için 0.000035 olarak bulunmuştur. İncelenen OKH değerlerine göre, en uygun ağ aralığının 0.5 cm olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, 0.5 cm'lik ağ aralığı için çözüm süresi 0.25 cm'lik aralığa göre önemli ölçüde daha kısa olduğundan, tüm debiler için 0.5 cm ağ aralığı tercih edilerek çözümler yapılmıştır. Oluşturulan ağ yapısı Şekil 2' de gösterilmiştir.

$$OKH = \sum_{i=1}^n \frac{(H_{iölçüm} - H_{iFLOW-3D})^2}{n} \quad (2.11)$$



Şekil 2 Ağ (Mesh) Aralığı Çalışması

## 2.5 Sınır Şartlarının Tanımlanması

Analiz bölgesinin fiziksel ve geometrik özelliklerini doğru bir şekilde temsil etmek için Xmin: Volume of Rate (debi), Xmax: Out-Flow (su çıkışı), Zmin: Wall (duvar), Zmax: Symmetry, Ymin: Symmetry, Ymax: Symmetry olarak yapılandırılmıştır. Çalışma kapsamında FLOW-3D programında modellemeler 2 boyutlu olarak yapılmıştır. Debi, kanal genişliğine bölünerek  $\text{cm}^3/\text{sn}/\text{cm}$  olacak şekilde birim genişlikten geçen debi değeri girilmiştir. Programda, Output sekmesindeki Hydraulic Data seçeneği üzerinden Restart Data Interval parametresi 0,1 olarak belirlenmiştir. Bu ayar sayesinde, 10 saniyelik toplam çözüm süresi boyunca, her 0,1 saniyede bir veri kaydedilerek analiz için gerekli sonuçların zamana bağlı olarak detaylı bir şekilde elde edilmesi sağlanmıştır.

## 2.6 Debi Katsayısı Hesabında Kullanılan Savak Geometrileri

Çalışma kapsamında mevcut deney verileri kullanılarak uygun ağ yapısı belirlendikten sonra farklı geometrilere sahip savaklarda debi katsayısı hesabı yapabilmek amacıyla yeni savak boyutları belirlenmiştir. Bu amaçla, savak genişliği 0.6 m olarak sabit tutulmuştur ve savak uzunlukları için 0.15, 0.20, 0.25, 0.50, 0.55, 0.60 ve 0.70 m seçilmiştir. Savak yüksekliği, farklı savak uzunluklarına göre şu şekilde belirlenmiştir: 0.15 m uzunluğundaki savak için 0.1, 0.2, 0.25 ve 0.3 m; 0.20, 0.25 ve 0.50 m uzunluğundaki savaklar için 0.1 m; 0.55 m uzunluğundaki savak için 0.1 ve 0.15 m; 0.60 m uzunluğundaki savak için 0.1 ve 0.15 m; ve 0.70 m uzunluğundaki savak için 0.05 ve 0.1 m yükseklik değerleri kullanılmıştır.

## 2.7 Debi Katsayılarının Hesaplanması

Debi katsayılarının hesaplanması için deneylerden elde edilen su yüzü ölçümleri ve yeni oluşturulmuş savak geometrilerin FLOW-3D programında çözülmesi ile elde edilen su yüzü sonuçları kullanılmıştır. Mevcut su yüzü profillerinden elde edilen su yükseklikleri kullanılarak  $c_d$  debi katsayıları hesaplanmıştır. Debi katsayılarının hesaplanmasında formül 1.1, 1.2, 1.3 ve 2.11 kullanılmıştır. Formül 1.1 ve 1.2 Azimi ve Rajaratnam [1], formül 1.3 Govinda Rao ve Muralidhar [2] tarafından önerilen formüller iken, formül 2.12 savaklar için önerilen genel debi katsayısı formülüdür. Burada b savak genişliğini, H ise memba kısmındaki toplam enerji yükünü ifade etmektedir.

