Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 6(1) 51-68 2025
Recep Tayyip Erdogan University Journal of Science and Engineering, 6(1) 51-68 2025
ISSN: 2687-2315 / E-ISSN: 2757-7686

Akış Koşulları Altında Yumurta Kesitli Çok Fazlı Atıksu Boru Hatlarının Nümerik Analiz Karşılaştırması

Esin ACAR *

*Artvin Çoruh Üniversitesi, Borçka Acarlar Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Artvin, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author
E-mail: esin.acar@artvin.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article
Geliş Tarihi/Received:20.05.2024
Kabul Tarihi/Accepted: 03.01.2025

ÖZ

Atık su boru sistemleri planlamalarında farklı akış koşulları altında çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda eğim, akış hızı, kesit özellikleri, pürüzlülük, faz durumları ve laminer/türbülanslı akış özelliklerine göre hesaplamalı akışkanlar dinamiği problemi oluşturulmuştur. Çalışmada iki farklı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) programı ile nümerik analizler ortaya konarak, program çıktıları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada 20 m uzunluğunda bir boru hattı kullanılmış olup, 15'inci m'deki hız değerleri ile boru akış kesitlerinden yararlanılmıştır. Böylece eşit fiziki koşullarda oluşturulan problemin sonlu hacimler yöntemini kullanan Star CCM$^+$ ile Ansys Fluent programları sonuçlarının çıktılarının değerlendirebilmesi sağlanmıştır. Boru hattı için 600 mm × 900 mm boyutlarında yumurta kesit kullanılmış olup, laminer akış için V= 0,0014 m/s, türbülanslı akış için ise V= 0,70 m/s ve V= 2,00 m/s giriş hızları alınmıştır. HAD programında çok fazlı akış koşulları için akışkan hacmi (volume of fluid), k-ε türbülans modeli kullanılarak, akışkan için uygun modellerin oluşturulması sağlanmıştır. Sonuçların birbiri ile uyumları, özellikle akış hız değerlerinin çok benzer sonuçlar vermesi programların güvenirliliklerini de arttırmaktadır. Farklı fazlardaki akış koşullarına göre de elde edilen hız değerleri, hız profilleri ve akış özelliklerinin birbirine yakın çıkması HAD programlarının analiz değerlerinin doğruluğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yumurta kesit, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), Atıksu boruları, Çok fazlı akış.

Numerical Analysis Comparison of Egg Section Multiphase Wastewater Pipelines Under Flow Conditions

ABSTRACT

In the planning of wastewater pipe systems, studies have been conducted under various flow conditions. In this context, a computational fluid dynamics (CFD) problem was formulated based on slope, flow velocity, cross-sectional properties, roughness, phase states, and laminar/turbulent flow characteristics. Numerical analyses were carried out using two different Computational Fluid Dynamics (CFD) programs, and their outputs were compared. A 20-meter-long pipeline was used in the comparison, utilizing velocity values at the 15th meter and the flow cross-sections of the pipe. This enabled the evaluation of results obtained from Star CCM$^+$, which employs the finite volume method and Ansys Fluent, which uses the finite element method, under identical physical conditions. An egg-shaped cross-section with dimensions of 600 mm × 900 mm was used for the pipeline. For laminar flow, an inlet velocity of V = 0.0014 m/s was applied, while for turbulent flow, inlet velocities of V = 0.70 m/s and V = 2.00 m/s were used. In the CFD program, the volume of fluid (VOF) method and the k-ε turbulence model were employed to create suitable models for multiphase flow conditions. The consistency of the results, particularly the close similarity in flow velocity values, enhances the reliability of the programs. Additionally, the agreement of velocity values, velocity profiles, and flow characteristics obtained under different phase flow conditions demonstrates the accuracy of the CFD program analyses.

Keywords: Egg shaped, Computational fluid dynamics (CFD), Wastewater pipes, Multiphase flow.

Cite as;
Acar, E. (2025). Akış Koşulları Altında Yumurta Kesitli Çok Fazlı Atıksu Boru Hatlarının Nümerik Analiz Karşılaştırması, *Recep Tayyip Erdogan University Journal of Science and Engineering,* 6 (1), 51-68. Doi: 10.53501/rteufemud.1486863

1. Giriş

Atık su boru sistemleri planlamalarının, çok fazlı akış özellikleri prensibine dayanarak yapılması daha gerçekçi sonuçlara ulaşmayı sağlamaktadır. Bu kriterlere göre yapılacak çalışmalarda nümerik analiz yöntemleri tercih edilmelidir. Bu sebeple öncelikle girdi verilerinin doğruluğu sağlanmalı ve sonra işletme çalışması ile istenen çıktıların doğru belirlenmesi gerekmektedir. Nümerik analiz programları hesaplamalı akışkanlar dinamiği çalışma yöntemini kullanmakta olup, çalışmada Star CCM$^+$ ile Ansys Fluent yazılımları kullanılmıştır. (Afif vd., 2020), çeşitli bilimsel disiplinlerden, akışkanlar mekaniği ve ısı transferinden alınan HAD'ın, prosesler, kimya mühendisliği, inşaat ve çevre gibi diğer keşfedilmemiş alanlarda da kendine yer bulduğunu belirtmektedir. Şibil (2023) ve Kumar vd. (2023) ise gelişen teknolojiyle beraber yüksek hesaplama gücüne sahip bilgisayarlar ve yazılımlar ile mühendislik problemleri kolaylıkla çözülebilmekte ve gerçek ortam koşulları başarılı bir şekilde oluşturularak yüksek tahmin gücüne sahip sayısal çalışmalar gerçekleştirilebildiğini belirtmektedir. Nasiri vd. (2018), akışkanların davranışının genellikle mantıklı olmadığını ve akışkan akışının etkisinin tahmin etmeyi zorlaştırdığını ve Ansys HAD ile karmaşık etkileşimler olsa bile akışkan akışlarının davranışını simüle etmenizi ve sonuçların yanı sıra tasarım ve üretim sırasındaki sonuçları güvenilir bir şekilde analiz etmenizi sağlayan araçlar sunar şeklinde belirtmiştir. Greifzu vd. (2016)'e göre, hesaplamalı akışkanlar dinamiği, çok çeşitli akışkan akışları hakkında fikir edinme imkânı sunduğunu ve son yıllarda, laminer veya türbülanslı akışlarda parçacık-akışkan ve ayrıca parçacık-parçacık etkileşimini artan bir doğrulukla tasvir eden HAD modelleri geliştirildiğini belirtmiştir. Moukalled vd. (2016) tarafından, HAD yazılımlarından biri olan Star CCM$^+$ yazılımının kısmi diferansiyel denklemlerin nümerik yolla çözümlenmesini sağlayan ve incelenecek bölge içinde üst-üste binmeyen sonlu sayıda kontrol hacmine bölünmesi gerektiren sonlu hacimler yöntemini kullandığını belirtmektedir. Bu yöntemde de korunum yasası gereği süreklilik-enerji-momentum denklemlerinin diferansiyel formlarının çözümlemede kullanıldığını belirtmiştir. Acar (2023) sonlu hacimler yöntemi esaslı ANSYS Fluent yazılımı ile sanal fiziksel modelleme üzerinden nümerik analiz teknikleriyle hesaplamalı akışkanlar dinamiği alt programının kullanımıyla newtonyen-newtonyen olmayan akışkan problemlerinde, türbülanslı-laminer akışlarda, sub-supersonik akışlarda, ısı transferi problemlerinde, çok fazlı akışın söz konusu olduğu durumlarda, çevresel yüklere maruz uzay taşıyıcı sistem, deniz yapılarının tasarımında hızlı ve güvenli hesap yapabilmesine imkan sağladığını belirtmektedir.

Sıvı-katı iki fazlı karışımlar üzerine çeşitli çalışmalar yapılmış, kararlı ve kararsız hareketlerinin incelenebilmesi için farklı modeller geliştirilmiştir (Atik ve Racabovadiloğlu, 2006). Hazari (2016) çalışmasında iki fazlı tabakalı kanal ve boru akımlarının türbülans modellemesini çalışmıştır. Boru akışı için çok fazlı olarak hava ve su akışı, değişen pürüzlülük ile değişen akış hızları için çeşitli çalışmalarda bulunmuştur. Kim ve Han (2013), kum ve su karışımlı çok fazlı boru hatları ile ilgili çalışmıştır. Bonakdari ve Larrarte (2016*),* yumurta kesitli kanalizasyon borularında kendi kendini temizleyen ve kesme gerilmesi üzerine deneysel ve sayısal incelemeler yapmışlardır. Standartlarda verilenden daha küçük maksimum akış hızı ve kayma gerilmesi olmasına rağmen boru içinde tortu birikiminin nadiren de olsa ortaya çıktığını belirtmişlerdir. Angkasuwansiri ve Sinha (2014), atık su boru hattının yaşam döngüsü ve tasarım, imalat, inşaat, işletme ve bakım, onarım/rehabilitasyon/değiştirme gibi farklı aşamalardaki boru arızasının nedenlerini çalışmıştır.

Farklı boru tipleri atık su sistemlerinde kullanılmakta olup, ülkemizde yaygın kullanıma sahip dairesel kesitlerdir. Fakat bu çalışmada kullanımı yurtdışında yaygın, ülkemizde üretimine başlanan yumurta kesitli atık su boru sistemi kullanılmıştır. Çalışmada atık su boru

hatlarında kullanılan kesit yumurta şeklinde alınmış olup, akımlar ile tek, iki ve üç fazlı değişkenlerin nümerik analiz programları ile karşılaştırılması amaçlanmıştır. Birçok mühendislik problemleri için kullanılan Star CCM$^+$ ve Ansys Fluent programları hesaplamalı akışkanlar dinamiği prensibine dayanarak çözüm yöntemi sunmaktadır.

Bu çalışmanın esas amacı akışkanın farklı fiziksel özelliklerine göre iki farklı HAD programları kullanılarak, farklı akış özelliklerinin değerlendirilmesidir. Bu kapsamda 750 mm kesite sahip dairesel ve 600 mm × 900 mm kesite sahip yumurta geometrisi kullanılmıştır. 20 m uzunluğunda alınan boru hattı için 1/500 ve 1/1000 eğimlerinde çalışma yapılmıştır. Farklı giriş hızları tanımlanarak türbülanslı akım oluşturulmuş, kesit içi pürüzlülük değerleri sayesinde pürüzlülüğün akışa etkisi incelenmiştir. Böylece yapılan çalışmaların nümerik sonuçlarının karşılaştırılması HAD programlarının doğruluklarının belirlenmesinde bu çalışma ile önemli rol oynamaktadır.

