

BİLGİSAYAR DESTEKLİ SİMÜLASYON VE HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ



Bahar Aslanbay Güler^{1,a}, Esra İmamoğlu^{1,b,*}

¹Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomühendislik Bölümü, İzmir, Türkiye

*Sorumlu Yazar:

E-mail: esraimamoglu@yahoo.com

(Geliş 10 Mart 2020; kabul 08 Haziran 2020)

a:  <https://orcid.org/0000-0002-0113-4823>, b:  <https://orcid.org/0000-0001-8759-7388>

ÖZET. Günümüzde, endüstriyel uygulamalardan ulaşım sektörüne, savunma sanayiinden deneysel çalışmalara kadar pek çok alanda akış içeren sistemler mevcuttur ve bu sistemlerin istenen verimde çalışabilmesi için çeşitli yaklaşımlar ortaya konmaktadır. Gelişen teknoloji ve artan talepler ile birlikte bu yaklaşımlar deneysellikten uzaklaşmış ve yerini bilgisayar ortamında yürütülen simülasyon uygulamalarına bırakmıştır. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, bilgisayar destekli simülasyon programlarından biri olup ortaya koyduğu başarılı sonuçlarla pek çok çalışmanın odak noktası haline gelmektedir. Bu yöntem ile deneysel yöntemlerle hesaplanması zor olan modellerle, ısı transferi, basınç kayıpları, enerji dağılımları ve akış hızları gibi veriler prosesin ilk aşamalarında simüle edilebilmektedir. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, sistem planlamalarında zaman kaybını en aza indirdiği, karmaşık problemlerin çözümüne imkân sağladığı, kurulum maliyetini azalttığı ve farklı parametrelerin tek seferde değerlendirilmesine olanak tanıdığı için geniş kullanım alanına sahiptir. Sahip olduğu avantajlar sayesinde bu yöntemin yaygın olarak kullanıldığı alanlar; uçak ve araçların aerodinamiği, gemi hidrodinamiği, enerji santralleri, elektrik elektronik ve biyomedikal mühendisliği gibi sektörlerdir. Bu makalede, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinin genel özelliklerinden ve piyasada bulunan simülasyon yazılımlarından bahsedilmiş, çözümlenmeler sırasında kullanılan temel korunum yasaları incelenmiş, analiz sırasında yürütülen prosedür detaylıca anlatılmış ve tekniğin yaygın olarak kullanıldığı alanlar ortaya konmuştur.

Anahtar kelimeler: Akışkanlar mekaniği, modelleme, Navier-Stokes eşitlikleri, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, Hidrodinamik

COMPUTER AIDED SIMULATION AND COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

ABSTRACT. Nowadays, fluid flow systems take place in a wide variety of areas, ranging from industrial applications to the transportation sector and experimental studies. In order to maximize the efficiencies of these systems, various approaches are suggested. Among these approaches, computer aided simulation techniques have attracted more interest than experimental studies by the reason of developing technology and increasing demands. Computational Fluid Dynamics technique is a powerful tool to simulate fluid flow and it has become an increasingly popular choice for hydrodynamic studies. It has been used to clarify fluid flow, heat transfer, pressure losses and energy distributions in the early stages of process by solving complex models that are difficult to calculate by experimental methods. Computational Fluid Dynamics technique has a wide range of applications because it prevents time losses during the system design, allows the solution of large and complex problems, reduces the cost and different parameters can be evaluated at one time by using it. Considering several advantages, its application areas include aerodynamics of aircraft and vehicles, hydrodynamics of ships, power plants, electric-electronic and biomedical engineering applications. In this article, general characteristics of Computational Fluid Dynamics and commercially available simulation softwares are mentioned, the main conservation equations are examined, stages of analysis are explained in details and common application areas are presented.

