



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Yumurta kesitli atıksu borularının akış performansının star CCM+ hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı ile doğrulanması

Verification of the flow performance of egg-section wastewater pipes with star CCM+ computational fluid dynamics program

Yazar (Author): Esin ACAR

ORCID: 0000-0002-3926-2804

To cite to this article: Acar E., “Yumurta Kesitli Atıksu Borularının Akış Performansının Star CCM+ Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Programı ile Doğrulanması”, *Journal of Polytechnic*, 29(4):290417:1-10 (2026).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Acar E., “Yumurta Kesitli Atıksu Borularının Akış Performansının Star CCM+ Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Programı ile Doğrulanması”, *Politeknik Dergisi*, 29(4):290417:1-10 (2026).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1651243

Yumurta Kesitli Atıksu Borularının Akış Performansının Star CCM⁺ Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Programı ile Doğrulanması

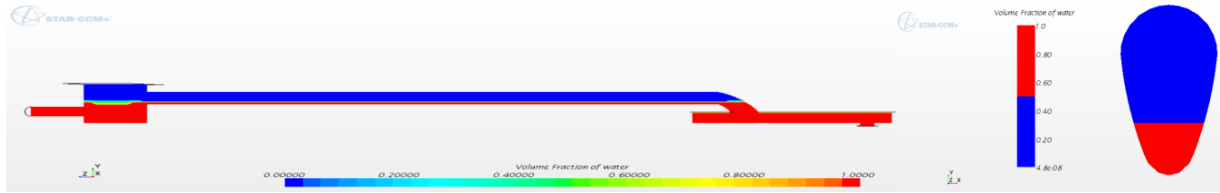
Verification of the Flow Performance of Egg-Section Wastewater Pipes with Star CCM⁺ Computational Fluid Dynamics Program

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Yumurta kesitli atıksu borularının akış performansı değerlendirildi. / Flow performance of egg-shaped wastewater pipes evaluated.
- ❖ Hesaplamalı akışkanlar dinamiği programlarının akış hesaplamaları karşılaştırıldı. / Flow calculations of computational fluid dynamics programs were compared.
- ❖ Star CCM⁺ programının doğruluğu ortaya konuldu. / The accuracy of the Star CCM⁺ program has been demonstrated.

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışma Star CCM⁺ programının akış performansının doğrulanmasına odaklanmıştır. / This study focuses on validating the streaming performance of the Star CCM⁺ program.



Şekil 1. Star CCM⁺ başlangıç koşulu ve 2 fazlı yumurta kesit / **Figure. 1** Star CCM⁺ initial condition and 2-phase egg shaped

Amaç (Aim)

Bu çalışma Star CCM⁺'in atıksu boru akışı hesaplamalarının doğruluğunu ortaya çıkarmayı amaçlamaktadır. / This study aims to demonstrate the accuracy of Star CCM⁺'s wastewater pipe flow calculations.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Makalesi [1] yapılmış yumurta kesitli atıksu boru hattı deneysel verilerinin Star CCM⁺ ile sayısal modellemesi yapılmıştır. / Numerical modeling of the experimental data of the egg section wastewater pipeline was performed with Star CCM⁺.

Özgünlük (Originality)

Var olan deneysel çalışmanın farklı bir yazılım ile doğrulanmasıdır. / It is the validation of an existing experimental study with a different software.

Bulgular (Findings)

Makale [1] verilerinden alınan deşarj, hız profilleri ve kayma gerilmeleri üzerinden karşılaştırma yapılmıştır. / Comparisons were made on discharge, velocity profiles and shear stresses from the article data.

Sonuç (Conclusion)

Makale [1] sonuçları ile oldukça uyumlu akış performans değerleri elde edilmiştir. / Flow performance values in good agreement with the results of the paper

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Yumurta Kesitli Atıksu Borularının Akış Performansının Star CCM⁺ Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Programı ile Doğrulanması

Araştırma Makalesi / Research Article

Esin ACAR*

Borçka Acarlar Meslek Yüksek Okulu, İnşaat Bölümü, Artvin Çoruh Üniversitesi, Türkiye
(Geliş/Received : 04.03.2025 ; Kabul/Accepted : 28.07.2025 ; Erken Görünüm/Early View : 28.09.2025)

ÖZ

Yumurta kesitli boru hatlarının hidrolik değerlendirmelerinin dairesel kesitlere göre daha az olması sebebiyle akış performansları literatürde çok fazla bulunmamaktadır. Bu çalışmada “Experimental and Numerical Analysis of Egg-Shaped Sewer Pipes Flow Performance” adlı makaledeki deneysel ve HAD (Hesaplamalı akışkanlar dinamiği) (Ansys CFX) sonuçlarının akış performansları farklı bir yazılım ile karşılaştırılmıştır. Star CCM⁺, türbülanslı akış problemlerinin çözümünde kullanılan multidisipliner bir yazılım olup, doğruluğunun ortaya konması ve atıksu hidrolik analizlerinde kullanılmasının yaygınlaşması hedeflenmiştir. Deney seti, H:385 mm, R:110 mm boyutlarındaki boru hattı yumurta kesitli geometri olup, 11 m uzunluğunda %0,2 eğimlidir. SolidWorks ile deney düzeneği oluşturularak, Star CCM⁺ yazılımına aktarılmıştır. Yazılımda sınır koşulları, iki fazlı (su + hava) akış ve fizik şartları deneysel verilerinden yararlanılarak simüle edilmiştir. Farklı su yüksekliklerinde, $h/H = 0,2, 0,3, 0,4$ ve $0,5$ olmak üzere işletme çalışması yapılmıştır. Belirlenen akış performans değerleri olan; deşarjlar, hız değerleri, reynolds sayıları, kayma gerilmeleri ve boru hattı orta kesit hız dağılımları deneysel ve Ansys CFX yazılımı ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçlarına göre Star CCM⁺ yazılımında; $h/H=0,20$ 'de maksimum hızda %8,80, ortalama hız ile deşarjda %3,10 ve kayma gerilmesinde -%2,60'lık fark görülmüştür. $h/H=0,30$ 'da maksimum hızda -%3,40, ortalama hız ile deşarjda %7,40 ve kayma gerilmesinde %1,50'lik fark oluşmuştur. $h/H=0,40$ 'da maksimum hızda %5,00 fark, ortalama hız ile deşarjda %2,60 ve kayma gerilmesinde %2,50'lik fark meydana gelmiştir. $h/H=0,50$ 'de ise maksimum hızda %17,00 fark, ortalama hız ile deşarjda %2,60 fark ve kayma gerilmesinde %0,20'lik fark oluşmuştur. Bu değerlendirmelere göre, deneysel akış performans değerleri ile Star CCM⁺ sonuçları benzerlik göstermiştir. Böylece Star CCM⁺ programının akışkanların akış performans değerlendirmelerinde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, Yumurta kesitli atıksu boruları, Star CCM⁺, Akış performansı.

Verification of the Flow Performance of Egg-Section Wastewater Pipes with Star CCM⁺ Computational Fluid Dynamics Program

ABSTRACT

Due to the fact that hydraulic evaluations of egg-shaped pipe sections are less common than those of circular sections, their flow performance is not widely documented in the literature. In this study, the experimental and CFD (Computational Fluid Dynamics) (Ansys CFX) results from the article titled “Experimental and Numerical Analysis of Egg-Shaped Sewer Pipes Flow Performance” were compared with flow performance using a different software. Star CCM⁺ is a multidisciplinary software used to solve turbulent flow problems, and the aim is to demonstrate its accuracy and promote its use in wastewater hydraulic analyses. The experimental setup consists of an egg-shaped pipe geometry with dimensions H: 385 mm and R: 110 mm, and a length of 11 m with a 0.2% slope. The experimental setup was created using SolidWorks and transferred to the Star CCM⁺ software. In the software, boundary conditions, two-phase (water + air) flow, and physical conditions were simulated using experimental data. Operational tests were conducted at different water levels, with $h/H = 0.2, 0.3, 0.4$, and 0.5 . The determined flow performance values, including discharges, velocity values, Reynolds numbers, shear stresses, and pipe line mid-section velocity distributions, were compared with experimental data and Ansys CFX software. According to the comparison results, in the Star CCM⁺ software, at $h/H = 0.20$, there was an 8.80% difference in maximum velocity, a 3.10% difference in average velocity and discharge, and a -2.60% difference in shear stress. At $h/H=0.30$, there was a difference of -3.40% in maximum velocity, 7.40% in average velocity at discharge, and 1.50% in shear stress. At $h/H=0.40$, there was a difference of 5.00% in maximum velocity, 2.60% in average velocity at discharge, and 2.50% in shear stress. At $h/H=0.50$, there was a 17.00% difference at maximum speed, a 2.60% difference at average speed during discharge, and a 0.20% difference in shear stress. According to these evaluations, experimental flow performance values and Star CCM⁺ results were similar. Thus, it was concluded that the Star CCM⁺ program can be used for evaluating the flow performance of fluids.