2. Materyal ve Metot

Yapılan çalışmalarda farklı HAD programlarının sonuçlarının karşılaştırma yapılabilmesi ve doğruluklarının değerlendirilebilmesi amacıyla Star CCM$^+$ ve Ansys Fluent programları kullanılmıştır. Star CCM$^+$ ve Ansys Fluent programı sonlu hacimler yöntemini kullanmaktadır. Sonlu hacimler yönteminde akış hacmi ayrıklaştırılırken yapısal elemanlara ihtiyaç duymamaktadır. Çözüm alanının ayrıklaştırılması, akış hacminin tanımlanan sınır şartları içerisinde akışı tanımlayan denklemlerinin çözüleceği parçalara bölünmesi işlemidir. (Başyazıcı, 2007). Bu programlarda kullanılan fiziki özellikler sayesinde akışkan problemlerinin tanımlanabilmesi sağlanmaktadır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözüm prensibine göre çalışmada, akışkan hacmi (VOF) yöntemi kullanılmış olup, akışkan hacmi yöntemi modeli olan momentum denklemleri setini çözerek ve sıvıların her birinin hacim oranını izleyerek iki veya daha fazla karışmayan sıvıyı modelleyebilmektedir (Taşar vd., 2021; Özdemir, 2023). VOF modeli Star CCM$^+$ ve Ansys Fluent yazılımlarında çok fazlı akış koşullarında kullanılmaktadır.

VOF modelde sıvı ve gaz fazı arasındaki ara yüzeyin belirlenmesi her k fazı için bir hacim oranı süreklilik denkleminin çözümü ile gerçekleşir (Aydın, 2005).

$$\frac{\partial \varepsilon_k}{\partial t} + u_i \frac{\partial \varepsilon_k}{\partial x_i} = S_{\varepsilon_k} \qquad (\mathbf{1})$$

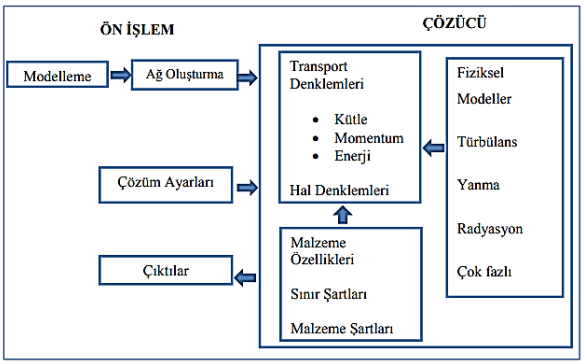
Denklemin sağ tarafındaki kaynak terimi VOF model sıfıra eşittir. Bu terim kavitasyon model için sıfırdan farklıdır. Hacim oranı denklemi birincil faz için çözülmeyecektir. Birincil fazın hacim oranı denklem 1'deki sınırlamaya dayalı olarak hesaplanır.

$$\sum_{k=1}^{n} \varepsilon_k = 1 \qquad \mathbf{(2)}$$

Denklem 1 ve 2'deki; ε_k: k.fazın hacim oranı, u_i: hız vektörleri, x_i: yön vektörleri, S_{ε_k} : Kaynak terimi, n: akışkan sayısını ifade etmektedir.

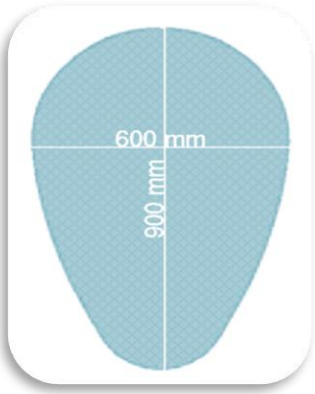
Yeniden normalleştirme grubu (Re-normalization group) RNG modeli ise, (Yakhot ve Orszag, 1986) tarafından geliştirilen istatistiksel yaklaşımı uyarlamak için ortaya çıkmıştır. Bu yaklaşım, Navier-Stokes denklemlerini yeniden normalleştirmek için modelde bazı iyileştirmeler yapan ve girdap ölçeklerinin daha küçük hareketinin etkilerini dikkate alarak Standard k-ε (SKE) modeline benzeyen yeniden normalleştirme grubu teorisi olarak adlandırılır. Bu model, sırasıyla türbülans kinetik enerjisi (k) ve türbülans viskozitesi ile ilgili türbülans dağılım oranı (ε) için yazılmış iki taşıma denkleminin çözümünü içerir (Sadeq, 2022). Navier-Stokes denklemlerinin çözümlenmesinde, sıvı hareketini üç boyutlu olarak temsil edilmesi ve simülasyon modelinin kurulması gerekmektedir. HAD analiz programının temel denklemleri: sıkıştırılamaz akışkanlar esaslı Navier-Stokes denklemleridir (Okyay, 2010). Bu denklem ile ara yüzeyin zaman içindeki gelişimini takip etmek için ayrı bir hacim oranı denkleminin çözülmesini sağlamaktadır (Bayrakdar, 2017).

Sonlu elemanlar, sonlu hacimler, sınır elemanları ve sonlu farklar yöntemlerini kullanan HAD, kontrol hacimlerinin sonlu set üzerinde ayrışma yapılmasını sağlayarak çözümleme yapmaktadır. Kütle, enerji ve momentum gibi korunum denklemlerinin çözümü, kontrol hacimleri için hazırlanan denklemler aracılığıyla çözülmektedir (Savaş, 2015). HAD yazılımlarının çözüm şeması Şekil 1'de yer almaktadır.



Şekil 1. HAD modelleme çözüm şeması (Savaş, 2015)
Figure 1. *CFD modeling solution diagram (Savaş, 2015)*

Programlar ile 600 mm × 900 mm boyutlarındaki yumurta kesitli (Şekil 2), 20 m uzunluğundaki boru hattının (Şekil 3) 1/500 ve 1/1000 eğimleri kullanılarak 12 farklı senaryo üzerinden çalışmalar yapılmıştır.



Şekil 2. 600 mm × 900 mm yumurta kesiti
Figure 2. *600 mm × 900 mm egg cross section*



Şekil 3. Yumurta kesitli boru hattı görünümü
Figure 3. *Egg-shaped pipeline view*

Farklı Reynolds sayıları kullanılarak türbülanslı akışta (Re: 534.265 ve V=0,70 m/s- Re: 1.526.471 ve 2,00 m/s) sabit akış değerlerine göre çalışılmıştır. Boru içi akış için tek fazlı (su), 2 fazlı (su+hava) ve 3 fazlı (hava+su+katı madde) durumları kullanılmıştır (Tablo 1). Katı madde yoğunluğu ise 1100 kg/m^3 alınmıştır.

Tablo 1. Akışkan ve geometri özellikleri
Table 1. *Fluid and geometry properties*

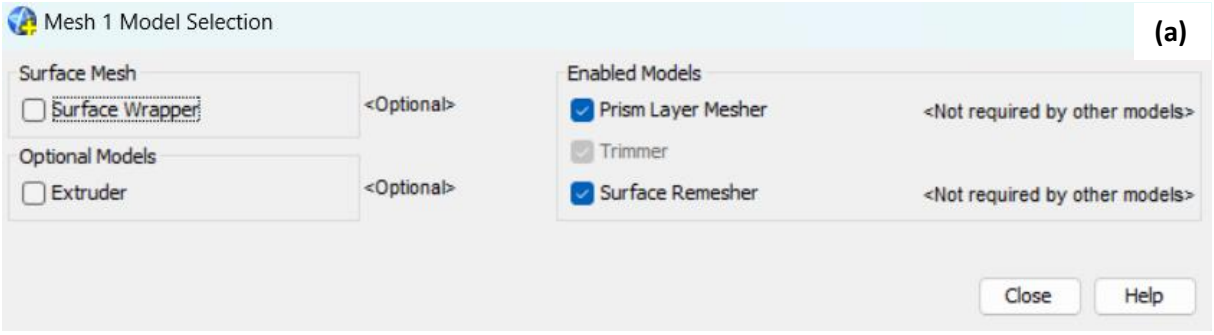
Kesit	Faz	Eğim	Hız (m/s)	Reynolds Sayısı	Pürüzlülük (n)
600 mm × 900 mm	Tek (su)	1/500	0,70	534.265	0,012
	Tek (su)		2,00	1.526.471	0,012 - 0,018
	İki faz (su+hava)		0,70	534.265	0,012
	İki faz (su+hava)		2,00	1.526.471	0,012 - 0,018
	Üç faz (katı+su+hava)		2,00	1.526.471	0,012 - 0,018 - 0,048
600 mm × 900 mm	Tek (su)	1/1000	0,70	534.265	0,012
	Tek (su)		2,00	1.526.471	0,012 - 0,018
	İki faz (su+hava)		0,70	534.265	0,012
	İki faz (su+hava)		2,00	1.526.471	0,012 - 0,018
	Üç faz (katı+su+hava)		2,00	1.526.471	0,012 - 0,018 - 0,048

HAD programına bu girişler eşdeğer pürüzlülük olarak k_s, Strickler denkleminde yer alan ($n=k_s^{1/6}/25$) bağıntısına uygun olarak n'nin bir fonksiyonu olacak biçimde hesaplanmıştır (Regueiro-Picallo vd., 2016).

2.1. Mesh Oluşturma ve Sınır Koşulları

Çalışmada kullanılan yumurta kesitli geometriye göre HAD programları ile meshleme yapılmıştır. Pashchenko (2019) çalışmasında hesaplama ağının inşasının, yerleşik meshing modülünde gerçekleştirildiği ve çözümü yükseltmek için, hesaplama ağı yüzeyinin duvarlarının yakınında yapılandırıldığını belirtmiştir. Çalışmada standart "Boyutlandırma" ve "Şişkinlik" fonksiyonları kullanılarak 5 mm kalınlığında bir duvar sınır katmanı oluşturulmuştur. Bhowmik vd. (2022) Star CCM$^+$ ile mesh özelliklerini tanımlarken, çok yüzlü ağ, prizma katmanlı ağ (prism layer mesh), yüzey remesh (surface remesh) ve gömülü ince ağ modellerini kullanılmıştır.

