

OPENFOAM İLE TURBOMAKİNA UYGULAMALARINA GENEL BAKIŞ VE BİR HAVA TÜRBİNİNİN SİMÜLASYONU

A Review of Turbomachinery Applications in OpenFOAM and A Case Study of an Air Turbine

Erdem KAYA
Utku ŞENTÜRK

ÖZET

Turbomakina tasarımında hesaplamalı akışkanlar dinamiği biliminin kullanımı artık bir standart haline gelmiş olup, bu alanda özelleşmiş yazılımlar mevcuttur. Bunlar arasında OpenFOAM, açık kaynaklı ve lisans ücreti gerektirmeyen bir yazılım olması dolayısıyla, ticari uygulamalarda önemli bir alternatif olarak göze çarpmaktadır. Halen ülkemizde yaygınlaşma sürecinin başında olan bu yazılımın bir önemli avantajı, dışa bağımlılığın azaltılmasıdır. Bu çalışmada, OpenFOAM kullanılarak gerçekleştirilmiş olan güncel turbomakina uygulamalarına, geniş kapsamlı olarak yer verilmiştir. Daha sonra, bir kanaldaki hava akışından enerji elde etmek için tasarlanmış bir impuls türbini örnek olarak ele alınmış, akış simülasyonları ile performansı belirlenmiş ve deneysel verilerle doğrulanmıştır. Buna ek olarak, OpenFOAM'un paralel hesap performansı da ele alınmış ve çeşitli sayıda çekirdek ile yapılan analizlerde doğrusal hızlanma saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, OpenFOAM, turbomakina, türbin.

ABSTRACT

Utilizing computational fluid dynamics science has become a standard in designing turbomachinery and various specialized codes are now available in the field. Amongst them, OpenFOAM is promising as it is an alternative open-source tool which does not require licensing for commercial applications. The code is still in its early stages of widespread use nationwide, with the important advantage of reducing the dependence on foreign sources. In this study, a detailed review of recent turbomachinery applications in OpenFOAM is presented. Next, we consider a specific impulse turbine as a case study which is designed to extract energy from an air flow in a duct. We perform simulations with OpenFOAM and validate its experimental performance curves. Using this case, we benchmark the parallel computing performance of OpenFOAM and determine a linear speed-up.

Key Words: Computational fluid dynamics, OpenFOAM, turbomachinery, turbine.

1. GİRİŞ

↓

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), akışkan hareketini tanımlayan temel denklemlerin, nümerik yöntemlere dayalı çözümlerinin elde edilmesini kapsar. Bu denklemlerin analitik çözümleri, denklemlerin doğrusal olmayan yapısından ötürü bazı temel problemler dışında mevcut değildir. Diğer taraftan deneysel araştırma yöntemleri maliyetli, zaman ve uzmanlık gerektiren yöntemlerdir. Bu açıdan HAD, hızla gelişmekte olan bilgisayar teknolojisi sayesinde, gerek akademik gerekse endüstriyel problemlerin incelenmesinde önemli bir araştırma yöntemi haline gelmiştir. HAD'ın en yaygın endüstriyel uygulama alanlarından biri de turbomakinalardır. Günümüzde turbomakina tasarımlarında HAD'ın kullanımı son derece yaygın olup, yöntemin sunduğu yüksek doğruluklu sonuçlar sayesinde ürün geliştirme süreçlerinde artık bir standart haline gelmiştir.

OpenFOAM (Open Source Field Operation And Manipulation), açık kaynaklı bir sayısal çözüm platformudur. Skaler, vektörel veya tensörel değişkenlere sahip, genel transport denklemi

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\mathbf{V}\phi) = \nabla \cdot (\Gamma\nabla\phi) + S_\phi \quad (1)$$

formundaki herhangi bir kısmi diferansiyel denklemin sayısal çözümü için kullanılabilir [1]. Dolayısıyla OpenFOAM, açık kaynaklı olması ve çözülecek diferansiyel denkleme uygun çözücü kodun geliştirilebilir olması açısından, bir paket programdan farklılaşmakta ve bir sayısal çözücü geliştirme platformu olarak nitelendirilmektedir. Nesne tabanlı programlama yardımıyla, C++ dilinde geliştirilmiş olan OpenFOAM'un en yaygın kullanım alanı, hesaplamalı akışkanlar dinamiği problemleridir. Burada akışa ilişkin korunum denklemleri, sonlu hacimler yöntemine dayalı ayrıklaştırma ile cebirsel denklemlere dönüştürülür ve çözülürler. OpenFOAM, üst üste binmeyen ve düzlemsel yüzeylere sahip herhangi bir çok yüzlü formundaki ağ hücreleri için çözüm yapabilen, dolayısıyla akademik düzeydeki problemlerin yanı sıra, endüstriyel problemlerin de çözümünde yüksek doğrulukla kullanılabilen bir platformdur. Standart OpenFOAM kurulumu ile gelen çok sayıda cebirsel denklem sistemi çözücülerinin yanı sıra, arzu edilen herhangi işlemci sayısı için paralel hesaplama becerisi, bu alandaki ticari yazılımlara rakip olması açısından önemli unsurlardır. Laminer/türbülanslı, izotermal/ısı transferi içeren, tek/çok fazlı akışlar için çözümler yapılabilen, turbomakinaların akış analizlerinde tercih edilen bağıl koordinat sistemi çözümleri ya da kayar ağ modelleri kullanılabilir. Platformun önemli bir diğer artısı, dünyadaki kullanıcılar tarafından yapılan katkılar ile genişletilebilir olmasıdır. Bu tip katkılar, OpenFOAM platformunu güncel tutan geliştirici ekipler tarafından gerek görüldüğünde revize edilerek kaynak koda eklenebilmektedir.

