






# Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

## Atmosfere Açılan Bir Boruda Sızma Debi Parametrelerinin Sayısal Model ile İncelenmesi\*

 Ömer EKMEKÇİOĞLU<sup>a,\*</sup>,  Eyyup Ensar BAŞAKIN<sup>a</sup>,  Mehmet ÖZGER<sup>a</sup>

<sup>a</sup> İnşaat Mühendisliği Bölümü, İnşaat Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, TÜRKİYE

\* Sorumlu yazarın e-posta adresi: omer.ekmekcioglu@itu.edu.tr

DOI : 10.29130/dubited.779467

### ÖZET

Bu çalışmada, bir su dağıtım şebekesinde oluşacak kayıpların hesaplanmasında kullanılan debi katsayısı incelenmiş olup, debi katsayısının delik alanı ve boru iç basıncının bir fonksiyonu olduğu ifade edilmiştir. Çalışmanın ilk kısmında tüm delik geometrileri için her bir zaman adımında basınç artırılarak sızıntı alanlarında değişimler incelenmiş olup, ikinci aşamada ise debi katsayısının hesaplanması için hidrodinamik model kurulmuştur. Modelleme sonuçları elde edilen sızıntı değerleri Toricelli (orifis) denklemi ile modeller doğrulanmıştır. Doğrulamanın ardından, çeşitli incelemeler sonucunda, farklı delik alanlarına ve çeşitli basınç değerlerine göre dört farklı delik geometrisi için sonuçlar elde edilmiştir. Model sonucunda her delik geometrisi için, boyutsal homojenliğin sağlanması amacıyla fonksiyondaki değişkenler boyutsuz hale getirilmiş ve bir debi katsayısı fonksiyonu elde edilmiştir. Bu amaçla, delik alanının boru kesit alanına oranı olarak alan oranı ( $r$ ) ve iç basıncın harici basınca oranı olarak basınç oranı ( $p$ ) kullanılmıştır. Denklemlerin seçiminde, determinasyon katsayısı ( $R^2$ ), kök ortalama hata karesi (RMSE) ve ortalama mutlak hatası (MAE) gibi bazı performans göstergeleri dikkate alınmıştır. Optimum debi katsayısı fonksiyonlarına ait performans değerlendirmelerinde ise yuvarlak delik için  $R^2 = 0.93$ , dikdörtgen delik için  $R^2=0.88$ , üçgen delik için  $R^2=0.93$  ve zikzak delik geometrisi için  $R^2= 0.95$  sonuçlarına ulaşılmıştır. Ayrıca, optimum denklemlerin seçiminde en düşük MAE ve RMSE değerlerinin elde edilmesine dikkat edilmiştir. Netice olarak, bu çalışma kapsamında literatürde ifade edilen debi katsayısı değerinin sabit olarak alınabileceği kanısının aksine, özellikle büyük ölçekli hesaplamalarda sızıntı debisi üzerinde ciddi etkisi olacağı düşünülen debi katsayısının 0.65 ile 0.74 arasında değişkenlik göstereceği ve her bir delik geometrisi ve oryantasyonu için farklı eşitlikler ile daha doğru sonuçlara ulaşılabileceği vurgulanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** su dağıtım şebekeleri, debi katsayısı, sızıntı debisi, orifis

## Numerical Analysis of Leakage Flowrate Parameters in a Pipe Opening to Atmosphere

### ABSTRACT

In this study, discharge coefficient is found as a function of the hole area and the internal pressure of the pipe. The variation in leakage areas is performed at first and then, hydrodynamic model was established to calculate the discharge coefficient for various scenarios. Also, the results are validated with Toricelli (orifice) equation. After verification, the outcomes were acquired for four different hole geometries according to various hole areas and pressure values. An area ratio ( $r$ ), as the ratio of the hole area to the pipe cross-section area, and pressure ratio ( $p$ ),

Geliş: 12/08/2020, Düzeltme: 14/12/2020, Kabul: 14/12/2020

\* Bu çalışma Su Dağıtım Şebekelerinde Sızma Debi Parametrelerinin Sayısal Model İle İncelenmesi isimli yüksek lisans tezinden türetilmiştir.

as the ratio of the internal pressure to the external pressure, are used to provide dimensional homogeneity. Furthermore, performance indicators such as determination coefficient, root mean square of error and mean absolute error were considered in the selection of optimal equations. We obtained the determination coefficients as  $R^2 = 0.93$ ,  $R^2 = 0.88$ ,  $R^2 = 0.93$  and  $R^2 = 0.95$  for round hole, rectangular hole, triangular hole and zigzag hole, respectively. In conclusion, contrary to the opinion that the discharge coefficient value stated in the literature can be taken as constant within the scope of this study, the discharge coefficient, which is considered to have a serious effect on the leakage flow especially in large-scale calculations, vary between 0.65 and 0.74. Thus, it becomes more accurate with different equations for each hole geometry and orientation.

**Keywords:** water distribution networks, discharge coefficient, leakage flowrate, orifice

## I. GİRİŞ

Su dağıtım şebekeleri, su ve yaşam alanlarını bir araya getirilmesinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Su dağıtım şebekelerinin verimliliğini ifade eden önemli husus, kayıpların miktarıdır. Bu kayıplar, şebekenin hatalı dizaynı, yanlış boru seçimi, korozyon ve üretim hataları nedeniyle meydana gelmektedir. Önlem alınmadığı takdirde kayıplar, su kaynaklarının azalması, ekosistemin bozulması, çevre sorunları ve potansiyel hastalıklarla birlikte ciddi ekonomik zararlara neden olmaktadır. Sızıntı problemlerinin ortaya çıkmasıyla, araştırmacılar sızıntı davranışını anlamak ve sızıntı oranını azaltmak için farklı yöntemler bulmaya odaklanmıştır [1]. Bu yöntemlerden biri de basınç kontrolüdür [2]. Su dağıtım şebekeleri, son yıllarda basınç yönetimi faaliyetleri dikkate alınarak oldukça fazla çalışmanın yapıldığı bir alandır [3]–[6]. Tüm bu çalışmaların sonuçları, basınç yönetimi ve kaçak kontrolleri ile birlikte kaçak oranlarını azaltmak ve boru şebekelerinin hizmet ömrünü artırmak için önemli iyileştirmeler yapıldığını göstermektedir [7]. Literatürde yer alan çalışmalar, enerjinin korunmasından kaynaklanan basınç ve kaçak debi arasındaki ilişkiyi gösteren Toricelli denklemine dayanmaktadır. Bu denklem aynı zamanda orifis denklemi olarak da bilinmektedir. Hidrolik perspektife göre, boru sızıntıları orifis karakteristiği gösterdiğinden, sızıntı problemleri orifis denklemiyle fiziksel olarak örtüşmektedir [8].

