

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğine Genel Bir Bakış

Nehir TOKGÖZ¹, Özge SÜFER^{2*}

¹Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 54050, Sakarya, Türkiye

²Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 80000, Osmaniye, Türkiye

¹<https://orcid.org/0000-0001-9264-9971>

²<https://orcid.org/0000-0001-8337-6318>

*Sorumlu yazar: ozgesufer@hotmail.com.tr

Derleme

Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 19.10.2022

Kabul tarihi: 12.04.2023

Online Yayınlanma: 04.12.2023

Anahtar Kelimeler:

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği

Isı transferi

Kütle transferi

Momentum transferi

Akış problemi

ÖZ

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), akışkanlar mekaniği problemlerinin analiz edilmesi ve çözümlenmesi sırasında sayısal yöntemleri, kısmi diferansiyel denklemleri ve hesaplamalı geometriyi bir arada inceler. Hemen hemen bütün mühendislik uygulamalarında geniş bir yelpazede kullanılan bir bilim dalıdır. Güçlü bilgisayarlar ile uygulamalı matematik çözümü yapan bu bilim, akışın söz konusu olduğu bütün endüstriyel işlemlerde ısı, kütle ve momentum transferini ve aynı zamanda akış yapısını modelleyerek optimum tasarımların gerçekleşmesine imkân vermektedir. Birden fazla parametreyi aynı anda irdeleyerek daha az zamanda daha az maliyetle karmaşık problemlerin çözümüne de olanak sağlamaktadır. Bir akış problemini HAD yöntemiyle çözmek için temelde 3 adım takip edilmektedir. İlk olarak akışı tanımlayan genellikle kısmi diferansiyel denklemlerden oluşan matematiksel ifadeler yazılmakta ve ikinci adımda bu eşitlikler sayısal bir analojiye dönüştürülmek için ayrıştırılarak (discretization), akış alanı küçük ağlara (mesh) veya elemanlara bölünmektedir. Üçüncü adımda ise tanımlanan problemin başlangıç ve sınır şartları belirlenerek bu denklemler çözümlenmektedir. Denklemlerin çözümünde, (i) sonlu farklar; (ii) sonlu elemanlar ve (iii) sonlu hacimler yöntemi olmak üzere üç farklı metot kullanılmaktadır. HAD'da kullanılan yazılım teknolojilerinin hızla ilerlemesi ve yazılımların yüksek doğruluğa ve hassasiyete sahip olmasıyla beraber yazılım maliyetlerinin günden güne azalması, akış problemlerinin görselleştirilmesinde ve problemlerin daha etkili ve verimli çözümlenmesinde bu programların yaygın bir şekilde kullanılmasını sağlamıştır. Bu çalışmada; HAD'ın yöntem biliminden, avantajlarından ve dezavantajlarından ve ayrıca çözüm sırasında HAD'da kullanılan denge denklemlerinden bahsedilmiştir.

An Overview About Computational Fluid Dynamics

Review

Article History:

Received: 19.10.2022

Accepted: 12.04.2023

Published online: 04. 12.2023

Keywords:

Computational fluid dynamics

Heat transfer

Mass transfer

Momentum transfer

ABSTRACT

Computational fluid dynamics (CFD) is a science, that examines with partial differential equations and computational geometry together in the analysis and solution of fluid mechanics problems. It is used in a wide range of almost all engineering applications. This discipline, which makes applied mathematics solutions by using powerful computers, allows the realization of optimum designs by modeling the heat, mass and momentum transfer, as well as the flow structure in all industrial processes where flow is concerned. Also, it enables the

solution of complex problems with less cost and the simultaneous analysis of multiple parameters. Basically, 3 steps are followed to solve a flow problem with CFD method. Firstly, the mathematical equations describing the flow, usually consisting of partial differential equations, are written, secondly, they are discretized into a numerical analogy, and then the flow field is divided into small meshes or elements. In the third step, the initial and boundary conditions of the defined problem are determined, and these equations are solved by the different methods, using with finite differences, finite elements and finite volumes. The rapid progress of the software technologies utilized in CFD, and the high accuracy and precision of the software, as well as the decrease in costs day by day, have made these programs widely used in visualizing and solving flow problems more effectively and efficiently. In this study, the basis, methodology, advantages and disadvantages of CFD and the balance equations used in CFD during the solution are mentioned.

To Cite: Tokgöz N., Süfer Ö. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğine Genel Bir Bakış. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2023; 6(3): 2392-2408.

1. Giriş

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), ısı transferinde ve akışkanlar mekaniğinde kullanılan kütle, momentum ve enerji ifadelerindeki kısmi diferansiyel denklemleri yüksek hassasiyette çözebilen geliştirilmiş bir nümerik yöntemdir (Norton ve Sun, 2010; Malekjani ve Jafari, 2018). Pek çok mühendislik probleminde başarılı bir performans sergileyen HAD; basınç, hız vektörü, sıcaklık dağılımı ve ısı işlemler sırasında sıvı veya katıların konsantrasyonlarını ilgi çekici renkli figürler ve animasyonlar kullanarak detaylandıran bir yöntemdir (Lemus-Mondaca ve ark., 2011; Malekjani ve Jafari, 2018). HAD'ın performansı, simülasyonla elde edilmiş nümerik sonuçlar ile belirli koşullar altında yürütülen deneysel veriler arasındaki uyumlu ilişkiye ve gerçekte analizi mümkün olmayan son derece karmaşık süreçlerin ne kadar yüksek çözünürlükte yakınsadığını gösteren sonuçlara göre belirlenir (Oyinloye ve Yoon, 2021a, 2021b).

1900'lü yıllarda ortaya çıkan ve yıllar içerisinde günümüze kadar ciddi ilerlemeler kaydeden HAD teknolojisi sayesinde, ısı ve kütle transferi, faz değişimi, kimyasal reaksiyonlar (Yu ve ark., 2010; Kumar, 2014) ve bir zamanlar oldukça pahalı deneysel teçhizatlar ya da aşırı basitleştirilmiş hesaplamalar gerektiren karmaşık geometri içeren problemler, artık kişisel bilgisayarlarda yüksek düzeyde uzaysal ve zamansal doğrulukla modellenebilir hale gelmiştir (Norton ve ark., 2013). Bu gelişmeler ve iyileştirmeler neticesinde hesaplamalı akışkanlar dinamiği; havacılık (Ali ve ark., 2021; Chakraborty ve Ghosh, 2022; Sadaq ve ark., 2022), otomobil (Li ve ark., 2018; Gurusamy ve ark., 2021; Ouyang ve ark., 2022), biyomedikal (Dutta ve ark., 2020; Inthavong ve ark., 2020), turbomakineler (Karakas ve ark., 2022; Zhang ve ark., 2022) ve ısı değiştiriciler (Tokgoz ve ark., 2018; Hassanzadeh ve Tokgoz, 2019; Bilen ve ark., 2022) gibi birçok endüstriyel uygulamada, okyanus akıntılarının modellenmesi (Martínez-Ferrer ve ark., 2018; Li ve ark., 2019), iklim değişikliği (Mirzaei, 2019; Hadavi ve Pasharshahi, 2021), kirlilik (Badas ve ark., 2019; Jurado ve ark., 2021) gibi çevresel konularda ve ayrıca kardiyovasküler hastalıklar ile kan akışı (Jiang ve ark., 2022; Shinde ve ark., 2022; Uddin ve Yousuf, 2022) problemlerini içeren sağlık konularında yaygın bir şekilde