OpenFOAM, Imperial College'da (İngiltere), 60'lı yıllardan bu yana alanda öncü çalışmalar yürüten hesaplamalı akışkanlar dinamiği laboratuvarında geliştirilmiştir. Başlangıçta FORTRAN diline dayalı temel bir çözücü iken, 90'lı yıllarda ekip tarafından üretilen doktora tezleri kapsamında geliştirilip bugünkü halini alan yazılım, geçmişte FOAM adı ile ticari olarak satışa sunulmuş fakat bu açıdan başarısız olunca, 2004 yılında açık kaynaklı olarak yayınlanmıştır. Bu tarihten sonra, ilk geliştiriciler tarafından kurulan şirketlerde farklı isimler ile güncellenip yayınlanmaya devam etmişlerdir [2]. Günümüzde OpenFOAM Foundation, foam-extend (WIKKI), OpenFOAM+ gibi çeşitli uzantıları mevcuttur.

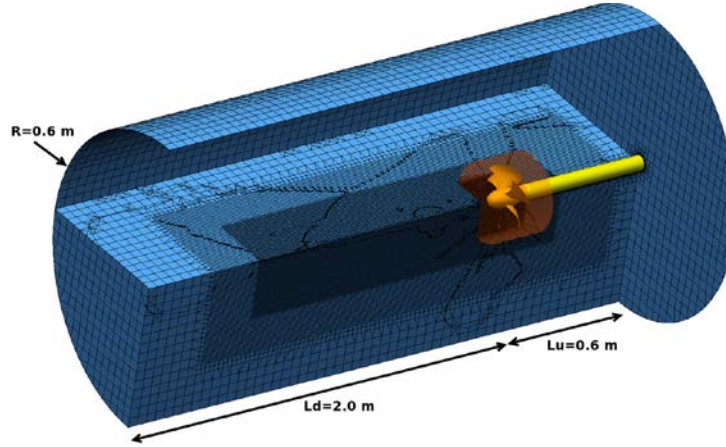
OpenFOAM'un başlıca dezavantajları ise, kullanıcı ara yüzünün olmaması ve komut satırı ile birlikte problem kurulumu için önceden hazırlanan metin dosyaları ile çalışması, ticari problemler için gelişmiş özelliklere sahip bir ön-işlemcisinin (ağ örücü) olmaması, kullanıcı kılavuzlarının ve örnek çözümlerin yetersizliğidir. Bu açılardan OpenFOAM'un kullanıcılar tarafından öğrenilme ve içselleştirme süreçleri ticari yazılımlara göre zahmetlidir. Ancak platformun açık kaynaklı olması dolayısıyla, ücretsiz olarak kullanılabilir, paylaşılabilir ve ticari amaçlar için geliştirilebilir olması, ülkemizin bu konuda dışa bağımlılığını azaltma yönünde önemini ortaya koymaktadır.

2. OpenFOAM ile TURBOMAKİNA UYGULAMALARINA GENEL BAKIŞ

Son yıllarda dünya genelindeki araştırmacılar tarafından yayınlanan sayısız çalışmada olduğu gibi OpenFOAM'un turbomakina uygulamalarındaki kullanımının yaygınlaşma eğiliminde olduğu söylenebilir. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile dönel cisimlerin daimi akış incelenmelerinde vazgeçilmez Multiple Reference Frames (MRF) yönteminin OpenFOAM içerisindeki yeteneklerinin geliştirilmesi bu yargıyı destekler niteliktedir [3]. Birbirleriyle örtüşmeyen keyfi ara yüzeyler arasındaki veri aktarımının iyileştirilmesi [4] dönel periyodik sınır koşulu kullanımının önünü açmış [5], böylece daha karmaşık problemlerin daha az hesaplama süresi ile çözümlenmesine olanak sağlanmıştır [6], [7]. OpenFOAM, ticari yazılımlarda da bulunan paralel hesaplama kabiliyeti [8] sayesinde büyük hesaplama yükü getiren zamana bağlı rotor-stator etkileşimi hesaplamalarını fazla sayıda çekirdeğe dağıtarak koşturabilmektedir. Reynolds-ortalama Navier–Stokes denklemleri türbülans modelleriyle birlikte çözülebilmekte, akışkan çalkantıların ayrıntılı görülebildiği Large Eddy Simulation (LES) ve

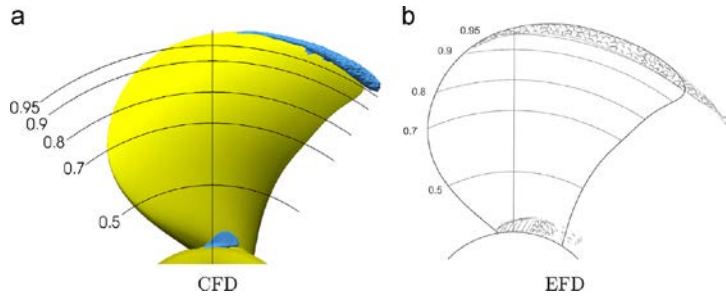
Detached Eddy Simulation (DES) [9] modelleri uygulanabilmektedir. Oluşturulan ağın çözümü sırasında deforme olmasına imkan veren dinamik ağ yöntemi ile katı-sıvı etkileşimlerinin analiz edilebilmesi [10] ve çok fazlı akış modellemesi ile kavite oluşumunun incelenebilmesi [11] sayesinde turbomakina uygulamalarında OpenFOAM kullanımının artarak devam edeceği açıkça görülmektedir.

OpenFOAM' un turbomakina yetenekleri literatürdeki çalışmalarda ortaya koyulmuştur. VP1304 kodlu geleneksel bir pervanenin kavite testinin modellendiği çalışmada [12] pervane çevresindeki hesaplama bölgesi için yine OpenFOAM bünyesinde bulunan ve ücretsiz olan snappyHexMesh algoritması kullanılarak ağ örülmüştür (Şekil 1).