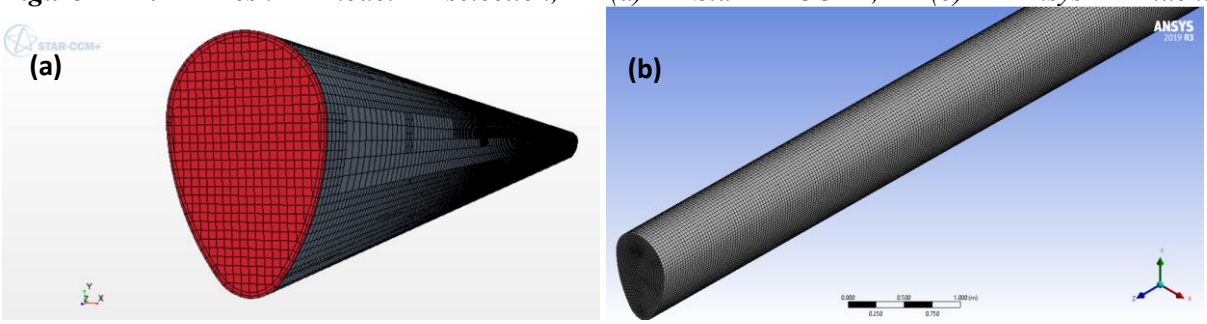
Çalışmada yapılan mesh özellikleri Şekil 4'te yer almakta olup, mesh işlemi yapılırken kenar yüzeyleri tanımlama, daha sık meshleme ile kenar ve köşelerin düzgün şekil alması sağlanmıştır. Star CCM$^+$ programında yüzeylerde minimum 1,5 cm, maksimum 5 cm'lik meshler oluşturularak, kenar yüzeylerde yüzeyin tanımlanabilmesi amacıyla sınır tabakasında 2 sıra mesh yapılması ve düzgün olmayan yüzeylerde ise %20'ye kadar mesh boyutlarının değiştirilebilmesi kriterleri seçilerek mesh işlemi gerçekleştirilmiştir. Mesh tipi olarak hexahedra kullanılmış olup, yumurta kesitte toplam 240 255 hücre oluşmuştur (Şekil 5a). Ansys Fluent programında eleman düzeni lineer olarak kabul edilerek boyutları 1mm olup standart boyutlandırma kullanılarak ve şişirme fonksiyonları kullanılarak 5 mm kalınlığında bir duvar sınır katmanı ile mesh işlemi gerçekleştirilmiş ve mesh eleman sayısı 542 271 şeklinde oluşmuştur (Şekil 5b).



Details of "Mesh" (b)

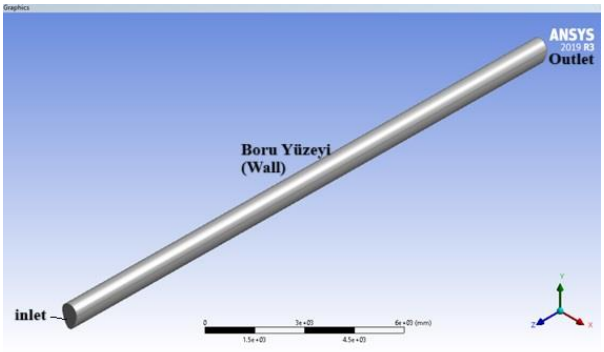
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Element Order	Program Controlled
Element Size	1.e-003 m
Export Format	Standard
Export Preview Surface Mesh	Yes
Sizing	
Use Adaptive Sizing	Yes
Resolution	2
Mesh Defeaturing	Yes
Defeature Size	Default
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
Initial Size Seed	Assembly
Bounding Box Diagonal	20.038 m
Average Surface Area	8.0579 m²
Minimum Edge Length	0.27819 m
Quality	
Inflation	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0.272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1.2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
Assembly Meshing	
Advanced	
Statistics	
Nodes	2250975
Elements	542271

Şekil 4. Mesh model seçimi, (a) Star CCM+, (b) Ansys Fluent
Figure 4. *Mesh model selection, (a) Star CCM+, (b) Ansys Fluent*

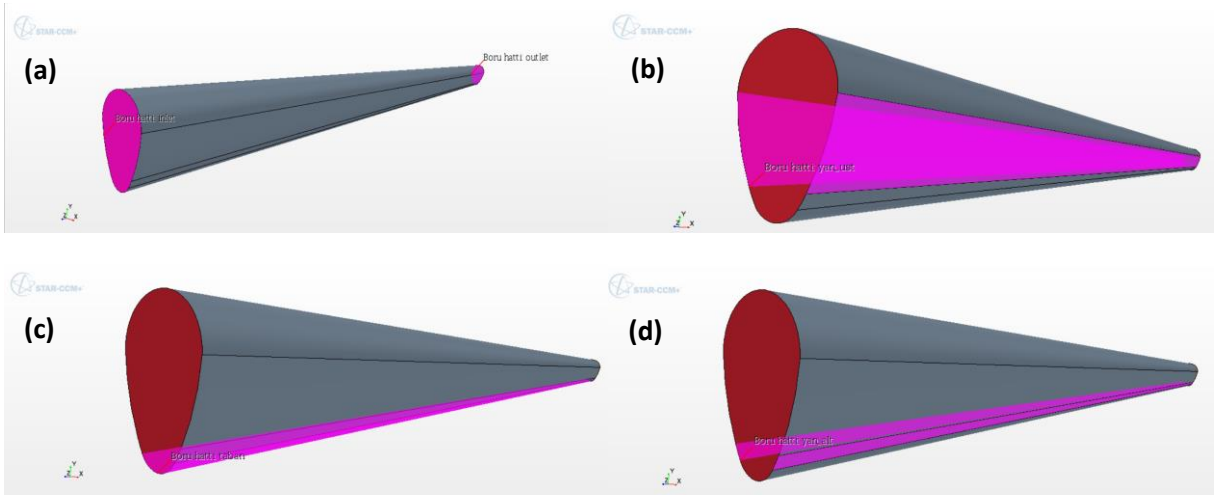


Şekil 5. Boru hatlarının mesh görünümleri, (a) Star CCM+, (b) Ansys Fluent
Figure 5. *Mesh views of pipelines, (a) Star CCM+, (b) Ansys Fluent*

Çalışmada tek fazlı, iki fazlı ve üç fazlı akımların modellemesinde yapılan çözümlemelerde kullanılan giriş ve çıkış sınır koşullarının fiziksel özellikleri olarak boru hattının inlet ve outlet olmak üzere öncelikle giriş ve çıkış koşulları belirlenmiştir. Daha sonra tek fazlı akış için; sınır koşulu boru hattı boyunca tek "Wall" yani duvar koşulu şeklinde tanımlanmıştır (Şekil 6). Şekil 7b, 7c, 7d'de ise iki fazlı akış için tabanı ve yan duvarları ve üç fazlı akış için taban, yan alt duvar ile yan üst duvar olacak şekilde sınır koşulları oluşturulmuştur. Böylece farklı faz koşullarına göre fiziksel özellikler tanımlanabilmiştir.



Şekil 6. Tek fazlı akış için sınır koşulu
Figure 6. *Boundary condition for single-phase flow*



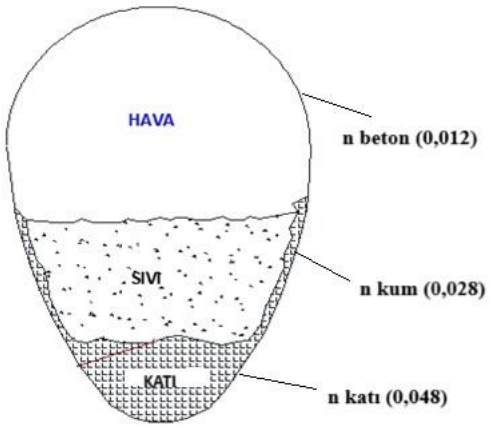
Şekil 7. İki ve Üç fazlı akışlar için sınır koşulları, (a) giriş ve çıkış, (b), yan üst duvar, (c) taban, (d) yan alt duvar
Figure 7. *Boundary conditions for two and three phase flows* (a) inlet and outlet, (b) side upper wall, (c) floor, (d) side lower wall

2.2. Kullanılan Boru Malzemesi ve pürüzlülük değerleri

Çalışmada kullanılan boru tipinde beton malzeme kullanılmış olup, manning pürüzlülük değeri (n) 0,012 olarak girilmiştir. Çalışma tek faz (su), 2 faz (su+hava) ve 3 fazlı (katı+su+hava) akış özelliklerine göre yapıldığı için, boru pürüzlülük değerleri için n manning katsayısı dikkate alınarak yumurta kesitin faz durumlarına göre farklı varyasyonlar kullanılmıştır (Şekil 8);

a. Tamamı beton (n:0,012) (tek fazlı),
b. Tabanı kum (n: 0,028), yan duvarları beton (iki fazlı),
c. Tabanı katı madde (n: 0,048), yan alt duvarları kum ve yan üst duvarları beton (üç fazlı),

şeklinde farklı pürüzlülük durumlarına göre hesaplamalar yapılmıştır.



Şekil 8. 3 fazlı akış pürüzlülük görseli
Figure 8. *3 phase flow roughness image*

2.3. Sayısal Modellemede Türbülans Modeli

Çalışmada türbülans metotlarından RANS (Reynolds averaged Navier–Stokes) ve k-ε (epsilon) modeli kullanılmıştır. Cinosi vd. (2014) türbülanslı akış için Star CCM$^+$ Programında yaptığı nümerik çalışmasında k- ε ve RANS modelini kullanmıştır. Bhowmik vd. (2022) ve Kuhn (1995) kütle akış hızı ve duvar sıcaklığı gibi test parametrelerini kullanarak deneysel soğutma sıvısı kütle sıcaklıklarını tahmin etmek için Yuann (1993) tarafından geliştirilen bir k-ε türbülans analitik modeli kullanmıştır.

2.4. Çok Fazlı Akış Özellikleri

Çok fazlı akış, kimyasal ve fiziksel özellikleri farklı akışkan ya da katı haldeki partiküllerin birbirine karışmadan bir sistem içinde akışını ifade etmektedir. Farklı fazlara ait akışların kombinasyonları aşağıdaki gibidir (Şekil 9) (Acar, 2023);

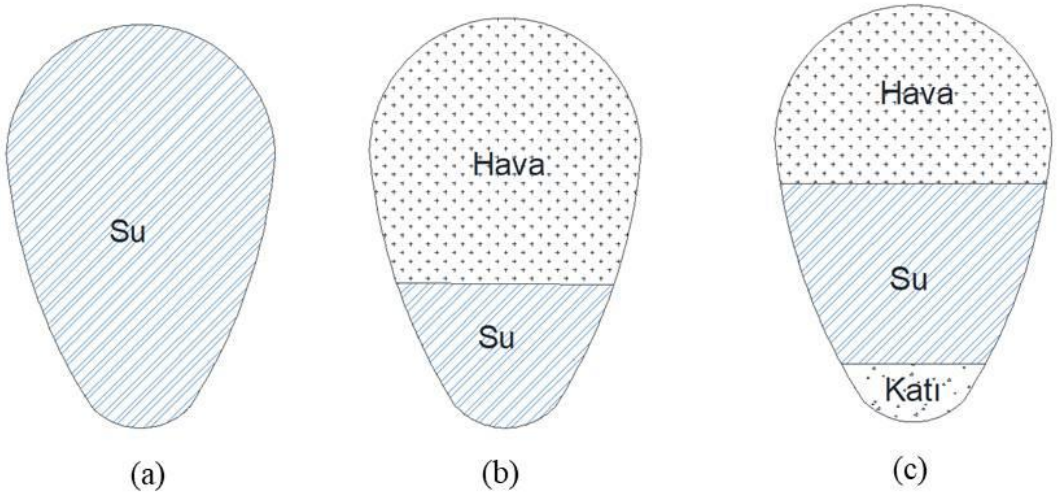
Tek fazlı akış; su ve benzeri homojen akış, sıvı akışı (homojen akış)

İki fazlı akış*;* su-gaz, su- katı, su-yağ, su-askı yüklü sıvı (heterojen akış)

Üç fazlı akış*;* gaz-su-katı, gaz-yağ-katı, gaz-su-kum (heterojen akış)

Tabakalı akış (stratified flow); su-kum, gaz-su

Çalışmada katı madde akışını tanımlamak amacıyla katı madde yoğunluğu 1100 kg/m^3, sıvı madde olarak su ise 998 kg/m^3 kabulleri ile alınmıştır.