kullanılmaya başlanmıştır. Diğer bir yandan, HAD teknolojisinin gıda endüstrisi için de önemi yadsınmazdır. Sütün dondurulması amacıyla enerji verimliliği yüksek ve pasif ısı depolama sağlayan sistemlerin geliştirilmesini (Prakash ve Ravindra, 2023), ve tahıl tanelerinin büzülme etkisini ihmal etmeden kurutulmasını konu edinen simülasyonlar (Azmir ve ark., 2019), şişelenmiş sıvıların pastörizasyonu sırasındaki doğal taşınımı modelleyen çalışmalar (Lespinard ve ark., 2019) ve de tepsili kurutucuda bademin kurutulmasını inceleyen araştırmalar (Chilka ve Ranade, 2019) literatürde mevcuttur. Ayrıca gıdaların 3 boyutlu yazıcılarla tasarımında da HAD teknolojisinden başarılı bir şekilde faydalanılabilmektedir (Oyinloye ve Yoon, 2021a). HAD; tahıl macunları (Guo ve ark., 2020), limon suyu (Yang ve ark., 2019), patates pulcukları (Guo ve ark., 2019) ve maya (Cilliers, 2018) gibi gıdaların 3 boyutlu olarak print edilmiş örneklerinde sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenmiştir.

Örneklerden anlaşıldığı üzere, sadece sıvı akış davranışının değil, aynı zamanda ısı ve kütle transferi, faz değişimi, kimyasal reaksiyonlar, mekanik hareketler ile katı yapılarıdaki gerilme veya deformasyon etkilerinin incelendiği tüm tasarım ve geliştirme alanlarında HAD programları kullanılmaktadır. HAD'ın uygulama alanlarına Tablo 1'de, avantajlarına ve dezavantajlarına ise Tablo 2'de yer verilmiştir.

Tablo 1. HAD'ın çeşitli alanlardaki uygulanabilirliği

Endüstriyel uygulamalar	Çevresel uygulamalar	Fiziksel Uygulamalar
• Havacılık	• Turbomakineler	• Hava, su ve çevre
• Mimari	• Makine	kirliliği
• Otomobil	• İnşaat	• Doğal kaynaklarının
Sektörü	• Elektrik-	kirliliği
• Biyomedikal	Elektronik	• İklim modelleme
• Cam üretimi	• Enerji	• Yangın modelleme
• Isıtma-soğutma-	• Gıda	• Okyanus akıntıları
iklimlendirme	• Kimya	• Güvenlik
uygulamaları	• Proses	
• Petrol	• Su	

2. Denge Denklemleri

Bir problemin hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak çözülebilmesi için değişkenlerin tanımlanması, matematiksel denklemlerin ve sayısal yöntemlerin seçilmesi, başlangıç ve sınır şartlarının belirlenmesi ve gerekli olduğunda ampirik korelasyonların seçilmiş olması gerekir. HAD metodunda kullanılan prensip, üç boyutlu akışkan hareketi için tanımlanmış, zamana bağlı-doğrusal olmayan beş adet kısmi diferansiyel denklem sisteminden oluşan ve akışkanlar mekaniğinin temeli sayılan Navier-Stokes denklemlerinin çözümüne dayanır (Doering ve Gibbon, 1995). Denge

denklemleri olarak da anılan bu eşitlikler, akış ve ısı transferinin ana denklemleri olan kütle, momentum ve enerji korunum yasalarının matematiksel formülasyonları şeklinde düşünülebilir. Söz konusu matematiksel eşitlikler, sürekli akışın sağlandığı bir ortama uygulandığında, akışkan özelliğinin değişim oranını dış kuvvetlerle ilişkilendiren temel korunum yasaları tanımlanır.

Tablo 2. HAD yönteminin olumlu ve olumsuz özellikleri

Avantajlar	Dezavantajlar
<ul style="list-style-type: none"> • Zaman tasarrufu • Azalan maliyet • Detaylı bilgi • Farklı, tehlikeli ve sıra dışı koşulları benzetim yeteneği • Yüksek katma değerli ürün 	<ul style="list-style-type: none"> • Basit akış modelleri veya basitleştirilmiş koşullarda hata • Türbülans, çoklu faz ve diğer zor mühendislik problemlerinde yetersiz modeller • Deneyimli kullanıcı olmaması durumunda çözücünün yanlış sonuç vermesi ve bu yüzden çok sayıda tecrübe ve alıştırmaya ihtiyaç duyması • Yanlış sonuçlar nedeniyle deney sayılarının artması ve dolayısıyla maliyetlerin yükselişi

Kütlenin korunumu yasası (süreklilik denklemi): Belirli bir zaman aralığında kontrol hacmine giren veya çıkan net kütle geçişi, aynı zaman aralığındaki net kütle değişimine eşittir. Başka bir ifadeyle kütle vardan yok, yoktan var edilemez (Cengel ve Cimbala, 2013).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla \cdot \bar{u} = 0 \quad (1)$$

Fiziksel olarak $\nabla \cdot \bar{u}$ ifadesi, hız vektörünün \bar{u} bileşenini (ıraksaklığını) temsil eder ve hareketli akışkan elemanın hacminin zamana göre değişim oranını, yani yoğunluğun değişimini gösterir. Sıkıştırılmaz akış kabulüyle çözülen problemlerde yoğunluk sabit olacağından yukarıdaki denklem Eşitlik (2)'deki gibi yazılabilir.

$$\rho \nabla \cdot \bar{u} = 0 \quad (2)$$

Momentumun korunumu yasası (Newton'un ikinci hareket yasası): Bir akışkan parçasına etki eden dış kuvvetlerin toplamının, cismin lineer momentumdaki değişim hızına eşit olduğunu belirtir (Cengel ve Cimbala, 2013).

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_i \bar{u}) = -\nabla p + \rho g \quad (3)$$

Burada u , tüm (x, y, z) yönlerdeki hız vektörüdür. Denklem (3), akışın izotermal olduğu yani viskozitenin sabit kabul edildiği durum için düzenlendiğinde yazıldığında, denklem (4) elde edilir. Bu denklem, sabit viskoziteli sıkıştırılamaz bir akış için Navier-Stokes denklemini tanımlayan ifadedir.

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_i \bar{u}) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \bar{u} + \rho g_i \quad (4)$$

Denklemin sağ tarafında kalan ilk terim basınç kuvvetlerini, ikinci terim kütle kuvvetlerini, üçüncü terim ise viskoz kuvvetleri temsil eder. İlgili denklemde, bu kuvvetlerin birim hacim başına yazıldığı unutulmamalıdır.