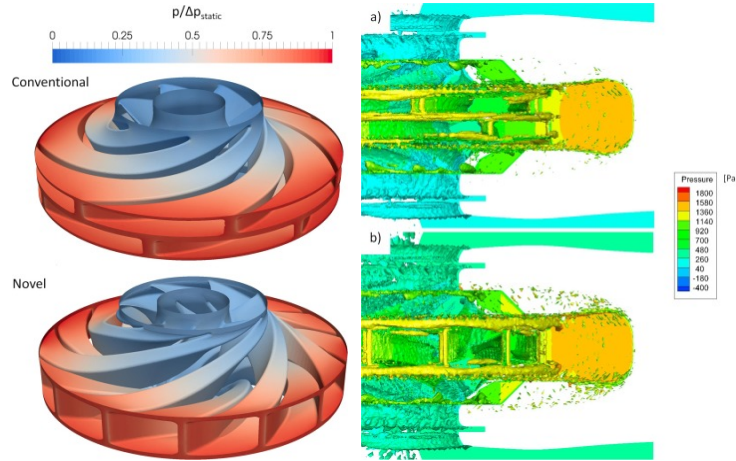
Şekil 1. VP1304 pervane çevresindeki ağ yapısı [12].

Çalışmada çok fazlı akış modellemesi ile elde edilen faz dağılımı deneysel çalışmayla [13] kıyaslandığında benzer sonuçların gözlemlendiği belirtilmiştir (Şekil 2). HAD ile elde edilen itme kuvvetinin deneysel çalışmaya göre %3.36 bağlı hataya sahip olması, kavite oluşumunun pervane performansı üzerindeki etkisinin nümerik olarak incelenebileceğinin göstergesidir.



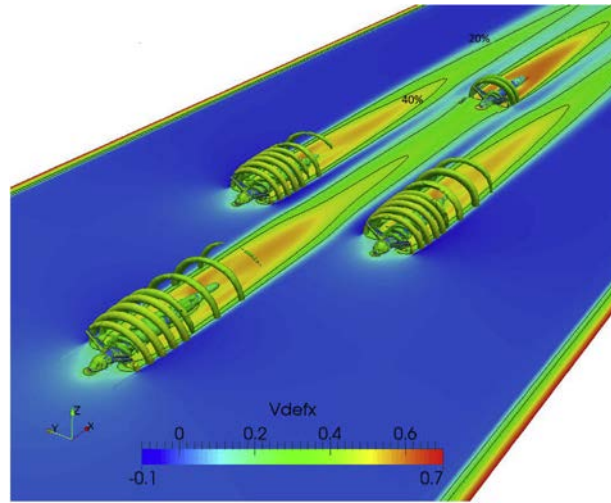
Şekil 2. VP1304 pervane etrafındaki kavite bölgeleri (a) OpenFOAM (b) Deneysel [12].

İki emiş borusuna sahip bir santrifüj pompada birisi geleneksel diğer yenilikçi iki çark tasarımının pompa verimine etkisinin incelendiği çalışmada [14], OpenFOAM analizleri ile elde edilen verim değerlerinin deneysel ölçümlerle %97 oranında örtüştüğü tespit edilmiştir. Aynı basma yüksekliğine sahip iki pompa arasından yenilikçi olanın pompa gövdesi maliyetlerini %5 oranında azaltacağı öngörülmüştür (Şekil 3).



Şekil 3. (a) Geleneksel, (b) yenilikçi santrifüj pompa çarkı basınç oranı dağılımı [14].

Bilindiği gibi rüzgâr türbinlerinin verimlerini direkt etkileyen faktörlerden birisi de türbin yerleşimleridir [15]. Benzer şekilde gel-git (tidal) türbinlerinin de denize yerleştirilmeden önce konumlarının tespit edilebilmesi kurulum maliyetlerinin düşürülmesini ve enerji eldesinin artırılmasını sağlayacaktır. Öncelikle tek bir türbin etrafındaki su akışının deneysel ve nümerik incelendiği çalışmada [16], türbin ardındaki hız değerlerinin OpenFOAM ile %8 bağıl hatayla hesaplatıldığı belirtilmiştir. Dört adet türbinin iki farklı yerleşimi ile türbülans yoğunluğu değişiminin incelendiği çalışmada türbinler arasındaki uzaklığın artmasının performans açısından avantajlı olduğu verilmiştir (Şekil 4).



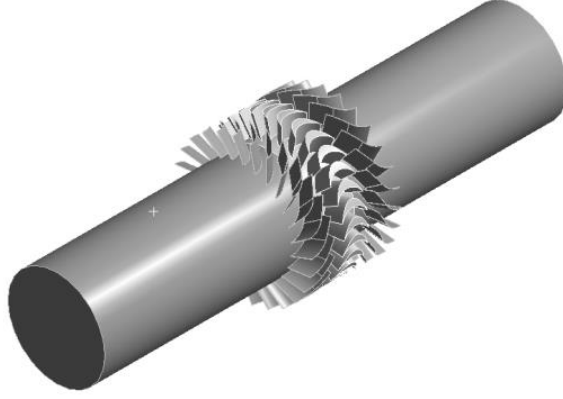
Şekil 4. Gel-git (tidal) türbinleri etrafındaki hız değişimleri ve çevrinti oluşumları [16].

3. ÖRNEK ÇALIŞMA: BİR HAVA TÜRBİNİNİN SİMÜLASYONU

Deniz dalgalarından enerji elde edilmesinde kullanılan salınan su sütunu denize kısmen batırılmış ve tabanı açık bir basınç odası olarak düşünülebilir [17]. Oda içindeki su seviyesi, dalga hareketinden ötürü yükselip alçalır ve oda içindeki havayı bir piston gibi sıkıştırır. Odanın üzerine, atmosfere açılan bir kanal yerleştirilir ve buraya bir hava türbini konursa, kanaldaki hava hareketinden elektrik enerjisi elde edilebilir. Kanaldaki hava hareketi, deniz dalgasının doğasından dolayı çift yönlüdür, buraya yerleştirilecek hava türbininin bu çift yönlü akışa uygun olması gerekmektedir. Örnek çalışmada bu amaçla tasarlanmış bir impuls türbininin [18] OpenFOAM ve ANSYS Fluent ile HAD simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Türbin akış karakteristikleri ve aerodinamik verimi deneysel verilerle kıyaslanmış ve sonuçlar irdelenmiştir.