Keywords: Computational Fluid Dynamics, Egg section wastewater pipes, Star CCM⁺, Flow performance.

1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Atıksu boru sistemleri altyapıların oluşturulması ve yerleşim yerlerinin planlanması aşamalarında önemli bir

yere sahiptir. Boot ve diğerleri [2];[3], yumurta şeklindeki bir kesitin hidrolik verimlilik ve yapısal

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : esin.acar@artvin.edu.tr

bütünlük arasında mükemmel bir uzlaşma sağlayabileceğini belirtmiştir. Atıksu sistemlerinin akış performanslarının yüksek olması boru hatlarının uzun süre kullanılmasına katkı sağlamaktadır. Bu sebeple planlama çalışmalarında fonksiyonel ve ekonomik yatırımlar olması ön plana çıkmaktadır. Özellikle geometri farklılıkları atıksu sistemlerinin hidrolik performanslarında etkili olmakta olup, yumurta kesitli atıksu boru hatlarının, geometrisi gereği hidrolik yarıçapları daha düşük olduğu için taban sediman birikimi daha az olmakta ve kesit daralmasına neden olmamaktadır. Bu durum uzun yıllar kullanılabilmesini sağlamaktadır. Bu sebeple yumurta kesitli atıksu boru sistemleri dairesel kesitlere kıyasla daha az sediment taşımaktadır. Böylece taban birikimine neden olan sediment, akış kesitindeki daralmalara neden olacağından boru sistemlerindeki akışa olumsuz etki etmektedir. Özellikle taban birikimi nedeniyle akış hızının düşmesi, atıksu sistemlerinin daha kısa sürede doluluk oranına ulaşmasına ve boru malzemesinin aşınmasına neden olmaktadır. Boru içi tortular akış kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir, yüksek akışta aniden akışa büyük miktarlarda tortu bırakabilir ve kanalizasyon akış kalitesini önemli ölçüde etkileyebilir [4];[5]. Açık bir kanaldaki hız dağılımının doğru bir şekilde bilinmesi, erozyon ve sediman taşınımının tahmin edilmesine yardımcı olduğu için çok önemlidir [6]. Yüksek akışkan hızlarında partiküller askıda kalır ve akışkanla birlikte akar. Ancak, düşük hızlarda partiküller (akışkandan daha yoğunsa) yerçekimi altında çöker ve borunun alt tarafında sabit bir partikül yatağı oluşur [7];[8].

Değişken kütleli akışlar su temini, havalandırma, kanalizasyon sistemlerinde (dallanan kanallar, oluklu boru, dağıtım kanalları, vb.) yaygın olarak kullanılmaktadır [9]. Drenaj ve kanalizasyon şebekeleri çoğunlukla serbest yüzey akışı koşullarında çalışır. Akışın düzgün ve sabit olduğu varsayılırsa, özellikleri Chow (1959), Henderson (1966), Metcalf and Eddy (1981), Carlier (1985), Hager (2010) gibi birçok yazar tarafından tartışılan Manning modeli kullanılarak tahmin edilebilir [10];[11],[12],[13],[14],[15]. Birleşik kanalizasyon sistemindeki yağmur suyu ve kanalizasyon miktarındaki fark, yoğun yağışların yoğunlaştığı bölgelerde önemli ölçüde büyüktür. Bu durum boruların içinde düşük su seviyesine ve yavaş akış hızına yol açarak yağmurlu olmayan günlerde tortulaşmaya ve kokuya neden olur. Karmaşık bir kesit modülü, yağmurlu olmayan günlerde kanalizasyonun akması için boru içinde küçük bir su yolu oluşturarak akış hızını artırır. Manning denklemini dikkate alırken, akış hızının hidrolik yarıçapın gücünün üçte ikisi ile orantılı olduğu prensibi uygulanmıştır [16].

Katı maddelerin boru hatlarında hidrolik olarak taşınması, madencilik ve dip taramada olduğu gibi kimya ve atık bertarafı endüstrilerinde büyük miktarlarda katı maddeyi uzun mesafelere taşımak için kullanılmaktadır [17]. Boru hatlarındaki sulu karışım akışı, özellikle katı partiküllerin sıvıya göre özellikleri olmak üzere birçok

değişkenden etkilendiği için karmaşıktır. Bu karmaşıklık ve sulu karışım akışı teorileri ve modelleri ile ilgili belirsizlikler nedeniyle, farklı akış rejimlerinin tanımlanmasıyla sonuçlanan farklı partikül konsantrasyonu, boru yönleri ve çalışma koşullarına sahip sulu karışım akışı üzerinde önemli araştırmalar yapılmıştır [18].

Taşma kirliliği, yağışlı hava koşullarında birleşik kanalizasyonlarda yaygın olarak meydana gelen istenmeyen bir sorundur. Siltasyonu önlemek için kanalizasyonların yapısal optimizasyonu konusunda mevcut çalışmalar yetersizdir ve bu amaçla yumurta şeklindeki kanalizasyonlar üzerinde daha önce yapılan hiçbir çalışma tatmin edici bir çökeltme önleme performansını doğrulamamıştır [19].

DeneySEL araştırmaların yanı sıra, son yıllarda gaz-katı iki fazlı akışın bilgisayar simülasyonunda hızlı bir büyüme görülmüştür [20]. İki fazlı akışkan-parçacık (gaz-katı ve sıvı-katı dahil) süreçleri, incelenen istenen değişkenlere bağlı olarak farklı zaman ve uzunluk ölçeklerinde modellenenebilir. Genel olarak, parçacıklar ve akışkan sürekli yöntem (Eulerian; makroskopik seviye) veya ayrık yöntem (Lagrangian; mikroskopik seviye) ile simüle edilebilir [21]. Bununla birlikte, iki fazlı akış, iki faz arasındaki ara yüzeyde meydana gelen etkileşimler nedeniyle oldukça karmaşık bir davranış sergiler. Bu nedenle, iki fazlı akışı anlamak ve tahmin etmek için kapsamlı araştırmalar yapılmıştır [22].

Çalışmada kullanılan simcenter STAR-CCM⁺ çok fazlı akışı iki kategoriye ayırır; 1. Kabarcıklı, damlacıklı ve parçacıklı akışlar gibi dağılık akışlar, 2. Serbest yüzey akışları veya borulardaki halka şeklindeki film akışı gibi tabakalı akışlar [23]. Ayrıca, bu iki akış kategorisinin gereksinimlerini karşılamak için Lagrangian çok fazlı modeli, akışkan film modeli, ayrık eleman modeli (DEM), Akışkan Hacmi modeli (VOF) ve Eulerian çok fazlı modeli gibi çeşitli modeller sunulmaktadır [24].

Çalışmada yumurta kesit geometrisine sahip atıksu boru hattının hidrolik açıdan değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu kapsamda daha önce deneysel ve nümerik analiz çalışılan, Piccallo ve diğ. (2016) çalışmasındaki sayısal sonuçların, hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı olan Star CCM⁺ ile modellenerek doğrulanması yapılmıştır. Çalışmanın amacı, Star CCM⁺ programının hidrolik ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği alanlarında kullanımının yaygınlaşması için programın doğruluğunun ortaya konarak literatüre katkı sağlanmasıdır.