Keywords: Fluid Dynamics, hydrodynamics, Modelleme

GİRİŞ

Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte sağlık, imalat, işletme, pazarlama gibi pek çok alanda zaman, maliyet ve risk yönetimi açısından çeşitli yenilikçi sistemler göz önünde bulundurulmaktadır. Bu sistemler arasında mühendislik uygulamaları için yaygın olarak tercih edilen çözümlene yöntemlerinden biri sistemin matematiksel ifadesini sağlayan modellerdir. Proseslerde kritik öneme sahip değişkenlerin nicel ifadesinin sayısal modellerle ortaya konması, mevcut yapının iyileştirilmesinde ve farklı ölçeğe sahip benzer sistemlerde büyük avantaj sağlamaktadır. Belirli parametreler üzerinden oluşturulan modellerle faktörlerin etkisi incelenmekte ve maksimum verimin eldesi için optimum koşullar öngörülebilmektedir. Ancak, parametrelerin sayısı ve karakteristik özellikleri ne kadar detaylı incelenirse, oluşturulacak modeller de o kadar karmaşık ve zor hale gelmektedir [1, 2]. Bu sebeple proseslerin sayısal ifadesi bilgisayar destekli simülasyon programları ile eldeki tüm verilerin kullanımıyla daha kolay ve daha hızlı gerçekleştirilebilmektedir. Simülasyon, herhangi bir gerçek sürecin veya fiziksel sistemin zaman üzerinden taklit edilmesi ve sonuçlarının değerlendirilmesidir. Bu sürecin ilerleyişinde, prosesdeki değişkenler arasında tanımlanmış ilişkileri ve süreçleri içeren sayısal modeller yer almaktadır. Bilgisayar ortamında gerçekleştirilen bu işlem ile bir üretimdeki değişkenlerin etkisi incelenmekte, olası değişikliklerin sonuçları izlenmekte ve maksimum verim için gerekli tasarım parametreleri ön görülebilmektedir. Bu açıdan proseslerin simülasyonu, sistemlerin geliştirilmesinde yaşanan zaman kaybını en aza indirmektedir. Proses değişkenleri ya da tasarımı konusunda geliştirilen yenilikçi fikirlerin iş gücü gereksinimi ve deneme-yanılma yoluna gerek kalmadan değerlendirilmesiyle maliyet açısından da avantaj sağlanmaktadır [3, 4].

“Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği-HAD (Computational Fluid Dynamics-CFD)” özellikle akış içeren proseslerde yaygın olarak kullanılan ve üzerinde yoğun çalışmaların yürütüldüğü bir simülasyon tekniğidir. Bu derlemede, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinin genel özellikleri ve işleyişi üzerine detaylı bilgiler verilerek kullanım alanları ortaya konmuştur.

HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ

Endüstriyel proseslerde yer alan temel bileşenlerden biri, sistem performansını büyük ölçüde etkileyen akışkanlardır ve mühendislik bakış açısıyla akışkan davranışının tespit edilmesi son derece önemlidir. Ancak herhangi bir anda, herhangi bir noktada bulunan akışkanın özelliklerinin belirlenmesi tüm sistem göz önüne alındığında imkânsız hale gelmektedir. Analitik yöntemlerle hesaplanamayan özellikler için kullanılan HAD, akış içeren sistemlerde problem çözmek ya da bir tasarımı geliştirmek için nümerik analizleri ve algoritmaları kullanan bilgisayar tabanlı bir tekniktir. Yüksek teknolojiye sahip bilgisayarlar sayesinde proseslerin gerçekleştirildiği sistemlerin tasarımı en basit düzeyden en karmaşık parçalara kadar ayrıntılı olarak sağlanabilmektedir [5].

HAD ile ilgili gerçekleştirilen çalışmalar son yıllarda yoğunluk kazanmış olsa da bu tekniğin temelleri 1920’li yıllarda sayısal analizlerin araştırılmasına dayanmaktadır. İlerleyen süreçte, çok sayıda HAD algoritması ortaya konmuş ve gelişen teknoloji ile ortaya çıkan ticari yazılımlar sayesinde gerek genel gerekse özel amaçlı uygulamalar için pek çok ticari yazılım piyasaya sürülmüştür [6].

HAD, akışkanın profilini ortaya çıkarmak için basınç, hız ve sıcaklık dağılımını, akışkanın sürüklenme ve kaldırma gibi kuvvetlerini, gaz-sıvı ve gaz-katı içeren çoklu

fazları ve proses sırasında meydana gelen reaksiyonları incelemektedir. Bu kriterlerin çözümlenmesi ve analizi sonucunda geliştirilecek yeni tasarımların çalışma prensipleri öngörülebilme, optimizasyon parametreleri değerlendirilmekte ve olası sorunların çözümü gerçekleştirilebilmektedir [5, 7]. Bu teknik ile sıvı akışı, basınç kayıpları, ısı ve kütle transferi, kimyasal reaksiyonlar ve bunlarla ilişkili sonuçlar elde edilebilmekte ve böylelikle zaman ve maliyet açısından üreticiye büyük avantajlar sağlanmaktadır. Bunun yanı sıra, analitik yöntemler için karmaşık yapıya sahip çok fazlı akışlar, ileri türbülans modelleri, dönen parça analizi gibi modellerin çözümünde HAD son derece ideal bir metottur [8, 9].