$$C_d = Q / (b \sqrt{8/27} \sqrt{gH^{3/2}}) \quad (2.12)$$

## 3. Bulgular

### 3.1 Debi Katsayısının Hesaplanması için Formül Üretilmesi

Çalışma kapsamında debi katsayısı  $c_d$ ' nin hesaplanmasında yeni formül oluşturma işleminde savak geometrileri dikkate alınmıştır. Savak geometrileri  $h/L$  oranına göre sınıflandırılmış olup;  $h$  akımın kararlı hale geldiği durumda memba su seviyesini,  $L$  savak uzunluğunu temsil etmektedir. Buna göre,  $h/L$  oranı 0 ile 0.1 arasında olduğunda savaklar uzun başlıklı, 0.1 ile 0.4 arasında olduğunda geniş başlıklı ve 0.4 ile 2 arasında olduğunda ise keskin kenarlı olarak tanımlanmıştır. Elde edilen bütün su yüzü profillerinden belirlenen su yükseklikleri ve savak geometrileri kullanılarak  $Q_{\text{tahmin}}$  ve  $C_{d\text{tahmin}}$  değerleri hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalardan elde edilen sonuçlar performans değerlendirme kriterleri değerlendirilerek yeni  $c_d$  debi katsayısı formülleri önerilmiştir. FLOW-3D' de analiz yapılırken türbülans kapatma modeli olarak Standart k- $\epsilon$  ve RNG k- $\epsilon$  modelleri kullanıldığından her iki analizden de elde edilen sonuçlara göre farklı  $c_d$  katsayıları hesaplanmıştır. Debi katsayısı hesabı için üretilen yeni formüller 3.1-3.8 de verilmiştir. Formüllerdeki  $h$  akımın kararlı hale geldiği durumda memba su yüksekliğini,  $p$  savak yüksekliğini ve  $L$  savak uzunluğunu gösterir.

Standart k- $\epsilon$  türbülans kapatma modeline göre keskin kenarlı savakta;

$$C_d = 1.025366 + 0.062949 \left( \frac{h}{L} \right) \quad (3.1)$$

Keskin kenarlı savakta RNG k- $\epsilon$  türbülans kapatma modeline göre;

$$C_d = 0.994254 + 0.90271 \left( \frac{h}{L} \right) \quad (3.2)$$

Geniş başlıklı savakta Standart k-ε türbülans kapatma modeline göre;

$$C_d = 1.011418 + 0.33974 \left( \frac{h}{L} \right) \quad (3.3)$$

Geniş başlıklı savakta RNG k-ε türbülans kapatma modeline göre;

$$C_d = 1.01118 + 0.237 \left( \frac{h}{L} \right) \quad (3.4)$$

Uzun başlıklı savakta Standart k-ε türbülans kapatma modeline göre;

$$C_d = 1.101133 [h/(h + p)]^{-0.01007} \quad (3.5)$$

Uzun başlıklı savakta RNG k-ε türbülans kapatma modeline göre;

$$C_d = 0.817777 [h/(h + p)]^{-0.20539} \quad (3.6)$$

Genel savak formülü Standart k-ε türbülans kapatma modeline göre;

$$C_d = 1.026838 + 0.43728 \left( \frac{h}{L} \right) \quad (3.7)$$

Genel savak formülü RNG k-ε türbülans kapatma modeline göre;

$$C_d = 1.009405 + 0.057083 \left( \frac{h}{L} \right) \quad (3.8)$$

Standart k-ε türbülans kapatma modeli için üretilen formül 3.1, 3.3, 3.5 ve 3.7 ve savak tipine uygun olarak literatürde bulunan 1.1, 1.2 ve 2.12 formülleri kullanılarak hesaplanan  $c_d$  katsayıları ve performans kriterleri Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1** Standart k-ε türbülans kapatma modeline  $c_d$  katsayıları ve performans kriterleri