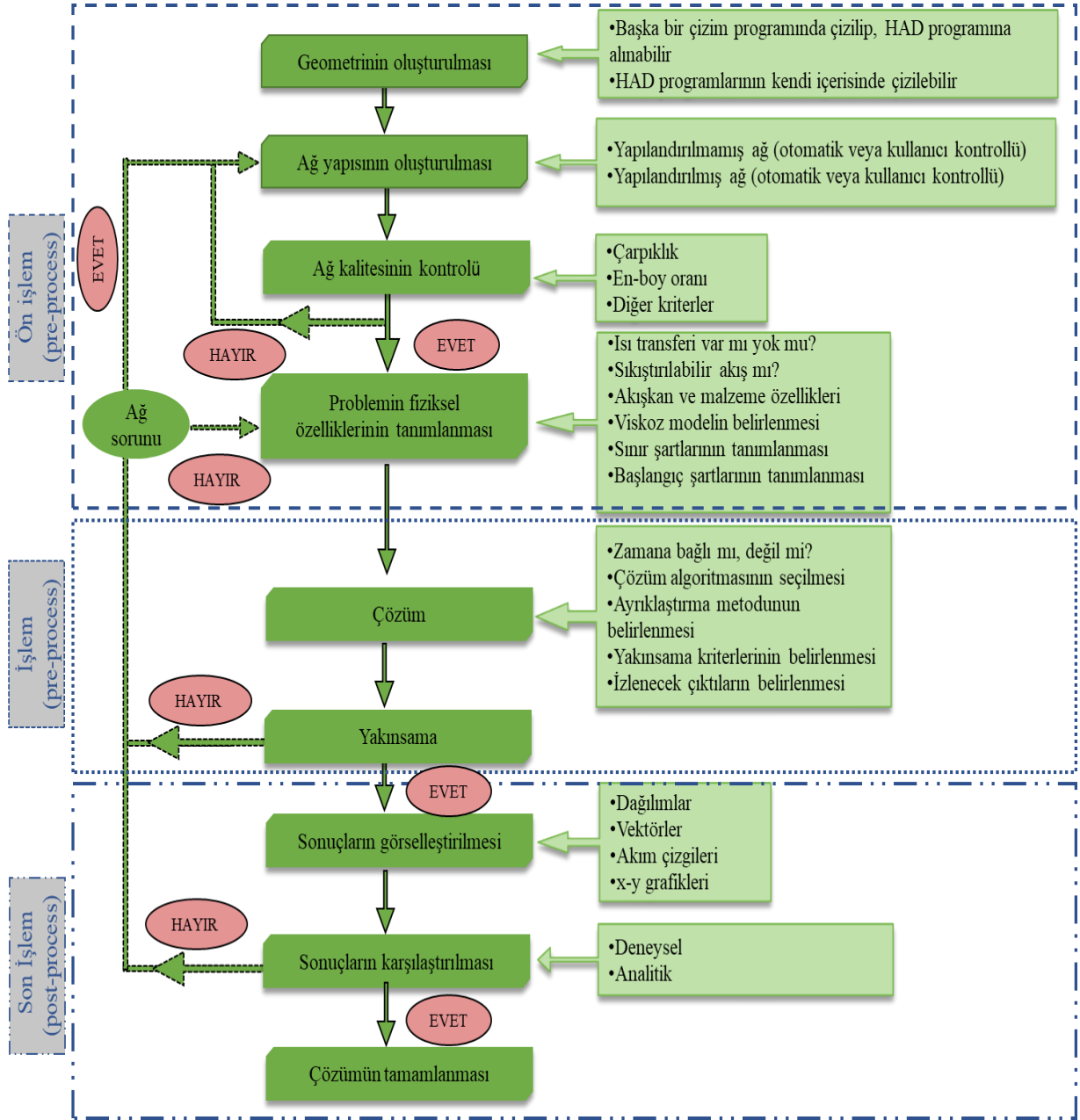
Enerjinin korunumu yasası (termodinamiğin birinci yasası): Bir akışkan parçacığının belirli bir zamandaki enerji değişimi, birim zamanda ısı, iş ve kütle tarafından açığa çıkartılan enerjiye eşittir. Enerjinin farklı biçimlere dönüşebileceğini ifade eder (Cengel ve Cimbala, 2013).

$$\rho C_p \frac{\partial T_f}{\partial t} + \rho C_p u_i \nabla T_f = \lambda \nabla^2 T_f + S_T \quad (5)$$

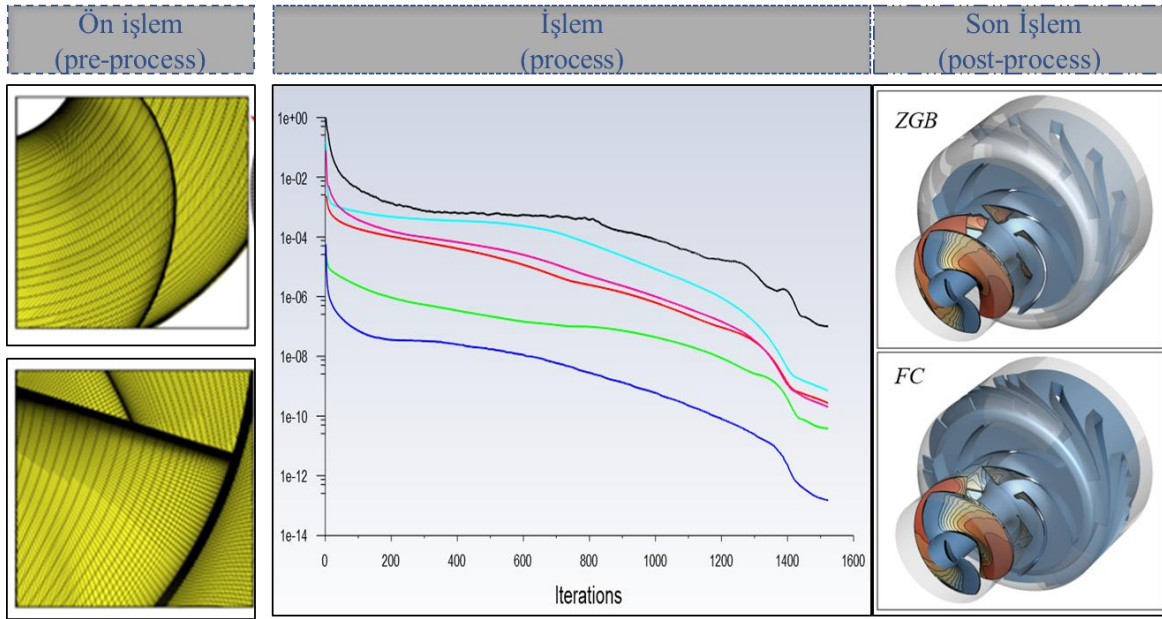
Denklemin sağ tarafında kalan ilk terim; ısı akısının (difüzyonun), ikinci terim ise mekanik enerjinin ısı enerjisine dönüştürüldüğünü gösteren temel ifadedir.