Piyasada HAD uygulamaları için çeşitli firmalar tarafından geliştirilen kodlar mevcuttur. Bu alanda en başta gelen şirketlerden biri CFX programını piyasaya sunan ANSYS Inc.'dur. CFX ile çoklu faz akışları, ısı transfer mekanizmaları, yanma ve radyasyon modellerini simüle etmek ve çok çeşitli akış problemlerini çözmek mümkündür. Ayrıca FLUENT, PHOENICS, STAR-CD, FLOW3D, CFD-ACE, ICEM CFD, PAM-FLOW, CFD++ gibi çok sayıda yazılım bulunmaktadır [10, 11].

Temel Eşitlikler

Akışkan akışı ve ısı transferini analiz eden denklemler, akışkanlar mekaniğinde kullanılan temel korunum yasalarının matematiksel eşitlikleri olarak kabul edilmekte ve genel olarak Navier-Stokes denklemleri olarak adlandırılmaktadır. Bu temel yasaların belirli akış alanındaki sonlu hacimler için çözümlenmesiyle kütle, momentum ve enerji korunumuna dair denklemler elde edilmektedir [12].

i. Kütle korunumu: HAD yönteminin dayandığı denklemlerden biri kütle korunumu olup sisteme giren ve sistemden ayrılan toplam kütle eşit olduğunu ifade etmektedir. Buna bağlı olarak kullanılan denklik [9, 13];

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

Eşitlikte $\nabla \cdot (\rho V) \equiv \text{div } \rho V$ olup koordinat sistemine göre belirlenmektedir. Kartezyen koordinat sistemi göz önüne alındığında mevcut eşitlik Denklem 2 haline gelmektedir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad 2$$

ii. Momentum korunumu: Momentum korunumu, bir nesne üzerindeki net kuvvetin o nesnenin momentumunun zaman ile değişimine orantılı olduğunu belirten Newton'un 2. yasasına dayanmaktadır. Bu yasa momentum değişimlerinin, sürtünme kayıplarına neden olan viskoz kuvvetleri ve basınç değişimlerinin toplamına eşit olduğunu savunmaktadır. Programda gerçekleştirilen çözüm sırasında akışkanın x, y ve z koordinatlarında momentum eşitliği analiz edilmektedir. Bu koordinatlar için çözdürülen eşitlikler [9, 13];

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad 3$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad 4$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad 5$$

Bu eşitlikte; p , basıncı; τ , stresi; ρf_i , akışkan üzerine etkiyen kuvveti ve $\frac{\partial(\rho u, v, w)}{\partial t}$ ise x, y ve z koordinatları için zamana bağlı momentum değişimini ifade etmektedir.

iii. Enerji korunumu: HAD analizlerinde enerjiyle ilgili yürütülen çözümlerler termodinamiğin 1. Yasasına dayanmaktadır. Bu yasaya göre akışkan bir elementteki enerji değişimi, ısı artışı ve yapılan iş toplamına eşittir. Buna bağlı olarak enerji korunumuna dair kullanılan eşitlik Denklem 6'da ifade edilmiştir [9, 13];

$$\rho \frac{De}{Dt} = \rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) - p \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \tau_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} + \tau_{yx} \frac{\partial u}{\partial y} + \tau_{zx} \frac{\partial u}{\partial z} + \tau_{xy} \frac{\partial v}{\partial x} + \tau_{yy} \frac{\partial v}{\partial y} + \tau_{zy} \frac{\partial v}{\partial z} + \tau_{xz} \frac{\partial w}{\partial x} + \tau_{yz} \frac{\partial w}{\partial y} + \tau_{zz} \frac{\partial w}{\partial z} \quad 6$$

Denklem 6'da; e , moleküler hareket kaynaklı iç enerjisi; " q "; birim kütle başına ısı artış oranını; k , ısı iletkenliği ve T , sıcaklık değerini belirtmektedir.

