ARAŞTIRMA MAKALESİ

Kelebek Vana Karakteristik Eğrilerinin Açık Kaynaklı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği İle Belirlenmesi

Tarcan ÖRNEK

Otomotiv Müh.
EYS Endüstri Makina
Aydın
tornek@e-y-s.com
orcid: 0009-0006-3017-2059

Erdem KAYA

Yük. Mak. Müh.
Diferans Mühendislik ve Simulasyon
İzmir
erdem.kaya@diferans.com
orcid: 0000-0002-8268-2484

Utku ŞENTÜRK

Doç. Dr.
Ege Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Makine Mühendisliği
İzmir
utku.senturk@ege.edu.tr
orcid: 0000-0002-4434-5196

ÖZ

Kesme veya kısılma görevinde görece daha düşük basınç düşüşü beklenen kelebek vanalardan talep edilen hassasiyet yüksektir. Performans iyileştirilmesinde etken faktör ise vana içerisindeki akış fiziğinin daha iyi anlaşılmasıdır. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği araçları bir vana etrafındaki akışları gözlemlemek ve bir vananın performansını tahmin etmeyi mümkün kılmaktadır. Son yıllarda, yüksek lisanslama maliyetlerine sahip ticari yazılımlara alternatif olarak açık kaynaklı ve lisans ücreti gerektirmeyen yazılımlar dikkat çekmektedir. Sonlu hacimler yöntemine dayalı ve endüstriyel problemlerin akış simülasyonları için uygun açık kaynaklı çözücülerden biri olan OpenFOAM'un vana uygulamalarındaki kabilliyetlerinin ortaya koyulması bu noktada önem arz etmektedir. Bu çalışmada, bir kelebek vananın hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri OpenFOAM ile gerçekleştirilmiş ve vana performans eğrileri ile akış fiziğine dair detaylı ard-işlem bulguları elde edilmiştir. Bunlar ile aynı problemin ticari yazılımlara dayalı çözümleri karşılaştırıldığında eşdeğer sonuçlara ulaşıldığı görülmektedir. Farklı akış fiziklerini çözümleme kabililyeti, açık kaynaklı yapısından dolayı geliştirilebilir olması ve şüphesiz lisanslama ücreti gerektirmemesi OpenFOAM'u vana geliştiricileri için yüksek önem derecesine ulaştırmaktadır.

Anahtar Kelimeler

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, OpenFOAM, Vana, Kelebek Vana.

Determination of Butterfly Valve Characteristic Curves with Open-Source Computational Fluid Dynamics

ABSTRACT

The precision required for butterfly valves that need low pressure drops in cut-off or throttling is high. A better understanding of the flow dynamics inside the valve is crucial for improving performance. Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations can provide insight into the flow patterns around the valve and predict its performance. In recent years, open-source CFD software, such as OpenFOAM, has gained popularity due to the absence of licensing fees compared to commercial software. OpenFOAM, a finite volume method-based open-source solver, is suitable for simulating industrial flow problems and has been evaluated for its potential in valve applications. This study performed CFD simulations of a butterfly valve using OpenFOAM and analyzed the results to obtain performance curves and flow physics insights. The findings showed that OpenFOAM can produce equivalent results compared to commercial software simulations of the same problem. The ability to simulate different flow physics, the flexibility for development due to its open-source structure, and the absence of licensing fees make OpenFOAM an attractive option for valve developers.

Keywords

Computational Fluid Dynamics, OpenFOAM, Valve, Butterfly Valve.

Geliş Tarihi : 27.01.2023
Kabul Tarihi : 03.06.2023

Örnek, T., Kaya, E., Şentürk, U., Kelebek Vana Karakteristik Eğrilerinin Açık Kaynaklı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği İle Belirlenmesi, Tesisat Mühendisliği Dergisi, sayı: 196, sf. 20-28, Mayıs-Haziran 2023.

1. GİRİŞ

Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte test ve ölçüm ekipmanlarına erişimin kolaylaşması zorlu mühendislik problemlerinin daha ayrıntılı incelenmesine imkan vermiştir. Akışkan hareketini tanımlayan temel denklemlerin, sayısal yöntemlere dayalı çözümlerinin elde edilmesini sağlayan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), vana tasarım süreçlerinde önemli rol oynamaktadır. Kısa zamanda bir çok sanal prototipin oluşturulması ve yüksek doğrulukla test edilmesini sağlayan HAD yöntemi pratikliğin esas olduğu günümüzde vana tasarımcıları için vazgeçilmezdir.

OpenFOAM (Open Source Field Operation And Manipulation), açık kaynaklı bir sayısal çözüm platformudur. Skaler, vektörel veya tensörel değişkenlere sahip, genel transport denklemi formundaki herhangi bir kısmi diferansiyel denklemin sayısal çözümü için kullanılabilmektedir [1]. Bu açık kaynak kodlu, dolayısıyla ücretsiz HAD yazılımında akışa ilişkin korumun denklemleri, sonlu hacimler yöntemine dayalı ayrıklaştırma ile cebirsel denklemlere dönüştürülür ve çözülürler [2].

Simülasyonlar için açık kaynaklı yazılımların kullanılması, ticari programların kullanımına göre sayısal modelleme süreci üzerinde daha ayrıntılı kontrol imkanı ve elde edilen sonuçların doğrulanması ve tekrarlanması için daha iyi koşullar sağlar. Özgün imalat yapan vana üretici sayısının oldukça az olduğu ve dolayısıyla vana ithalatçısı olan ülkemizde [3] OpenFOAM gibi paylaşılabilir, ticari amaçlar için geliştirilebilir bir modern ar-ge aracının bilinirliğinin artırılması ve içselleştirilmesi, dışa bağımlılığın azaltılmasına katkı sağlayacaktır.