Şekil 9. Yumurta kesit (a) Tek fazlı (su), (b) 2 fazlı (su+hava) ve (c) 3 fazlı (katı+su+hava) görünümü
Figure 9. *(a) Single phase (water), (b) 2 phase (water+air) and (c) 3 phase (solid+water+air) view of egg section*

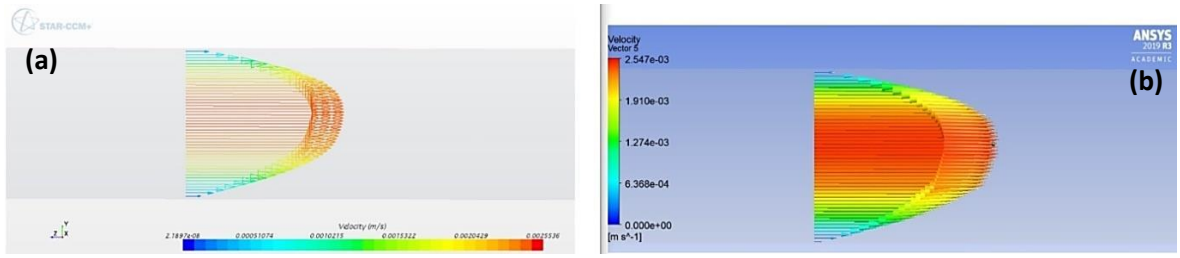
3. Bulgular ve Tartışma

Çalışmalarda kullanılan debiler belirlenirken İller Bankasının Teknik Şartnamesi'ne göre atık su kanal hızları dikkate alınmıştır. Farklı hız girişi denemeleri yapılmış ve en uygun minimum hızın 0,70 m/s alınması durumunda farklı yoğunluktaki maddelerin kanal boyunca akışının oluştuğu görülmüştür. Ayrıca diğer hız değeri olan 2,00 m/s alınmasının sebebi ise bu hızda boru akışının tam dolu hale gelebilmesidir. Aynı özellikteki boru hattı girdilerine göre HAD çıktı değerleri alınarak karşılaştırılmıştır. Yumurta kesitli (600 mm × 900 mm) kanal çalışılmış olup, tek fazlı (su), iki fazlı(hava+su), 3 fazlı (hava+su+katı madde) (Şekil 3) kanal şeklinde ve kanal eğimi 1/500 ve 1/1000, kanal uzunluğu 20 m alınmıştır. Karşılaştırma yapılması amacıyla her senaryoda 15'inci m deki hız dağılımları esas alınmıştır. Çalışmada 1/500 eğimli boru hattına ait akış bilgileri ile hız verileri Tablo 2'de verilmiştir.

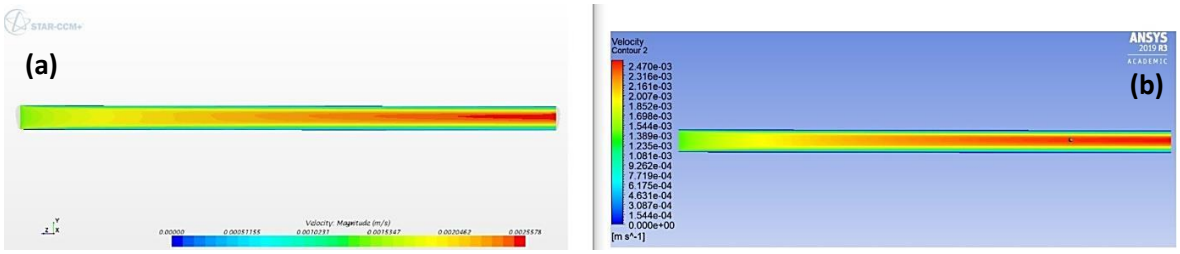
Çalışmada 1/500 eğimli boru hattına ait 6 farklı senaryoda farklı faz özelliklerine, pürüzlülük değerlerine, değişken giriş hızlarına göre HAD çalışması yapılmış olup 15'inci m deki hız profilleri ile boru içi akış hızları kesiti Şekil 10.∽21. arasında verilmiştir.

Tablo 2. Kanal Eğimi 1/500 olan boru hattı özellikleri ve sonuçları
Table 2. *Pipeline characteristics and results of the Channel Slope 1/500*

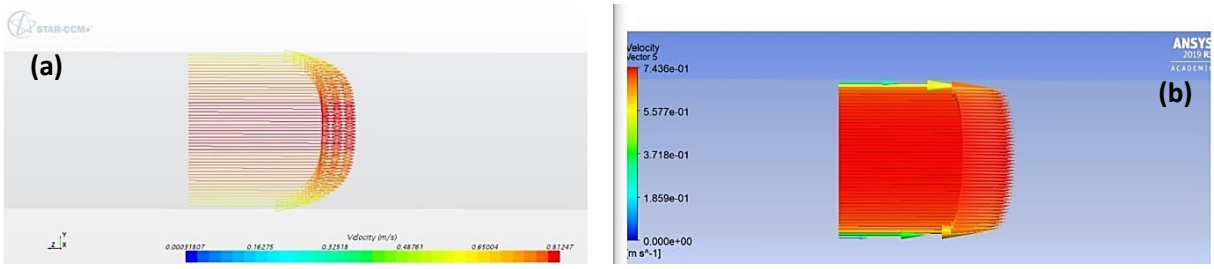
Senaryo No	Laminer / Türbülanslı	$V_{giriş}$ (m/s)	n (manning pürüzlülük)	Faz	STAR CCM+ V_{maks} (m/s)	ANSYS FLUENT V_{maks} (m/s)
1	Laminer	0,0014	Pürüzsüz	Tek faz (su)	0,0025	0,0025
2	Türbülanslı	0,70	Beton (n:0,012)	Tek faz (su)	0,79	0,74
3	Türbülanslı	0,70	Tabanı kum (n:0,028), Yanlar beton (n:0,012)	Tek faz (su)	0,79	0,77
4	Türbülanslı	0,70	Tabanı kum (n:0,028) Yanlar beton (n:0,012)	2 faz (su+hava)	2,02	1,75
5	Türbülanslı	2,00	Tabanı kum (n:0,028) Yanlar beton (n:0,012)	2 faz (su+hava)	2,45	2,40
6	Türbülanslı	2,00	Tabanı katı madde (n:0,048) Yan alt kum (n:0,028) Yan üst beton (n:0,012)	3 faz (katı+su+hava)	2,43	2,46



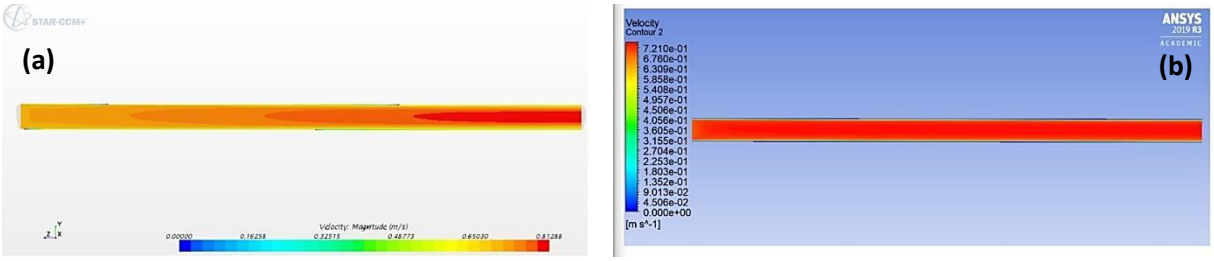
Şekil 10. 1 nolu senaryoya ait hız profilleri, (a) Star CCM+, (b) Ansys Fluent
Figure 10. *Velocity profiles for scenario no.1, (a) Star CCM+, (b) Ansys Fluent*



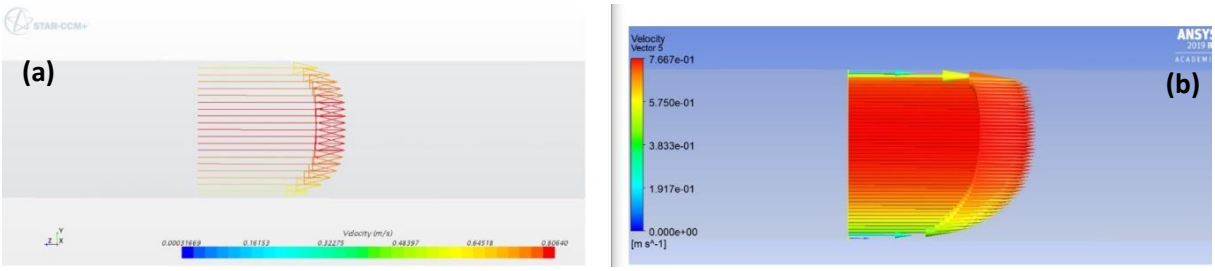
Şekil 11. 1 nolu senaryoya ait akış hızları, (a) Star CCM+, (b) Ansys Fluent
Figure 11. *Flow velocities for scenario 1, (a) Star CCM+, (b) Ansys Fluent*



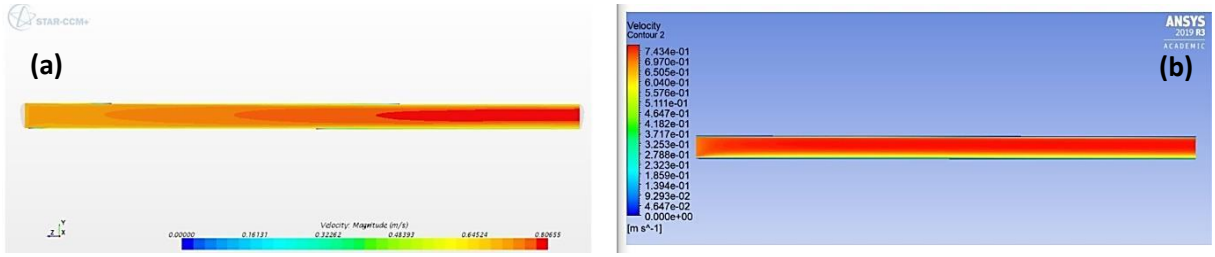
Şekil 12. 2 nolu senaryoya ait hız profilleri, (a) Star CCM+, (b) Ansys Fluent
Figure 12. *Velocity profiles for scenario no.2, (a) Star CCM+, (b) Ansys Fluent*