Genel olarak orifis debisi,  $Q$ , şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$Q = C_d \times A \times \sqrt{2gh} \quad (1)$$

Denklemden bulunan  $C_d$  debi katsayısı olup, sürtünmeden dolayı enerji kaybından oluşmaktadır.  $A$  ise sızıntı alanıdır.  $h$  ve  $g$  sırasıyla basınç yüksekliği ve yerçekimi ivmesidir. Kayıplar ve basınç arasındaki ilişkiyi ayrıntılı olarak araştırmak için Germanopoulos (1985) [9] kayıpların basınca bağlı olarak değiştiğini ve bir su dağıtım şebekesindeki sızıntıdan kaynaklanan kayıpların yüksek basınçla arttığını belirtmiştir.

Orifis denkleminin düzenlenerek elde edilen bir başka ifade ise sızıntı debisi şu şekilde ifade edilmektedir:

$$Q_L = C \times h^{N1} \quad (2)$$

Denklemden bulunan  $Q_L$  sızıntı debisi,  $C$  ve  $N1$  ise sırasıyla sızıntı katsayısı ve sızıntı üssünü temsil etmektedir. Bir orifis için sızıntı üssü 0.5 iken, van Zyl ve Clayton (2007) [10] tarafından sızıntı üssünü etkileyen olası parametreleri araştırmak için yapılan çalışmada, sızıntı üssünün genellikle 0.5'ten büyük olduğu ifade edilmiştir. Deneysel olarak gerçekleştirilen başka bir çalışmada Greyvenstein ve van Zyl (2007) [11], farklı boru malzemeleri ve farklı delik geometrileri için sızıntı üssünün 0.4 ile 2.3 arasında

olduğu sonucuna varmıştır. Ayrıca, farklı ülkelerde ve çalışma alanlarında yapılan birçok araştırma, bir sızıntı üssünün farklı aralıklarda değişebileceğini göstermektedir. N1 sızıntı üssü üzerinden yapılan çok sayıda çalışma [12]–[14] neticesinde sızıntı üssündeki varyasyonların nedeninin artan basınçla birlikte sızıntı alanının değişiminden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.

Buna paralel olarak, geliştirilen FAVAD (Sabit ve Değişken Alan Debisi) konseptine göre basınç artışıyla bazı sızıntıların değişmediğini ve bazı sızıntı alanlarının arttığını belirtmiştir. Cassa vd. (2010) [15] sonlu elemanlar metoduna dayanan sayısal bir analizde farklı tipteki borular için sızıntı alanı davranışını incelemiş, sızıntı alanının basınçla doğrusal olarak değişeceği belirtilmiştir. Böylelikle sızıntı alanı aşağıdaki gibi ifade edilmiştir:

$$A = A_0 + m \times h \quad (3)$$

Denklemden bulunan  $A_0$  başlangıçtaki delik alanını ifade ederken,  $m$  ise sızıntı alanı ile basınç arasındaki değişimin eğimini temsil etmektedir. Yukarıdaki debi denklemi ile birleştirildiğinde FAVAD denklemi elde edilmektedir:

$$Q = C_d \times \sqrt{2g} \times (A_0 \times h^{0.5} + m \times h^{1.5}) \quad (4)$$

Bu denklem ve önceki ifadelerde değinilen debi katsayısı değişkeni için de bir takım çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Cassa vd. (2010) [15] debi katsayısını 0.67 olarak sabit kabul ederken, Schwaller ve van Zyl (2014) [14], bir su dağıtım şebekesindeki debi katsayılarının, normal dağılım varsayımıyla, ortalama olarak 0.65 olacak şekilde, 0.5 ile 0.8 arasında değerler alacağını göstermiştir. Debi katsayısının hesaplanmasında normal dağılımın kullanıldığı başka bir çalışmada Schwaller vd. (2015) [16], bir sistem için debi katsayısı ve sızıntı üssü değerlerinin sabit olmadığını ifade ederken, her iki parametrenin de basınçla değiştiğini vurgulamıştır. Literatürde ortaya atılan değişik fikirler olarak ise sabit bir değer alınması fikrinin aksi olacak nitelikte, debi katsayısının orifis girişinin şekli, Reynolds Sayısı, basınç gibi çeşitli parametrelerin bir fonksiyonu olduğu görülmektedir [17]. Fakat, henüz debi katsayısı için herhangi bir eşitlik ortaya atılmamıştır.

Bu çalışmada, debi katsayısının bir dizi parametreye bağlı olduğu ve bu parametrelerin bir fonksiyonu olarak ifade edilebileceği konusunda bir araştırma yapılmıştır. Sayısal analizler ile debi katsayısının sızıntı alanı, delik geometrisi ve basıncına göre ilişkileri gözlenmiş olup, debi katsayısının hesaplanması için bir eşitlik önerilmiştir. Bu eşitlikler çalışma kapsamında değerlendirilen dört farklı geometri ve bu geometrilerin standart oryantasyonları için geliştirilmiştir.

## **II. MALZEME VE YÖNTEM**

Bu çalışmada ABAQUS/CAE ve ANSYS Fluent yazılımları kullanılmıştır. Bu iki model kullanım amacı olarak farklılık gösterse de, kullanım pratikleri ve işlem adımları büyük ölçüde benzerlik göstermektedir. Her iki model de hesaplama adımları olarak kabaca şu süreci izlemektedir: (1) Geometri oluşturma, (2) Mesh Üretimi, (3) Fiziksel Kurulum, (4) Sayısal Çözüm, (5) Sayısal Çözüm ve Sonuçların Elde Edilmesi. Kullanılan yazılımlar ile ilgili bilgiler aşağıda açıklayıcı bir şekilde ifade edilmiştir: Abaqus/CAE, mekanik bileşenlerin hem modellenmesi, hem de analizi için kullanılan ve sonlu elemanlar analiz sonucunu görselleştiren bir yazılımdır. Yani, modelleme işlemlerinin çözümü izleme, prosese müdahale etme ve sonuçları inceleme gibi tüm bileşenleri ile birlikte ön-işleme ve son-işleme süreçleri de gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca açık kodlu olması özelliği ile Abaqus/CAE, Python programlama dilinden yararlanmak suretiyle kullanıcılara uygulamaya yönelik çözümler üretebilme ve bu çözümleri otomatik hâle getirebilme olanakları sunmaktadır. Bu çalışmada sızıntı alanında ortaya çıkan deformasyonların incelenmesi için Abaqus/CAE yazılımından yararlanılmıştır. Nümerik hidrodinamik simülasyonlar için ise ANSYS Fluent yazılımı kullanılmıştır. Serbest yüzeyler, çoklu sıvı fazları, viskoz ve türbülanslı akışlar gibi çeşitli karmaşık ve büyük ölçekli hesaplamalı akışkanlar dinamiği modelleri, Fluent ile hızlı ve uygun maliyetli bir şekilde modellenabilir.