Dünya genelinde OpenFOAM'un vana uygulamalarındaki kullanımı oldukça yaygındır. Literatürden sürgülü vana [4], yüksek basınçlı türbin kontrol vanası [5] ve dikme vanası [6] zamandan bağımsız çözümlerine ve bu çözümlerin deneysel verilerle olan uyumlarına ulaşmak mümkündür. Zorlu akış fiziklerine yönelik geniş kütüphaneye sahip yazılım, sıkıştırılabilir akış simülasyonlarını [7] emniyet vanası [8] için gerçekleştirebilir, çok fazlı modelleme kabiliyeti [9,10] sayesinde bir küresel vana içerisindeki kavitasyonu [11,12], katılaşmayı [13] veya spray akışını [14] analiz edebilir. OpenFOAM, Reynolds-Averaged Navier–Stokes (RANS) türbülans modellerinin yetersiz kalabildiği vana uygulamalarında akışkan çalkantıların görülebildiği Large Eddy Simulation (LES) ve Detached Eddy Simulation (DES) modellerini sunduğu gibi, bu çalkantıların direkt olarak çözülebildiği Direct Numerical Simulation (DNS) yöntemini de içerisinde barındırmaktadır. Literatürde bir iğneli vananın LES [15] ve bir valf/piston montajının DNS [16] türbülans modelleriyle yapılmış çalışmaları bulunmaktadır. Ticari yazılımlarda da bulunan paralel hesaplama kabiliyeti [17] sayesinde büyük hesaplama yükü getiren zamana bağlı bu modellemeleri çok sayıda çekirdeğe dağıtarak koşturabilmektedir. Oluşturulan ağın çözümleme sırasında deforme olmasına imkan veren dinamik ağ yönteminin OpenFOAM ile analiz edilebilmesi [18], emniyet vanası [19, 20, 21], sürgülü vana [22] ve sübap [23, 24] performansının daha iyi anlaşılmasını sağlamaktadır. Borularda su darbesinin de başarıyla modellenebilmesi [25] sayesinde vana uygulamalarında OpenFOAM'un giderek yaygınlaşacağı rahatlıkla söylenebilir.

Bu çalışmada, içerdiği karmaşık fizikten dolayı zorlu problemlerden birisi sayılabilecek kelebek vana içerisindeki akış açık kaynaklı hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile ele alınmış, vana performans eğrileri ve akış fiziğine dair detaylı ard-işlem bulguları elde edilmiştir. Bulgular, aynı problemin literatürden elde edilen deneysel ölçümleri ve ticari yazılımlara dayalı çözümleri ile karşılaştırılmıştır.

2. VANA KARAKTERİSTİK KATSAYILARI

Vana akış katsayısı K_v(m^3/s) , ρ_{ref}(kg/m^3) su yoğunluğu, ρ(kg/m^3) akışkanın yoğunluğu, ΔP(Pa) basınç düşüşü olmak üzere P_{ref}= 1 bar= 105 Pa basınç düşüşü durumunda vana içerisinden geçen akışkanın Q(m^3/s) hacimsel debisini tanımlar [27],

$$K_V = Q\sqrt{\frac{P_{ref}}{\Delta P}\times\frac{\rho}{\rho_{ref}}} \qquad (1)$$

ile ifade edilir. Basınç düşüşü ΔP_{Test}(Pa), test yöntemine göre vana yukarı akım ve aşağı akımından ölçülen statik basınçların farkıdır. D(m) boru iç çapı, ε(m) yüzey pürüzlülüğü, μ(kg/m-s) akışkanın dinamik viskozitesi, V(m/s) ortalama akış hızı ve Reynolds sayısı Re= ρVD/μ ile Colebrook denklemi [28];

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0\log\left[\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{\mathrm{Re}\sqrt{fe}}\right] \quad (2)$$

kullanılarak f sürtünme faktörü hesaplanır. Ölçüm noktaları arasındaki düz boru mesafesi L(m) olmak üzere ΔP_{Boru}(Pa) boru kayıpları,

$$\Delta P_{Boru} = f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2}\rho \quad (3)$$

yardımıyla hesaplanır. Böylece vana basınç düşüşü,

$$\Delta P = \Delta P_{Test} - \Delta P_{Boru} \quad (4)$$

ile hesaplanır ve Denklem 1'de verilen K_v elde edilir.

Hidrodinamik moment T(Nm), belirli bir α(°) vana açılma açısında vanadan geçen akışkanın şafta uyguladığı dönme momentidir. Hidrodinamik moment katsayısı C_t boyutsuz bir değişkendir ve

$$C_t = \frac{T}{\Delta P \cdot D^3} \quad (5)$$

ile ifade edilir [26].