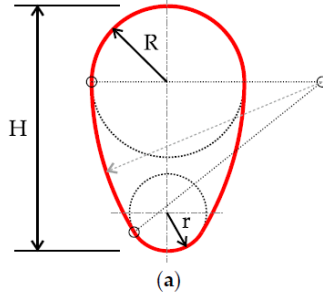
2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

Çalışma ile deneysel ve sayısal modelleme olarak daha önce yapılmış bir makalenin [1] Star CCM⁺ programı ile yeniden modellenerek hidrolik açıdan sonuçlarının karşılaştırılması ve doğruluğunun ortaya konması sağlanmıştır. Çalışmada yumurta kesitli boru hattı değerlendirilmiş ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile deneysel sonuçlar arasında karşılaştırma yapılmış olup,

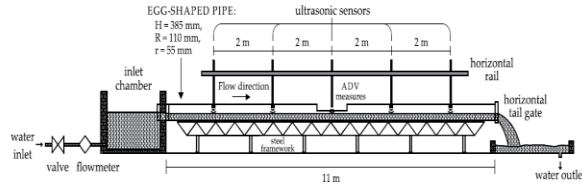
HAD programı olarak makalede [1] Ansys CFX kullanılmıştır.

2.1 Kesit Özellikleri ve Deney Düzeneği (Section Definition and experimental Setup)

Makalede [1] farklı yumurta kesitleri üzerinde değerlendirme yapılmış ve en uygun kesit olarak deneysel ekipmanlar (Şekil 1) $R = 110$ mm, $H = 385$ mm ve $r = 55$ mm olan 11 m uzunluğunda paslanmaz çelik yumurta şekilli bir borudan oluşmuştur. Deney, %0,2'lik bir eğimde uygulanmıştır (Şekil 2).



Şekil 1. Yumurta kesit özellikleri (Egg shaped sectional properties) [1]



Şekil 2. Fiziksel modelin şematik çizimi (Schematic drawing of the physical model)

2.2 HAD Modeli (CFD Models)

Sayısal analiz için seçilen yumurta kesit geometrisindeki atıksu borusunun davranışlarını analiz etmek için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği programı olan Star CCM+ kullanılmıştır.

HAD analiz programının temel denklemleri, sıkıştırılabilir akışkanlar esaslı Navier-Stokes denklemleridir. Bu program Navier-Stokes denklemlerini çözümlenmesinde, sıvı hareketini üç boyutlu olarak temsil etmekte ve simülasyon modelini kurmaktadır (1a, 1b, 1c)[25].

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho B_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (1a)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho B_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (1b)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho B_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (1c)$$

Borular gibi kapalı kanallarda akışı simüle etmek için, sıvı (su) ve gaz (hava) ara yüzü arasındaki etkileşimleri çözmek için iki fazlı bir model oluşturulmuştur. Her iki sıvı arasındaki arabirimi hesaplamak için Star CCM+, akışkan hacmi (VOF) modelinin hacmini kullanmaktadır. 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 [26;27].

VOF modelinde sıvı ve gaz fazları arasında ara yüzeyin ortaya konması için her k fazı için bir hacim oranı süreklilik denklemi çözülür [28].

$$\frac{\partial \epsilon_k}{\partial t} + u_i \frac{\partial \epsilon_k}{\partial x_i} = S_{\epsilon_k} \quad (2)$$

Denklemden sağ tarafta yer alan kaynak terimi için VOF modeli sıfırdır. Fakat bu terim kaviteasyon model için sıfır olmamaktadır. Birincil faz için hacim oranı denklemi çözümlenmemektedir. Bu sebeple hacim oranı denklem 2'de yer alan sınırlamaya göre hesaplanır.

$$\sum_{k=1}^n \epsilon_k = 1 \quad (3)$$

Denklemler 2 ve 3'teki; ϵ_k : k. fazın hacim oranı, u_i : hız vektörleri, x_i : yön vektörleri, S_{ϵ_k} : Kaynak terimi, n : akışkan sayısını vermektedir.

Çalışmada Manning denkleminden yararlanılmıştır (Denklemler 4).

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S_e^{1/2} \quad (4)$$

V_{ort} ortalama hız (m/s) değerlerine göre, R_h hidrolik yarıçap (m), S_e borunun eğimi (m / m) ve n Manning pürüzlülük katsayısıdır.

2.3 Sınır Koşulları ve Fizik modelleri (Boundary conditions and physical models)

Çalışmada belirlenen sınır koşulları deneysel verilerden [1] alınmıştır. Başlangıç koşulu olarak alınan hız değeri ortalama hızı ifade etmektedir. HAD programında kullanılan türbülans modeli k-ε (epsilon) seçilmiştir. Deney [1] başlangıç durumunda su ve hava fazları için su seviyeleri doluluk oranlarına göre alınmıştır. Kanallın girişinde, her bir fazın konumuna bağlı olarak deşarj ve su seviyesi sabit değerlere ayarlanmıştır. Kanal çıkışında da su seviyesi sabitlenmiştir. [1].

Çalışmada kullanılan fizik parametreleri olarak; Eulerian multiphase ile 2 fazlı akış tanımlanarak, volume fraction için su ve hava fazları seçilmiştir. Denklemlerin çözümü için, çözüm metodunda genel ağ içindeki bir hesaplama hacmini (bilinen sınır ve başlangıç parametrelerine sahip) ayrıklaştıran ayrık (segregated) metod kullanılmıştır. k-Epsilon türbülans modeli ile VOF modeli seçilmiştir ve HAD Parametreleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. HAD Parametreleri (HAD Parameters)

Fizik Modelleri	Çözümleyici Kriterleri
Turbulent	Implicit Unsteady (0.1s)
k- turbulence	
Segregated flow	
Volume of fluid	
Implicit unsteady	
Eulerian Multiphase	

Deneyisel çalışmanın katı modeli SolidWorks ile sonlu eleman ağı Star CCM⁺ ile oluşturulmuştur. Mesh çalışması için yüzeylerde minimum 1,5 cm, maksimum 4 cm'lik meshler oluşturularak ve kenar yüzeylerde yüzeyin tanımlanabilmesi amacıyla sınır tabakasında 5 sıra mesh yapılması ile düzgün olmayan yüzeylerde ise %10'a kadar mesh boyutlarının değiştirilebilmesi özellikleri seçilerek mesh işlemi gerçekleştirilmiştir. Mesh tipi hexahedra olup, deney düzeneğinde toplam 282.810 hücre, 828.384 yüzey oluşmuştur (Şekil 5).

**Şekil 3.** Mesh Modelleme (Mesh Modeling)

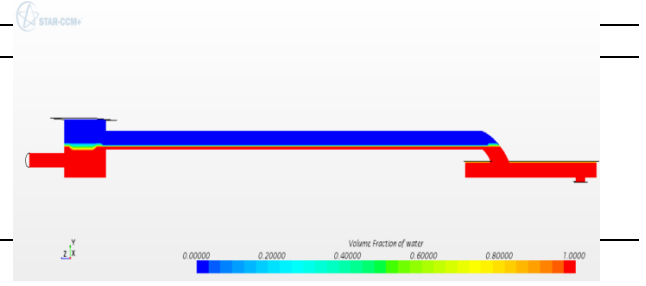
Ağdan bağımsızlık testi için kaba ve orta ağ seçenekleri çalışılmış olup, Tablo 2'de yer alan değerlerde önemli bir fark oluşmadığı gözlemlenmiştir. Orta mesh özelliği ile yumurta kesitin geometri şeklinin daha düzgün olduğu görülmüştür. Bu sebeple orta mesh değerleri kullanılmıştır.