3. HAD'ın Metodolojisi

HAD, bir akış alanındaki denge denklemlerinin (süreklilik, Navier-Stokes denklemleri vb.) sayısal çözümü şeklinde gelişen bilgisayar için bellek ve hesaplama açısından pahalı olan yinelemeli bir süreci ifade eder. Sayısal bir analiz yapmak için önce problem belirlenir, matematiksel olarak ifade edilir ve daha sonra HAD yazılımı ile bu matematiksel ifadenin somutlaştırılarak hesaplanması sağlanır. Problemi analiz eden uzman tarafından elde edilen sonuçlar, renklendirilmiş şekil temaları ile görselleştirilerek yorumlanır. Prensip olarak HAD simülasyonunu gerçekleştirebilmek için kendi döngüsü içerisinde üç ana akış tipi izlenir. HAD modelleme sürecinin adımları, Şekil 1'de, sürecin uygulanmış hali ise örnek bir çalışmadan alıntılanarak Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 1. HAD ile modelleme prosesi

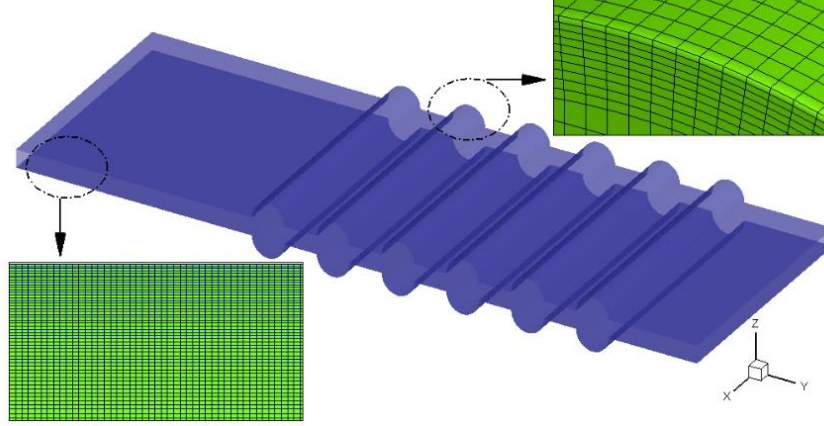


Şekil 2. HAD işleminin uygulanma aşamaları (Karakas ve ark., 2022)

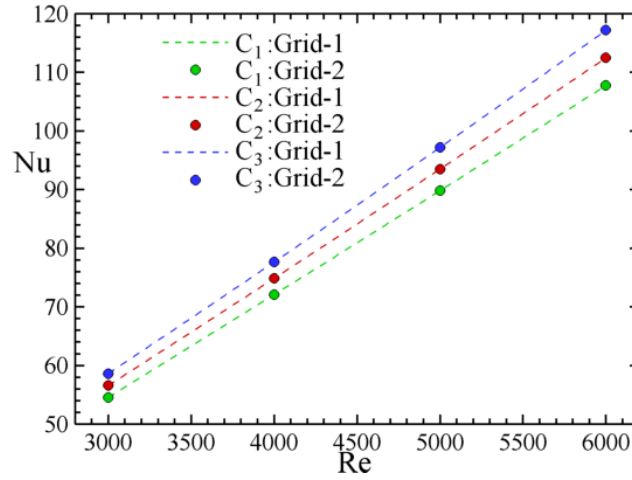
3.1. Ön İşlem (Pre-process)

Çözüm aşamasına geçilmeden önce gerçekleştirilen tüm süreçler, ön-işlem olarak nitelendirilir. Güvenilir sonuçlar elde etmek için hesaplanacak akış alanının seçimi çok önemlidir. Bunun yanı sıra, tasarımcı problemin fiziğine ve akışın nelerden etkilenebileceğine hâkim olacak alt yapıya sahip olmalıdır. Problemin geometrik çizimi, çeşitli bilgisayar programları aracılığıyla gerçekleştirilip HAD programlarına aktarılabilirdiği gibi bu aşama, paket programların kendi içerisindeki modüller aracılığıyla da yapılabilmektedir. Geometri çizimini takip eden ikinci aşama, ağ yapısının oluşturulmasıdır. Akış alanı, hacimler veya elemanlar olarak da bilinen çok sayıda ağa (hücreye) bölünür. Belirli algoritmaya göre otomatik veya tasarımcı kontrollü yapılan ağlara bölme aşaması, problemin doğru çözülmesi için son derece önemlidir. Genellikle uzmanların en çok zamanını alan bu aşamadaki çözümün güvenilirliği, doğrudan tanımlanmış ağa bağlıdır. Ağ elemanlarının boyutları, yüksek hassasiyette ve doğrulukta çözümün gerekli olduğu belirli yerlerde örneğin, türbülansın direnç gösterdiği alanlarda veya cidarlara yakın sınır tabakaya yakın yerlerde çok küçük olmalıdır. Cidara yakın olan elemanların aralıklarına uygun y^+ değerini belirlemek için doğrudan Reynolds sayısı (Re) kullanılır. Seçilen türbülans modelinin doğru sonuç vermesi için sınır tabaka içindeki eleman sayısının 10-20 arasında olması veya y^+ değerinin 5'ten küçük olması gerekirken, bazı durumlarda da eleman sayısının 30'dan büyük olması tercih edilebilir (Fluent, 2002). Elemanların boyutları küçüldükçe hesaplama süresi ve bellek gereksinimleri artar. Bu nedenle, ağ boyutlarının seçimi, başlı başına bir optimizasyon işlemidir ve gerekli olan alanlarda ağ iyileştirmelerini ve dolayısıyla akışkan hareketinin daha yavaş olduğu veya katı cisimlerin araştırıldığı yerlerde, daha büyük elemanların kullanılmasını gerektirir. Örnek bir ağ çalışması Şekil 3'te gösterilmiştir. Gereğinden sık yapılmış hücre bölme işlemleri çözüm için çok fazla vakit harcanmasının yanı sıra, sonucun doğru çıkmamasına sebebiyet

verirken; çok seyrek yapılmış hücre bölme işlemleri ile oldukça kısa bir sürede ulaşılan sonuçlar ise kullanıcıyı yanıltan çözümlere sebep olur. Bu olumsuzlukları giderebilmek için HAD çalışmalarında, mutlaka ağdan bağımsız olarak yapılacak testlere yer verilmelidir (Şekil 4). Ağdan bağımsızlık testi ile doğru çözümlere ulaşılmaya çalışılsa da karmaşık bir ağ oluşturmak kolay değildir. Hızla ilerleyen bilgisayar teknolojilerine rağmen, özellikle 3 boyutlu türbülanslı akış problemleri için yeterince sık ağ yapısındaki çözüm alanını ayırklaştırmak hala çok zordur.