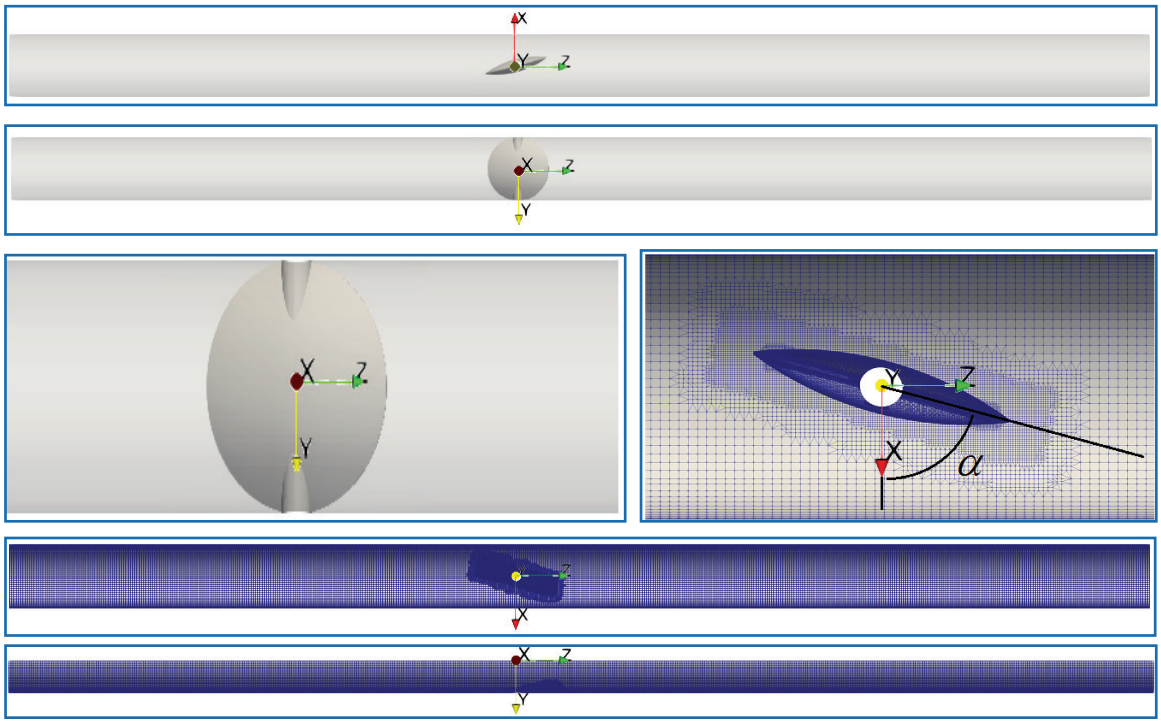
3. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ MODELİ

Çalışmada ele alınan kelebek vana görseli Şekil 1'de verilmiştir [26]. İçerisinden ρ= 998,2 kg/m^3 yoğunluğa ve μ= 1,003x10^{-3} kg/m-s dinamik viskoziteye sahip su geçen, iç çapı D= 1,8 m olan vananın iç yüzeyleri işlenmiş olup yüzey pürüzlülüğü ε= 5x10^{-4} m'dir. Disk şeklindeki vana, en yüksek 0,6 m, en düşük 0,02 m kalınlığa sahiptir.



Şekil 1. Kelebek vana fotoğrafı [26]

Kelebek vana Şekil 2'de görüldüğü üzere XZ düzlemine göre simetriktir. Bu sayede çözümleme



Şekil 2. Akış hacmi geometrisi, hesaplama bölgesi ve sayısal ağ

yükünü azaltabilmek adına hesaplama bölgesinin sadece yarısı analize dahil edilmiştir. Girişte tam gelişmiş türbülanslı akış profili oluşturabilmek ve çıkışta olası girdap akımlarının çözümlemeye etkisini ortadan kaldırmak için referans alınan araştırmaya uygun olacak şekilde yukarı akım uzunluğu 8D ve aşağı akım uzunluğu 10,2D olan simetrik bir hesaplama bölgesi oluşturulmuştur (Şekil 2). Yukarı akım girişinde düzgün hız dağılımı V= 3 m/s olarak tanımlanmış ve aşağı akım çıkışında basınç gradyeni sıfıra eşitlenmiştir. Vana açılma açısı, $0°<\alpha< 90°$ ile tüm açıklığı tarayacak şekilde çeşitlendirilmiştir. Boru çeperi ve vana yüzeylerinde kaymama sınır koşulu tanımlanmıştır.

Kartezyen ağ örme algoritmaları, yüksek kaliteli elemanları daha az eleman sayısıyla sunabilmesiyle HAD simülasyonlarında sıkça kullanılmaktadır. Kartezyen ağlarda, ağın oluşturulma süresi diğer eleman tiplerine göre daha uzun sürmekte ancak eleman sayısının azaltılması ile çözümleme süresi kısalmaktadır. OpenFOAM bünyesinde sunulan snappyhexmesh algoritması [29], Kartezyen yapıdaki bir ağın geometri yüzeyleriyle kesişen elemanlarını keserek (İng:cut-cell) ağ örmekte ve bu tip bir endüstriyel uygulamada rahatlıkla kullanılabilmektedir.