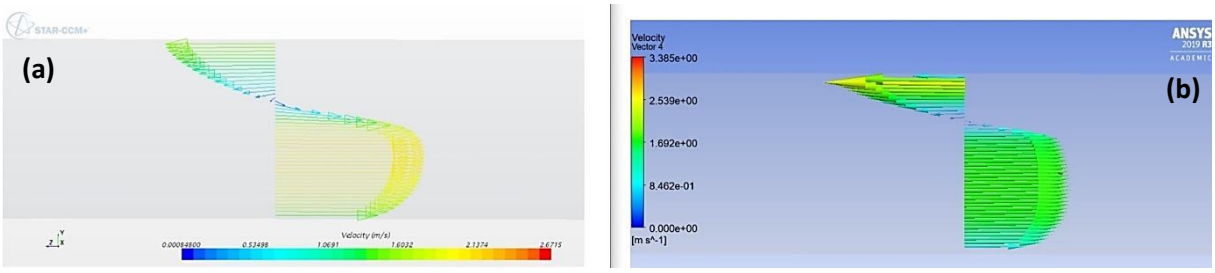
Şekil 13. 2 nolu senaryoya ait akış hızları, (a) Star CCM+, (b) Ansys Fluent
Figure 13. *Flow velocities for scenario 2, (a) Star CCM+, (b) Ansys Fluent*



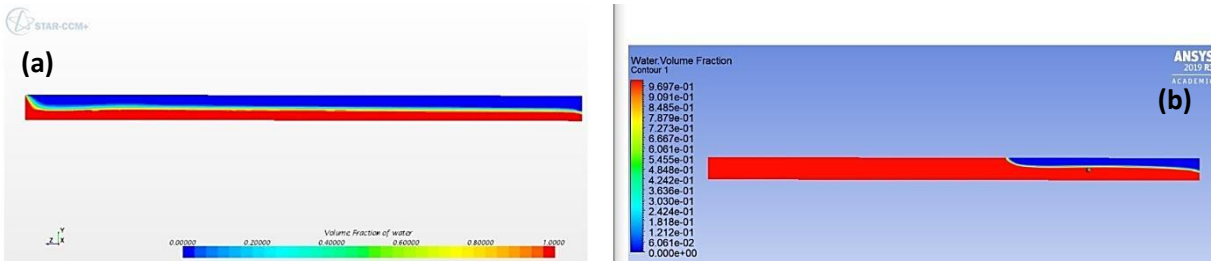
Şekil 14. 3 nolu senaryoya ait hız profilleri, (a) Star CCM+, (b) Ansys Fluent
Figure 14. *Velocity profiles for scenario no.3, (a) Star CCM+, (b) Ansys Fluent*



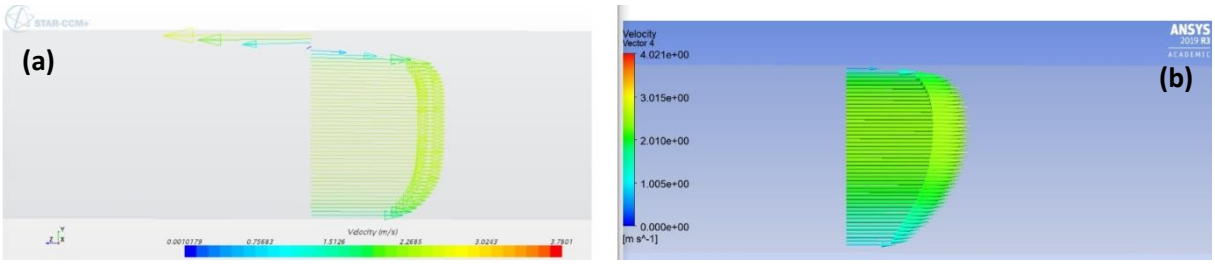
Şekil 15. 3 nolu senaryoya ait akış hızları, (a) Star CCM+, (b) Ansys Fluent
Figure 15. *Flow velocities for scenario 3, (a) Star CCM+, (b) Ansys Fluent*



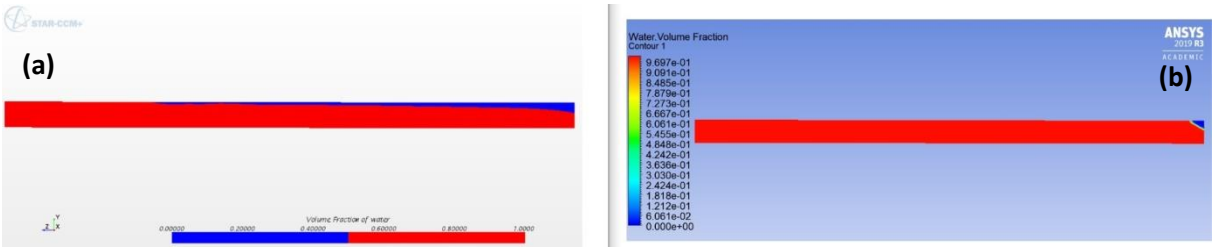
Şekil 16. 4 nolu senaryoya ait hız profilleri, (a) Star CCM+, (b) Ansys Fluent
Figure 16. *Velocity profiles for scenario no.4, (a) Star CCM+, (b) Ansys Fluent*



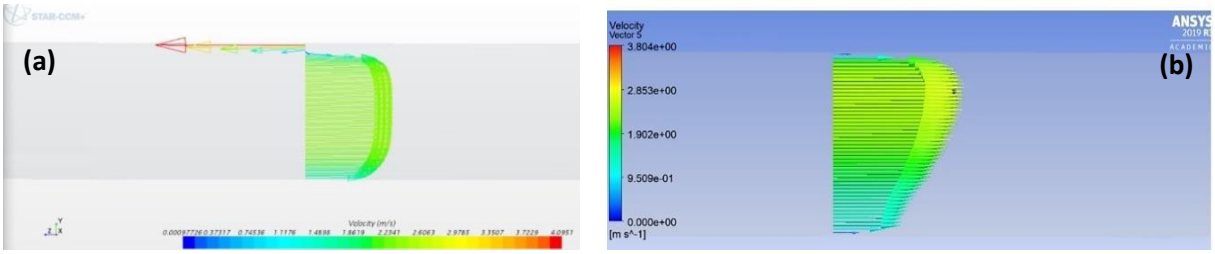
Şekil 17. 4 nolu senaryoya ait akış hacimleri, (a) Star CCM$^+$, (b) Ansys Fluent
Figure 17. *Flow volumes for scenario no. 4, (a) Star CCM$^+$, (b) Ansys Fluent*



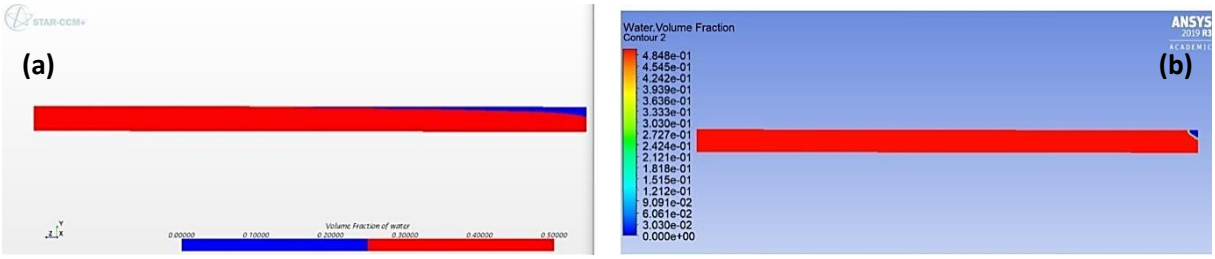
Şekil 18. 5 nolu senaryoya ait hız profilleri, (a) Star CCM$^+$, (b) Ansys Fluent
Figure 18. *Velocity profiles for scenario no.5, (a) Star CCM$^+$, (b) Ansys Fluent*



Şekil 19. 5 nolu senaryoya ait akış hacimleri, (a) Star CCM$^+$, (b) Ansys Fluent
Figure 19. *Flow volumes for scenario no. 5, (a) Star CCM$^+$, (b) Ansys Fluent*



Şekil 20. 6 nolu senaryoya ait hız profilleri, (a) Star CCM$^+$, (b) Ansys Fluent
Figure 20. *Velocity profiles for scenario no.6, (a) Star CCM$^+$, (b) Ansys Fluent*

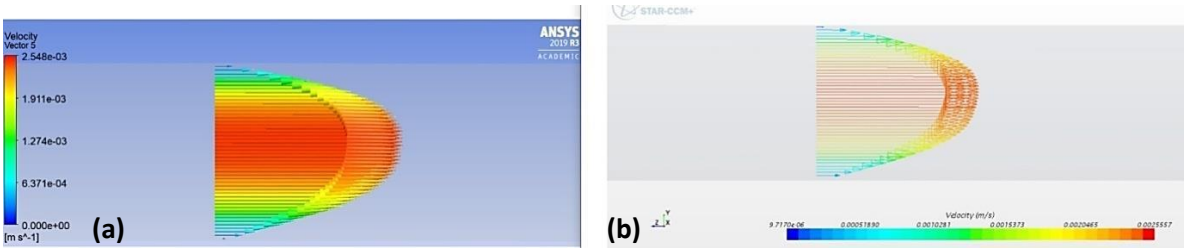


Şekil 21. 6 nolu senaryoya ait akış hacimleri, (a) Star CCM$^+$, (b) Ansys Fluent
Figure 21. *Flow volumes for scenario no. 6, (a) Star CCM$^+$, (b) Ansys Fluent*

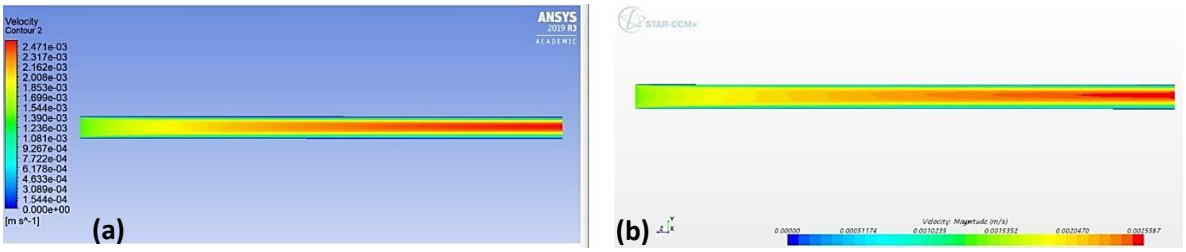
Çalışmada diğer eğim olan 1/1000 eğimli boru hattına ait akış bilgileri ile program işletme çalışmalarından elde edilen hız verileri Tablo 3'te verilmiştir. Çalışmada 1/1000 eğimli boru hattına ait 6 farklı senaryoda farklı faz özelliklerine, pürüzlülük değerlerine, değişken giriş hızlarına göre HAD çalışması yapılmış olup 15'inci m deki hız profilleri ile boru içi akış hızları kesiti Şekil 22.∽33. arasında verilmiştir.