Şekil 3. Isı transferini iyileştirmede kullanılan oluklu bir kanalın örnek ağ yapısı (Tokgoz, 2019)

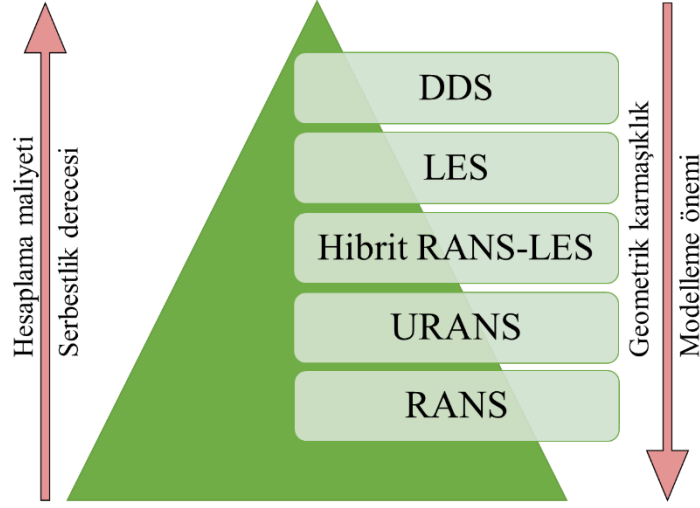


Şekil 4. Nusselt sayısı için ağdan bağımsızlık örneği (Tokgoz ve ark., 2017)

Ağlara bölme işlemi tamamlandıktan sonra, problemde yer alan sıvıların ve katıların özelliklerinin doğru bir şekilde tanımlanması ve başlangıç-sınır şartları ile türbülans modelleri gibi tüm değişkenlerin programda ayrıca belirtilmesi gereklidir. Başlangıç-sınır şartları, gerçek durumların ilişkilendirildiği matematiksel ifadelerin oluşturulmasında kilit bir role sahip olup, sınır şartlarının seçimi ön işlemin bir diğer önemli adımıdır. Fiziksel problemin özgün sınır koşulları ile karakterize edilmediği ve uygun olmayan sınır şartlarının seçildiği durumlar, çoğu zaman yanıltıcı sonuçlara yol

açar. En gerçekçi model için, mutlaka akışın fiziğine ve farklı sınır koşullarının sayısal çözüm üzerindeki etkisine hâkim olan kapsayıcı bir seçim tercih edilmelidir.

Sınır şartlarının seçiminden sonra, HAD yöntemiyle problemin nasıl çözüleceğinin belirlendiği viskoz model seçim aşamasına geçilir. Navier-Stokes denklemleri, herhangi bir modelleme varsayımı kullanılmadan, yani *Doğrudan Sayısal Simülasyon* veya kısaca *DDS* yöntemiyle laminar akış için doğrudan çözümlenebilir. Ancak, türbülanslı akışta Kolmogorov mikro ölçeklerindeki akışkan hareketinin çözümü, henüz hesaplamalı olarak mümkün değildir. Bu nedenle türbülanslı akış rejiminde Navier-Stokes denklemlerinin yanı sıra, türbülans modelleri de çözümlenmelidir. Her bir türbülans modeli, her tip problem için doğru çözüm vermeyebilir. Programı analizini gerçekleştiren uzmanın tecrübesine bağlı olarak yapılacak bu seçimler, daha önce de söz edildiği gibi sonuçların doğruluğu, çözüm süreci ve dolayısıyla maliyet üzerinde çok etkilidir. Mühendislik uygulamalarının birçoğunun, türbülans modelleri kullanılarak çözümlenmesi gerektiği unutulmamalıdır. Öte yandan, akışkan yapılarının karmaşıklığını doğru bir şekilde çözmek için gerekli ağ çözünürlüğü ve zaman adımları, Reynolds sayısının küpü ile yaklaşık olarak ölçeklendirilebilir. Bu yaklaşım, mühendislik uygulamaları için DDS kullanımını neredeyse imkânsız hale getirir. DDS, akademide ve araştırma kurumlarında, sadece basit akışları modellemek için deneylerle birlikte kullanılmaktadır. Mühendislik uygulamalarında ise genellikle bir cisim üzerine etki eden kuvvetlerle veya bir akış boyunca değişen hız ile ilişkili ortalama veya integre nicelikler üzerinde çalışılmaktadır. Bu nicelikleri elde etmek için türbülanslı akışların sözü edilen modelle çözümlenmesi, uygun maliyetli ve güvenilir çözümlerin daha verimli kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Genel olarak türbülans modelleri, temel denklemlere göre sınıflandırılır. Bunlar, Reynolds ortalama Navier-Stokes (RANS) modelleri ve hesaplama dalgalanmaları üzerinde çalışan büyük girdap simülasyonları (Large Eddy Simulation, LES) modelleridir. Türbülanslı akışları çözmek için kullanılan en yaygın yaklaşımların özeti Şekil 5'te gösterilmiştir. Bir HAD simülasyonunun hesaplama maliyeti, akışı çözmek için gereken serbestlik derecesi sayısı arttıkça RANS'tan DDS'ye yükselir. Hesaplama maliyetinin bir sonucu olarak, DDS ve LES gibi yaklaşımlar genellikle basit geometrilere uygulanırken, hibrit RANS-LES, URANS ve RANS modellemeleri kullanılarak karmaşık endüstriyel problemler başarıyla çözümlenmektedir.



Şekil 5. RANS'tan DDS'ye hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde kullanılan türbülans modelleri (Sagaut ve ark., 2013)

RANS olarak adlandırılan denklemleri elde etmek için, Navier-Stokes denklemlerinin ortalaması alınır. Ortalanmış bu denklemler, orijinal Navier-Stokes denklemlere çok benzemekte, ancak momentumun tanımlandığı ifade, bilinmeyen ve modellenmesi gereken Reynolds gerilme terimleri adı verilen bazı ek terimleri içermektedir. Türbülans durumundaki süreç değişkenlerinin akış rejimi içinde belirli bir değer aralığında olacağı varsayılarak türbülans modellerinde ele alınan bu terimlerin türbülans üzerine etkisini çözmek için RANS denklemleri kullanılır. RANS denklemleri; bir eşitlik içeren, iki eşitlik içeren RANS modelleri ile düşük Reynolds sayılı modeller olmak üzere 3 gruba ayrılabilir. Tek eşitlikli RANS denklemleri, türbülans kinetik enerji (TKE) gibi tek taşınım eşitliklerini çözmek için kullanılmakta iken; iki eşitlik modeller, TKE'nin yanı sıra, ϵ gibi TKE'nin yayılma oranını ya da ω gibi spesifik yayılma oranını açıklayan türbülans özelliklerini de kapsayabilir. Son kategorideki modelin ise iki eşitlik içeren denklemlere oranla, daha az ağ duyarlılığına ve ağ noktasına ihtiyaç duyduğu belirtilmektedir (Yusof ve ark., 2020). RANS ile modelleme, endüstriyel uygulamalarda kullanılan en yaygın yaklaşımdır. Tüm RANS modellerinde, modelin matematiksel formülasyonunu türetmek için modele uygun kabul sınırları vardır. Bazı uygulamalar için, tüm türbülans ölçeklerini modellemek yerine, akışın en çok enerji içeren yapılarını çözmeye çalışan ve LES adı verilen daha ayrıntılı yaklaşımların kullanılması gerekebilir. Bu yaklaşımda LES en küçük türbülans ölçekleri uzaysal olarak filtrelenirken, en büyük ve en çok enerji içeren ölçekler doğrudan çözülür. LES modellemesi, uygulanabilirlik aralığı ve çözümün doğruluğu açısından avantajlı gibi görünse de, zamana bağlı çözümün gerektirdiği hesaplama maliyetleriyle birlikte, akışı daha fazla detaylandırmak için ağ bağımlılık yani daha fazla eleman sayısına ve hassasiyetine ihtiyaç duyar.