	$C_d$	MSE	RMSE	MARE	MAE	R <sup>2</sup>	NSE
<b>Keskin Kenarlı Savak Literatür Formülü</b>	0.76	0.00004700	0.006890	13.916584	0.006591	0.838933	0.381964
<b>Keskin Kenarlı Savak Üretilen Yeni Formül</b>	1.02	0.00001100	0.003382	4.359829	0.002011	0.853303	0.851141
<b>Geniş Başlıklı Savak Literatür Formülü</b>	0.91	0.00002500	0.005019	13.998362	0.003715	0.668544	0.592410
<b>Geniş Başlıklı Savak Üretilen Yeni Formül</b>	1.01	0.00003200	0.005654	8.356126	0.002110	0.667354	0.482734
<b>Uzun Başlıklı Literatür Formülü</b>	1.02	0.00000300	0.001717	23.668904	0.001682	0.995660	0.528580
<b>Uzun Başlıklı Savak Üretilen Yeni Formül</b>	1.10	0.00000007	0.000272	3.081310	0.000205	0.992972	0.988150
<b>Genel Savak Literatür Formülü</b>	0.91	0.00002400	0.004926	14.622950	0.003885	0.944796	0.918369
<b>Genel Savak Üretilen Yeni Formül</b>	1.02	0.00001800	0.004199	7.515684	0.001823	0.943603	0.940689

RNG k-ε türbülans kapatma modeli için üretilen formül 3.2, 3.4, 3.6 ve 3.8 ve savak tipine uygun olarak literatürde bulunan 1.1, 1.2 ve 2.12 formülleri kullanılarak hesaplanan  $c_d$  katsayıları ve performans kriterleri Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2** RNG k-ε türbülans kapatma modeline  $c_d$  katsayıları ve performans kriterleri

	$C_d$	MSE	RMSE	MARE	MAE	$R^2$	NSE
<b>Keskin Kenarlı Savak Literatür Formülü</b>	0.76	0.00004100	0.006398	12.998343	0.006151	0.965634	0.467150
<b>Keskin Kenarlı Savak Üretilen Yeni Formül</b>	0.99	0.00000200	0.001527	2.3187750	0.001159	0.973720	0.969650
<b>Geniş Başlıklı Savak Literatür Formülü</b>	0.91	0.00002000	0.004434	12.654777	0.003398	0.740685	0.681896
<b>Geniş Başlıklı Savak Üretilen Yeni Formül</b>	1.01	0.00002400	0.004914	6.8922480	0.001767	0.739024	0.609242
<b>Uzun Başlıklı Literatür Formülü</b>	1.02	0.00000400	0.002097	25.805592	0.001899	0.709089	0.296667
<b>Uzun Başlıklı Savak Üretilen Yeni Formül</b>	0.81	0.00000200	0.001287	6.8491190	0.000603	0.835297	0.735016
<b>Genel Savak Literatür Formülü</b>	0.91	0.00002000	0.004497	14.158922	0.003635	0.961831	0.931951
<b>Genel Savak Üretilen Yeni Formül</b>	1.00	0.00001100	0.003375	7.2559760	0.001433	0.962127	0.961671

Keskin kenarlı savakta Standart k-ε türbülans kapatma modeline göre oluşturulan modellemelerde, NSE değeri 0.85,  $R^2$  değeri 0.85' tir.  $R^2$  değerinin 1'e yakın olması ve NSE değerinin 0.7 ile 0.9 arasında olması, yüksek bir tahmin başarısına işaret etmektedir. RNG k-ε türbülans kapatma yaklaşım modeline göre oluşturulan modellemelerde, NSE değeri 0.96,  $R^2$  değeri 0.97' dir.  $R^2$  değerinin 1'e yakın olması ve NSE değerinin 0.91'in üzerinde olması, tahmin başarısının mükemmel olduğunu göstermektedir.