Tablo 3. Kanal Eğimi 1/1000 olan boru hattı özellikleri ve sonuçları
Table 3. *Pipeline characteristics and results of the Channel Slope 1/1000*

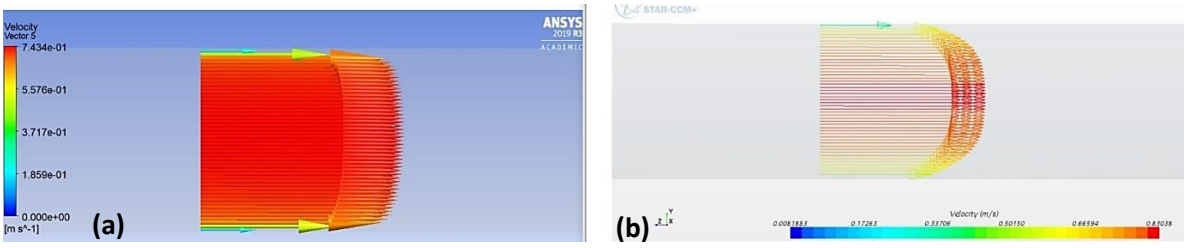
Senaryo No	Laminer / Türbülanslı	$V_{giriş}$ (m/s)	n (manning pürüzlülük)	Faz	STAR CCM+	ANSYS FLUENT
					V_{maks} (m/s)	
7	Laminer	0,0014	Pürüzsüz	Tek faz (su)	0,00245	0,00246
8	Türbülanslı	0,70	Beton (n:0,012)	Tek faz (su)	0,80	0,74
9	Türbülanslı	0,70	Tabanı kum (n:0,028) Yanlar beton (n:0,012)	Tek faz (su)	0,81	0,76
10	Türbülanslı	0,70	Tabanı kum (n:0,028) Yanlar beton (n:0,012)	2 faz (su+hava)	1,78	1,71
11	Türbülanslı	2,00	Tabanı kum (n:0,028) Yanlar beton (n:0,012)	2 faz (su+hava)	2,40	2,40
12	Türbülanslı	2,00	Tabanı katı madde (n:0,048) Yan alt kum (n:0,028) Yan üst beton (n:0,012)	3 faz (katı+su+hava)	2,40	2,39



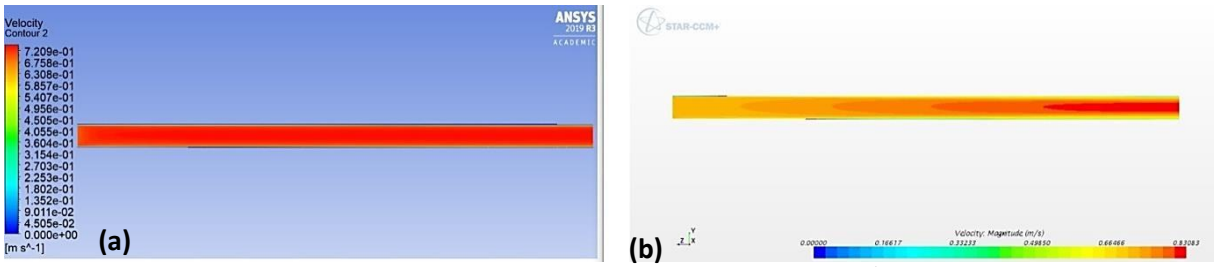
Şekil 22. 7 nolu senaryoya ait hız profilleri, (a) Ansys Fluent (b) Star CCM+
Figure 22. *Velocity profiles for scenario no.7, (a) Ansys Fluent (b) Star CCM+*



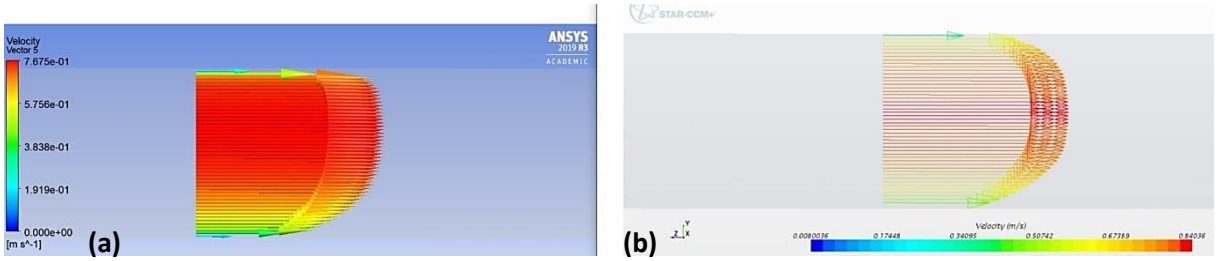
Şekil 23. 7 nolu senaryoya ait akış hızları, (a) Ansys Fluent (b) Star CCM+
Figure 23. *Flow velocities for scenario 7, (a) Ansys Fluent (b) Star CCM+*



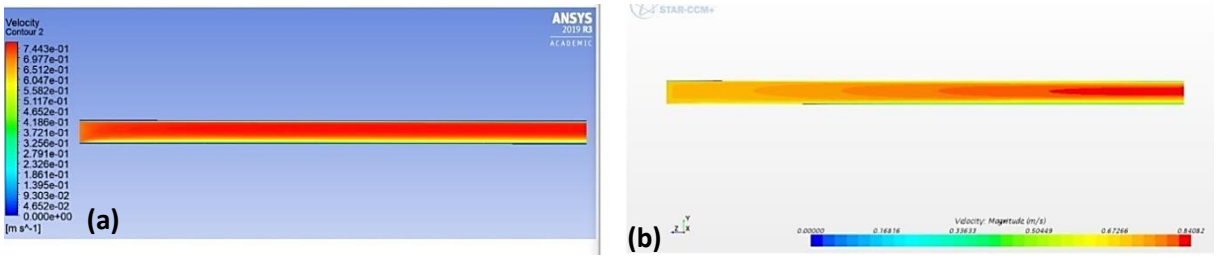
Şekil 24. 8 nolu senaryoya ait hız profilleri, (a) Ansys Fluent (b) Star CCM+
Figure 24. *Velocity profiles for scenario no.8, (a) Ansys Fluent (b) Star CCM+*



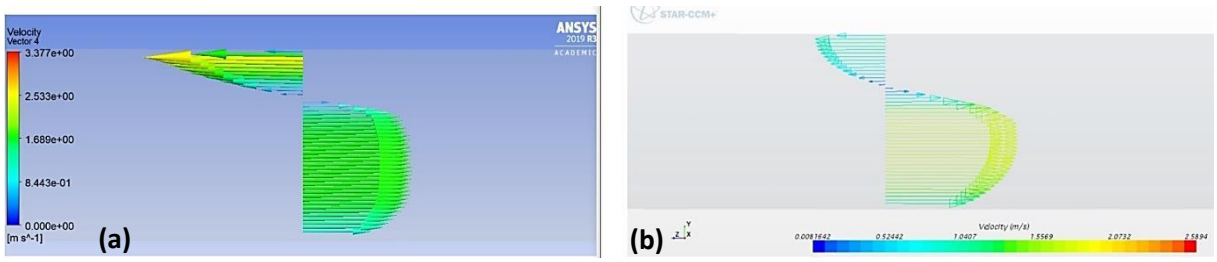
Şekil 25. 8 nolu senaryoya ait akış hızları, (a) Ansys Fluent (b) Star CCM+
Figure 25. *Flow velocities for scenario 8, (a) Ansys Fluent (b) Star CCM+*



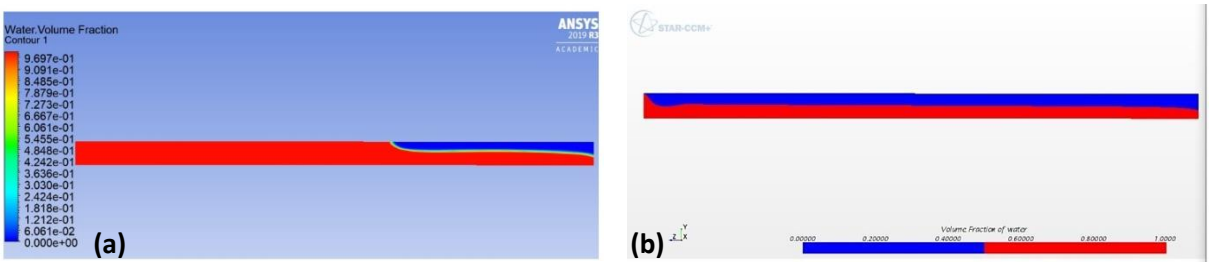
Şekil 26. 9 nolu senaryoya ait hız profilleri, (a) Ansys Fluent (b) Star CCM+
Figure 26. *Velocity profiles for scenario no.9, (a) Ansys Fluent (b) Star CCM+*



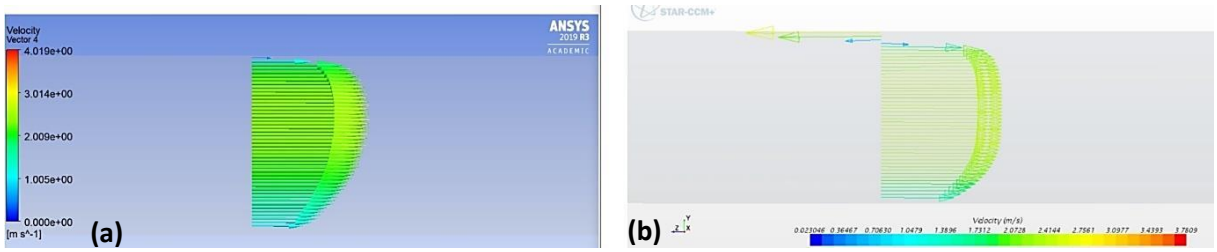
Şekil 27. 9 nolu senaryoya ait akış hızları, (a) Ansys Fluent (b) Star CCM+
Figure 27. *Flow velocities for scenario 9, (a) Ansys Fluent (b) Star CCM+*