Bu çalışma kapsamında kullanılan yazılımlar sonucu elde edilen denklemler bir takım başarı kriterlerine göre seçilmiştir. Bu başarı kriterleri ise, determinasyon katsayısı ( $R^2$ ), ortalama mutlak hata (MAE) ve kök ortalama hata karesi (RMSE) olarak belirlenmiştir. Bu kriterlere ait denklemler şu şekilde ifade edilebilmektedir:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (D_{oi} - \bar{D}_o) (D_{pi} - \bar{D}_p)^2}{\sum_{i=1}^n (D_{oi} - \bar{D}_o)^2 \sum_{i=1}^n (D_{pi} - \bar{D}_p)^2} \quad (5)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |D_{pi} - D_{oi}| \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (D_{pi} - D_{oi})^2} \quad (7)$$

Determinasyon katsayısı ( $R^2$ ) için pozitif değerler, iki değişkenin doğrudan orantılı olduğunu, negatif değerler ise ters ilişkiyi temsil ettiğini gösterir. -1 veya 1'e yaklaşmak  $R^2$  için ilişkinin gücünü arttırırken, sıfır olması durumunda değişkenler arasında ilişki olmadığı anlamına gelmektedir. MAE ve RMSE'nin her ikisinin de sıfıra yakın olması model doğruluğunun artırılması bakımından beklenmektedir.

### III. KORUNUM DENKLEMLERİ

ANSYS Fluent ile çözülen üç denklem vardır: (1) kütle korunumu, (2) momentum korunumu ve (3) enerjinin korunumu. (1) ve (2) tüm akışlar için çözülür, (3) ısı transferi ve sıkıştırılabilirlik içeriyorsa çözülür. Akış çalkantılı olduğunda, ek taşınım denklemleri çözülür.

Denklem 1, tek fazlı bir akış için verilmiştir. Kullanıcı tanımlı herhangi bir kaynak eklendiğinde veya akış çok fazlı akışsa, denklemin sağ tarafına "S" eklenmelidir (ANSYS Fluent 14).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (9)$$

Denklemlerde bulunan  $\rho$  özgül kütle,  $\vec{v}$  ortalama kesitsel hız,  $p$  statik basınç,  $\bar{\tau}$  gerilme tensörü,  $\rho \vec{g}$  kütle çekim kuvveti ve  $\vec{F}$  ise kullanıcı tanımlı kaynaklar gibi modele bağlı diğer kaynak terimlerini de içeren dış gövde kuvvetleri. Bu çalışmada standart k-epsilon türbülans modeli kullanılmıştır.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial t_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial t_i} (\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (P_k + C_{3\epsilon} P_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (11)$$

Denkleimde bulunan  $k$  türbülans kinetik enerjiyi,  $u_i$  ilgili doğrultudaki hız bileşenini,  $P_k$  ortalama hız gradyanları nedeniyle üretilen türbülans kinetik enerjisini,  $P_b$  kaldırma kuvvetine bağlı türbülans kinetik enerji üretimini temsil etmektedir.  $\mu_t$  ise eddy viskozitesi olup, aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (12)$$

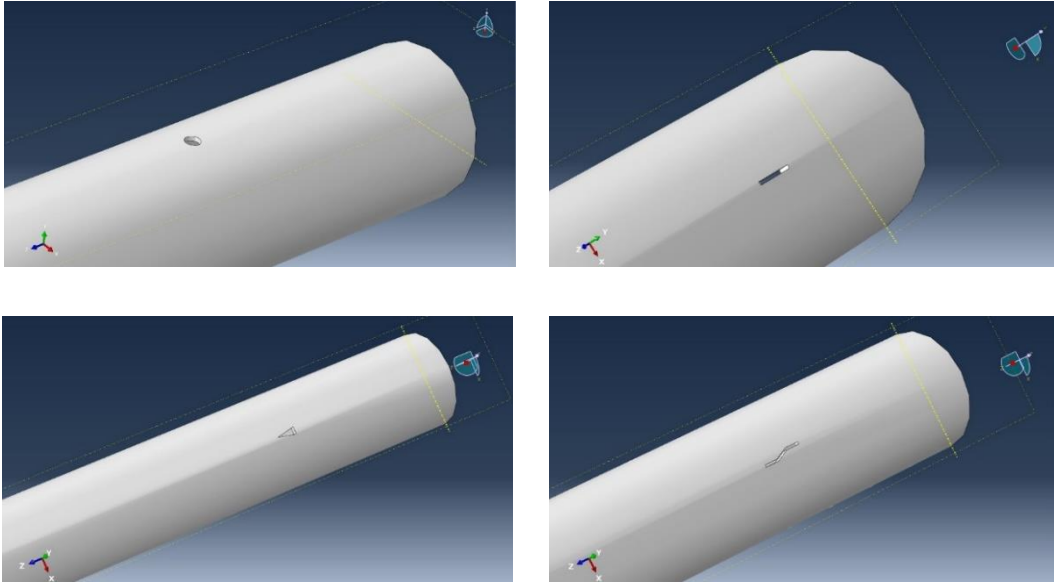
Türbülans Prandtl sayıları ise  $k$  ve  $\epsilon$  için sırasıyla:  $\sigma_k, \sigma_\epsilon$  and  $C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}$  çok sayıda iterasyonun sonunda sırasıyla 1.0, 1.3, 1.44, 1.92 olarak belirlenen sabit değerlerdir.  $S$ , ortalama gerinim hızı tensörünün modülüdür ve şöyle tanımlanmaktadır:

$$S \equiv \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (13)$$

## IV. MODEL DOĞRULAMASI

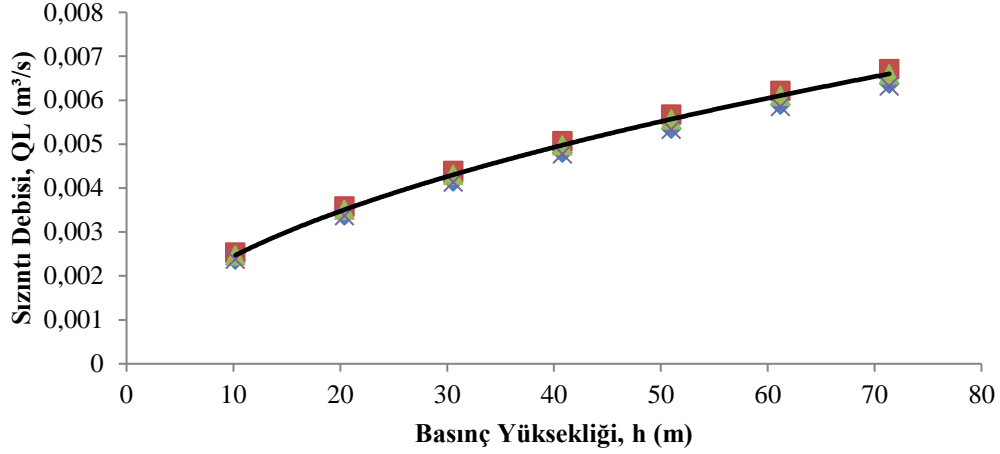
Yapılan nümerik simülasyonlarda, sızıntı debisinin değişimi basınca göre incelenmiştir. Bu amaçla, sabit bir boru ve sabit bir delik çapı ile, 1 ve 7 bar arasında farklı basınç değerleri uygulanmış olup her model çalışmasından sonra sızıntı debisi değerleri hesaplanmıştır.