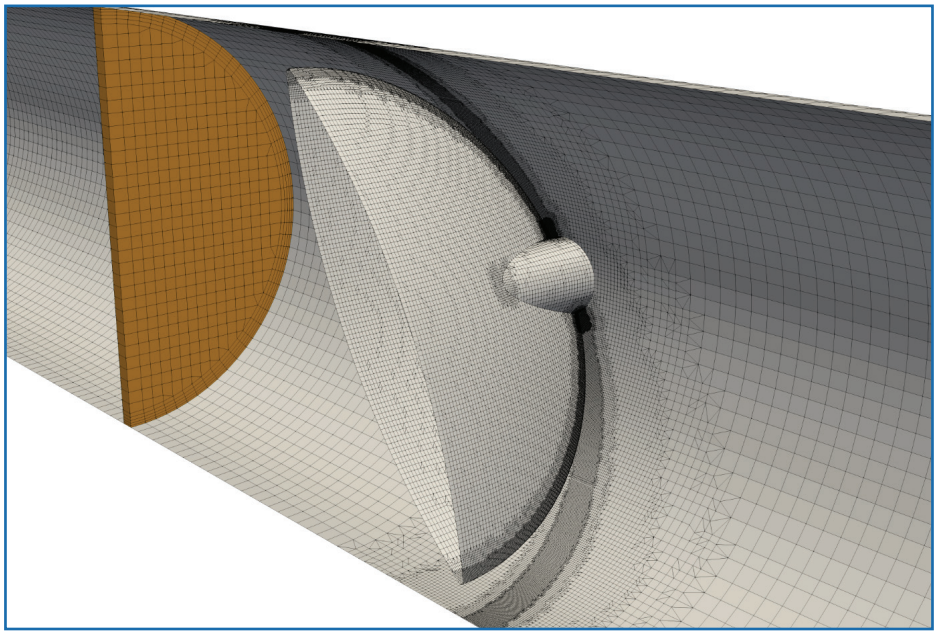
Bu doğrultuda snappyhexmesh algoritması ile örülen yaklaşık 1.600.000 elemana sahip ağın en düşük ortogonal kalite değeri 0,18 ve en yüksek çarpıklık değeri 0,8'dir. Hesaplama bölgesi genelinde 0,06 m'lik elemanlar vana yakınında 0,02 m'ye, vana kalınlığının azaldığı bölgelerde 0,005 m'ye ve şaft yakınında 0,002 m'ye kadar düşürülmüştür. Oluşturulan sayısal ağın görüntüsü Şekil 3'te verilmiştir.

Hesaplama bölgesinin giriş basıncı ve vana hidrodinamik momenti yakınsamayı görebilmek için çözümlemeler süresince gözlemlenmiştir. Referans çalışmadan [26] farklı olarak k-ω türbülans modeli seçilmiştir. Çözücülerde ikinci mertebe ayrıklaştırma tanımlanmış olup, basınç hız birlikteliği SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) algoritması ile garanti altına alınmıştır [30].

4. SAYISAL ANALİZ SONUÇLARI

Simülasyonlar hem açık kaynak kodlu OpenFOAM hem de referans alınan çalışmayla aynı ticari HAD yazılımında [26] çözümlenmiş olup, vana karakteristik eğrileri için ihtiyaç duyulan veriler sayısal olarak elde edilmiştir. Ard-işlemler aynı görselleştirme aracıyla gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4'te $\alpha= 30°$ ve $\alpha= 75°$ açıklıkta disk etrafındaki basınç dağılımı iki çözücü için karşılaştırılmıştır. Basınç dağılımı, farklı açıklıklarda her iki çözücü için neredeyse aynıdır. Görsellerde disk hücum kenarındaki yüksek basınç bölgesinin



Şekil 3. Vana yüzeyindeki ve bir kesit üzerindeki sayısal ağ

OpenFOAM'da α= 30° için daha büyük, α= 75° için daha küçük olduğu görülebilir.

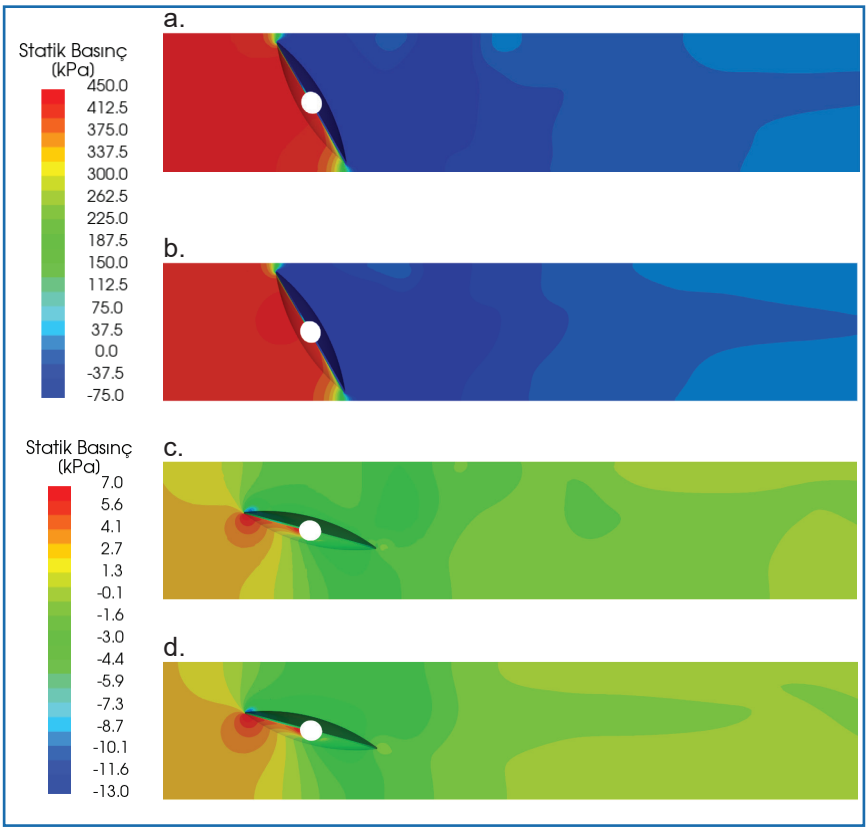
Hız dağılımı, her iki çözümleme için aynı aralıklarla vana simetri düzleminde verilmiştir (Şekil 5). Akışın disk ile çeper arasında kalan küçük alanda 10 kat hızlandığı α= 30° için her iki çözücü yüksek uyum sergilemiştir. Etkinin daha çok sınır tabakada görüldüğü α= 75° için çözücüler benzer deseni oluşturmuşlardır.