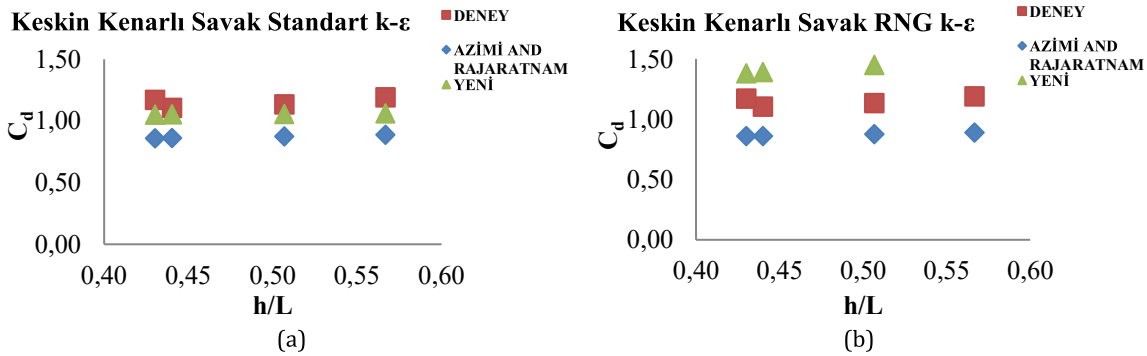
Geniş başlıklı savakta Standart k-ε türbülans kapatma modeline göre oluşturulan modellemelerde, NSE değeri 0.48,  $R^2$  değeri 0.66' dır.  $R^2$  değerinin 1'den biraz uzaklaşması ve NSE değerinin 0.3- 0.5 arasında olması düşük tahmin başarısı olarak yorumlanmıştır. RNG k-ε türbülans kapatma modeline göre oluşturulan modellemelerde, NSE değeri 0.60,  $R^2$  değeri 0.73' tür.  $R^2$  değerinin 1'e yakın olması ve NSE değerinin 0.7 ile 0.9 arasında bulunması, modelin yüksek tahmin başarısına sahip olduğunu göstermiştir.

Uzun başlıklı savakta Standart k-ε türbülans kapatma modeline göre oluşturulan modellemelerde, NSE değeri 0.98,  $R^2$  değeri 0.99' dur.  $R^2$  değerinin 1'e çok yakın olması ve NSE değerinin 0.91' den büyük olmasından dolayı tahmin başarısının mükemmel olduğu anlaşılmıştır. RNG k-ε türbülans kapatma modeline göre oluşturulan modellemelerde, NSE değeri 0.73,  $R^2$  değeri 0.83' tür.  $R^2$  değerinin 1'e yaklaşması ve NSE değerinin 0.7 ile 0.9 arasında olması, tahmin başarısının yüksek olduğunu ortaya koymuştur.

Savak geometrisi göz önüne alınmaksızın, Standart k-ε türbülans kapatma modeli kullanılarak elde edilen genel formül incelendiğinde, NSE değeri 0.94 ve  $R^2$  değeri 0.94 olarak bulunmuştur.  $R^2$  değerinin 1'e çok yakın olması ve NSE değerinin 0.91'in üzerinde olması, modelin tahmin başarısının mükemmel olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde, RNG k-ε türbülans kapatma modeli ile elde edilen genel formül incelendiğinde, NSE değeri 0.96 ve  $R^2$  değeri 0.96'dır.  $R^2$  değerinin 1'e oldukça yakın olması ve NSE değerinin 0.91'in üzerinde olması, tahmin başarısının mükemmel olduğu şeklinde değerlendirilmiştir.

### 3.2 Hesaplanan Debi Katsayılarının Karşılaştırılması

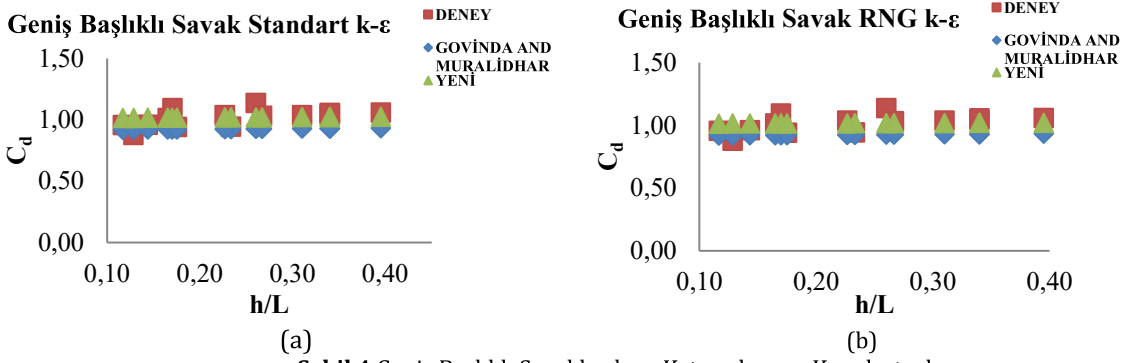
Kenarlı savakta deney verileri kullanılarak Standart k-ε ve RNG k-ε türbülans kapatma modeline göre formül 2.12 ile hesaplanan debi katsayıları, Azimi ve Rajaratnam [1] formülü ile hesaplanan debi katsayıları ve çalışma kapsamında elde edilen yeni formülle hesaplanan debi katsayıları Şekil 3 (a) ve (b)'de gösterilmiştir.