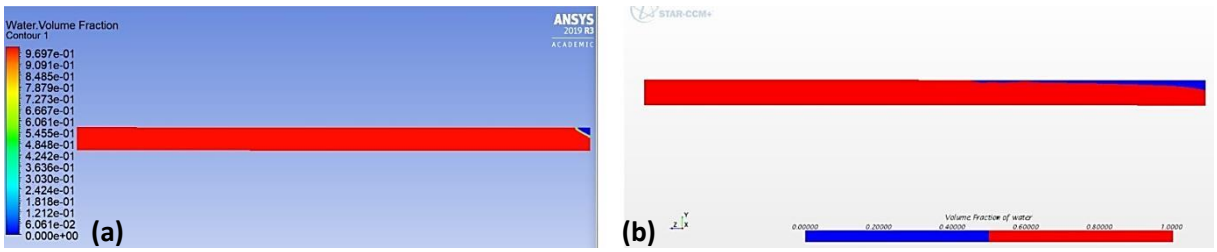
Şekil 28 nolu senaryoya ait hız profilleri, (a) Ansys Fluent (b) Star CCM+
Figure 28. *Velocity profiles for scenario no.10, (a) Ansys Fluent (b) Star CCM+*



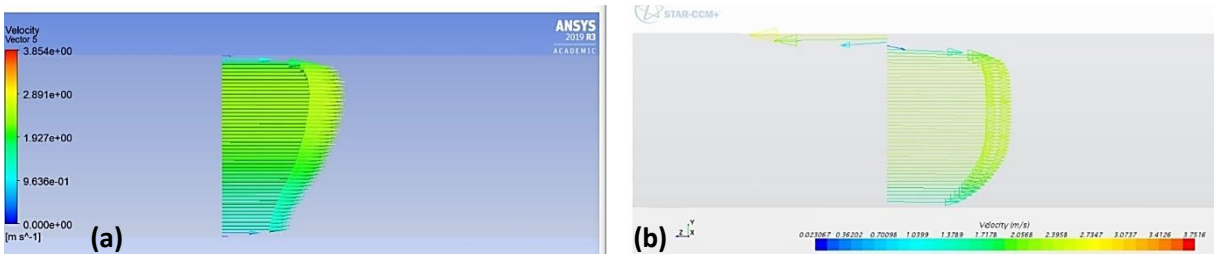
Şekil 29. 10 nolu senaryoya ait akış hacimleri, (a) Ansys Fluent (b) Star CCM+
Figure 29. *Flow volumes for scenario no. 10, (a) Ansys Fluent (b) Star CCM+*



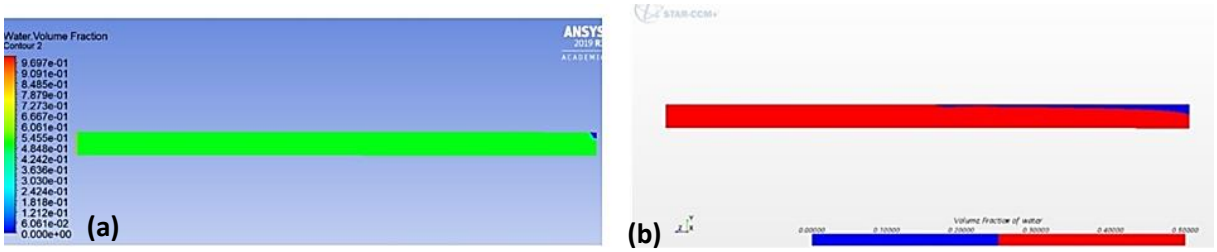
Şekil 30. 11 nolu senaryoya ait hız profilleri, (a) Ansys Fluent (b) Star CCM+
Figure 30. *Velocity profiles for scenario no.11, (a) Ansys Fluent (b) Star CCM+*



Şekil 31. 11 nolu senaryoya ait akış hacimleri, (a) Ansys Fluent (b) Star CCM+
Figure 31. *Flow volumes for scenario no. 11, (a) Ansys Fluent (b) Star CCM+*

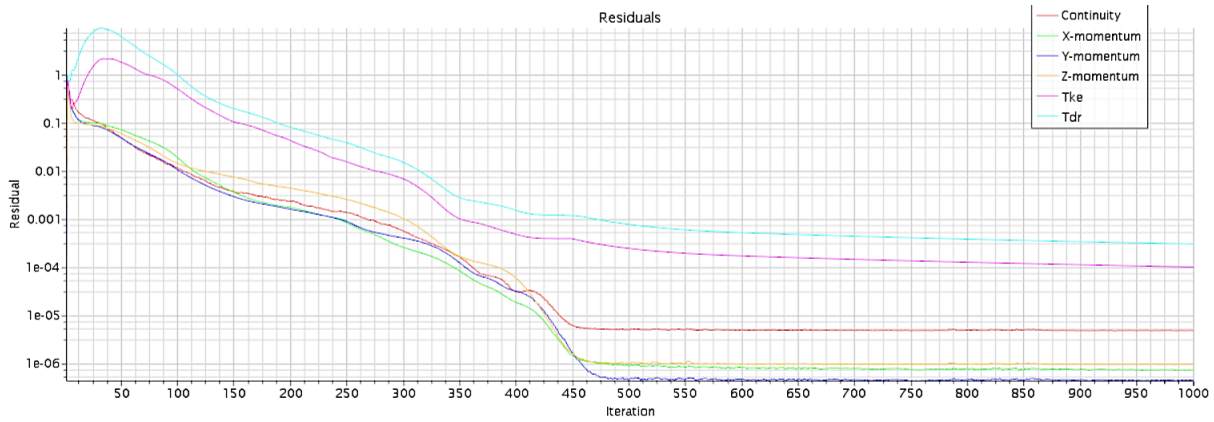


Şekil 32. 12 nolu senaryoya ait hız profilleri, (a) Ansys Fluent (b) Star CCM+
Figure 32. *Velocity profiles for scenario no.12, (a) Ansys Fluent (b) Star CCM+*



Şekil 33. 12 nolu senaryoya ait akış hacimleri, (a) Ansys Fluent (b) Star CCM+
Figure 33. *Flow volumes for scenario no. 12, (a) Ansys Fluent (b) Star CCM+*

Genel hacim içinde tanımlı tüm sonlu hacimlerin düğümlerindeki akış parametreleri ardışık olarak hesaplanır. Bu işlem iteratif olarak defalarca yapılır. Eski ve yeni iterasyon sonuçları sürekli hata hesabına tabii tutulur. Hata tolerans dahilinde çıkarsa sonuçlar yakınsama (örtüşme) sağlamıştır ve iterasyon işlemi sonlandırılır (Acar, 2023). Yinelemeli çözümlerde, çözülen her denklem için normalleştirilmiş artıklarda en az 10^{-3} düzeyinde yakınsama sağlanmalıdır (Cici ve Dursun, 2022). Çalışmada yapılan işletmede, 1000 adet iterasyon yapılarak, uygun yakınsama değerlerine ulaştığı için ve yakınsama değerleri 10^{-5} olduğundan (Şekil 34) işletme sonlandırılmıştır.



Şekil 34. Program yakınsama değerleri
Figure 34. *Programme convergence values*

Değerlendirmede kullanılan eğimlere göre (1/500 – 1/1000) farklı akış hızları ve tek-iki-üç fazlı akışlara göre;

a) Laminer ve pürüzsüz akış koşullarında 1'inci ve 7'inci senaryolarda hız değerleri aynı hesaplanmıştır. Boru boyunca oluşan hız verileri de oldukça benzer değerlerdedir.

b) 1/500 eğimde V=0,70 m/s lik hız hesaplamalarında tek fazda 2'inci ve 3'üncü senaryolarında hız değerleri %3 ila %6 Ansys Fluent verileri daha düşük hesaplanmıştır. 1/1000 eğimde ise hız değerleri 8'inci ve 9'uncu senaryoda %6 ila %7 aralığında Ansys Fluent programında düşüş gerçekleşmiştir. Boru çıkışına yakın hız değerlerine bakıldığında tabanı kumlu yüzeydeki hızın Ansys programında bir miktar artış gösterdiği tespit edilmiştir.

c) 4'üncü senaryoda 2 fazlı akışta Star CCM$^+$ programı hız değeri %15 civarı yüksek hesaplanmıştır. Hız akış kesitine bakıldığında Star programında su hacmi boru hattı boyunca yayılım gösterirken, Ansys'te 12'inci m den itibaren su hacmi görülmeye başlanmıştır. Hız değerlerinin farkının sebebi farklı su hacimlerinin oluşmuş olmasıdır. 4'üncü ve 10'uncu senaryolarda 2 fazlı akış için programlar arasındaki farklılığın düşük hızlı akımlarda (v:0,70 m/s) boru içi akışın tam olarak temsil edilemediğinden, akış hızının düşük kalmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Bu nedenle bu senaryolarda düşük hızda boru içi akışlarının hacim farklılıkları oldukça yüksektir. Fakat 5 ve 11 nolu senaryolarda daha yüksek olan v hızı 2,00 m/s ye göre işletme çalışması yapıldığında her iki programdaki akışkan hacimlerinin benzer olduğu görülmektedir. 2'inci ve 3'üncü senaryolara göre boru hattının su yüksekliği daha düşük olduğu için hız değerlerinde artış gözlemlenmiştir. 10'uncu senaryoda hız profili değerleri birbirine çok yakın olup, Ansys'te boru hattı boyunca yarı dolu akış görülürken, Star'da 12'inci m den önce tam dolu iken daha sonra yarı dolu serbest akışa geçmiştir.

d) 5'inci ve 6'ıncı ile 11'inci ve 12'inci senaryolarda 15'inci m deki hız profil değerleri birbirine çok yakındır. Boru hattı boyunca Ansys'te akış tam dolu halde olup boru çıkışında serbest hale gelmiştir. Star'da ise tam dolu halden 16'ıncı m den itibaren boru çıkışına doğru serbest yüzeyler görülmüştür.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Mevcut değerlendirmeler 12 farklı senaryoya göre yapılmış olup, boru uzunluğunun 15'inci m sinde yer alan hız dağılımına göre karşılaştırmalar yapılmıştır. Her iki programda da birbirine yakın değerlerin olduğu ortaya konmuştur. Boru içi farklı hızların boru akışına olan etkileri incelenmiştir. Bu çalışmaya göre;

a) HAD programlarının sonuçlarının (akışkan hacmi ve hız profilleri) yakın olduğu gözlemlenmiştir. Fakat daha düşük hızlarda çok fazlı akış koşullarında oluşan akışkan hacim farklılıklarının uygun fiziki (hız değeri, eğim gibi) değerlerin çalışma için belirlenmesi gerekliliğini ortaya koymuştur.

b) Farklı faz (tek, iki ve üç fazlı) özelliklerine ait çalışmada fizik modelleri de farklılık göstermektedir. Tek fazlı akış için türbülanslı, RANS, k-ε epsilon modeli kullanılırken, iki ve üç fazlı akışlarda ilave olarak çok fazlı akış özelliklerini tanımlamak için Eulerian multiphase (Euler çok fazlı akış) ve VOF modeli kullanılmıştır. Kararlı (Steady) akım çalışmada tek giriş hız değerleri ile fazlarda farklı boru içi hız değerleri ortaya çıkmıştır. Çok fazlı akış özelliklerine bakıldığında boru içindeki hız değerlerinde farklılıkların oluştuğu tespit edilmiştir. Fazlar arası bu farklılıkların boru içi akış yoğunluklarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Katı faz yoğunluğu 1200 kg/m^3 iken, sıvı fazı 998 kg/m^3 olduğu için boru içi akış hızlarında farklılıklar oluşmaktadır.