Düşük açıklıklarda (α < 30°) disk etrafındaki akış oldukça hızlanmakta, disk arkasında geniş girdap bölgeleri oluşturmaktadır. Disk uçlarından ayrılan akış, zamandan bağımsız kabul edildiğinden ötürü yakınsama trendini her iki çözücü için etkilemektedir. Yüksek açıklıklara göre daha zor yakınsamalar ve dalgalanmalar görülmüştür. Bu tip durumlarda daralan bölgelerdeki elemanlar ve özellikle duvar yakınındaki katmanların sayısı artırılır. Bu haliyle düşük açıklıklarda çözümleme oldukça hassas davranmaktadır.

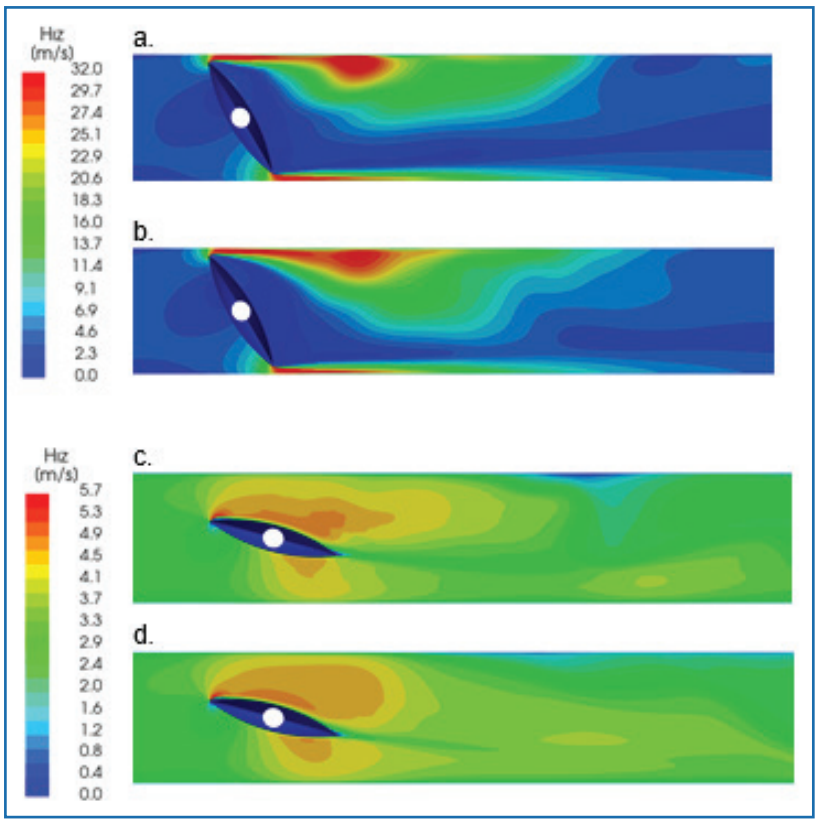
Yüksek açılarda çözümleme her iki çözücü için de daha stabildir. Bu açılarda diskin uyguladığı kayma gerilmesi baskın hale gelmektedir. Özellikle çok yüksek açılarda (α > 75°) basınç farklarını daha çok diskin uyguladığı kayma gerilmesi belirlemektedir.

OpenFOAM'da, ticari HAD'a göre akış disk etrafında daha fazla hızlanmış ve bunun sonucunda arkadaki akış ayrılması görece daha büyük olmuştur (Şekil 6). Buna rağmen akış çizgileri karşılaştırıldığında çözücüler arasında kaydadeğer bir fark bulmak oldukça güçtür. Her iki çözücü de vana etrafındaki akış yapılarını yakalamış ve girdapları benzer şekilde oluşturmuştur.

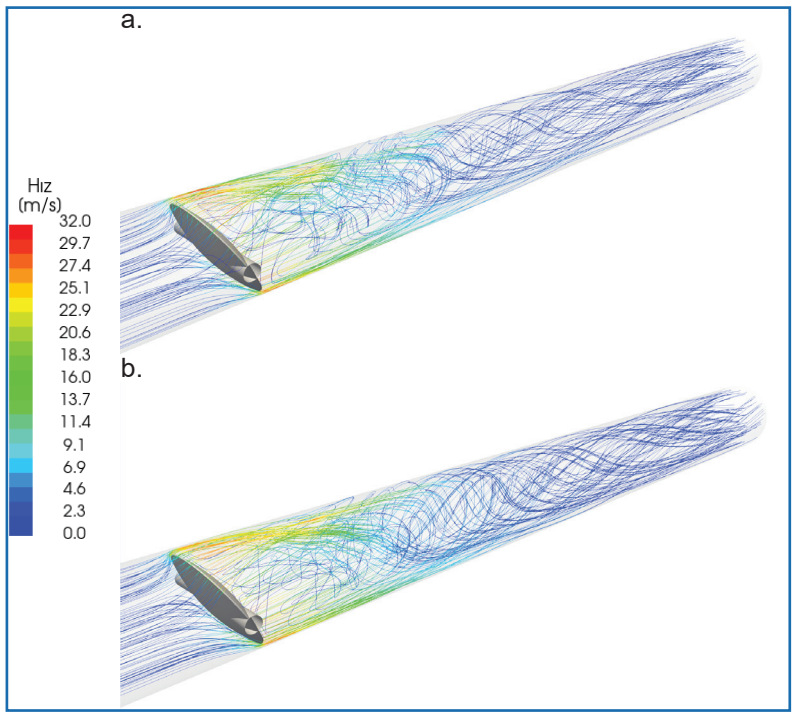
Sayısal sonuçlar iki çözücünün performansının geniş bir bakış açısında değerlendirilmesine imkan sağlayacaktır. Şekil 7, deneysel verilerle sayısal sonuçları vana akış katsayısındaki değişimle karşılaştırmaktadır. Vana açıklık miktarı arttıkça, vana akış katsayısı 0'dan 265000 m^3/s mertebelerine ulaşabilmektedir. Akış katsayısının belirlenmesinde basınç düşüşü baskındır. Düşük vana açılarında akış görece çok küçük bir alanda hızlanmakta ve HAD değerleri deneysel verilere göre düşük kalmaktadır.