Tablo 2. Ağdan bağımsızlık testi (Mesh independence test)

Ağ	Yüzey Sayısı	Orta kesit Maks. Hız (m/s)	Türbülans kinetik enerji m ² /s ²	Türbülans dağılım oranı m ² /s ³	Efektif viskozite kg/m-s
Kaba	184.717	0,496	6,70E-08	1,14E-10	0,194
Orta	828.384	0,500	6,61E-08	1,73E-10	0,226

Deneyisel çalışmanın Star CCM⁺'de modellemesi yapılarak başlangıç koşulları için farklı h su yüksekliklerine ait su yüzü belirlenmiştir. Şekil 4'te h/H:0,2 durumuna ait deneyisel çalışmanın sayısal modelleme başlangıç koşulu yer almaktadır.

Yumurta şeklindeki boru için çelik malzemesi kullanılmış olup, Manning katsayısı ($n = 0,012 \text{ s/m}^{1/3}$) ile kesit pürüzlülüğü belirlenmiştir. Ancak, sayısal modellemedeki pürüzlülük Manning-Strickler denklemi aracılığıyla n'nin bir fonksiyonu olarak tahmin edilebilen eşdeğer bir pürüzlülük (k_s) olarak tanımlanmıştır ($n = k_s^{1/6}/25$).

**Şekil 4.** Deneyisel modelin Star CCM+ başlangıç koşulu (h/H:0,2) (Star CCM+ initial condition of the experimental model h/H:0.2)

Bu denkleme göre, sayısal modeldeki eşdeğer pürüzlülük değeri $k_s = 0,729 \text{ mm}$ olarak belirlenmiştir [1]. Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde duvar sınır koşulları tanımlanırken “wall surface specification” yani duvar yüzeyi özellikleri “rough” yani pürüzlü olarak tanımlanmaktadır. Bu durumda manning pürüzlülük değeri girilebilir ve sınır koşullarında pürüzlülük tanımlanabilir hale gelmektedir. HAD programlarında k_s eşdeğer pürüzlülük yüksekliği olarak programa giriş yapılmıştır. Star CCM⁺ çalışmasında da eşdeğer pürüzlülük değeri $k_s = 0,729 \text{ mm}$ olarak tanımlanmıştır.

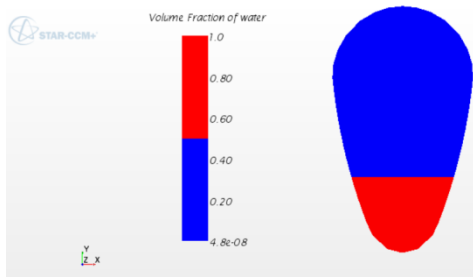
3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Deneyisel çalışmada [1], 3,20 ila 19,03 L/s arasında değişen deşarjlar kullanılmış ve bu da farklı su derinlikleri ile Reynolds sayıları oluşturmuştur. Deneyisel verilerden, toplam kesme gerilmesi $\tau = \rho U_{av}^2$ denklemi ile ortalama sürtünme hızı U_{av} 'nın bir fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Burada ρ , akış yoğunluğu (kg/m^3) olup, ortalama sürtünme hızı, $U_{av} = (g R_h S)^{1/2}$ olarak hesaplanmış, S boru eğimi (%), hidrolik yarıçap (R_h) ve (g) yerçekimi ivmesi (m/s^2)'dir. Makalede [1] farklı deşarj değerlerine göre yapılan hesaplamalar Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Deneyisel parametreler: deşarj Q (L/s), ortalama hız U_{av} (m/s), doluluk oranı h/H (boyutsuz), hidrolik yarıçap R_h (m), Reynolds. Deneyisel metodolojiden elde edilen toplam kayma gerilmesi sonuçları ve HAD kayma gerilmesi modelleme çıktısı (N/m^2) (bağıl olarak hatalar parantez içindedir) (Experimental parameters: discharge Q (L/s), mean velocity U_{av} (m/s), fill rate h/H (dimensionless), hydraulic radius R_h (m), Reynolds. Total shear stress results from experimental methodology and CFD shear stress modeling output (N/m^2) (relative errors in parentheses))

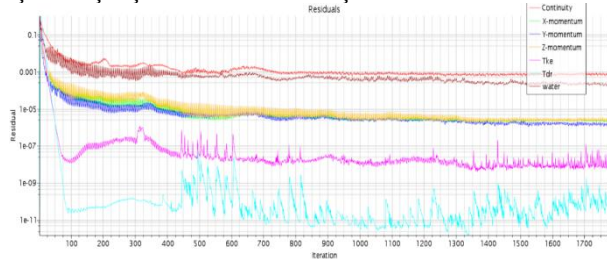
Te st	Deneyisel Şartlar						(AnsysCFX)HAD Model	
	Q (L/s)	U_{av} (m/s)	h/H (-)	R_h (m)	Re(x) 10 ³	$\tau = \rho U_{av}^2$ (N/m ²)	$\tau = \tau_{HAD}$ (N/m ²)	
1	3,2	0,41	0,2	0,034	5,7	0,684	0,664	(-2,9%)
2	7,04	0,528	0,3	0,046	9,5	0,883	0,964	(9,20%)
3	13,08	0,582	0,4	0,057	13,3	1,121	1,159	(3,40%)
4	19,03	0,658	0,5	0,064	16,8	1,254	1,374	(9,60%)

Çalışmada makaleden [1] elde edilen değerlerin doğrulanması amaçlandığı için deney düzeneği Star CCM⁺ programında simüle edilerek yapılmıştır. Star CCM⁺ programında 2 fazlı (su+hava) (Şekil 5), VOF modeli ve türbülanslı model seçilmiştir. İşletme çalışması için seçilen türbülans modeli RANS (Reynolds averaged Navier–Stokes) ve k-ε (epsilon)'dur. Gimbun ve ark. (2005), HAD Fluent yazılımını kullanarak basınç düşümü, giriş hızı ve sıcaklığın etkilerini nümerik olarak inceleyerek, farklı türbülans modellerini yaparak deneysel datalar ile karşılaştırmıştır. Zaman ve kolaylık açısından en uygun türbülans modelinin k-ε modeli olduğunu belirtmişlerdir. [29] Cinosi vd., [30] Star CCM⁺ ile yaptığı nümerik çalışmada da türbülanslı akış için k-ε ve RANS modelini kullanmıştır.



Şekil 5. Yumurta kesit su ve hava faz gösterimi (Egg shaped sectional water and air phase representation)

Yapılan işletme çalışması sonucunda, yinelemeli çözümlerde, çözülen her denklem için normalleştirilmiş artıklarda en az 10^{-3} düzeyinde yakınsama sağlanmalıdır [31]. İşletme çalışmasında, her durum için 1.760 iterasyon yapılmış ve yakınsama değerleri süreklilik denkleminde 10^{-3} değerine ulaşmış olduğundan (Şekil 6) işletme çalışması sonlandırılmıştır.



Şekil 6. Star CCM⁺ yakınsama değerleri (Star CCM⁺ convergence values)

Star CCM⁺ çalışmasında yumurta kesit deney düzeneğinde kullanılan H:385 mm ve R:110 mm boyutları ile kayma gerilmesi değerlerini hesaplamak için ortalama sürtünme hızı, $U_{av}^* = (gR_h S)^{1/2}$ kullanılmıştır. Star CCM⁺ işletme çalışmasına göre oluşan hız ve kayma gerilmesi değerleri Tablo 4'te verilmiştir.