3.1. İmpuls Türbini Karakteristikleri

Çalışmada kullanılan impuls türbini Şekil 5’ te gösterilmektedir. Hava, sabit duran yönlendirici kanatların arasında hızlanmakta ve rotor üzerine yönlendirilmektedir. Yönlendirici kanatlar türbinin çift yönlü akış altında çalışabilmesi için rotor düzlemine göre simetriktrir.



Şekil 5. İmpuls türbini geometrisi

İmpuls türbini karakteristikleri genellikle akış katsayısı (ϕ)’nin bir fonksiyonu olarak tork katsayısı (C_T), girdi güç katsayısı (C_A) ve verim (η) terimleri ile ifade edilmektedir. Bu birimsiz sayılar şu şekilde tanımlanır:

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho (V_A^2 + U_R^2) b_R l_R z_R r_R} \quad (2)$$

$$C_A = \frac{\Delta P Q}{\frac{1}{2} \rho (V_A^2 + U_R^2) b_R l_R z_R V_A} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{T \omega}{\Delta P Q} = \frac{C_T}{C_A \phi} \quad (4)$$

$$\phi = \frac{V_A}{U_R} \quad (5)$$

Burada, T , ΔP ve Q sırasıyla türbin kanatlarındaki tork (Nm), toplam basınç farkı (Pa) ve havanın hacimsel debisi (m^3/s)’ dir. V_A giriş hava hızı (m/s) ve ortalama yarıçap (r_R)’deki U_R çevresel hız (m/s) olarak ifade edilmiştir. Burada ν göbek çapının kanat çapına oranı ve D türbin çapı (m) olmak üzere;

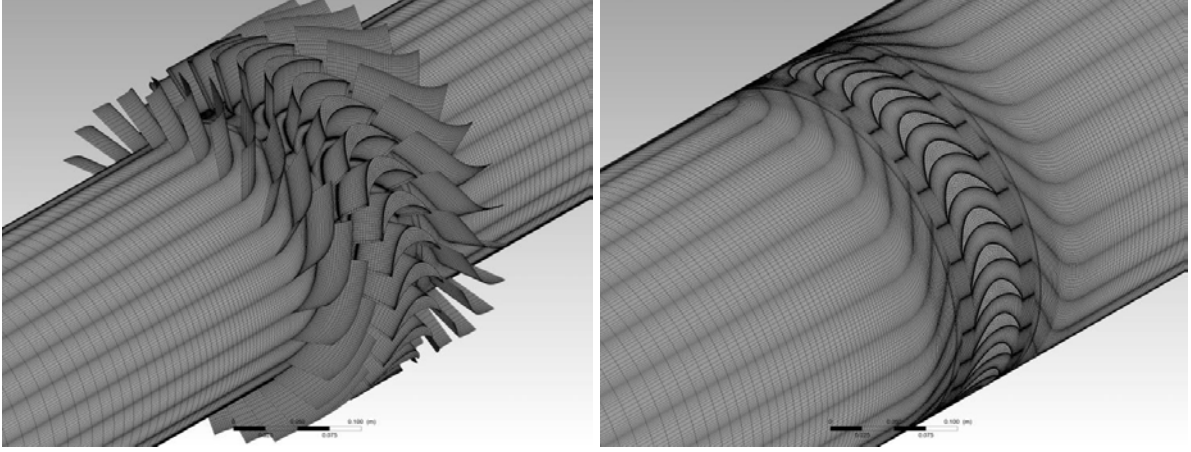
$$r_R = (1 + \nu) \frac{D}{4} \quad (5)$$

ile tanımlanmıştır. Denklem 2 ve 3’ te b_R , l_R ve z_R sırasıyla bıçak yüksekliği (m), bıçak genişliği (m) ve bıçak sayısıdır.

DeneySEL çalışmaların elde edildiği geometrinin ölçüleri $z_R = 30$, yönlendirici kanat sayısı $z_{GV} = 26$, $\nu = 0.705$, $l = 0.054$ m, rotorun eliptik eğrisi için $a=0.1258$ m ile $b=0.0414$ m ve dairesel eğrisinin yarıçapı ise 0.0302 m’ dir [18].

3.2. HAD Simülasyonları

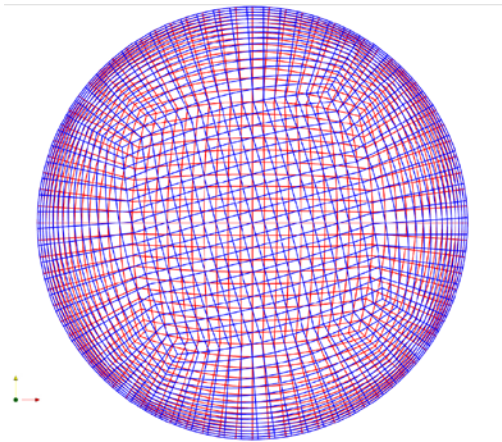
Üç boyutlu akış alanının nümerik çözümleri OpenFOAM ve Fluent ile gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalar daimi akış kabulü ile gerçekleştirildiği için MRF yöntemi dönel ve sabit hacimlerin tanımlanmasında kullanılmıştır. Çoklu blok yapısı kullanılarak altı yüzlü hücreler ağırlıklı hibrit ağ yapısı Şekil 6’ daki gibi oluşturulmuştur. Yönlendirici kanat kalınlıkları ihmal edilerek iki boyutlu eğrisel yüzey olarak tanımlanmıştır.