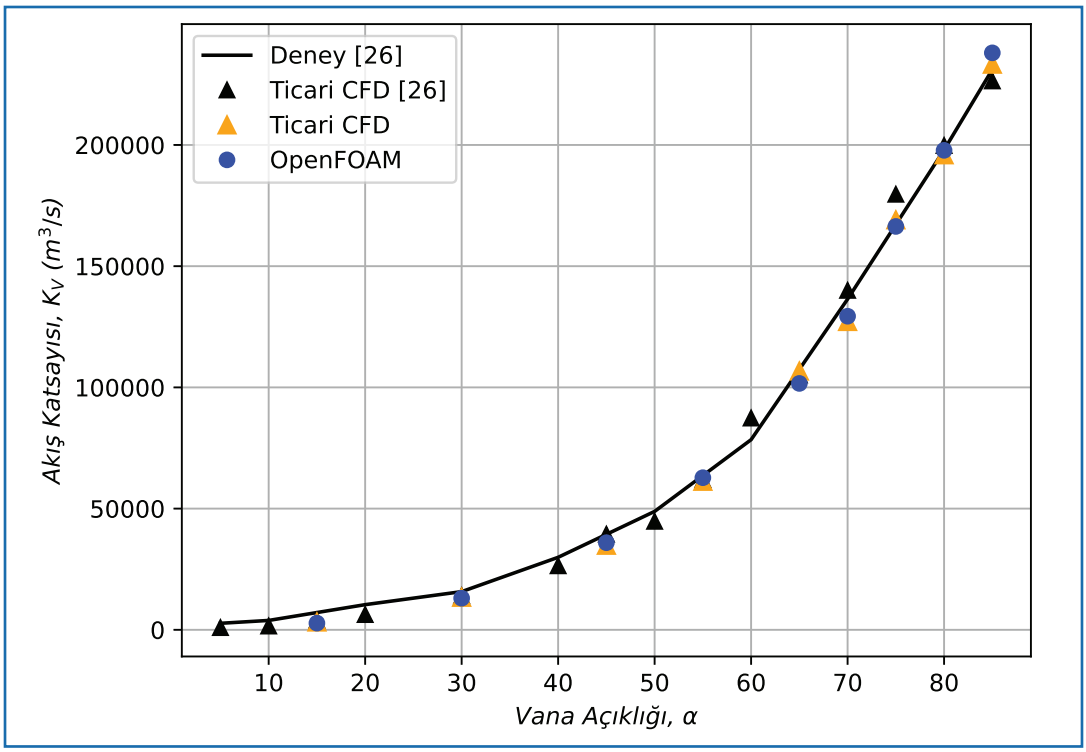
Şekil 4. XZ düzleminde basınç dağılımları. α= 30° için a. OpenFOAM b. Ticari HAD ve α= 75° için için c. OpenFOAM d. Ticari HAD



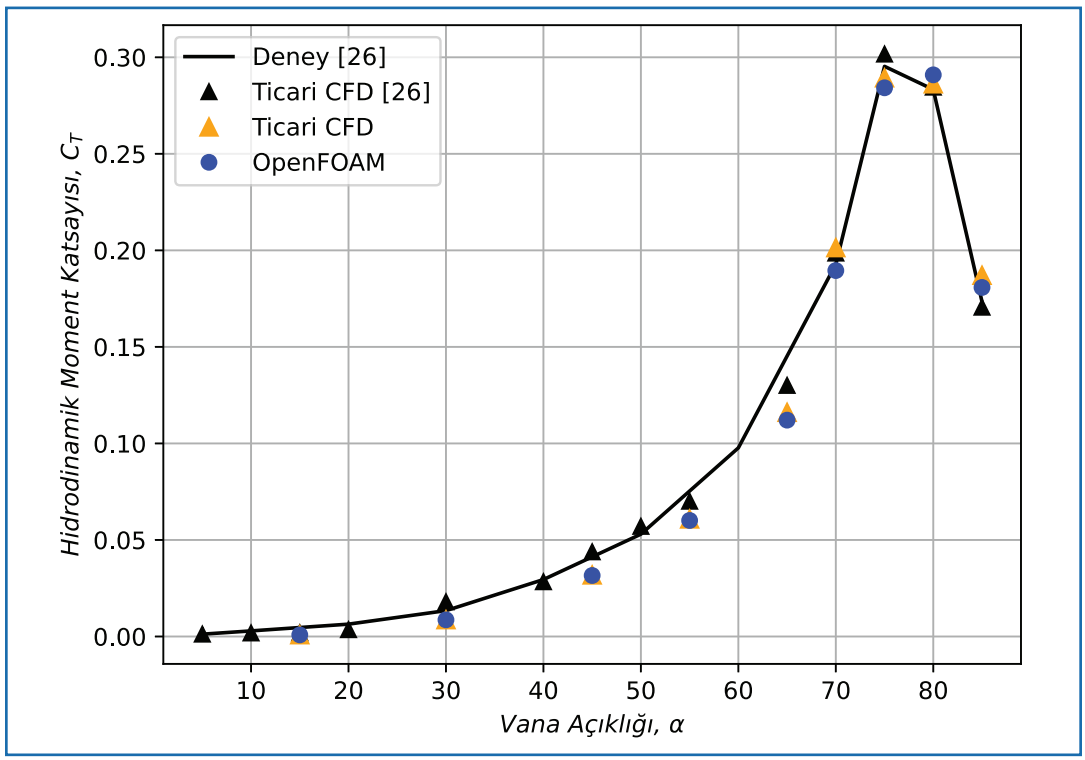
Şekil 5. XZ düzleminde hız dağılımları. α= 30° için a. OpenFOAM b. Ticari HAD ve α= 75° için için c. OpenFOAM d. Ticari HAD