   Çok fazlı akışlar olan iki ve üç fazlı akışlarda boru içi akışının arttırdığı görülmektedir. Bu durumun nedeni boru içindeki faz hacimlerinin değişiklik göstermesidir. Katı ve sıvı hacimleri ile hava hacminin boru içi akış alanları madde özelliklerinden dolayı farklıdır. Sabit giriş hızı ile boru içinde oluşan faz alanları değişiklik gösterdiği için fazlara ait hızlar da değişiklik göstermektedir. Böylece akış alanları azalan faz akışının hızı da artmaktadır. Programlar arasında farklı akış hızlarının görülme sebebi faz akış alanlarındaki farklılıklardan kaynaklanmaktadır.

c) Aynı sayısal modelleme yöntemi (sonlu hacimler) kullanan programların karşılaştırılması ve genel olarak yakın sonuçlar elde edilmesi güvenilirliklerini arttırmıştır.

d) Nümerik analiz programlarının kullanım alanlarının yaygınlaştırılması karmaşık problem çözümlerinin güvenli bir şekilde çözülebilmesine olanak sağlayacaktır.

e) Çalışmada kullanılan senaryolardaki değerlerin (hız, pürüzlülük, faz, yoğunluk gibi) çeşitlendirilerek çalışmalar yapılması önerilmektedir. Özellikle çok fazlı akışlar için farklı hız değerlerine ve eğimlere göre sayısal örneklerin yapılması bilime katkı sunacaktır.

f) Özellikle 3 fazlı akışa (katı+su+hava) sahip atıksu boru hatlarının HAD programları ile işletme çalışmasının yapılması, atıksu sistemlerinin daha doğru temsil edilebilmesine katkı sağlayacaktır.

g) Yumurta kesitli atık su borularının tasarlanmasında ve kullanımlarının yaygınlaştırılmasında bu çalışmaların arttırılması önerilmektedir.

Sonuç olarak, çalışmada 600 mm × 900 mm boyutlarındaki yumurta kesitli boru hattı kullanılmış ve farklı yoğunluk, pürüzlülük, faz ve hız değerlerinde boru içi akışı ortaya konmuştur. Her iki HAD programında hız değerlerinin değerleri birbirine yakınlık gösterirken, çok fazlı durumlarda farklı su yüzü profillerinin ortaya çıktığı görülmüştür. Çalışmada farklı pürüzlülük değerleri kullanılmış olup, pürüzlülük değerleri için tamamı beton, tabanı kum ya da çakıl – yanları beton varyasyonları çalışılmıştır. 3 fazlı çalışmada katı madde de yoğunluk 1100 kg/m^3 alınmıştır ve yüksek yoğunluk değerinden dolayı pürüzlülük değeri yaklaşık çakıla ait n katsayı alınmıştır.

Bu çalışma ile yumurta kesitli, farklı faz, eğim ve pürüzlülük özelliklerine sahip atık su borularındaki akışkanın iki farklı HAD programına göre akış davranışları simüle edilmiştir. Tek fazlı akış hız değerleri ve boru hattı boyunca hız değerleri birbiri ile çok benzerlik gösterirken, çok fazlı akışlarda hız değerlerinin yaklaşık benzer değerler oluşturduğu, sadece boru içindeki fazların

dağılımında değişiklikler olduğu gözlemlenmiştir. Örneğin tam dolu ya da yarı dolu, serbest/basınçlı akış özellikleri oluşmuştur. Bu kapsamda ortaya çıkan çalışma için farklı fiziki koşullar altında çalışmaların yapılması önerilmektedir. Özellikle çok fazlı akış koşullarının ve kararsız akış koşulları altında atıksu borularının davranışlarının ortaya konması tavsiye edilmektedir. Akışkan problemlerinin çözümünde HAD programlarının farklı girdilerinin ve akış koşullarının oluşturulması ile karmaşık akışkan problemlerinin çözümüne katkıları yadsınamaz bir gerçektir.

Yazar katkısı (Author contribution)

Acar, E.: Metodoloji, Veri toplama, Veri işleme, Literatür taraması, Yazma-İnceleme ve Düzenleme.

Finansman beyanı

Bu araştırma herhangi bir fon kuruluşundan, ticari veya kar amacı gütmeyen sektörlerden özel bir hibe almamıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Etik standartlar

Bu çalışma için Etik Kurul Kararı gerekmemektedir.

References

Acar, E. (2023). Kararsız Akış Koşulları Altında Yumurta Kesitli Atık Su Borularının Hidrolik Performansı, Doktora Tezi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Türkiye.

Afif, A.A., Wulandari, P., Syahriar, A. (2020). CFD analysis of vertical axis wind turbine using ansys fluent, *BIS-ASE 2019 Journal of Physics: Conference Series*, 16 October 2019, Magelang, Indonesia.

Angkasuwansiri, T., Sinha, S. (2014). Development of wastewater pipe performance index and performance prediction model, *International Journal of Sustainable Materials and Structural Systems,* 1, 244-264. https://doi.org/10.1504/IJSMSS.2014.062767

Atik, K., Racabovadiloğlu, Z. (2006). Sıvı-katı iki fazlı karışımın kararsız hareketlerinin sayısal ve Slezkin-Targ yöntemleriyle incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(4), 661-666.

Aydın, M.C. (2005). Alttan alışlı dolusavak havalandırıcıların CFD analizi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye.

Başyazıcı, İ.U. (2007). İki fazlı akışlara sayısal yöntemlerin uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Türkiye.

Bayrakdar, F. (2017). Application of Volume of Fluid (VOF) Method in Conjunction with Shear Stress Transport (Sst) K-Ω Turbulence Closure Model to Investigate Spillway Flow, Master Thesis, Middle East Technical University, Türkiye.

Bhowmik, P.K., Schlegel, J.P., Kalra, V., Alam, S.B., Hong, S., Usman, S. (2022). CFD validation of condensation heat transfer in scaled-down small modular reactor applications, Part 1: Pure steam, *Experimental and Computational Multiphase Flow*, 4(4), 409-423. https://doi.org/10.1007/s42757-021-0115-5

Bonakdari, H., Larrarte, F. (2006). Experimental and numerical investigation on self-cleansing and shear stress in sewers, *Sewer Operation and Maintenance conference*, October 2006, Wien, Austria.

Cici İ., Dursun Ö. F. (2022). Sayısal model yardımıyla farklı havalandırıcı tiplerin venturi havalandırma performansı üzerindeki etkilerinin incelenmesi. *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 9(1), 96-112. https://doi.org/10.31202/ecjse.948387

Cinosi, N., Walker, S.P., Bluck, M.J., Issa, R. (2014). CFD simulation of turbulent flow in a rod bundle with spacer grids(MATIS-H) using STAR-CCM+, *Nuclear Engineering and Design,* 279, 37–49. http://dx.doi.org/10.1016/j.nucengdes.2014.06.019

Greifzu, F., Kratzsch, C., Forgber, T., Lindner, F., Schwarze, R. (2016). Assessment of particle-tracking models for dispersed particleladen flows implemented in Open FOAM and ANSYS FLUENT. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 10(1), 30-43. https://doi.org/10.1080/19942060.2015.1104266

Hazari, S.A. (2016). Turbulence Modelling of Two Phase Stratified Channel and Pipe Flows, Master Thesis, Delft University of Technology, Netherlands.

Kim, C., Han, C. (2013). Numerical simulation of hydraulic transport of sand-water mixtures in

pipelines. *Open Journal of Fluid Dynamics*, 3(4), 266-270. https://doi.org/10.4236/ojfd.2013.34033

Kuhn, S. Z. (1995). Investigation of heat transfer from condensing steam-gas mixtures and turbulent films flowing downward inside a vertical tube, Ph.D. Dissertation, University of California, USA.

Kumar, S., Kumar, B., Deshpande, V., Agarwal, M. (2023). Predicting flow velocity in a vegetative alluvial channel using standalone and hybrid machine learning techniques. *Expert Systems with Applications*, 232, 1-12. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120885

Moukalled, F., Mangani, L., Darwish, M. (2016). The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics, Springer, ISSN: 2215-0056.

Nasiri Khalaji, M., Osta, M. H. and Yakut, K. (2018). Numerical analysis of heat transfer of hot oil and cold water fluids in a concentric type heat exchanger with ansys fluent. *International Journal of Innovative Research and Reviews*, 2(2), 24-27.

Okyay, G. (2010). Utilization of CFD Tools in the Design Process of a Francis Türbine, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Türkiye.

Özdemir, Y.C. (2023). Farklı Açılardaki Batık Kanat Yapılarının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi, Türkiye.

Pashchenko, D.I. (2019). CFD Modeling of Operating Processes of a Solar Air Heater in ANSYS Fluent. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 92(1), 73-79. DOI 10.1007/s10891-019-01908-8

Regueiro-Picallo, M., Naves, J., Anta, J., Puertas, J., Suárez, J. (2016). Experimental and numerical analysis of egg-shaped sewer pipes flow performance. *Water,* 8(587), 1-9. https://doi.org/10.3390/w8120587

Sadeq, A.M. (2022). Açık Kanal Akımındaki Eğrisel Köprü Yan Ayaklarının Deneysel ve Sayısal Modellemesi, Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Türkiye.

Savaş, E. (2015). Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yazılımı (Fluent) Kullanılarak Bir İşyerinde Yangın Acil Durumunda Duman Tahliyesi Modellenmesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanlık Tezi, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, Türkiye.

Şibil, R. (2023). Bitki örtülü kanalların akım özelliklerinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile belirlenmesinde yakın duvar davranışının etkisi. *Recep Tayyip Erdogan University Journal of Science and Engineering*, 4(2), 109-123. https://doi.org/10.53501/rteufemud.1323845

Taşar, B., Üneş, F., Gemici, E., Varçin, H. (2021). Numerical simulation of channel flow using submerged vane in river arrangements, *2021 Air and Water – Components of the Environment Conference Proceedings,* March 2021, Cluj-Napoca, Romania.

Yakhot, V., Orszag, S.A. (1986). Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory. *Journal of Scientific Computing*, 1(1), 3-51.

Yuann, R. Y. (1993). Condensation from vapor-gas mixture for forced downflow inside a tube, Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley, CA, USA.