Model doğrulaması için ilk olarak model kurulduğunda test edilecek delik çaplarının ortalaması olan 1.75 cm yuvarlak delik çapı ve tüm analizlerin yapıldığı 10 cm boru çapı için sonuçlar elde edilmiş olup, orifis denklemi ile karşılaştırılmıştır. Daha sonra ise aynı şartlar altında (sızıntı alanı, boru çapı ve basınç değerleri) yuvarlak, dikdörtgen, üçgen ve zikzak gibi farklı delik geometrileri ile analizler yapılmıştır (Şekil 1).



*Şekil 1. ABAQUS ile incelenen delik geometrileri.*

Her bir farklı delik geometrisi için basınç-sızıntı debisi ilişkisi elde edilmiştir. Şekil 2' den görüldüğü üzere, diğer tüm koşullar aynı olduğunda basınç ile sızıntı debisi arasında üstel bir ilişki vardır. Grafiklere ait regresyon denklemleri ise Tablo 1' de sunulmuştur:



*Şekil 2. Farklı geometrilere göre sızıntı debisi-basınç yüksekliği ilişkisi.*

*Tablo 1. Farklı geometrilere göre model doğrulama sonuçları.*

Delik Geometrisi	Denklem	R <sup>2</sup>
Yuvarlak	$y = 0.0007x^{0.5075}$	R <sup>2</sup> =0.99
Dikdörtgen	$y = 0.0008x^{0.5007}$	R <sup>2</sup> =0.99
Üçgen	$y = 0.0008x^{0.5048}$	R <sup>2</sup> =0.99
Zikzak	$y = 0.0007x^{0.5017}$	R <sup>2</sup> =0.99

İkinci olarak, modelde farklı bir sabit delik çapı (2 cm) göz önünde bulundurulmuş ve analiz, yukarıda belirtilen tüm koşullar için tekrar edilmiştir. Bu senaryonun sonuçları, birincisine kıyasla sızıntı katsayısında değişiklik olduğunu ortaya koymuştur. Teoride sızıntı katsayısı delik çapı, bir sabit olan  $\sqrt{2g}$  ve debi katsayısı ( $C_d$ ) gibi değişkenleri içermektedir. Fakat incelendiğinde sızıntı alanında yapılan değişim, sızıntı alanında meydana gelen değişimi tek başına karşılamamaktadır. Dolayısıyla bu noktada sızıntı alanı ve basınç ile debi katsayısında bir değişim olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle, debi katsayısının sabit olduğu gerçeğinden farklı olarak, delik alanına ve basınca bağlı olarak değiştiği sonucuna varılmıştır. Dolayısıyla sonuçlar farklı delik alanları ve basınçlar göz önünde bulundurularak her bir geometri için elde edilmiştir.

## **V. BULGULAR**

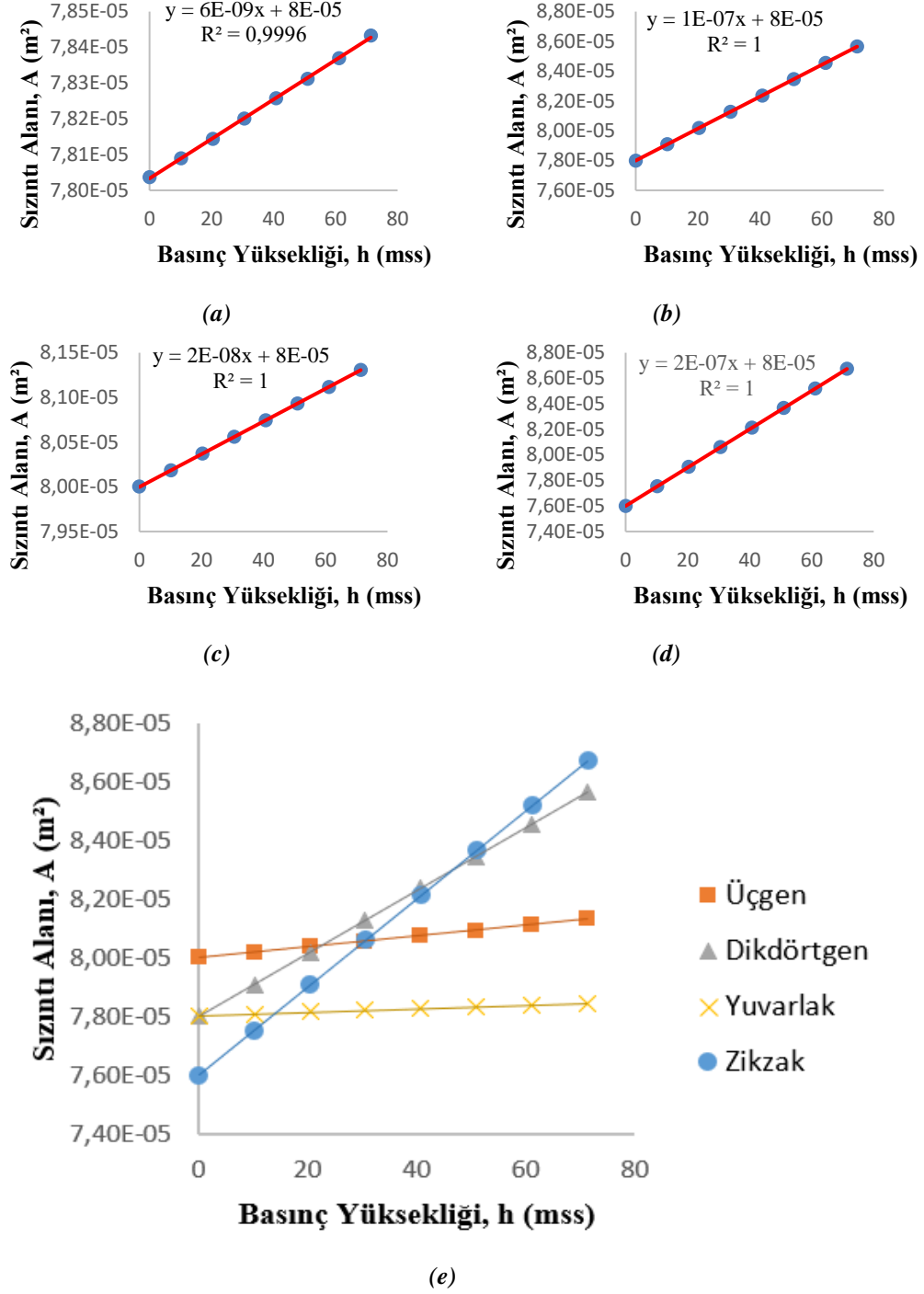
İlk olarak Abaqus/CAE yazılımı kullanılarak 4 farklı delik geometrisi için boru iç basınç koşulları 1 ile 7 bar arasında değiştirilmek suretiyle sızıntı alanlarındaki değişimler gözlenmiş olup, değişimlere bağlı sızıntı alanı-basınç arasındaki ilişkiyi temsil eden doğrunun eğimi hesaplanmıştır. İkinci olarak ise ANSYS Fluent yazılımı kullanılarak her bir delik geometrisine ayrı ayrı farklı sızıntı alanları ve basınç değerleri senaryoları ile sızıntı debileri hesaplanmıştır. Son olarak ise iki yazılımdan elde edilen çıktılar literatürde kullanılan sızıntı debisi denklemine (FAVAD konsepti) konularak debi katsayısı değerleri elde edilmiştir. Yapılan bu çalışmada, şu kabuller yapılarak sonuçlar elde edilmiştir:

- Delik atmosfere açılmaktadır.
- Hesaplamalar yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) boru için yapılmıştır.
- Boru uzunluğu 1 m ve boru çapı 10 cm seçilmiştir.
- Simülasyonlar 4 farklı delik geometrisine göre yapılmıştır.

- Boru iç basıncı 1 ile 7 bar arasında değişmektedir.

## A. ABAQUS/CAE

Her bir düğüm noktasının global eksene göre her bir basınç değeri için koordinatları alınarak, bu koordinatlara göre delik alanları hesaplanmıştır. Sızıntı alanı ve basınç değeri arasındaki ilişki ise Şekil 3' te verilmiştir.



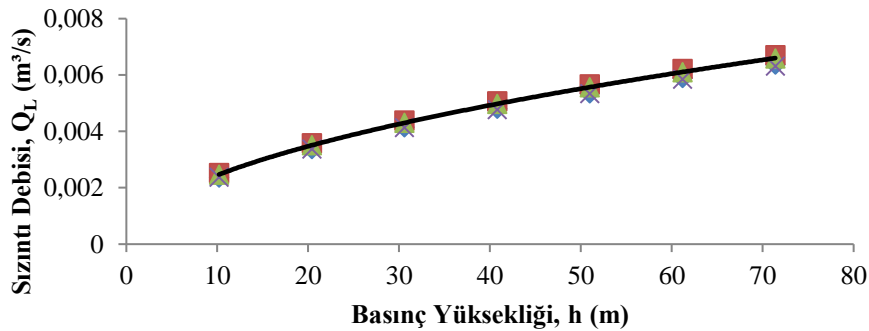
Şekil 3. Her bir delik geometrisi için delik alanı-basınç ilişkisi. (a) Yuvarlak (b) Dikdörtgen (c) Üçgen (d) Zikzak (e) Tüm delik geometrilerine göre basınç-delik alanı ilişkisi.

Şekil 3’ te görüldüğü üzere delik alanındaki değişim her bir geometri için doğrusal bir eğim ortaya çıkacak şekilde meydana gelmiştir. Yuvarlak delik için eğim ( $m = 6 \times 10^{-9}$ , dikdörtgen delik için  $m=1 \times 10^{-7}$ , üçgen delik için  $m = 2 \times 10^{-8}$  ve zikzak delik için  $m = 2 \times 10^{-7}$  şeklinde görülmektedir. Daha önce Cassa ve van Zyl (2014) [18] tarafından bulunan basınç-sızıntı alanı ilişkisini veren bağıntıya bu ilgili değerler girildiğinde ise dikdörtgen (uzunlamasına) çatlak için eğim değeri  $m = 3.95 \times 10^{-7}$  olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla çalışmada elde edilen  $m = 1 \times 10^{-7}$  ile benzerlik göstermektedir. O hâlde, ABAQUS CAE neticesinde elde edilen eğim değerleri, çalışmanın hidrodinamik FLUENT analizlerini kapsayan analizlerin sonucunda bulunan sızıntı debisi ile birlikte incelenecek olup debi katsayısı hesaplarında kullanılabilir.

Şekil 1’de görüldüğü üzere, dikdörtgen ve zikzak geometrileri için basınç ile birlikte alan değişimleri diğer geometrilere nazaran daha yüksek olmuştur. Bunun nedeni olarak ise, dikdörtgen ve zikzak deliklerin şekil itibarı ile uzunlamasına delikler olması ve burada meydana gelen şekil değiştirmelerin boyuna doğrultuda daha fazla meydana geldiği gösterilebilmektedir.

## B. ANSYS FLUENT

Yapılan nümerik simülasyonlarda, sızıntı debisinin değişimi basınca göre incelenmiştir. Bu amaçla, sabit bir boru ve sabit bir delik çapı ile, önceki bölümde belirtildiği gibi, 1 ila 7 bar arasında farklı basınç değerleri uygulanmış ve her model çalışmasından sonra sızıntı debisi değerleri hesaplanmıştır. Nümerik simülasyonlarda kurulan modelin güvenilirliğini model doğrulaması belirlemektedir. Model doğrulaması için ilk olarak model kurulduğunda test edilecek delik çapları (örneğin 1.75 cm) ve tüm analizlerin yapıldığı 10 cm boru çapı için sonuçlar elde edilmiş olup, orifis denklemi ile karşılaştırılmıştır. Daha sonra ise aynı şartlar altında (sızıntı alanı, boru çapı ve basınç değerleri) yuvarlak, dikdörtgen, üçgen ve zikzak gibi farklı delik geometrileri ile analizler yapılmıştır. Her bir farklı delik geometrisi için basınç-sızıntı debisi ilişkisi elde edilmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Farklı geometrilere göre sızıntı debisi-basınç yüksekliği ilişkisi.

Tablo 2. Farklı geometrilere göre model doğrulama sonuçları.

Delik Geometrisi	Denklem	R <sup>2</sup>
Yuvarlak	$y = 0.0007x^{0.5075}$	R <sup>2</sup> =0.99
Dikdörtgen	$y = 0.0008x^{0.5007}$	R <sup>2</sup> =0.99
Üçgen	$y = 0.0008x^{0.5048}$	R <sup>2</sup> =0.99
Zikzak	$y = 0.0007x^{0.5017}$	R <sup>2</sup> =0.99

Şekil 4 ve Tablo 2’de görüldüğü üzere, diğer tüm koşullar aynı olduğunda basınç ile sızıntı debisi arasında üstel bir ilişki vardır. Grafiklerin denklemleri incelendiğinde ise, sonuçta elde edilen regresyon denklemi  $ax^b$  formatındadır. Bu denklemde bulunan “a” orifis denklemindeki sızıntı katsayısına (C),



“b” ise yine aynı denklemde bulunan ve literatürde de ifade edildiği gibi 0.5 civarında olan sızıntı üssüne (N1) tekabül etmektedir.