Şekil 6. Vana etrafındaki akış çizgileri α= 75° için a. OpenFOAM b. Ticari HAD



Şekil 7. Akış katsayısının vana açıklık değerlerine göre değişimi



Şekil 8. Hidrodinamik moment katsayısının vana açıklık değerlerine göre değişimi

Hem OpenFOAM hem de ticari HAD için 15° açıklıkta deneysel ölçümler ile fark %15 civarındadır. Bu fark referans çalışmanın aksine daha düşük bulunmuştur [26]. Seçilen k-ω türbülans modelinin düşük vana açılarında akış ayrılmalarını daha iyi modelleyebileceği için avantajlı olduğu söylenebilir. OpenFOAM'un hem deneysel verilerle, hem ticari HAD çözücüleriyle akış katsayısı eldesinde benzer sonuçlara ulaşması dikkat çekmektedir.

Hidrodinamik moment katsayısı, ticari HAD yazılımları için α= 75° açıklığa kadar artış göstermiş, bu açıdan sonra düşüş eğilimi göstermiştir. OpenFOAM çözümlemesinde bu durum α= 80°'de kendini göstermiştir. 75°–80° arasında ölçüm sayısı artırılarak hem deneysel hem de sayısal sonuçların çözünürlüğünün artırılması gerekmektedir.

OpenFOAM'un düşük açıklık değerlerinde deneysel ve sayısal verilerle benzer hidrodinamik moment katsayısı sonuçları elde ettiği görülmüştür. Yine OpenFOAM için 70°–75° açıklıklarda referans verilerden daha düşük, 80°–85° açıklıklarda referans verilerden daha yüksek değerler görülmüştür. Yazılımlar arasındaki türbülans modellerinin farklılıkları, OpenFOAM'un eleman boyutu ve seçimi konusunda daha hassas olması bu farkların oluşmasını sağlamış olabilir. Aradaki fark en yüksek değer için sadece %4'tür, böylece; OpenFOAM'un deney ve ticari HAD bulguları ile kabul edilebilir düzeyde uyuma sahip olduğu gözlemlenmiştir.

SONUÇ

Vana tasarımlarında tartışılmaz öneme sahip HAD yönteminin ticari uygulamalarına alternatif olan OpenFOAM yazılımı popülerliğini artırmaktadır. Yazılımın vana uygulamalarındaki kapasitesi ve gelişimi, literatürden derlenen çalışmalarla irdelenmiştir.

Çalışmada bir kelebek vananın hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri açık kaynak kodlu OpenFOAM ve ticari HAD ile gerçekleştirilmiştir. Literatürden elde edilen deneysel ölçümler ve ticari HAD çözümlemeleri ile kıyaslanan OpenFOAM benzer sonuçlara ulaşmıştır. Ticari HAD'a en fazla %4 mertebelerinde farklılığa sahip OpenFOAM'un rekabetçi yönü kelebek vana için de ortaya koyulmuştur. OpenFOAM çözümlerinin diğer verilerle yüksek uyum içerisinde olduğu ve yazılımın kelebek vana problemlerinde ihtiyaca rahatlıkla cevap verdiği görülmüştür.

Çalışmada OpenFOAM bünyesinde sunulan ağ örme algoritması snappyhexmesh test edilmiş olup, algoritmanın endüstriyel uygulamalardaki kullanılabilirliği ortaya konulmuştur.

Dışa bağımlılığın azaltılması ihtiyacı ve kaynak koduna erişim kabiliyeti, OpenFOAM'un vana uygulamalarındaki yerinin önümüzdeki dönemde artmaya devam edeceğini işaret etmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Weller, H. G., Tabor, G., Jasak, H., Fureby, C., "A Tensorial Approach to Computational Continuum Mechanics", American Institute of Physics, 12, 620-631, 1998

[2] Kaya, E., Şimsek E., Şentürk, U., "Açık Kaynak Kodlu Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Çözücüsü: OpenFOAM", Mühendis ve Makina Dergisi, 62, 25-36, 2022.

[3] Makine İhracatçıları Birliği, "Moment Expo Dergisi", 24.01.2023 tarihinde erişildi. https://www.moment-expo.com/tr/dergiler/24/kapak/, 2019.

[4] Melnikova V. G. & Shcheglov, G. A., "Quasi-Static CFD Research of the Spool Flow Valve Parameters", ISH Journal of Hydraulic Engineering, 29:1, 31-38, 2023.