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Aşamaları

HAD tekniği, "*Temel eşitlikler*" bölümünde verilen denklemleri kullanarak akışkan içeren prosesler hakkında analiz gerçekleştirmekte ve etkili sonuçlara ulaşmaktadır. Bu analizin çözümlenmesi sırasında izlenen temel basamaklar şu şekildedir,

i. Modelleme ve simülasyon işleminin amacının belirlenmesi: HAD simülasyonunun ilk aşamasında, işlemin sonucunda hedeflenen çıktının ve temel amacın ne olduğu belirlenmektedir. Bu amaç doğrultusunda, akışkan türü (laminer, türbülans, kararsız), çalışma koşulları, akışkanın etki alanı gibi parametreler göz önünde bulundurularak gerçekleştirilecek analiz ile ulaşılmak istenen sonuçlar planlanmaktadır [14].

ii. Analiz edilecek bölgenin tanımlanması: Çeşitli ölçüğe sahip proseslerde akışkan hareketinin görüldüğü bir ya da birden fazla bölge bulunmaktadır ve başarılı bir simülasyon için analizi gerçekleştirilecek kısım iyi bir şekilde tanımlanmalıdır. Çözümleme ve analiz işlemlerinin nerede başlayıp nerede sonlanacağını belirtmek için sınır koşullarının detaylıca belirtilmelidir. Bunun yanı sıra analizi gerekmeyen bölgelerin sisteme dahil edilmesi zaman ve maliyet açısından zarara yol açmaktadır [5, 14].

iii. Tanımlanan bölgenin çizimi: Simülasyon amacının belirlenmesi ve ilgili bölgenin detaylarının tanımlanmasının ardından, bilgisayar ortamındaki çeşitli yazılımlara geçilerek sistem geometrisinin çizimi yapılmaktadır. Bu aşamada akışkan içeren bölgenin programa detaylı bir çiziminin sunulması gerekmektedir. Çeşitli geometrilerin aktarılmasında programda mevcut bulunan CAD çizimleri kullanılabilir gibi sıfırdan bir çizimle yapıları oluşturmak da mümkündür. Karmaşıklığı en aza indirmek, kolay ilerlemek ve simülasyon süresini kısaltmak için geometride akışta etkisi olmayan detaylar çıkartılır, karmaşık bölgeler eğer mümkünse sadeleştirilir [5, 15].

iv. Matematiksel ağ (meş) oluşumu: Çözüm öncesi yürütülen aşamalarda en önemli kısım, çizilen geometrinin matematiksel ağlara bölündüğü meş üretim aşamasıdır. Bu noktada mevcut geometri çok sayıda, küçük, üst üste çakışmayan hücrelere (meş) bölünmektedir. Analiz sırasında her bir meş için eşitlikler çözüleceğinden, simülasyonun doğru sonuç vermesi büyük ölçüde bu aşamaya bağlıdır. Çalışılan geometrinin yapısına göre meşin sayısı, yapısı ve özellikleri belirlenmektedir. Matematiksel ağların oluşumunda kullanılan meş türleri; 2 boyutlu (triangle, quadrilateral) ve 3 boyutlu (tetrahedron, pyramid, hexahedron) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Meş atma işlemi

tüm geometri için otomatik gerçekleştirilebileceği gibi arada kalan bölgeler, dar alanlar, ince kıvrımlar için manuel olarak daha detaylı olarak sağlanabilmektedir [5, 16].

v. Ortam koşullarının ve akışkan özelliklerinin tanımlanması: Çözümüne geçmeden önce sistemde bulunan akışkanın yoğunluk, viskozite gibi fiziksel özellikleri, prosesin çalışma koşulları, tekli-çoklu faz oluşumu, ısı enerji değişimleri gibi parametreler programa tanımlanmaktadır. Sistemdeki akışkan özellikleri manuel olarak tanımlanabilir ya da program kütüphanesinde hazır bulunan çeşitli materyallerden elde edilebilir [17].

vi. Sınır koşullarının tanımlanması: İlk aşamada belirlenen ve çizimi yapılan geometride akışkanın hareketine bağlı olarak ilgili bölgeler için sınır koşullarının tanımlanması gerekmektedir. HAD analizinde en çok kullanılan sınır koşulları; akışkanın giriş-çıkışı, simetri durumları, fiziksel sınır koşulları ve basınç değişimleridir [5, 17].