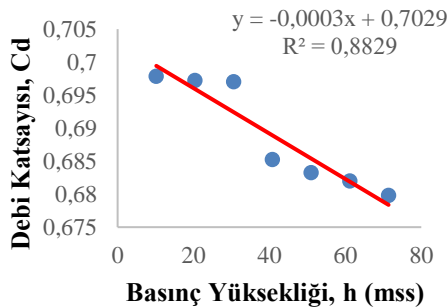
Doğrulama yapıldıktan sonra, ilk olarak, yuvarlak deliğin alanı sabit tutulurken debi katsayısının basınç artışı ile değişimi incelenmiştir. Yapılan incelemelerde basınç arttıkça debi katsayısının azaldığı gözlenmiştir. Diğer delik geometrileri de aynı şekilde test edilmiştir. Debi katsayısında basınçla ters orantılı bir değişiklik olduğu tespit edilmiştir (Şekil 5). Sonuç olarak tüm delik geometrilerinde ters orantılı ilişki temsil edilmektedir.

Şekil 5’ e göre, debi katsayısının ( $C_d$ ) delik alanı ile değişim aralığı basınçla yapılan değişiklikten meydana gelen aralıktan daha fazladır. Bunun nedeni, delik alanının debi katsayısı değişikliği üzerindeki etkisinin, basıncın etkisinden daha büyük olmasıdır. Bu nedenle, önerilen denklemde, delik alanıyla ilgili parametrelerle daha dikkatli olmak gerekir. Genel olarak ise  $C_d$ , 0.65 ile 0.74 değerleri arasında değişmektedir. Hesaplanan debi katsayısı değerlerinin literatürde önceki çalışmalar ile karşılaştırmalı sonuçlarına ise Tablo 3’ te yer verilmiştir.

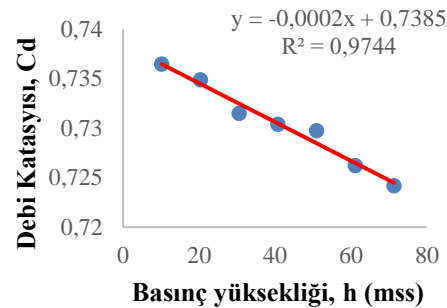
**Tablo 3.** Hesaplanan debi katsayısı değerlerinin literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırılması

Referans	Debi Katsayısı Değeri
Lambert (2003) [19]	0.75
Idelchik (1986)[17]	0.97
Cassa ve diğ. (2010) [15]	0.67
Schwaller ve vanZyl (2014) [14]	0.65
Schwaller ve diğ.(2015) [16]	0.65
Fox ve diğ. (2016) [20]	0.64-0.75
Bu çalışma	0.65-0.74

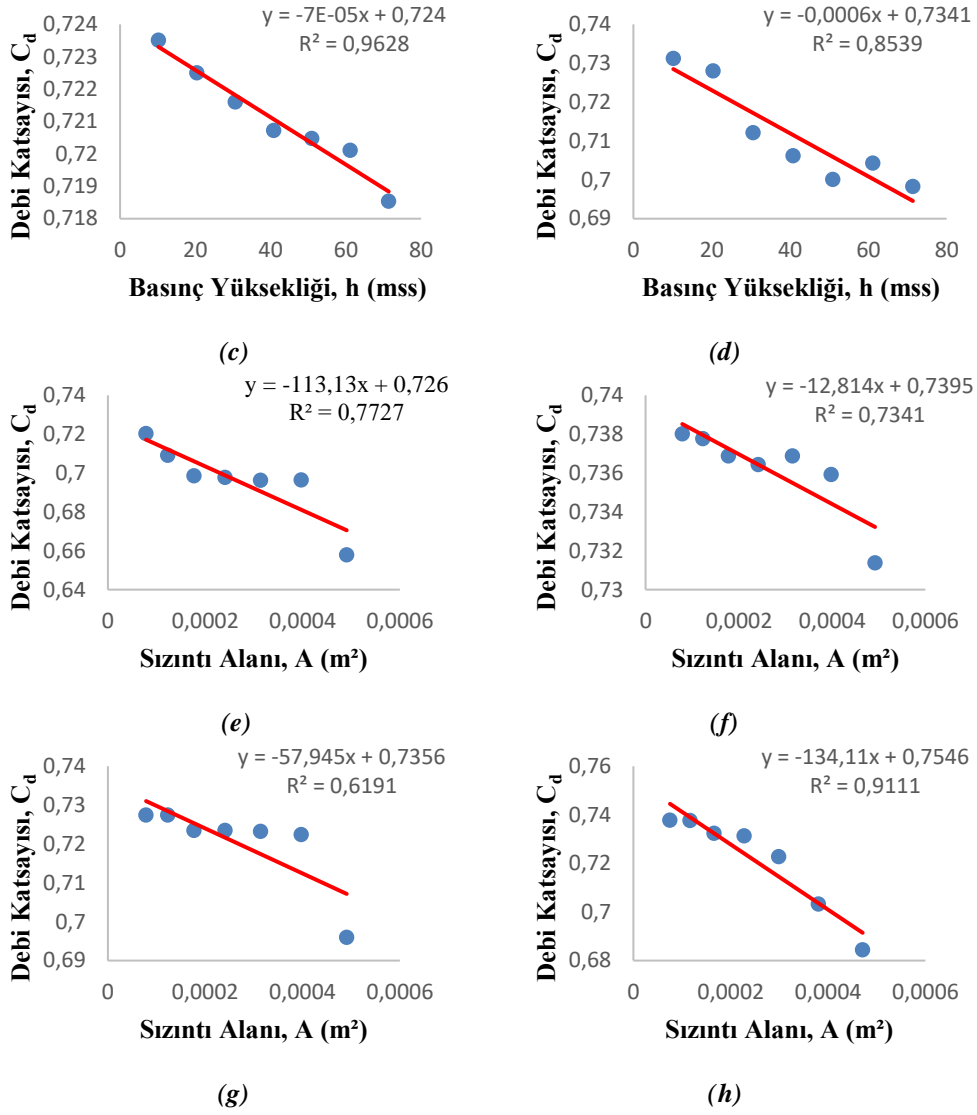
Elde edilen bu sonuçlara istinaden debi katsayısı,  $C_d$ , boyutsuz bir değişken olmasından ötürü içerdiği fonksiyon değişkenlerinin de boyutsuz olarak seçilmesine karar verilmiştir. Bu amaca yönelik olarak, delik alanı ile boru kesit alanının oranını veren boyutsuz alan ( $r$ ) ve iç basıncın dış basınca oranını veren boyutsuz basınç ( $p$ ) değişkenleri elde edilerek kullanılmıştır. Matematiksel olarak ifade edilecek olursa ( $r$ ) ve ( $p$ ) şu şekilde formüle edilmiştir.