[5] Sláma, V., Mrózek, L., Tajč, L., vd., "Creation and Validation of Pressure Loss Model For Steam Turbine Control Valves", AIP Conference Proceedings, Vol. 2189, No. 1, AIP Publishing LLC, 2019.

[6] Yuan, C., Song, J., Liu, M., "Investigation of Flow Dynamics and Governing Mechanism of Choked Flow for Cavitating Jet in a Poppet Valve", International Journal of Heat and Mass Transfer 129, 2019.

[7] Casari, N., et al. "Reducing Pressure Valve with Real Gases: An Integrated Approach for The Design", Energy Procedia 148, 607-614, 2018.

[8] Banfi, R. A., "Development of a CFD Model to Simulate The Compressible Flow Within a Pressure-Relief Safety Valve", Yüksek Lisans Tezi, Milano Poltecnico, 2019.

[9] Yuan, C., Zhu, L., Du, Z. & Liu, S., "Numerical Investigation into The Cavitating Jet Inside Water Poppet Valves with Varied Valve Seat Structures", Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 15:1, 391-412, 2021.

[10] Cavallo, D. M., et al. "A Novel Approach for Hydraulic Valve Experimental Assessment under Cavitating Condition", International Journal of Fluid Power, 183-204, 2022.

[11] Calvete, D. R., and Gosset, A., "Cavitating Flow in a 3D Globe Valve", OpenFOAM®: Selected Papers of the 11th Workshop, Springer International Publishing, 2019.

[12] Calvete, D. R., et al. "Numerical Simulation of Cavitating Flow in a Globe Valve: Comparison of OpenFoam and CFX", Pressure Vessels and Piping Conference, Vol. 50398, American Society of Mechanical Engineers, 2016.

[13] Riupassa, R. D., Basar, K. and Waris, A., "Numerical Investigation of Freeze Valve Melting Behavior in Molten Salt Reactor using OpenFOAM", Journal of Physics: Conference Series, Vol. 2243, No. 1, IOP Publishing, 2022.

[14] Zhang, Z., Yu, Y. and Cao, J., "Effect of Upstream Valve Opening Process on Dynamic Spray Atomization of Bipropellant Thruster Injector", Micromachines 13.4, 527, 2022.

[15] Kolovos, K., et al. "Transient Cavitation and Friction-Induced Heating Effects of Diesel Fuel During the Needle Valve Early Opening Stages For Discharge Pressures up to 450 MPa", Energies 14.10, 2923, 2021.

[16] Montorfano, A., et al. "Comparison of Direct and Large Eddy Simulations of The Turbulent Flow in a Valve/Piston Assembly", Flow, Turbulence and Combustion 95, 461-480, 2015.

[17] Catellani, C., et al. "Large Eddy Simulation of a Steady Flow Test Bench Using OpenFOAM®", Energy Procedia 101, 622-629, 2016.

[18] Jasak, H., "Dynamic Mesh Handling in OpenFOAM", 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 2009.

[19] Leati, E., Gradl, C. and Scheidl. R., "Modeling of a Fast Plate Type Hydraulic Check Valve", Journal Of Dynamic Systems, Measurement, and Control 138.6, 2016.

[20] Raeder, T., et al. "Multilevel Simulation of Direct Operated Safety Valve", 2018 Ivannikov Ispras Open Conference (ISPRAS), IEEE, 2018.

[21] Suárez, R., Piero, J., J. Cárdenas-Gutiérrez, J. A. and Pabon J. A., "CFD Study of Industrial Safety Valves in a Virtual Environment with OpenfOAM® Software", International Review of Mechanical Engineering 14.11, 674-683, 2020.

[22] Melnikova V.G., Kotsur O.S., Shcheglov G.A., "Numerical Simulation of the Flow Rate Regulator Valve Using OpenFOAM", Proceedings of the Institute For System Programming of The RAS (Proceedings of ISP RAS), 29(1):53-70., (In Russ.), 2017.

[23] Montorfano, A., Piscaglia, F. and Onorati, A., "An Extension of the Dynamic Mesh Handling with Topological Changes for LES of ICE in OpenFOAM®", SAE Technical Paper, April, 1-15, 2015.

[24] Lucchini, T., et al. "Full-Cycle CFD Modeling of Air/Fuel Mixing Process in an Optically Accessible GDI Engine", SAE International Journal of Engines 6.3, 1610-1625, 2013.

[25] Pham, T. Q. D., and Choi, S., "Numerical Analysis of Direct Contact Condensation-Induced Water Hammering Effect Using OpenFOAM in Realistic Steam Pipes", International Journal of Heat and Mass Transfer 171, 121099, 2021.

[26] Song, X. G. and Park, Y. C., "Numerical Analysis of Butterfly Valve-Prediction of Flow Coefficient and Hydrodynamic Torque Coefficient", Proceedings of The World Congress on Engineering and Computer Science, 2007.

[27] AWWA, Butterfly Valves: Torque, Head Loss, and Cavitation, 2nd ed., M49, Denver, USA, 2012.

[28] Cengel, Y., and Cimbala, J., "Fluid Mechanics Fundamentals and Applications", McGraw Hill, 2013.

[29] Greenshields C.J., OpenFOAM v9 User Guide: 5.4 Mesh Generation with The SnappyHexMesh Utility, OpenFOAM Foundation, 2021.

[30] Ferziger J. H. ve Peric M., Computational Methods for Fuid Dynamics, Springer Verlag, 3rd Edition, Berlin-New York, 2002.