vii. Çözüm modelinin belirlenmesi: Tanımlanan sistemin analiz sürecine geçmeden önce çözüm için kullanılacak modellerin belirlenmesi gerekmektedir. Akışkanlar mekaniğinde akış problemleri temelde laminar akış, geçiş akışı ve türbülans akış olmak üzere üç gruba ayrılır. Her üç akış şeklinin analizi için birbirinden farklı matematiksel formülasyonlar ve geliştirilmiş modeller bulunmaktadır. Sistemin analizi için öncelikle akış özelliği tespit edilmekte ve buna uygun akış modeli tespit edilmektedir. Ayrıca akışkan hareketine etki eden kuvvetler tanımlanmakta ve sistemde bulunan akışkan sayısına göre tekli ya da çoklu faz modelleri uygulanmaktadır. Bu aşamada yazılımlar tarafından sağlanan ve yaygın olarak kullanılan temel akış modelleri; laminar, $k-\epsilon$, $k-\omega$, Reynolds stress (RSM) ve Large-eddy simulation (LES) modelleridir. Bu hazır modellerin yanı sıra, kullanıcı tarafından analiz öncesinde CFD kodları ile sisteme aktarılan eşitlikler doğrultusunda yeni ve ilave modellerin değerlendirilmesi de mümkündür [17, 18].

viii. Sistemin çözümü: Çözüm aşamasına gelindiğinde her bir meş için seçilen modeldeki eşitlikler çözdürülür ve sisteme tanımlanan yakınsama kriterine ulaşılan kadar süreç devam eder. Yakınsama işlemi çözüm sonuçları arasındaki fark göz ardı edilebilecek kadar azaldığında durdurulur. Sonuçların doğruluğu, geometrideki detaylara, uygun modelin tanımlanmasına ve meş kalitesine bağlı olarak değişmektedir [19].

ix. Sonuçların değerlendirilmesi: Simülasyonun son aşamasında, yakınsama kriteri sağlanarak sonlandırılan analiz kapsamında program tarafından çeşitli sonuçlara ulaşılmakta ve bu veriler dışarı aktararak sistemin değerlendirilmesi sağlanmaktadır. Elde edilen veriler; akış profilini, oluşan girdapları, kaldırma-sürüklenme gibi kuvvetlerin etkisini, tasarım gereksinimlerini, ısı enerji değişimlerini ortaya koymaktadır. Sonuçların 1D, 2D ve 3D boyutlarda görselleştirilmesi sağlanarak akışkanın hareketi, farklı kontur seviyeleri ve renklendirmeler ile parametrelerin değişkenliği, izo hacimlerin gösterimi, parçacık izleme ve animasyon oluşturma gibi etkili çıktılar elde edilmektedir [5, 17].

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinin Kullanım Alanları

Akışkanlar mekaniği ile ilgili hesaplamalar pek çok endüstriyel alanda karşımıza çıkmaktadır ve bu sistemlerin simüle edilmesinde HAD programlarının kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. HAD tekniği, bir akışkanın hareketi süresince bulunduğu ortamdaki fiziksel durumunu, difüzyon, yayılım, akış rejimi gibi karakteristik özelliklerini anlamada

etkili bir araştırma aracı olarak kullanılmaktadır. Bu araştırmalar gerek eğitim alanında gerekse endüstriyel proseslerde kullanılmak üzere temel literatür birikimi oluşturmada oldukça önemlidir [5]. HAD simülasyonunun sıkça kullanıldığı başlıca alanlar şunlardır;