Şekil 6. İmpuls türbini ağ yapısı

Simülasyonlarda türbülans modeli olarak RKE (realizable k- ϵ) seçilmiştir. Dönel hacmin açısal hızı $n = 200$ devir/dakika olup, giriş hızı Denklem 5 ile verilen akış katsayısının aralığını tarayacak değerler ile çeşitlendirilmiştir. Hesaplama bölgesinin giriş toplam basıncı ve kanatlardaki moment yakınsamayı görebilmek için çözümlene süresince gözlemlenmiştir. Her iki çözücü için aynı ayrıklaştırma dereceleri tanımlanmış olup, tüm çözümler 7.320.984 elemana sahip en uygun ağ yapısı ile tamamlanmıştır.

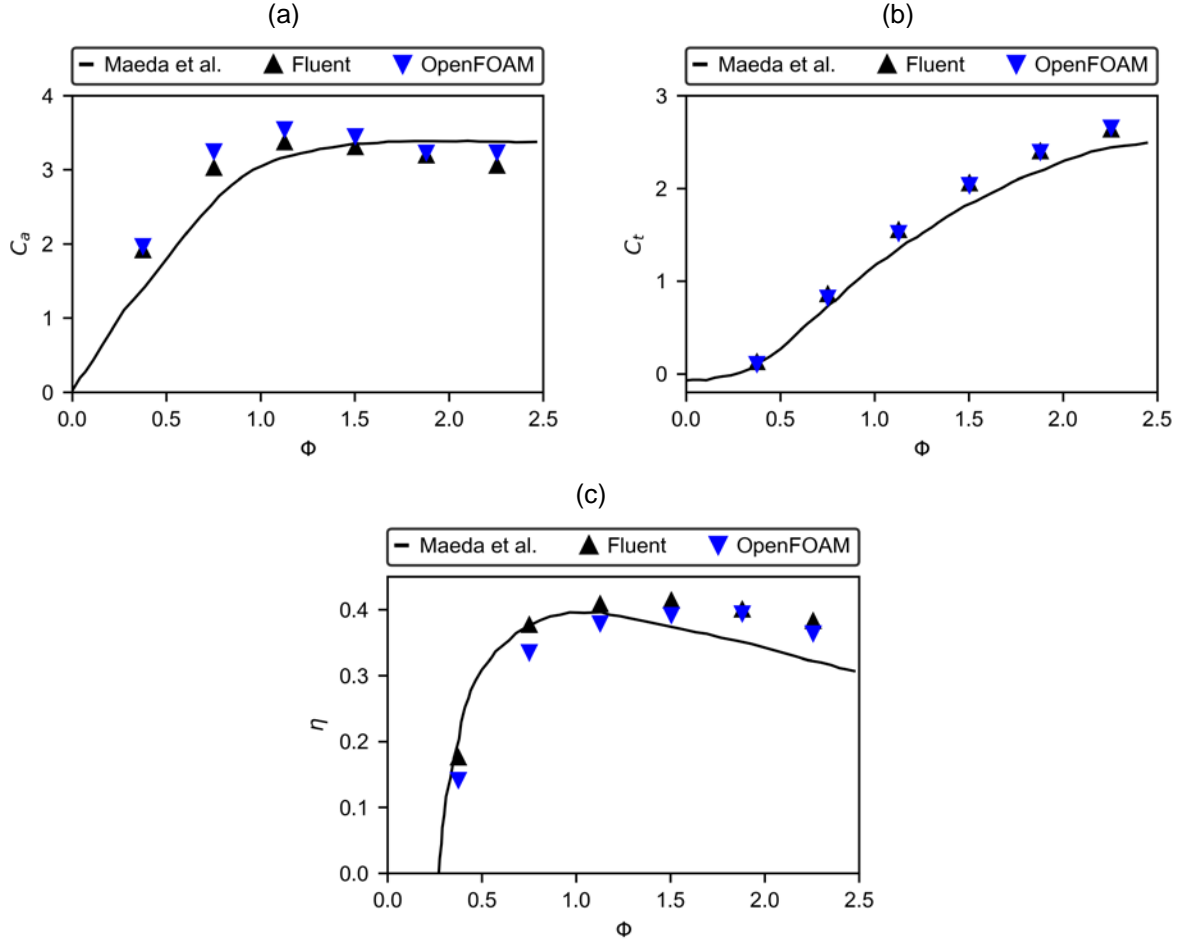
Kanat uç açıklığı probleme dahil edilmiş olup, dönel ve sabit hacimlerin arasında birbirleriyle örtüşmeyen ara yüzey sınır koşulları tanımlanmıştır. OpenFOAM’un farklı versiyonlarında AMI (Arbitrary Mesh Interface) veya GGI (General Grid Interface) olarak tanımlanan yöntemde, Şekil 7’ de görülen mor ve pembe renkli elemanlara sahip iki komşu yüzey arasında iletişim bir algoritma ile sağlanmaktadır [4].



Şekil 7. Düğüm noktalarının örtüşmediği bir ara yüzey sınır koşulu [4]. Üst üste binen iki yüzeyin birinde mor ağ, diğerinde pembe ağ vardır.

3.3. Sonuçlar

Şekil 8' de sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir. HAD simülasyonlarının hem OpenFOAM hem de Fluent için deneysel çalışma [18] ile uyumlu olduğu görülebilmektedir. C_A 'nın, doğal olarak η 'nin göreceli olarak deneysel verilerden, özellikle yüksek akış katsayılarında, az da olsa farklılaştığı gözlemlenmiştir. Bu farkın kaynağının türbin gövdesinin simülasyonlara dahil edilmemesi olduğu öngörülmektedir.