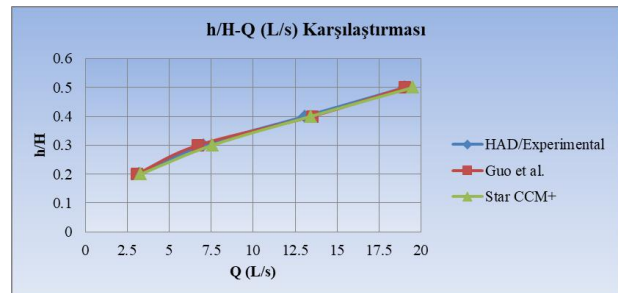
Tablo 4. Star CCM⁺ yazılımı işletme değerleri ile deneysel metodolojiden elde edilen sonuçların bağıl olarak hataları (bağıl hatalar parantez içindedir) (Relative errors of the Star CCM⁺ software operating values and the results obtained from the experimental methodology) (relative errors in parentheses)

Star CCM ⁺						
Test	Q(L/s)	U _{av} (m/s)	h/H (-)	R _h (m)	Re(x10 ³)	τ _{STAR} (N/m ²)
1	3,30	0,423 (%3,1)	0,2	0,03	5,63 (- 4 1,2%)	0,666 (- 2,6%)
2	7,56	0,567 (%7,4)	0,3	0,04 6	10,15 (6,8%)	0,896 (1,5%)
3	13,4 2	0,597 (%2,6)	0,4	0,05 9	13,72 (3,2%)	1,149 (2,5%)
4	19,5 2	0,675 (%2,6)	0,5	0,06 4	16,96 (0,9%)	1,257 (0,2%)

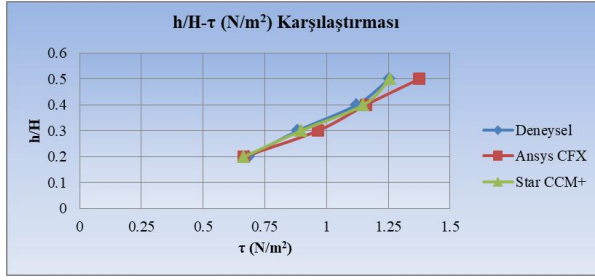
Picallo ve diğ. (2016), HAD model çıktılarını, kesit hız dağılımı için Guo ve arkadaşlarının [32] formülasyonu ile karşılaştırılmıştır. Guo ve arkadaşları [32] konik açık kanallar için herhangi bir parametre uydurmadan basit bir hız dağılım modeli önermiştir [1]. Bu çalışma ile HAD (Ansys CFX) ve Star CCM⁺ ile karşılaştırma yapılmış olup, farklı h/H yüksekliklerine göre Q (L/s) deşarjları Tablo 5'te, karşılaştırma grafiği Şekil 7'de yer almaktadır. Hesaplanan kayma gerilmelerine göre h/H değerlerine göre Kayma Gerilmeleri τ (N/m²) karşılaştırması Şekil 8'de verilmiştir.

Tablo 5. Makaledeki [1] HAD/Deneysel/Star CCM⁺ deşarjların Guo ve ark. formülünden [32] elde edilen değerlerle karşılaştırılması (Göreceli hatalar parantez içinde verilmiştir) (Comparison of CFD/Experimental/Star CCM⁺ discharges from the article with values obtained from Guo et al. formula [32]) (Relative errors in parentheses)

Q (L/s)	h/H=0,2	h/H=0,3	h/H=0,4	h/H=0,5
HAD/Experimental	3,2	7,04	13,08	19,03
Guo et al. [30]	3,06 (- 4,4%)	6,72 (- 4,5%)	13,51 (3,3%)	19,02 (- 0,1%)
Star CCM⁺	3,30 (3,0%)	7,56 (6,9%)	13,42 (2,5%)	19,52 (2,5%)

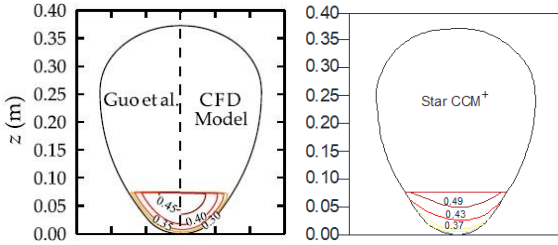


Şekil 7. h/H = 0,2, 0,3, 0,4 ve 0,5 doluluk oranlarına göre Deneysel/Guo et al./Sayısal modelleme Deşarj Q (L/s) karşılaştırması (Experimental/Guo et al./Numerical modeling Discharge Q (L/s) comparison for h/H = 0.2, 0.3, 0.4 and 0.5 occupancy rates)



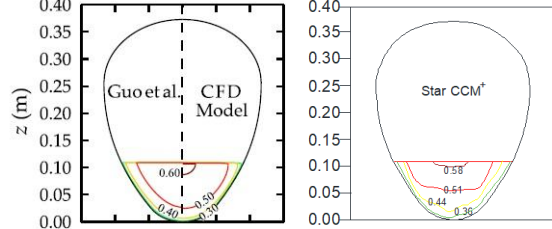
Şekil 8. $h/H = 0,2, 0,3, 0,4$ ve $0,5$ doluluk oranlarına göre Deneyisel/Ansys CFX/Star CCM+ Kayma Gerilmesi τ (N/m²) karşılaştırması (Experimental/Ansys CFX/Star CCM+ Shear Stress τ (N/m²) comparison for $h/H = 0,2, 0,3, 0,4$ and $0,5$ occupancy ratios)

Picallo ve diğ. (2016) çalışmasındaki hız dağılımları karşılaştırmasına ek Star CCM⁺ işletme çalışması sonuçlarına ait hız dağılımları 4 farklı duruma göre Şekil 9, Şekil 10, Şekil 11 ve Şekil 12’de yer almaktadır.



Şekil 9. Hız dağılımlarının (m/s) ve $h/H = 0,2$ için karşılaştırılması. Soldaki veriler makaleden [1] ve sağdaki veriler sayısal modelden alınmıştır. (Comparison of velocity distributions (m/s) and for $h/H = 0,2$. Data on the left are from the paper and data on the right are from the numerical model).

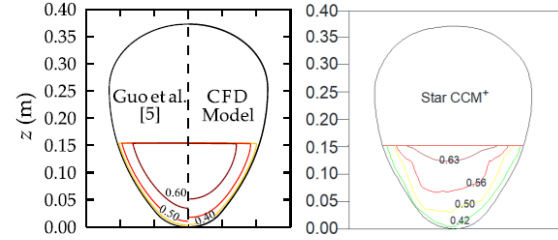
$h/H=0,20$ ’ye göre deneysel çalışma verileri için maksimum hız $0,45$ m/s, Star CCM⁺ verileri için $0,49$ m/s olup (Şekil 9), $\pm 8,8$ civarında fark ortaya çıkmıştır. Boru hattındaki deşarj farkları incelendiğinde (Tablo 5) ise ± 3 farkın olduğu görülmüştür. Kayma gerilmelerine göre (Tablo 4) $\pm 2,6$ ’lık ve Reynolds sayılarında ise $\pm 1,23$ fark meydana gelmiştir.



Şekil 10. Hız dağılımlarının (m/s) ve $h/H = 0,3$ için karşılaştırılması. Soldaki veriler makaleden [1] ve sağdaki veriler sayısal modelden alınmıştır. (Comparison of velocity distributions (m/s) and for $h/H = 0,3$. Data on the left are from the paper and data on the right are from the numerical model).

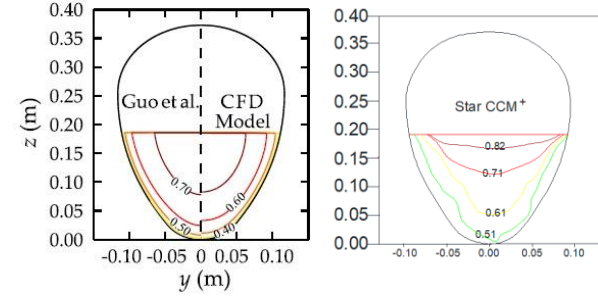
$h/H=0,30$ ’a göre deneysel çalışma verileri için maksimum hız $0,60$ m/s, Star CCM⁺ verileri için $0,58$ m/s olup (Şekil 10), $\pm 3,4$ civarında fark ortaya çıkmıştır.

Boru hattındaki deşarj farkları incelendiğinde (Tablo 5) ise $\pm 6,9$ farkın olduğu görülmüştür. Kayma gerilmelerine göre (Tablo 4) $\pm 1,5$ ’lik ve Reynolds sayılarında ise $\pm 6,84$ fark meydana gelmiştir.