Şekil 3 Keskin Kenarlı Savaklarda  $c_d$  Katsayılarının Karşılaştırılması

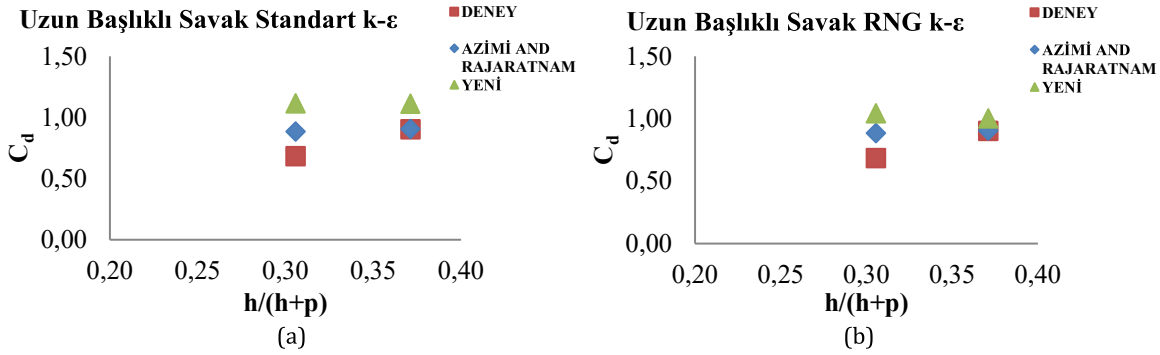


Geniş başlıklı savakta deney verileri kullanılarak Standart k- $\epsilon$  ve RNG k- $\epsilon$  türbülans kapatma modeline göre formül 2.12 ile hesaplanan debi katsayıları, Govinda Rao ve Muralidhar [2] formülü ile hesaplanan debi katsayıları ve çalışma kapsamında elde edilen yeni formülle hesaplanan debi katsayıları Şekil 4 (a) ve (b)'de gösterilmiştir.



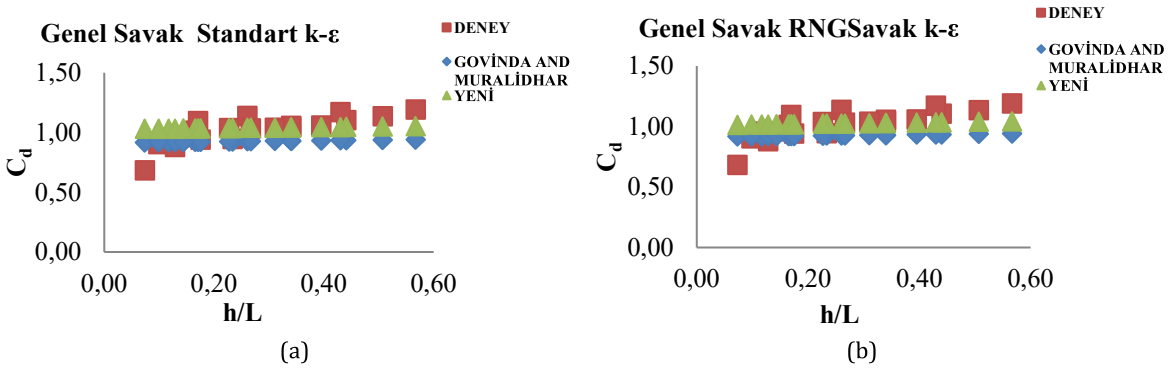
Şekil 4 Geniş Başlıklı Savaklarda  $C_d$  Katsayılarının Karşılaştırılması

Uzun başlıklı savakta deney verileri kullanılarak Standart k- $\epsilon$  ve RNG k- $\epsilon$  türbülans kapatma modeline göre formül 2.12 ile hesaplanan debi katsayıları, Azimi ve Rajaratnam [1] formülü ile hesaplanan debi katsayıları ve çalışma kapsamında elde edilen yeni formülle hesaplanan debi katsayıları Şekil 5 (a) ve (b)'de gösterilmiştir.