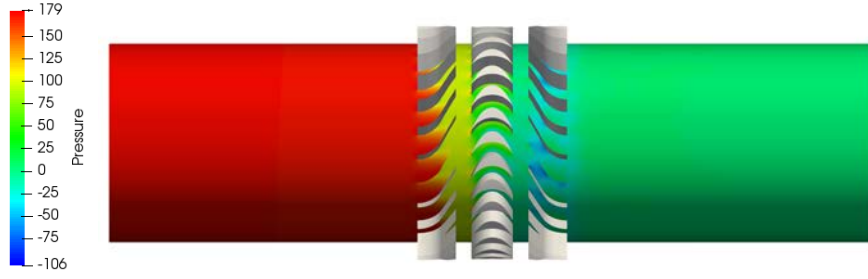


Şekil 8. Deneysel ve nümerik sonuçların karşılaştırılması a) $C_A(\phi)$ b) $C_T(\phi)$ c) $\eta(\phi)$

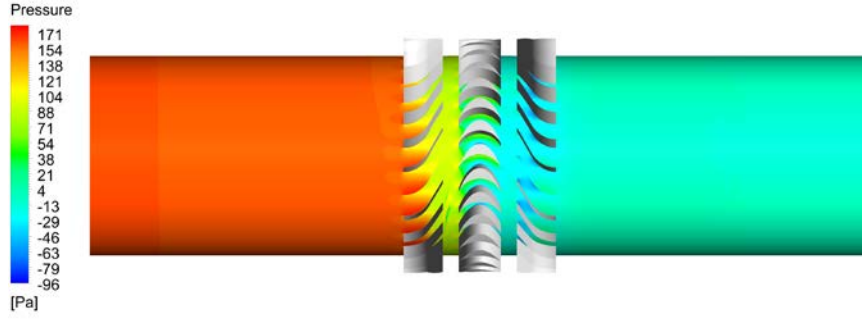
Çalışmada OpenFOAM ile Fluent sonuçlarının yüksek uyumu dikkat çekmektedir. OpenFOAM genel olarak Fluent'a göre %3-4 mertebelerinde daha yüksek değerlere ulaşmışsa da tüm eğrilerde her iki çözücü benzer yönelim göstermiştir. Şekil 9' da statik basınç dağılımları her iki çözümler için kendi sonuçlarına göre düzenlenen aralıklarda, türbinin orta kesitindeki yüzeyde verilmiştir.

Şekil 10' da hız dağılımları her iki çözümler için aynı aralıklarda, türbinin orta kesitindeki yüzeyde verilmiştir. Burada yönlendirici kanatlardan ayrılan akışın OpenFOAM'da daha dağınık olduğu görülmektedir. Karakteristik eğrilerde görülen farklılıkların sebeplerinden birinin bu olduğu düşünülmektedir.

(a)



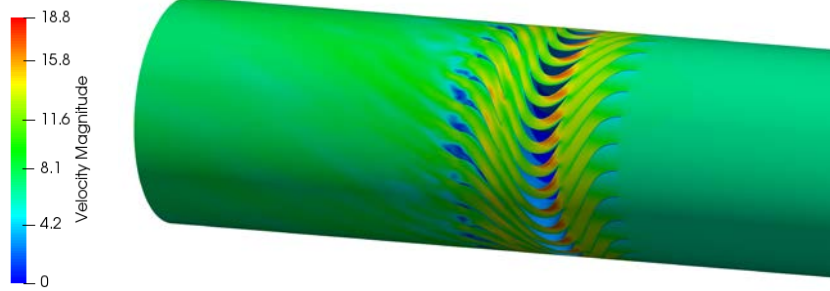
(b)



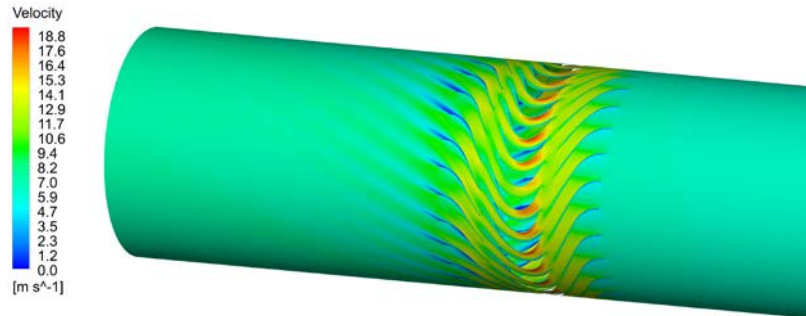
Şekil 9. İmpuls türbini statik basınç dağılımı a) OpenFOAM b) Fluent

OpenFOAM ve Fluent sonuçlarının arasındaki farkın sebeplerinden birisi ara yüzey sınır koşullarında haberleşme kayıpları olabilir. Şekil 11' de bir ara yüzeyin iki farklı komşu yüzeyindeki hız dağılımı sunulmuştur. Fluent'ta her iki yüzey neredeyse aynı dağılıma sahipken, OpenFOAM'da dikkatli incelendiğinde küçük farklılıklar görülmektedir. Yine de her iki komşu yüzeye bakıldığında yeterli veri aktarımının sağlandığı söylenebilir.