Şekil 11. Hız dağılımlarının (m/s) ve $h/H = 0,4$ için karşılaştırılması. Soldaki veriler makaleden [1] ve sağdaki veriler sayısal modelden alınmıştır. (Comparison of velocity distributions (m/s) and for $h/H = 0,4$. Data on the left are from the paper and data on the right are from the numerical model).

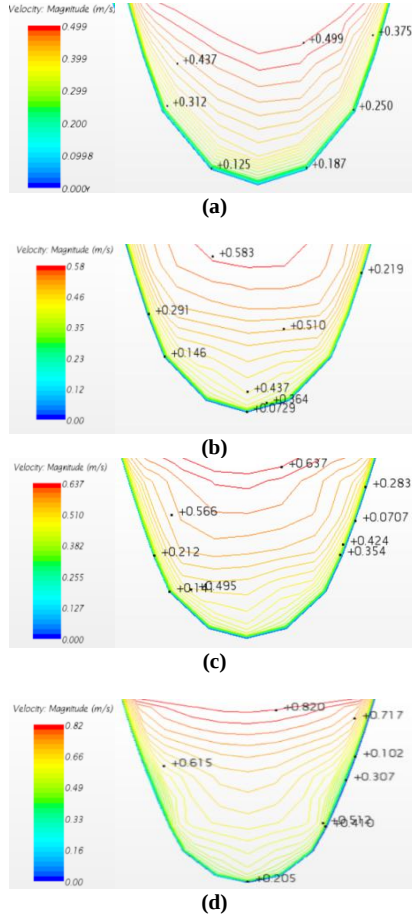
$h/H=0,40$ ’a göre deneysel çalışma verileri için maksimum hız $0,60$ m/s, Star CCM⁺ verileri için $0,63$ m/s olup (Şekil 11), ± 5 civarında fark ortaya çıkmıştır. Boru hattındaki deşarj farkları incelendiğinde (Tablo 5) ise $\pm 2,5$ farkın olduğu görülmüştür. Kayma gerilmelerine göre (Tablo 4) $\pm 2,5$ ’lik ve Reynolds sayılarında ise $\pm 3,16$ fark meydana gelmiştir.



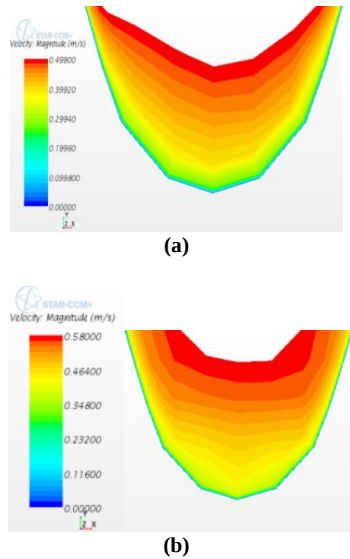
Şekil 12. Hız dağılımlarının (m/s) ve $h/H = 0,5$ için karşılaştırılması. Soldaki veriler makaleden [1] ve sağdaki veriler sayısal modelden alınmıştır. (Comparison of velocity distributions (m/s) and for $h/H = 0,5$. Data on the left are from the paper and data on the right are from the numerical model).

$h/H=0,50$ ’ye göre deneysel çalışma verileri için maksimum hız $0,70$ m/s, Star CCM⁺ verileri için $0,82$ m/s olup (Şekil 12), ± 17 civarında fark ortaya çıkmıştır. Boru hattındaki deşarj farkları incelendiğinde (Tablo 5) ise $\pm 2,5$ farkın olduğu görülmüştür. Kayma gerilmelerine göre (Tablo 4) $\pm 0,2$ ’lik ve Reynolds sayılarında ise $\pm 0,95$ fark meydana gelmiştir.

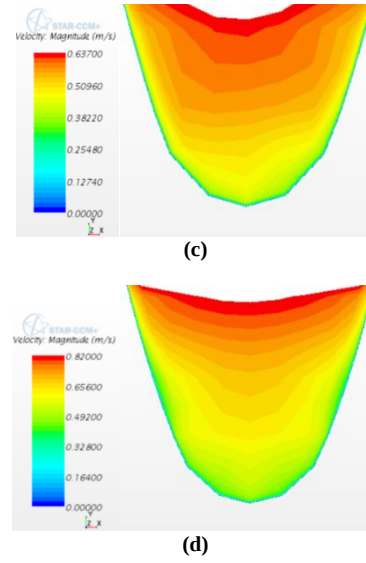
Star CCM⁺ çalışması sonuçlarına göre programdan alınan detaylı hız dağılımlarının line görünümü Şekil 13’de, contour görünümü ise Şekil 14’de yer almaktadır.



Şekil 13. Star CCM+ orta kesatine ait hız profillerinin line hız dağılımları (m/s) ve $h/H = 0,2$ (a); $0,3$ (b); $0,4$ (c); $0,5$ (d) karşılaştırması (Comparison of line velocity distributions (m/s) and $h/H = 0.2$ (a); 0.3 (b); 0.4 (c); 0.5 (d) of velocity profiles of Star CCM+ center section)

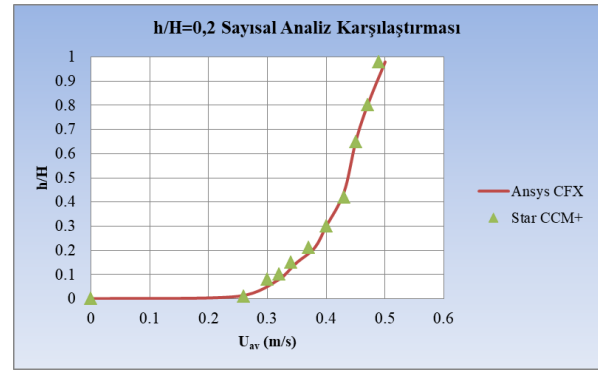


Şekil 14. Star CCM+ orta kesatine ait hız profillerinin contour görünümleri (m/s) ve $h/H = 0,2$ (a); $0,3$ (b); $0,4$ (c); $0,5$ (d) karşılaştırması (Contour views of velocity profiles (m/s) of Star CCM+ center section and comparison of $h/H = 0.2$ (a); 0.3 (b); 0.4 (c); 0.5 (d))

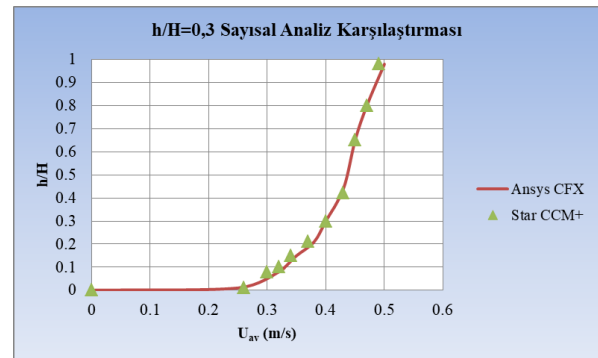


Şekil 14. (Devam). Star CCM+ orta kesatine ait hız profillerinin contour görünümleri (m/s) ve $h/H = 0,2$ (a); $0,3$ (b); $0,4$ (c); $0,5$ (d) karşılaştırması (Contour views of velocity profiles (m/s) of Star CCM+ center section and comparison of $h/H = 0.2$ (a); 0.3 (b); 0.4 (c); 0.5 (d))

Picallo ve diğ. (2016) çalışmasındaki Ansys CFX programı ile yapılan sayısal analiz sonuçları ile Star CCM+ sonuçlarının karşılaştırılması amacıyla $h/H: 0,2$ ile $h/H: 0,3$ doluluk oranlarına göre U_{av} hız değerlerine ait sayısal performansları mukayese edilmiş olup, Şekil 15 ve Şekil 16'da yer almaktadır.