Tüm türbülans modelleri doğası gereği, güçlü varsayımsal yönlere ve sınırlamalara sahiptir. Türbülanslı akışlara en uygun modeli seçme konusunda, uzman kullanıcının deneyimini ortaya koymadan, kolaylıkla uygulanabilecek hiçbir model yoktur. Ayrıca doğruluk, tutarlılık ve güvenilirlik

açısından yeterli simülasyonlar elde etmek için model katsayılarının belirlenmesi de son derece önem taşımaktadır.

3.2. İşlem (Process)

Ağ yapısı oluşturulan, başlangıç ve sınır şartları ile viskoz modeli belirlenen problem için tanımlanan matematiksel denklemler, bir bilgisayar yazılımı ile çözülür. Bu yazılımda kullanılan genel bir analitik çözümü olmayan kısmi diferansiyel denklemler, akış alanında spesifik noktalarda yer alan her değişkenin yaklaşık değerini hesaplamak için ayrıklaştırılmalı ve sayısal olarak çözülmelidir. Modelleneyecek ağın her bir hücresine uygulanan ve denklemin ayrıklaştırılması olarak bilinen bu aşamada, ele alınan her bir noktaya ait sınır koşulları belirlenir ve denklemler integre edilir. Kullanılan çözücüye bağlı olarak farklı ayrıklaştırma şemaları vardır. Yoğun ve son derece karmaşık olan bu süreç tekrarlanarak her adımda bilgisayarın binlerce denklemi çözmesi sağlanır. Hesaplamalar belirli bir kesinlik elde edilinceye kadar devam eder ve genellikle bir veya daha fazla özelliğe ait denklemin çözdürülmesi sonucunda elde edilen residue (artık) değerine göre değerlendirilir. Bu değer dikkate alındığı noktada çözümün yakınsadığı söylenir. Araştırılacak mekanizmaya uygun olarak zamana bağlı (daimî olmayan) veya zamandan bağımsız (daimî) simülasyonlar gerçekleştirilebilir. Bir akışın zaman içindeki davranışı araştırılırken daimî olmayan simülasyonlara ihtiyaç duyulur. Geniş bir zaman aralığına ihtiyaç duyulan ve kullanıcı tarafından sadece izlendiği için işleyişin çok az bir kısmını oluşturuyor gibi algılanabilen bu süreç, HAD yazılımının temelini oluşturan en kritik aşamadır (Xia ve Sun, 2002). HAD'da çok sayıda ticari yazılım programı mevcuttur. Bunlardan en çok tercih edilen yazılım programları ve kullanılan kodlar, Tablo 3'te detaylı olarak verilmiştir.

3.3. Son İşlem (Post-process)

Son işlem aşaması, HAD analizi ile üretilen verilerin değerlendirilmesini sağlar. Model çözüldüğünde elde edilen sonuçlar hem sayısal hem de grafiksel olarak analiz edilebilir. Çözücü, akış alanı boyunca tüm değişkenlerin dağılımını gösteren bir harita oluşturur. Bu sonucun kolayca raporlanabilmesi, görselleştirilebilmesi ve analiz edilebilmesi için, simülasyonun kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesini sağlamak amacıyla gerçekleştirilen “son işlem” aşamasının başarılı olması önemlidir. Yüksek donanımlı son işlem HAD yazılımları, 2 boyutlu basit grafiklerden başlayarak 3 boyutlu karmaşık gösterimlere kadar her yüzeyde görselleştirme yapabilirler. Görselleştirme ile elde edilen grafiklerden bazıları hız, basınç ve sıcaklık alanları, vektörel ve skaler değişkenlerin dağılımları hakkında bilgi verdiği gibi her geometriye uygun olarak tasarlanabilen gösterimlerdir (Smale ve ark., 2006). Renkli olarak görselleştirilen bu sonuçların yorumlanması ve sunulması oldukça kolaylaşmaktadır. Akış alanında geçerli konumlar için tüm değişkenlerin anlık değerine ilişkin bilgilerin kullanıldığı sayısal hesaplamalar yapılabilir. Simülasyon sonuçları elde edildiğinde, öncelikle çözümün tatmin edici olup olmadığını kontrol etmek ve ardından doğrulama yapmak çok

önemlidir. Tutarsız ve beklenmeyen durumlarla karşılaşılması halinde, başa dönülerek simülasyonun yenilenmesi ve düzeltmelerin yapılması gerekmektedir.

Tablo 3. Yaygın kullanılan ticari HAD yazılımları

Firma	HAD Kod	Yöntem	Erişim adresleri
<i>ANSYS, Inc</i>	CFX Fluent Polyflow	SHY	https://www.ansys.com/
<i>CHAM Ltd.</i>	PHOENICS	SHY	http://www.cham.co.uk/
<i>SIEMENS</i>	STAR-CCM+ STAR-CD	SHY	https://www.plm.automation.siemens.com/
<i>COMSOL Multiphysics</i>	COMSOL	SEY	https://www.comsol.com/
<i>Autodesk</i>	Autodesk® CFD	SEY	https://www.autodesk.com/
<i>OpenFOAM</i>	OpenFOAM	SHY	https://openfoam.org/
<i>Flow Science, Inc.</i>	FLOW-3D	SHY	https://www.flow3d.com/

SHY: Sonlu Hacimler Yöntemi, SEY: Sonlu Elemanlar Yöntemi

3.4. Doğrulama

Bilimsel araştırmalarda ve mühendislik sistemlerinin analizinde ve tasarımında yer alan fiziksel süreçlerde simülasyonların kullanılması, son yıllarda gelişen bilgisayar teknolojilerinin birçok alanda tercih edilmesini sağlamıştır. Analizi yapılan sistemlerin tasarım şartlarında, tasarım dışı şartlarda, arıza modunda veya kaza anında nasıl sonuçlar verecekleri simüle edilmektedir. Bu sistemlerin içerisinde sadece mekanik olanlar değil, aynı zamanda doğal sistemlerde yer almaktadır. Örneğin, yüzey suyu kalitesinin analizinde ve yeraltı nükleer atık depolarının risk değerlendirmesinde, çevresel tahminlerde bile bilgisayar simülasyonları kullanılmaktadır. Hesaplama sonuçlarının güvenilirliği, modelleme ve simülasyon sonucunda elde edilen tahminleri doğrudan etkileyeceğinden, simülasyon destekli tahminler, kamu politikasının geliştirilmesinde, güvenlik aşamalarının hazırlanmasında ve yasal sorumluluğun belirlenmesinde stratejik açıdan çok önemlidir. Çünkü tahminlerin doğruluğu, bu tahminlere göre kararını belirleyen mühendislik tasarımcılarını, yöneticileri, kamu görevlilerini ve tüm çalışanları ciddi anlamda etkiler. Mühendislik sistemlerinde kullanılan "sanal prototipleme" ve "sanal test" gibi terminolojik işlemler, mühendislik geliştirmede, yeni donanımın hatta tüm sistemin tasarımında, değerlendirilmesinde ve test edilmesinde, sayısal simülasyonun tanımlanmasını