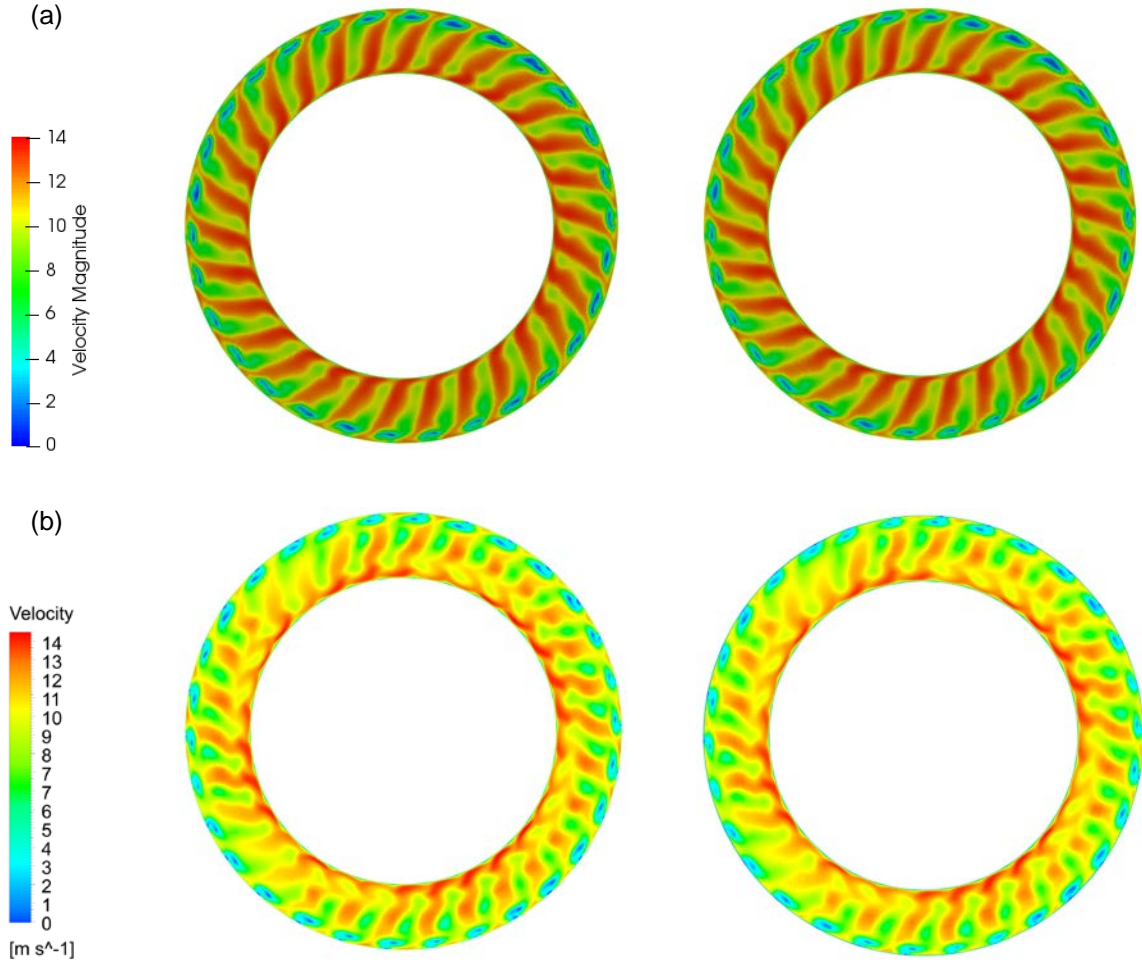
(a)



(b)

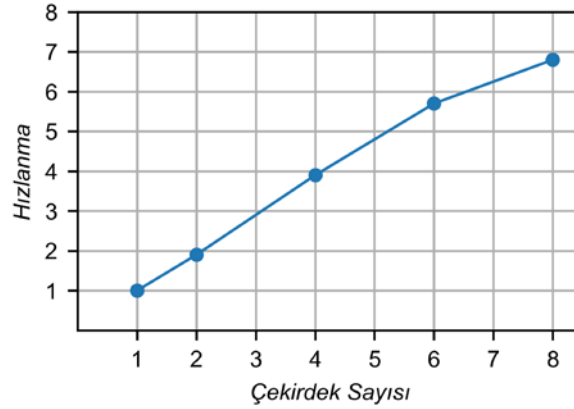


Şekil 10. İmpuls türbini hız dağılımı a) OpenFOAM b) Fluent



Şekil 11. Ara yüzeyin iki farklı komşu yüzeylerindeki hız dağılımı a) OpenFOAM b) Fluent

OpenFOAM'un paralel hesaplama kabiliyeti de çalışmanın çıktılarından biri olmuştur. Seri çözümleme baz alınarak, 8 çekirdeğe kadar elde edilen değerlerde görülmektedir ki, yaklaşık 7 milyona sahip bu çalışmada lineer hızlanmaya neredeyse ulaşılmıştır (Şekil 12). Burada paralel hesaplama için herhangi bir lisansa gerek duyulmaması da önemli bir diğer avantaj olmuştur.



Şekil 12. OpenFOAM' un paralel hesaplama performansının ölçülmesi

SONUÇ

Turbomakina tasarımlarında tartışılmaz öneme sahip HAD yönteminin ticari uygulamalarına alternatif olan OpenFOAM yazılımı popülerliğini artırmaktadır. Lisans ücreti gerektirmiyor olması sayesinde dışa bağımlılığın azaltılmasında avantajlı durumda olan yazılımın turbomakina uygulamalarındaki kapasitesi ve gelişimi, çalışmanın ilk bölümünde literatürden derlenen çalışmalarla irdelenmiştir. OpenFOAM ile gerçekleştirilmiş güncel uygulamalar, yazılımın oldukça rekabetçi olduğunu ve turbomakina uygulamalarında rahatlıkla kullanılabileceğini göstermektedir. Özellikle dönel ve sabit bölgeler arasında düğüm noktalarının örtüşmediği ara yüzelerdeki veri aktarımı konusundaki çalışmalar, çözücünün turbomakina uygulamalarındaki yeterliliğinin daha da artırılacağını göstermektedir.

Çalışmanın ikinci bölümünde bir turbomakina uygulaması olan impuls türbini HAD kullanılarak incelenmiş ve çözümlerle elde edilen türbin performansı deneysel verilerle kıyaslanmıştır. Hem OpenFOAM hem de Fluent ile elde edilen sonuçların deneylerle örtüştüğü görülmüş, nümerik ve deneysel sonuçlardaki farklılıklar irdelenmiştir.

OpenFOAM ile Fluent sonuçlarının da karşılaştırıldığı çalışmada, %3-4 mertebelerinde bağıl hataya sahip OpenFOAM'un rekabetçi yönünü bir kez daha ortaya koymuştur. Türbülans çözümlemesi ve ara yüzey haberleşmesinde küçük farklılıklar bulunsa da OpenFOAM'un yüksek doğruluğa sahip olduğu görülmüştür. Burada şu belirtilmelidir ki, OpenFOAM'un farklı geliştiricileri bazı uygulamalarda birbirlerinden farklılaşmaktadırlar. Özellikle turbomakina konusunda özelleşmiş foam-extend sürümünün sunduğu GGI (General Grid Interface) [4] yardımıyla bu örnek çalışmadaki ara yüzey modellemesinin kalitesi artırılabilir.