(a)



(b)



**Şekil 5.** Debi katsayısının basınç değerlerine göre değişimi (Delik çapı: 1.75 cm). (a) Yuvarlak (b) Dikdörtgen (c) Üçgen (d) Zikzak; Debi katsayısının delik alanına göre değişimi (İç basınç: 1 bar) (e) Yuvarlak (f) Dikdörtgen (g) Üçgen (h) Zikzak

$$r = \frac{A_{\text{sızıntı}}}{A_{\text{boru}}} \quad ; \quad p = \frac{P_i}{P_d} \quad (14)$$

Burada;

$A_{\text{sızıntı}}$  : Sızıntı alanını,

$A_{\text{boru}}$  : Boru kesit alanını,

$P_i$  : Boru içi basıncı,

$P_d$  : Boru dış basıncını temsil etmektedir.

Böylelikle debi katsayısının,  $C_d$ , boyutsuz alan ve boyutsuz basınç değişkenlerinin bir fonksiyonu olarak yazılabileceği türetilmiştir.

$$C_d = f\left(\frac{A_{\text{sızıntı}}}{A_{\text{boru}}}; \frac{P_i}{P_d}\right) = f(r; p) \quad (15)$$

Fonksiyonun bulunması için yedi farklı sızıntı alanı, yedi farklı basınç değeri ve dört farklı delik geometrisi ile 196 adet simülasyon yapılmıştır. Sonuç olarak, simülasyon sonuçlarının verileri kullanılarak elde edilebilecek denklemi bulmak için doğrusal regresyon analizleri kullanılmıştır. Çok sayıda denemenin sonucu olarak, doğrusal regresyon analizleri tüm delik tipleri için en iyi eşleşen denkleminin elde edilmesiyle sonuçlanmıştır. Regresyon denkleminde girdi olarak  $r, r^2, r^3, p, p^2, p^{0.5}$  kullanılmıştır. Ayrıca, en iyi eşleşen denkleme çeşitli performans kriterlerine göre yapılan değerlendirme sonucunda karar verilmiştir. Elde edilen yuvarlak  $C_{d,y}$ , dikdörtgen ( $C_{d,d}$ ), üçgen ( $C_{d,u}$ ) ve zikzak ( $C_{d,z}$ ) delik geometrilerine ait debi katsayısı eşitlikleri aşağıda sırasıyla verilmiştir:

$$C_{d,y} = -3.3128 \times r + 123.1042 \times r^2 - 1484.5532 \times r^3 - 0.0052 \times p + 0.7391 \quad (16)$$

$$C_{d,d} = -0.1788 \times r + 4.6348 \times r^2 - 58.5223 \times r^3 - 0.0021 \times p + 0.7415 \quad (17)$$

$$C_{d,u} = -3.5560 \times r + 124.3492 \times r^2 - 1357.9716 \times r^3 - 0.0010 \times p + 0.7580 \quad (18)$$

$$C_{d,z} = -4.3684 \times r + 130.0477 \times r^2 - 1451.5371 \times r^3 - 0.0048 \times p + 0.7822 \quad (19)$$

**Tablo 4.** Optimum debi katsayısı fonksiyonu için türetilmiş denklemlerin performans değerlendirmesi

Geometri	Bağımsız Değişkenler	MAE	RMSE	R <sup>2</sup>
Yuvarlak	$r, r^2, r^3, p$	0.0053	0.0733	0.93
Dikdörtgen	$r, r^2, r^3, p$	0.0012	0.0355	0.88
Üçgen	$r, r^2, r^3, p$	0.0027	0.0526	0.93
Zikzak	$r, r^2, r^3, p$	0.0044	0.0667	0.95

Bu denklemler parametrik bir yöntem olan en küçük kareler yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Bu çalışmada, yapılan testler sonucunda her katsayı %95 güven aralığında 0.05'ten küçük bulunmuştur. Böylece tüm katsayıların sıfırdan önemli ölçüde farklı olduğunu göstermiş olup elde edilen denklemler istatistiksel olarak anlamlıdır.

## **VI. SONUC**

Su dağıtım şebekelerindeki kayıplar, ekonomik ve doğal kaynaklar açısından son derece önemlidir. Dolayısıyla şebekelerde meydana gelen kayıpların minimize edilmesi hem çevre hem de ülke ekonomisine ciddi katkı sağlayacaktır. Bu doğrultuda çalışmalar gerçekleştirilirken ise problemin çözümüne kaynakta müdahale etmek daha doğru olacaktır. Bu noktada sızıntı debisinin hesaplanması yaşanan kayıplarının boyutunu ortaya koymaktadır. Bu çalışmada, hidrolik olarak, son yıllarda üzerinde önemli sayıda çalışma yürütülen bu konunun daha doğru anlaşılmasını sağlamak için bir analiz yapılmıştır. Bu analizin yapılabilmesi için öncelikle sayısal bir model oluşturulmuş olup, daha sonra modelin doğruluğu Toricelli (orifis) denklemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Simülasyonlarda, debi katsayısının sızıntı alanı, basınç ve delik geometrisinin bir fonksiyonu olduğu bulunmuştur. Artan boru içi basınçla birlikte delik geometrisinde meydana gelen deformasyonların incelenmesi ve sayısallaştırılabilmesi için ABAQUS CAE yazılımından yararlanılmıştır. FAVAD konseptine dayalı denklemde delik alanında meydana gelen değişimler farklı delik geometrileri göz önünde bulundurularak işlenmiştir. Sızıntı debisinin hesabı için ise hidrodinamik analizler ANSYS FLUENT yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Böylelikle, debi katsayısını alan ve basınç ile ilişkilendirmek için 196 farklı model çalışması yürütülmüştür. Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar ise aşağıda listelenmiştir:

- Yuvarlak, dikdörtgen, üçgen ve zikzak delik geometrileri için basınç ve sızıntı alanı değişimi arasında doğrusal bir ilişki vardır.
- Yuvarlak ve üçgen delik geometrileri için basınç-sızıntı alanı ilişkisini ifade eden doğru eğimi (m) düşüktür.
- Dikdörtgen (uzunlamasına) ve zikzak delik geometrileri için basınç-sızıntı alanı ilişkisini ifade eden doğru eğimi (m) yüksektir.
- Sızıntı alanlarında meydana gelen şekil değiştirmeler boyuna doğrultudaki çatlaklarda diğer geometrilere göre daha fazla gerçekleşmiştir.
- Dikdörtgen, zikzak ve üçgen geometrilerde gerilmeler özellikle köşe noktalarda yüksek iken, yuvarlak delikte gerilmeler homojen bir dağılım göstermiştir.
- Debi katsayısını, sızıntı debisi hesaplarında bir sabit olarak kabul edilip bu doğrultuda işlem yapmaktansa, debi katsayısını etkileyen faktörlerden (delik geometrisi, basınç ve sızıntı alanı) bir fonksiyon elde edilip, sızıntı debisi hesapları bu şekilde yapılmalıdır.
- Debi katsayısı ile basınç arasında ve debi katsayısı ile sızıntı alanı arasında ters orantılı bir ilişki olduğu görülmüştür.
- Önerilen debi katsayısı denkleminin boyutsuz değişkenlerin bir fonksiyonu olarak ifade edilmesi, boyut homojenliği ve eşitliğin kullanım pratikliği açısından önemlidir.
- Debi katsayısına ait farklı geometriler için elde edilen tüm denklemler çeşitli performans kriterlerine göre oldukça yüksek doğrulukta sonuçlar vermiştir.