Şekil 15. $h/H:0,2$ sayısal analiz sonuçları karşılaştırması ($h/H:0.2$ numerical analysis results comparison)



Şekil 16. $h/H:0,3$ sayısal analiz sonuçları karşılaştırması ($h/H:0.3$ numerical analysis results comparison)

Şekil 15 ve Şekil 16'ya göre Ansys CFX /Star CCM⁺ h/H verilerinin birbiri ile oldukça uyumlu olduğu görülmüştür.

Çalışmada makale [1] verilerinden yararlanılarak deneysel ve sayısal analiz sonuçlarına göre ortaya konan karşılaştırma verileri deşarj, hız profilleri ve kayma gerilmeleri üzerinden yapılmıştır. Böylece farklı su yüksekliklerine göre değerlendirme sonuçları ortaya konmuştur.

$h/H = 0,2, 0,3, 0,4$ ve $0,5$ doluluk oranlarına göre Deneysel/Guo et al./Sayısal modelleme Deşarj Q (L/s) karşılaştırması (Şekil 7) ve Deneysel/Ansys CFX/Star CCM⁺ Kayma Gerilmesi τ (N/m²) karşılaştırması (Şekil 8) grafikleri incelendiğinde, Star CCM⁺ verilerinin hem deneysel hem de Ansys CFX sonuçları ile tutarlı bir grafik oluşturduğu görülmüştür. Şekil 9, Şekil 10, Şekil 11 ve Şekil 12'de yer alan kesit hız dağılımları incelendiğinde de Star CCM⁺ hız dağılımlarının da hem deneysel hem de Ansys CFX hız dağılımlarında da uyumlu olduğu görülmektedir.

4. SONUÇ (RESULT)

HAD yazılımı olan Star CCM⁺ ile birçok alanda çalışmalar yapılabilmektedir. Bu çalışmalar kapsamında deneysel verilerin doğrulanması amacıyla ortaya konan analizlerde HAD yazılımlarının sonuçları tatmin edici niteliktedir.

Agbodomegba ve diğ., (2015), Star CCM⁺ yazılımı ile yürüttükleri çalışmada, sayısal simülasyon sonuçlarını deneysel verilerle karşılaştırarak, yazılımda kullanılan modellerin ortalama akış parametrelerini başarıyla tahmin ettiğini göstermiştir. Bu durum, söz konusu ticari yazılımın fiziksel problemleri analiz etmek için güvenilir bir araç olduğunu ortaya koymaktadır [33]. Benzer şekilde, egzoz manifoldlarının termal gerilim analizlerinde yaygın olarak kullanılan HAD ve FEM yöntemleriyle elde edilen modellerin doğruluğu da zamanla artmakta ve bu yöntemlerin güvenilirliğini güçlendirmektedir [34];[35,36].

Pawińska (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Simcenter Star CCM⁺ ile elde edilen sonuçların deneysel verilerle yüksek uyum göstermesi, yazılımda kullanılan modelin doğruluğunu ortaya koymuştur. Bu doğrulama, farklı akışkanlar içeren ileri çalışmalar için deneysel ihtiyacı azaltarak, sayısal simülasyonlara öncelik verilmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca, hem kararlı hem de zamana bağlı akış problemleri için HAD yazılımlarının etkin şekilde kullanılacağı ifade edilmektedir [37].

Tüm bu çalışmalar, sonlu hacimler yöntemini kullanan Star CCM⁺ yazılımının, sayısal model doğruluğu açısından güvenilirliğini literatür genelinde teyit etmektedir.

Picallo ve diğ. (2016), "Experimental and Numerical Analysis of Egg-Shaped Sewer Pipes Flow Performance" makalesinde yumurta kesitli atıksu boru hattı için deneysel ve Ansys CFX sayısal modelleme kıyaslaması yaparak, her iki veri sonuçlarının birbiri ile uyumlu olduğunu belirtmiştir. Aynı zamanda, düşük akış

koşullarında kirliliğin boruların dibinde çökelme oluşturduğu için, yumurta şeklindeki boruların katı maddelerin taşınmasını iyileştireceğini belirtilmiştir. Bunu sebebinin ise kuru hava akış koşullarında standart dairesel borulardan daha düşük bir hidrolik yarıçap olduğunu savunmuştur. Böylece yumurta şekilli boruların birleşik kanalizasyon sistemlerinin tasarımı için geleneksel dairesel borularla rekabet edebileceğini belirtmiştir. Ayrıca sayısal model ile deneysel sonuçları karşılaştırmak için hız profilleri ve kayma gerilmesini kullanmış ve sayısal hız dağılımları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve iyi bir uyum elde edilmiştir.

Star CCM⁺ yazılımı ile deneysel verilerden elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde çeşitli hata oranları olduğu görülmektedir. Bu durum deneysel çalışma sonuçları ile tatmin edici düzeyde olsa da bu hata oranlarının deneysel çalışmanın fiziki şartlarının (ortam ve su sıcaklığı gibi) yazılımda benzer olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Farklı fizik parametreleri olan yoğunluk ve dinamik viskozite değerleri birtakım hata paylarının oluşmasına neden olmaktadır. Star CCM⁺ yazılımı benzer diğer yazılımlara göre mesh hazırlama ve fizik şartları tanımlama açısından daha belirleyici özelliktedir. Bu sebeple farklı mühendislik alanlarına hizmet verebilecek niteliktedir. Yazılım modellemesinde problemin sınır şartlarının (inlet, outlet, wall gibi) doğru belirlenmesi, simülasyonun tanımlanmasında kritik rol oynamaktadır. Aynı zamanda mesh oluşturma ve mesh bağımsızlık testi yapılarak belirlenen ağ özelliklerinin doğruluğu ortaya konmuştur.

Çalışma sonucunda, belirlenen akış performans değerleri olan, deşarjlar, hız değerleri, reynolds sayıları, kayma gerilmeleri ve boru hattı orta kesit hız dağılımları makale [1] verileri (deneysel ve Ansys CFX) ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçlarına göre Star CCM⁺ yazılımında; $h/H=0,20$ 'de maksimum hızda %8,80, ortalama hız ile deşarjda %3,10 ve kayma gerilmesinde -%2,60'lık fark görülmüştür. $h/H=0,30$ 'da maksimum hızda -%3,40, ortalama hız ile deşarjda %7,40 ve kayma gerilmesinde %1,50'lik fark oluşmuştur. $h/H=0,40$ 'da maksimum hızda %5,00 fark, ortalama hız ile deşarjda %2,60 ve kayma gerilmesinde %2,50'lik fark meydana gelmiştir. $h/H=0,50$ 'de ise maksimum hızda %17,00 fark, ortalama hız ile deşarjda %2,60 fark ve kayma gerilmesinde %0,20'lik fark oluşmuştur. Bu değerlendirmelere göre, makale verilerindeki akış performans değerleri ile Star CCM⁺ sonuçları uyumluluk göstermiştir. Bu durum pek çok kez deneysel düzeneğin oluşturulmasının imkan vermediği durumlarda sayısal modelleme olan Star CCM⁺ programı ile uygun modelleme kriterleri doğrultusunda çalışılabileceğini göstermektedir. Programın farklı disiplinlerde kullanılabilir olması da birçok alanda çalışma yapılabilmesine olanak sağlamaktadır.