Çalışmada, OpenFOAM'un paralel hesaplama kabiliyeti irdelenmiştir. 8 çekirdeğe dağıtılarak, seri hesaplamaya göre yaklaşık 7 kat hızlı çözümleme sağlaması arkasındaki teknoloji hakkında ipucu vermektedir. Lisans ücreti kaygısının olmaması ile OpenFOAM'un yeterli fiziksel donanım sağlandığında çözümleme hızı konusunda olumlu tepki vereceği söylenebilir.

Doğrulama süreçlerinde nicel ve nitel olarak başarılı sonuçların elde edilmesi, temel düzeyde ağ oluşturma ve paralel işlemler için lisans gerektirmemesi ve kaynak koduna erişim kabiliyeti, OpenFOAM'un turbomakina 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] CHEN, G., XIONG, Q., MORRIS, P.J., PATERSON, E.G., SERGEEV, A., WANG Y.C., "OpenFOAM for Computational Fluid Dynamics", 61 (4), 354-363, 2014
- [3] HEINRICH, M., SCHWARZE, R., "Simulation and Validation of the Compressor Stage of A Turbocharger Using OpenFOAM", 8th International Conference on Compressors and Their Systems (Londra, İngiltere) 659-667, Eylül – 2013
- [4] BEAUDOIN, M., JASAK, H., "Development of a General Grid Interface for Turbomachinery Simulations with OpenFOAM", Open Source CFD International Conference (Berlin, Almanya) Aralık – 2008
- [5] PAGE, M., BEAUDOIN, M., GIROUX, A.M., "Steady-state Capabilities for Hydroturbines with OpenFOAM", 25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems (Timisoara, Romanya), 2010
- [6] BEAUDOIN, M., NILSSON, H., PAGE, M., MAGNAN, R., JASAK, H., "Evaluation of An Improved Mixing Plane Interface for OpenFOAM", IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: Computational and Experimental Techniques, 22, 2014
- [7] CVIJETIC, G., GATIN, I., VUKCEVIC, V., JASAK, H., "Harmonic Balance Developments in OpenFOAM", Computers and Fluids, 172, 632-643, 2018

- [8] TOWARA, M., SCHANEN, M., NAUMANN, U., “MPI-Parallel Discrete Adjoint OpenFOAM”, *Procedia Computer Science*, 51, 19-28, 2015
- [9] ZHANG, Y., DENG, S., WANG, X., “RANS and DDES Simulations of A Horizontal-axis Wind Turbine Under Stalled Flow Condition Using OpenFOAM”, *Energy*, 167, 1155-1163, 2019
- [10] MACPHEE, D.W., BEYENE, A., “Performance Analysis of A Small Wind Turbine Equipped with Flexible Blades”, *Renewable Energy*, 132, 497-508, 2019
- [11] DECAIX, J., DREYER, M., BALARAC, G., FARHAT, M., “RANS Computations of A Confined Cavitating Tip-Leakage Vortex”, *European Journal of Mechanics / B Fluids*, 67, 198–210, 2018
- [12] LIDTKE, A., HUMPHREY, V.F., TURNOCK, S.R., “Feasibility Study Into A Computational Approach for Marine Propeller Noise And Cavitation Modelling”, *Ocean Engineering*, 120, 152–159, 2016
- [13] ABDEL-MAKSOU, M., “In: Proceedings of the Workshop on Cavitation And Propeller Performance”, *The Second International Symposium on Marine Propulsors (Hamburg, Almanya)*, Haziran – 2011
- [14] CAPURSO, T., BERGAMINI, L., TORRESI, M., “Design And CFD Performance Analysis of A Novel Impeller For Double Suction Centrifugal Pumps”, *Nuclear Engineering and Design*, 341, 155–166, 2019
- [15] VASEL-BE-HAGH, A., ARCHER, C.L., “Wind Farms with Counter-Rotating Wind Turbines”, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 24, 19–30, 2017
- [16] NUERNBERG, M., TAO, L., “Three Dimensional Tidal Turbine Array Simulations Using Openfoam With Dynamic Mesh”, *Ocean Engineering*, 147, 629–646, 2018
- [17] PORTER, R., “Complementary Methods and Bounds in Linear Water Waves”, *Doctoral Thesis, University of Bristol*, 1995
- [18] MAEDA, H., SANTHAKUMAR, S., SETOGUCHI, T., TAKAO, M., KINOUE, Y., KANEKO, K., “Performance of An Impulse Turbine with Fixed Guide Vanes for Wave Power Conversion”, *Renewable Energy*, 6, 533-547, 1999

ÖZGEÇMİŞ

Erdem KAYA

1988 yılı Sivas doğumludur. 2010 yılında yılında Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nü bitirmiştir. 2018 yılında yine aynı bölümden Yüksek Mühendis ünvanını almıştır. 2011-2015 yılları arasında Vestel Beyaz Eşya A.Ş. firmasında Ar-Ge Mühendisi, 2015-2018 yılları arasında Figes A.Ş. firmasında Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Mühendisi olarak görev yapmıştır. 2018 yılından itibaren kurucusu olduğu Diferans Mühendislik&Simülasyon firmasında çalışmakta ve mezun olduğu bölümde doktora programına devam etmektedir.

Utku ŞENTÜRK

1980 yılı Denizli doğumludur. Evli ve bir kız babasıdır. 2004 yılında Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nü bitirmiştir. Aynı Üniversiteden 2007 yılında Yüksek Mühendis ve 2011 yılında Doktor ünvanını almıştır. 2015-2016 arasında Princeton Üniversitesi Makina ve Uzay Mühendisliği Bölümü'nde doktora sonrası araştırma yürütmüştür. Halen Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde Doç. Dr. ünvanı ile görev yapmaktadır. Akışkanlar mekaniği, hesaplamalı akışkanlar dinamiği, ısı transferi konularında çalışmaktadır.