Tüm bu model çalışmaları sonucunda birçok sayıda denklem elde edilmiş olup, kullanım kolaylığı ve pratik olan denklemler her bir delik geometrisi için seçilmiştir. Önerilen denklemde boyut homojenliğinin sağlanabilmesi açısından, aynı debi katsayısı gibi boyutsuz olan sayılar (boru kesit alanına oranını ifade eden (r) ve boru iç basıncının dış basınca oranını ifade eden (p)) elde edilerek bu sayılara yer verilmiştir. Farklı delik geometrilerine göre elde edilen ve sonrasında seçilen denklemlere ise determinasyon katsayısı, ortalama mutlak hata ve kök ortalama hata karesi gibi performans kriterleri yardımıyla karar verilmiştir. Böylelikle çalışmada, debi katsayısının basit bir denklem yardımıyla hesaplanabileceği ve bu yaklaşımın debi katsayısının sabit olduğu varsayılarak yapılan hesaplamalardan daha doğru sonuçlar vereceği önerilmektedir. Ayrıca, su dağıtım şebekelerinde önemli bir sorun olan kayıpların hidrolik olarak doğru anlaşılması için literatüre bir katkı yapılmıştır.

## **VII. KAYNAKLAR**

- [1] A. Abdulshaheed, F. Mustapha, and A. Ghavamian, "A pressure-based method for monitoring leaks in a pipe distribution system: A Review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, c. 69, s. January, ss. 902–911, 2017.
- [2] Ö. Ekmekcioğlu, E. E. Başakın, and M. Özger, "Discharge coefficient equation to calculate the leakage from pipe networks," *J. Inst. Sci. Technol.*, c. 10, s. 3, ss. 1737–1746, 2020.
- [3] D. J. Vicente, L. Garrote, R. Sánchez, and D. Santillán, "Pressure Management in Water Distribution Systems: Current Status, Proposals, and Future Trends," *J. Water Resour. Plan. Manag.*, c. 142, s. 2, ss. 04015061, 2016.
- [4] T. Lydon, P. Coughlan, and A. McNabola, "Pressure management and energy recovery in water distribution networks: Development of design and selection methodologies using three pump-as-turbine case studies," *Renew. Energy*, c. 114, ss. 1038–1050, 2017.
- [5] N. Samir, R. Kansoh, W. Elbarki, and A. Fleifle, "Pressure control for minimizing leakage in water distribution systems," *Alexandria Eng. J.*, c. 56, s. 4, ss. 601–612, 2017.

- [6] I. E. Karadirek, S. Kara, G. Yilmaz, A. Muhammetoglu, and H. Muhammetoglu, "Implementation of Hydraulic Modelling for Water-Loss Reduction Through Pressure Management," *Water Resour. Manag.*, c. 26, s. 9, ss. 2555–2568, 2012.
- [7] A. Lambert, M. Fantozzi, and J. Thornton, "Practical approaches to modeling leakage and pressure management in distribution systems – progress since 2005," *12th Int. Conf. Comput. Control Water Ind. CCWI2013*, s. 2011, ss. 11, 2013.
- [8] J. E. Van Zyl and R. Malde, "Evaluating the pressure-leakage behaviour of leaks in water pipes," *J. Water Supply Res. Technol. - AQUA*, c. 66, s. 5, ss. 287–299, 2017.
- [9] G. Germanopoulos, "A technical note on the inclusion of pressure dependent demand and leakage terms in water supply network models," *Civ. Eng. Syst.*, c. 2, s. 3, ss. 171–179, 1985.
- [10] J. E. Van Zyl, "The effect of pressure on leakage in water distribution systems," s. June, ss. 109–114, 2007.
- [11] B. Greyvenstein and J. E. Van Zyl, "An experimental investigation into the pressure - Leakage relationship of some failed water pipes," *J. Water Supply Res. Technol. - AQUA*, c. 56, s. 2, ss. 117–124, 2007.
- [12] M. Ferrante, "Experimental Investigation of the Effects of Pipe Material on the Leak Head-Discharge Relationship," *J. Hydraul. Eng.*, c. 138, s. 8, ss. 736–743, 2012.
- [13] M. Ferrante, B. Brunone, S. Meniconi, C. Capponi, and C. Massari, "The leak law: From local to global scale," *Procedia Eng.*, c. 70, ss. 651–659, 2014.
- [14] J. Schwaller and J. E. Van Zyl, "Implications of the known pressure-response of individual leaks for whole distribution systems," *Procedia Eng.*, c. 70, s. September, ss. 1513–1517, 2014.
- [15] A. M. Cassa, J. E. van Zyl, and R. F. Laubscher, "A numerical investigation into the effect of pressure on holes and cracks in water supply pipes," *Urban Water J.*, c. 7, s. 2, ss. 109–120, 2010.
- [16] J. Schwaller, J. E. Van Zyl, and A. M. Kabaasha, "Characterising the pressure-leakage response of pipe networks using the FAVAD equation," *Water Sci. Technol. Water Supply*, c. 15, s. 6, ss. 1373–1382, 2015.
- [17] I. E. Idelchik, *Handbook of hydraulic resistance*, 2nd revised and enlarged edition, Washington, 1986.
- [18] A. M. Cassa and J. E. Van Zyl, "Predicting the head-leakage slope of cracks in pipes subject to elastic deformations," *J. Water Supply Res. Technol. - AQUA*, c. 62, s. 4, ss. 214–223, 2013.
- [19] A. Lambert, "What do we know about pressure: leakage relationships in distribution systems?," *IWA Conf. 'System approach to leakage Control water Distrib. Syst. Manag.*, ss. 1–9, 2003.
- [20] S. Fox, R. Collins, and J. Boxall, "Experimental Study Exploring the Interaction of Structural and Leakage Dynamics," *J. Hydraul. Eng.*, c. 143, s. 2, ss. 04016080, 2016.
- [21] Fluent, *Bilgisayar Programı*, Canonsburg, Pennsylvania: ANSYS, 2014.
- [22] Abaqus, *Bilgisayar Programı*, Rhode Island, US: Dassault Systemes, 2020.