Star CCM⁺ programı farklı mühendislik problemlerinin çözümünde kullanılabilir olması sebebiyle multi disiplinler bir çalışma alanına sahiptir. Özellikle dinamik akışkan problemlerinde deneysel imkanların olmadığı ya da kısıtlı olduğu durumlarda problemi simüle ederek

deney düzeneğinin dijital ikizi niteliğinde çalışma yapılmasına imkan verecektir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Esin ACAR: Sayısal modelleme yapmış ve sonuçlarını analiz etmiş, makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKÇA

- [1] Regueiro-Picallo, M., Naves, J., Anta, J., Puertas, J. and Suárez, J., "Experimental and Numerical Analysis of Egg-Shaped Sewer Pipes Flow Performance", *Water*, 8:1-9, (2016).
- [2] Li, Z., Liu, S., Zhang, Q., Zhang, Z., "Analytical buckling scheme of a functionally graded porous liner reinforced by nanocomposites encased in an egg-shaped pipe", *Engineering Structures*, 310: 1-11, (2024).
- [3] Boot J.C., Naqvi M.M., Gumbel J.E., "A new method for the structural design of flexible liners for gravity pipes of egg-shaped cross section: theoretical considerations and formulation of the problem" *Thin Walled Structures*, 85:411-418, (2014).
- [4] Bonakdari, H., Larrarte, F., "Experimental and numerical investigation on self-cleansing and shear stress in sewers", *Sewer Operation and Maintenance conference*, Wien, Austria, (2006).
- [5] Ashley R. M., Bertrand-Krajewski J. L., Hvitved-Jacobsen T. and Verbanck M., "Solid in sewers", *IWA Publishing*, London, (2004).
- [6] Alfadhli, I., Yang, S. and Sivakumar, M., (2013). "Velocity distribution in non-uniform/unsteady flows and the validity of log law", *SGEM 2013: 13th International Multidisciplinary Scientific Geoconference*, Bulgaria, 425-432, (2013).
- [7] Girolami, L., Sherwood, J. D. and Charru, F., "Dynamics of a slowly-varying sand bed in a circular pipe", *International Journal of Multiphase Flow*, 81:113- 129, (2016).
- [8] Turian, R.M. , Hsu, F.L. , Ma, T.W., "Estimation of the critical velocity in pipeline flow of slurries", *Powder Technology*, 51: 35–47, (1987).
- [9] Zemlyanaya, N.V., Gulyakin, A.V., "Analysis of Causes of Non-Uniform Flow Distribution in Manifold Systems with Variable Flow Rate along Length", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Chelyabinsk, Russian Federation, (2017).
- [10] Zeghadnia, L., Djemili, L., Houichi, L., "Analytic Solution for The computation of Flow Velocity and Water Surface Angle for drainage and Sewer networks: Case of Pipes arranged in series", *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 4:58-67, (2014).
- [11] Chow V.T, "Open channel hydraulics", *Mc Graw-Hill College*, New York, (1959).
- [12] Henderson F.M., "Open Channel Flow", *Macmillan Books*, New York, (1966).
- [13] Metcalf and Eddy, Tchobanoglou G., "Wastewater engineering: collection and pumping of Wastewater", *McGraw-Hill College*, New York (1981).
- [14] Ji, H.Y., Yoo, S.S., Koo, D.D., and Kang, J.H., "Analysis of the flow performance of the complex cross-section module to reduce the sedimentation in a combined sewer pipe", *Water*, 12:1-13 (2020).
- [15] Carlier, M., Gaston, R., "Hydraulique générale et appliquée", *Eyrolles*, Paris,(1980).
- [16] Hager, W.H., "Wastewater hydraulics theory and practice", Springer Science and Business Media, *New York*, (2010).
- [17] Polanský, J., "Experimental investigation of slurry flow", *University of Leeds*, https://home.zcu.cz/~rcermak/opvk_htt/VY_02_05.pdf [Erişim: Şubat, 2025], 2014.
- [18] Kim, C., Lee, M., Han, C., "Hydraulic transport of sand-water mixtures in pipelines Part I. Experiment", *Journal of Mechanical Science and Technology*, 22: 2534-2541, (2008).
- [19] Wu, H., Huang, Y., Chen, L., Zhu, Y., Li, H., "Shape optimization of egg-shaped sewer pipes based on the nondominated sorting genetic algorithm (NSGA-II)", *Environmental Research*, 204: 1–10, (2022).
- [20] Yang, N., Wang, W., Ge, W., Li, J., "CFD simulation of concurrent-up gas–solid flow in circulating fluidized beds with structure-dependent drag coefficient", *Chemical Engineering Journal*, 96: 71–80, (2003).
- [21] Ranjbari, P., Ebrahimi, M., Ein-Mozaffari, F., Upreti, S., Lohi, A., "A critical review of the coupled CFD–DEM method for the simulation of two-phase liquid–solid systems", *Powder Technology*, 454: 1-28, (2025).
- [22] Bak, j., Doan, M.L., Park, S., Jeong, J.J., Yun, B., "Local two-group bubble size model for adiabatic air–water flow in a large diameter pipe using CFD code", *Case Studies in Thermal Engineering*, Volume 64: 1-17, (2024).
- [23] Ding, W., Chen, R., Tian, W., Qiu, S., Su, G.H., "Numerical investigation of dynamic characteristics of debris bed formation based on CFD-DEM method", *Annals of Nuclear Energy*, 180: 1-10, (2023).
- [24] Eom, J.H., Ra, I.S., Tak, G.Y., Tiep, N.H., Jeong, H.Y., Jung, J.H., An, S.M., "STAR-CCM+ simulation of debris bed formation in the unheated DEFCON-S experiment", *Annals of Nuclear Energy*, 206: 1-8, (2024).
- [25] Okay, G., "Utilization of CFD tools in the design process of a Francis turbine", *Yüksek Lisans Tezi*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2010).
- [26] Taşar, B., Üneş, F., Gemici, E., Varçin, H., "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, (2021).

- [27] Özdemir, Y.C., “Farklı Açılardaki Batık Kanat Yapılarının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile İncelenmesi”, **Yüksek Lisans Tezi**, İskenderun Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2023).
- [28] Aydın, M.C., “Alttan alıslı dolusavak havalandırıcıların CFD analizi”, **Doktora Tezi**, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2005).
- [29] Gimbut J., Chuah T. G., Fakhrul-Razi A., Choong, T. S. Y., “The influence of temperature and inlet velocity on cyclone pressure drop: a CFD study”, **Chemical Engineering and Processing**, 44, 7-12, (2005).
- [30] Cici İ., Dursun Ö. F., “Sayısal Model Yardımıyla Farklı Havalandırıcı Tiplerin Venturi Havalandırma Performansı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi”, **EL-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi**, 9: 96-112, (2022).
- [31] Cinosi, N., Walker, S.P., Bluck, M.J., Issa, R., “CFD simulation of turbulent flow in a rod bundle with spacer grids (MATIS-H) using STAR-CCM+”, **Nuclear Engineering and Design**, 279: 37-49, (2014).
- [32] Guo, J.; Mohebbi, A.; Zhai, Y.; Clark, S.P., “Turbulent velocity distribution with dip phenomenon in conic open channels”, **Journal Hydraulic Research**, 53: 73-82, (2015).
- [33] Agbodemegbea, V.Y., Chenga, X., Akaho, E.H.K., Allote F.K.A., “Correlation for cross-flow resistance coefficient using STAR-CCM+ simulation data for flow of water through rod bundle supported by spacer grid with split-type mixing vane”, **Nuclear Engineering and Design**, 285: 134-149, (2015).
- [34] Yi, L., Gang, W., Pan, N., Wang, W., Mo, S., “Fluid-Structure Coupled Analysis of the Transient Thermal Stress in an Exhaust Manifold, Fluid Dynamics and Materials Processing”, **Fluid Dynamics and Materials Processing**, 19: 2777-2790, (2023).
- [35] Sugiyama, K., Ii, S., Takeuchi, S., Takagi, S., Matsumoto, Y., “A full Eulerian finite difference approach for solving fluid-structure coupling problems”, **Journal of Computational Physics**, 230: 596-627, (2011).
- [36] Li, B., Cui, Y., Fu, Y., Deng, K., Tian, Y., “Marine diesel exhaust manifold failure and life prediction under high-temperature vibration, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers”, **Journal of Mechanical Engineering Science**, 236: 6180-6191, (2022).
- [37] Pawińska, A., Piasecki, A., Dadas, N., Hożejowska, S., Piasecka, M., “Homotopy Perturbation Method with Trefftz Functions and Simcenter STAR-CCM+ used for the Analysis of Flow Boiling Heat Transfer”, **Acta Mechanica et Automatica**, 18: 233-243, (2024).