Şekil 5 Uzun Başlıklı Savaklarda  $C_d$  Katsayılarının Karşılaştırılması

Savak türü ayırt etmeden deney verileri kullanılarak Standart k- $\epsilon$  ve RNG k- $\epsilon$  türbülans kapatma modeline göre formül 1.3 ile hesaplanan debi katsayıları, Govinda Rao ve Muralidhar [2] formülü ile hesaplanan debi katsayıları ve çalışma kapsamında elde edilen yeni formülle hesaplanan debi katsayıları Şekil 6 (a) ve (b)'de gösterilmiştir.



Şekil 6 Uzun Başlıklı Savaklarda  $C_d$  Katsayılarının Karşılaştırılması

Keskin kenarlı savakta, Standart k- $\epsilon$  türbülans kapatma modeline göre deney verilerinin formül 2.12 ve Azimi ve Rajaratnam [1] formülü ile hesaplanması sonucunda debi katsayıları arasındaki fark, ortalama olarak %32,00 seviyesinde bulunmuştur. Formül 2.12 kullanılarak hesaplanan debi katsayıları ve yeni oluşturulan formül ile hesaplanan debi katsayıları arasındaki ortalama fark ise %8,90 olarak tespit edilmiştir. RNG k- $\epsilon$  türbülans kapatma modeline göre, deney verilerinin Azimi ve Rajaratnam'ın [1] önerdikleri formül ve 2.12'de verilen formül ile hesaplanması sonucunda ortaya çıkan debi katsayıları arasındaki ortalama fark yine %32,00 olarak hesaplanmıştır. Formül 2.12 ile hesaplanan debi katsayıları ve yeni oluşturulan formül arasındaki fark ise %19,70 olarak belirlenmiştir.

Geniş başlıklı savakta, Standart k-ε türbülans kapatma modeline göre deney verilerinin formül 2.12 ve Govinda Rao ve Muralidhar [2] formülü ile karşılaştırılması sonucunda, debi katsayıları arasındaki ortalama fark %10.00 olarak hesaplanmıştır. Yeni oluşturulan formülle formül 2.12 arasında hesaplanan debi katsayıları farkı ise %5.20 olarak belirlenmiştir. Ancak, yeni formülün performans değerlendirme kriterlerine göre düşük tahmin başarısına sahip olduğu görülmüş ve bu nedenle çalışma kapsamında önerilmemiştir. RNG k-ε türbülans kapatma modeline göre, deney verilerinin formül 2.12 ve Govinda Rao ve Muralidhar [2] formülü ile hesaplanması sonucunda ortalama fark %10.00 olarak bulunmuş, yeni formül ile %5.30 fark ortaya çıkmıştır. Performans değerlendirme kriterleri bu durumda yüksek tahmin başarısını işaret etmektedir.

Uzun başlıklı savakta, Standart k-ε türbülans kapatma modeline göre deney verilerinin formül 2.12 ve Azimi [1] formülü ile karşılaştırılması sonucunda, debi katsayıları arasındaki ortalama fark %11.60 olarak hesaplanmıştır. Formül 2.12 ile yeni formül arasında %28.80 fark olduğu belirlenmiştir. RNG k-ε türbülans kapatma modeline göre, deney verilerinin formül 2.12 ve Azimi ve Rajaratnam [1] formülü ile hesaplanması sonucunda %11.60'luk bir fark bulunmuş, yeni formülle bu fark %22.30 olmuştur. Yeni formüllerin performans değerlendirme kriterleri yüksek tahmin başarısına işaret etse de, ortalama farkın büyük olması nedeniyle bu formüller önerilmemektedir. Genel bir formül elde etmek amacıyla, Standart k-ε türbülans kapatma modeline göre deney verilerinin formül 1.3 ve Govinda Rao ve Muralidhar [2] formülü ile karşılaştırılması sonucu %13.10'luk bir ortalama fark tespit edilmiştir. Formül 1.3 ile yeni genel formül arasında hesaplanan debi katsayıları farkı ise %7.70 olarak belirlenmiştir. RNG k-ε türbülans kapatma modeline göre, deney verilerinin formül 1.3 ve Govinda Rao ve Muralidhar [2] formülü ile karşılaştırılması sonucu %13.10'luk bir ortalama fark bulunmuş, yeni genel formülle bu fark %7.80 olarak hesaplanmıştır.