sağlamaktadır (Oberkampff ve Trucano, 2002). Modelleme ve simülasyon tabanlı bu yeni tasarım trendi, uçak, otomobil ve tüketici ürünlerine yönelik artan rekabet ortamında, birçok pazara sunulan teklif süresini ve maliyetini azaltma ihtiyacından dolayı ortaya çıkmıştır. Bu yeni trendin tercih edilme sebeplerinden bir diğeri ise, sistemlerin bir bütün olarak test edilmesi için gereken laboratuvar veya saha unsurlarının yüksek maliyetli olması ve zaman almasıdır. Ayrıca, ürünün veya sistemin güvenlik özellikleri, sayısal simülasyonları test etme veya doğrulama konusunda oldukça önemlidir. Donanım arızalarının oluşturacağı yasal ve sorumluluk maliyetleri bir şirket, çevre veya toplum için çok yüksek seviyededir. Bu hesaplama dayalı tasarımlardan bazılarında ilişkin sağlamlık veya güvenlik kriterlerinin test edilemeyecek kadar yüksek risk taşıyan sistemler olduğu göz önüne alındığında, donanım hatalarından kaynaklanan hususlar çok daha kritik hale gelmektedir. Örneğin, test edilen bir nükleer santral için tasarlanmış bire bir ölçekli bir koruma binasının, yüksek bir ofis binasından yayılan yangının veya kara taşımacılığı kazasına karışan nükleer silahın hasarı durumunda karşılaşılabilecek muhtemel sonuçlar, bu kapsamda değerlendirilebilir.

Sağlama, bilinen çözümlerle karşılaştırılarak bir hesaplama modelinin matematiksel bir mantık çerçevesinde yorumlanması sonucunda elde edilen çözümün doğruluk derecesinin değerlendirilmesidir. Doğrulama ise bir hesaplama ile gerçekleşen simülasyonun deneysel verilerle karşılaştırılarak kesinliğinin değerlendirilmesidir. Dolayısıyla, sağlama işleminde, simülasyonun gerçek dünya (gerçek veriler) ile doğrudan ilişkili olup olmaması bir sorun değildir. Ancak doğrulamada ise hesaplama ile gerçek dünya, yani deneysel veriler arasındaki ilişki mutlaka tanımlanmalıdır. Başka bir deyişle, sağlama öncelikle matematiksel bir sorunun çözümü için gerekli iken, doğrulama ise öncelikle bir fizik sorununa çözüm bulmak için yapılır. Günümüzde hesaplamalı simülasyon kullanıcıları ve geliştiricileri, “modelleme ve simülasyona olan güven algısı, eleştirel olarak nasıl değerlendirilmelidir?” şeklinde kritik bir soruyla karşı karşıyadır. Hesaplamalı simülasyonlara ait sağlamaların yapılarak doğrulandığı aşamalar, söz konusu güven ortamının ölçüklendirilebilir şekilde oluşması açısından kayda değerdir.

4. Sonuç

Bu derleme çalışmanın amacı, hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin hangi alanlarda kullanılabileceğine ışık tutmak ve bu teknolojinin önemli basamaklarına denge denklemleri sayesinde değinerek, akademide ve sektörlerde yaygın bir şekilde kullanılan ticari HAD bilgisayar yazılımları hakkında bilgi vermektir. Geometri, ağ oluşturma, model çeşitleri gibi bir HAD modelini ortaya çıkartmada önem arz eden elemanlar ve adımlar detaylıca tartışılmıştır. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, bu konuda Türkçe kaynak konusunda eksiklikler olduğu görülmüştür. HAD modellerinin kesinliklerini arttırmak için bir dizi çalışma yapılması gerektiği de ayrıca önerilmektedir. HAD, yeni tasarımların veya proseslerin performansını, üretim ve uygulama aşamalarından önce yüksek doğrulukta tahmin eden oldukça etkili bir teknolojidir. Dolayısıyla, HAD ile modelleme birçok şirketin mühendislik tasarımının ve analiz işlemlerinin vazgeçilmez bir parçası haline gelmiş ve gelecektir (Schaldach ve

ark., 2000). Simülasyonlardan alınan her sonucun, kullanıcı dostu arayüzler ve son teknolojinin sunduğu görselleştirme teknikleriyle birleştirildiği HAD, endüstrinin birçok alanında güçlü ve yaygın bir çözüm odağına dönüşmektedir (Xia ve Sun, 2002). HAD'ın özellikle, havacılık, mimari, gıda, kimya, otomotiv, biyomedikal ve iklimlendirme alanlarındaki üstün başarısı, gelecekteki yeni uygulamalarına referans olacak niteliktedir. Zaman tasarrufu sağlayarak, yüksek katma değerli ürünlerin açığa çıkmasına olanak sağlaması, HAD'ın birincil avantajları olarak gösterilmektedir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduğunu beyan eder.

Kaynakça

- Ali MH., Mehdi SN., Naik MT. Comparative analysis of low velocity vertical axis wind turbine NACA blades at different attacking angles in CFD. *Materials Today: Proceedings 2021*; in press.
- Azmir J., Hou Q., Yu, A. CFD-DEM simulation of drying of food grains with particle shrinkage. *Powder Technology*, 2019; 343: 792–802.
- Badas MG., Salvadori L., Garau M., Querzoli G., Ferrari S. Urban areas parameterisation for CFD simulation and cities air quality analysis. *International Journal of Environment and Pollution* 2019; 66(1-3): 5-18.
- Bilen K., Tokgoz N., Solmaz İ., Balta T. Thermo-hydraulic performance of tube with decaying swirl flow generators. *Applied Thermal Engineering* 2022; 200: 117643.
- Cengel Y., Cimbala J. EBOOK: Fluid mechanics fundamentals and applications (SI units). McGraw Hill; 2013.
- Chakraborty S., Ghosh S. A CFD study on the structural parameters of NACA 2412 airfoil based air-wing using different composite materials. *Materials Today: Proceedings 2022*; 60: 894–901.
- Chilka AG., Ranade, VV. CFD modelling of almond drying in a tray dryer. *Canadian Journal of Chemical Engineering* 2019; 97(2): 560–572.
- Cilliers J. Optimising small hydrocyclone design using 3D printing and CFD simulations. *Chemical Engineering Journal* 2018; 350: 653–659.
- Doering CR., Gibbon JD. Applied analysis of the Navier-Stokes equations. Cambridge University Press; 1995.
- Dutta R., Spence B., Wei X., Dhapare S., Hindle M., Longest P. CFD guided optimization of nose-to-lung aerosol delivery in adults: Effects of inhalation waveforms and synchronized aerosol delivery. *Pharmaceutical Research* 2020; 37(10): 1–18.