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, mevcut geniş başlıklı savak deney verileri FLOW-3D paket programı ile çözülerek doğrulanmış ve yeni savak geometrileri belirlenerek Standart k-ε ve RNG k-ε türbülans kapatma modeline sayısal olarak çözümleme yapılmıştır. Elde edilen su yüzü profillerinden her bir savak için Microsoft Excel ile  $Q_{\text{tahmin}}$  ve  $C_{d\text{tahmin}}$  değerleri hesaplanarak yeni  $c_d$  debi katsayısı formülleri önerilerek literatürde bulunan formüller ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışma sonucunda, debi katsayısının hesabı için kullanılacak genel formüller geliştirilmiştir. Bu formüller, deneysel sonuçlarla uyumlu olup literatürdeki mevcut formüllerden daha başarılı sonuçlar vermiştir. Oluşturulan yeni debi katsayısı formüllerinin başarısı performans kriterlerine göre değerlendirilmiştir. Performans kriterleri açısından değerlendirilmesinin yanı sıra deneysel veriler literatürde bulunan formüller ve yeni üretilen formüller ile hesaplanarak aralarındaki farklar % olarak karşılaştırılmıştır. Her iki sonuca göre uzun başlıklı savaklar için literatürde verilen denklemlerin doğruluğu yeni üretilen denkleme göre daha fazladır. Geniş başlıklı savaklar, keskin kenarlı savaklar ve genel savaklar için üretilen formüller ise literatürde bulunan formüllere göre daha başarılı sonuç vermektedir. Türbülans modeli açısından yapılan değerlendirmelerde, RNG k-ε modeli, Standart k-ε modeline göre daha düşük hata oranlarıyla deneysel sonuçlara daha yakın değerler vermiştir. Özellikle geniş başlıklı savaklarda daha tutarlı sonuçlar elde edilmiştir.

#### Kaynakça

- [1] Azimi, A.H., Rajaratnam, N., 2009. Discharge characteristics of weirs of finite crest length, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 135(12): 1081-1085.
- [2] Govinda Rao, N. S., Muralidhar, D., 1963. Discharge characteristics of weirs of finite crest width, Houille Blanche, 18(5), 537-545.
- [3] Ramamurthy, S. A., Tim, U. S., Rao, M. V. J. 1987. Flow Over Sharp Crested Plate Weirs, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 113.
- [4] El-Alfy, K.S., 2005. Effect of vertical curvature of flow at weir crest on discharge coefficient, Ninth International Water Technology Conference, IWTC9, Sharm El-Sheikh, Egypt, 249-262.
- [5] Doğan, Y., 2009. Savaklarda Kret Şeklinin Debi Katsayısına Etkisinin İncelenmesi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ, 50 s.
- [6] Bilhan, Ö., Emiroğlu, M.E., Kişi, Ö., 2010. Application of two different neural network techniques to lateral outflow over rectangular side weirs located on a straight channel, Advances in Engineering Software, 41, 831-837.

- [7] Salması, F., Yıldırım, G., Masoodi, A., Parsamehr, P., 2013. Predicting discharge coefficient of compound broad-crested weir by using genetic programming (GP) and artificial neural network (ANN) techniques, *Arabian Journal of Geosciences*, 6, 2709-2717.
- [8] Al-Khatip, İ., Gogus, M., 2014. Prediction Models For Discharge Estimation In Rectangular Compound Broad-Crested Weirs, *Flow Measurement and Instrumentation*, 36, 1-8.
- [9] Hoseini, S.H., Afshar, H., 2014. Flow over a Broad-Crested Weir in Subcritical Flow Conditions, *Physical Syudy, Journal of River Engineering*, 2(1), 1005-1012.
- [10] İlkentapar, M., 2015. Açık Kanallarda Geniş Başlıklı Savaklar Üzerindeki Akımın Deneysel Ve Sayısal Modellenmesi. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 130 s.
- [11] Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models, Part 1: A discussion of principles. *J. Hydrol.* 282–290.