- Fluent I. *Fluent 14.5 user guide*. Fluent Inc, Lebanon NH-03766. 2002.
- Guo CF., Zhang M., Bhandari BA. Comparative study between syringe-based and screw-based 3D food printers by computational simulation. *Computers and Electronics in Agriculture* 2019; 162: 397–404.
- Guo C., Zhang M., Devahastin S. 3D extrusion-based printability evaluation of selected cereal grains by computational fluid dynamic simulation. *Journal of Food Engineering* 2020; 286: 110113.
- Gurusamy P., Thirupathiraja S., Raj SHK., Kumar JL. Experimental investigation and CFD analysis of inlet manifold in Internal combustion engine. *Materials Today: Proceedings* 2021; 37: 840–843.
- Hadavi M., Pasdarsahri H. Impacts of urban buildings on microclimate and cooling systems efficiency: Coupled CFD and BES simulations. *Sustainable Cities and Society* 2021; 67: 102740.
- Hassanzadeh R., Tokgoz N. Analysis of heat and fluid flow between parallel plates by inserting triangular cross-section rods in the cross-stream plane. *Applied Thermal Engineering* 2019; 160: 113981.
- Inthavong K., Singh N., Wong E., Tu J. *Clinical and biomedical engineering in the human nose: A Computational Fluid Dynamics Approach*. Springer Nature; 2020.
- Jiang J., Li C., Hu Y., Li C., He J., Leng X., et al. A novel CFD-based computed index of microcirculatory resistance (IMR) derived from coronary angiography to assess coronary microcirculation. *Computer Methods and Programs in Biomedicine* 2022; 106897.
- Jurado X., Reiminger N., Vazquez J., Wemmert C. On the minimal wind directions required to assess mean annual air pollution concentration based on CFD results. *Sustainable Cities and Society* 2021; 71: 102920.
- Karakas ES., Tokgöz N., Watanabe H., Aureli M., Evrensel CA.. Comparison of transport equation-based cavitation models and application to industrial pumps with inducers. *Journal of Fluids Engineering* 2022; 144(1): 011201.
- Kumar A. Analysis of heat transfer and fluid flow in different shaped roughness elements on the absorber plate solar air heater duct. *Energy Procedia* 2014; 57: 2102–2111.
- Lemus-Mondaca RA., Vega-Gálvez A., Moraga NO. Computational simulation and developments applied to food thermal processing. *Food Engineering Reviews* 2011; 3(3): 121–135.
- Lespinaud AR., Badin EE., Santos MV., Mascheroni RH. Computational fluid dynamics analysis on natural convective heating of bottled liquid food during pasteurization: Effect of container orientation. *Journal of Food Process Engineering* 2019; 42(3): e12995.
- Li J., Deng Y., Wang Y., Su C., Liu X. CFD-Based research on control strategy of the opening of Active Grille Shutter on automobile. *Case Studies in Thermal Engineering* 2018; 12: 390–395.
- Li Z., Deng G., Queutey P., Bouscasse B., Ducrozet G., Gentaz L., et al. Comparison of wave modeling methods in CFD solvers for ocean engineering applications. *Ocean Engineering* 2019; 188: 106237.

- Malekjani N., Jafari SM. Simulation of food drying processes by Computational Fluid Dynamics (CFD); recent advances and approaches. *Trends in Food Science & Technology* 2018; 78: 206–223.
- Martínez-Ferrer PJ., Qian L., Ma Z., Causon DM., Mingham CG. Improved numerical wave generation for modelling ocean and coastal engineering problems. *Ocean Engineering* 2018; 152: 257–272.
- Mirzaei PA. CFD modeling of micro and urban climates: Problems to be solved in the new decade. *Sustainable Cities and Society* 2021; 69: 102839.
- Norton T., Sun DW. CFD: An innovative and effective design tool for the food industry. In: *Food engineering interfaces*. Springer; 2010. p. 45–68.
- Norton T., Tiwari B., Sun DW. Computational fluid dynamics in the design and analysis of thermal processes: a review of recent advances. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 2013; 53(3): 251–275.
- Oberkampf WL., Trucano TG. Verification and validation in computational fluid dynamics. *Progress in Aerospace Sciences* 2002; 38(3): 209–272.
- Ouyang T., Mo X., Lu Y., Wang J. CFD-vibration coupled model for predicting cavitation in gear transmissions. *International Journal of Mechanical Sciences* 2022; 225: 107377.
- Oyinloye TM., Yoon WB. Application of computational fluid dynamics (CFD) simulation for the effective design of food 3D printing (A review). *Processes* 2021; 9(11): 1867.
- Oyinloye TM., Yoon WB. Stability of 3D printing using a mixture of pea protein and alginate: Precision and application of additive layer manufacturing simulation approach for stress distribution. *Journal of Food Engineering* 2021; 288: 110127.
- Prakash R., Ravindra MR. Cold thermal energy storage for milk chilling: A numerical and experimental study. *Journal of Food Engineering* 2023; 337: 111223.
- Sadaq SI., Mehdi SN., Mehdi SD, Yasear S. Analysis of NACA 0020 aerofoil profile rotor blade using CFD approach. *Materials Today: Proceedings* 2022; 64(1): 147-160.
- Sagaut P., Terracol M., Deck S. Multiscale and multiresolution approaches in turbulence-LES, DES and Hybrid RANS/LES Methods: Applications and Guidelines. World Scientific 2013; 448 p.
- Schaldach G., Berger L., Razilov I., Berndt H. Computer simulation for fundamental studies and optimisation of ICP spray chambers. ISAS (Institute of Spectrochemistry and Applied Spectroscopy) Current Research Reports, Berlin, Germany. 2000.
- Shinde S., Mukhopadhyay S., Mukhopadhyay S. Investigation of flow in an idealized curved artery: Comparative study using CFD and FSI with Newtonian and Non-newtonian fluids. *Journal of Mechanics in Medicine and Biology* 2022; 22(02): 2250010.
- Smale NJ., Moureh J., Cortella G. A review of numerical models of airflow in refrigerated food applications. *International Journal of Refrigeration* 2006; 29(6): 911–930.

- Tokgoz N., Aksoy MM., Sahin B. Investigation of flow characteristics and heat transfer enhancement of corrugated duct geometries. *Applied Thermal Engineering* 2017; 118: 518–530.
- Tokgoz N., Alıç E., Kaşka Ö., Aksoy MM. The numerical study of heat transfer enhancement using Al₂O₃-water nanofluid in corrugated duct application. *Journal of Thermal Engineering* 2018; 4(3): 1984–1997.
- Tokgoz N. Experimental and numerical investigation of flow structure in a cylindrical corrugated channel. *International Journal of Mechanical Sciences* 2019; 157: 787–801.
- Uddin MJ., Yousuf MSI. Numerical simulation of CFD and fluid-structure-interaction (FSI) of steady flow in a stenotic vessel. *Open Journal of Modelling and Simulation* 2022; 10(3): 255–266.
- Xia B., Sun D-W. Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the food industry: A review. *Computers and Electronics in Agriculture* 2002; 34(1–3): 5–24.
- Yang F., Guo C., Zhang M., Bhandari B., Liu Y. Improving 3D printing process of lemon juice gel based on fluid flow numerical simulation. *LWT-Food Science and Technology* 2019; 102: 89–99.
- Yue G., Zhang H., Zhao C., Luo Z. *Proceedings of the 20th International Conference on Fluidized Bed Combustion*. Springer Science & Business Media; 2010.
- Yusof SNA., Asako Y., Sidik NAC., Mohamed SB., Japar WMAA. A short review on rans turbulence models. *CFD Letters* 2020; 12(11): 83–96.
- Zhang H., Xia B., Kong F., Li G., Cao P. Experimental investigation of cavitation characteristics for a high-speed inducer with a great flow rate. *Advances in Mechanical Engineering* 2022; 14(3): 16878132221087510.