i. Havacılık ve uzay endüstrisi: HAD analizinin havacılık endüstrisinde kullanımı 1970'li yıllara dayanmakta olup gelişen bilgisayar sistemleri ve uçak teknolojisi ile birlikte günümüzde giderek yaygınlaşmaktadır. HAD kullanımı ile tasarlanacak ya da optimize edilecek bir hava aracının üretim aşamasında izlenen yol; temel aerodinamik teorilerinin belirlenmesi, HAD analizi ile uçağın kritik bileşenlerinde hava akımının incelenmesi ve simülasyonu, hava tüneli testleri ve uçuş testidir. HAD teknolojisinin uygulanmasıyla uçak ve uzay araçlarının kalkış anı, uçuş sırasında etki eden kaldırma kuvveti, beklenmeyen hava akımlarında meydana gelebilecek olası tehlikeler ve iniş aşamaları için hava-aracı arasındaki mekanik ilişkiler incelenmektedir. Özellikle uzay araçlarında süreçlerin fiziksel testinin imkansız olması, test edilebilen kriterlerin ise yüksek maliyete sahip olması ve hataya yer olmaması simülasyonların önemini arttırmaktadır. Hava araçlarında spesifik olarak kanat ve kanatçıkların tasarımı, kaldırma kuvvetinin analizi, uçuş sırasında meydana gelen sürtünme kuvvetlerinin, itici güçlerin ve motor gereksinimlerinin belirlenmesi, kabin tasarımı ve basınç tasarımı gibi güvenli uçuş için kritik olan parametrelerin analizinde HAD tekniği kullanılmaktadır [20]. Literatürdeki çalışmalardan birinde Chavan ve arkadaşları [21] havanın sürüklenme kuvvetinin etkisini azaltmak amacıyla uçak gövdesinin tasarımında HAD analizinden yararlanmışlardır. Diğer bir çalışmada, uçuş sırasında değişen hava koşulları ile uçağın yalıtım katmanlarında biriken nem miktarının analizi için HAD kullanılmış ve bu miktarın mümkün olduğunca azalmasını sağlayacak uygun modeller geliştirilmiştir [22]. Bu alanda yürütülen çalışmalar sadece akademik alanla sınırlı kalmamakta, uçak sektöründe önde gelen firmaların tasarım departmanlarında da yer almaktadır. Dünya çapındaki firmalar arasında başı çeken Boeing, uçak modellerinin geliştirilmesinde yaklaşık 50 yıldır HAD simülasyon teknolojisini aktif olarak kullanmaktadır [21].

ii. Otomotiv sektörü: HAD'in uygulama alanı olan otomotiv sektöründe de havacılıkta olduğu gibi aerodinamik önemli bir parametredir. Temel korunum denklemlerinin yanı sıra aerodinamik yasalarının da dikkate alınmasıyla, piyasada mevcut ya da tasarlama aşamasında olan araçların dizayn parametreleri incelenmektedir. Bu kapsamda başta enerji verimliliğini arttırmak için motor performansı, yapı ve tasarım bileşenlerinin optimizasyonu olmak üzere araç içi ortamın iyileştirilmesi, güvenliğin artırılması, aeroakustik koşullarının geliştirilmesi için analizler gerçekleştirilmektedir [23, 24]. Bu alanda yürütülen araştırmalardan bazılarında egzoz gazını daha az zararlı hale getiren katalitik konvertörlerdeki akış dağılımının hesaplanması [25], yakıt ikmal sistemlerinde kullanılan basınç kontrol vanasındaki akışkan-basınç özelliklerinin incelenmesi [26], yarış bisiklet lastiğinin aerodinamik kuvvetlere karşı hareketinin simülasyonu [27] ve otomobilin arkasına yerleştirilen kanatın aerodinamik açıdan etkinliğinin analizi [28] gibi amaçlarla HAD tekniği kullanılmış ve önemli sonuçlar elde edilmiştir.

iii. Biyomedikal ve tıp uygulamaları: Tıp ve biyomedikal alanda bilgisayar tabanlı simülasyon programları son dönemlerde sıklıkla tercih edilmekte ve bu kapsamda HAD ile ilgili çalışmalar da giderek hız kazanmaktadır. HAD tekniği, tıbbi müdahaleleri doğru

yönde geliştirmek ve herhangi bir tasarım değişikliğini gerçekleştirmek için deneysel aşama içermeden simülasyon şansı sunarak önemli bir avantaj kazandırmaktadır. Canlı vücudunda akışkan içeren kardiyovasküler ve solunum sistemleri için yürütülen HAD, klinik araştırmalar, tanı ve tedavi protokolleri, medikal cihaz tasarımları gibi konularda yararlı teorik veriler sunmaktadır. Özellikle vücut içerisindeki kanın akış profili, kalp ve damarlarda meydana gelen değişimler, burun fizyolojisi, ilaç taşınımı ve cerrahi uygulamaların öngörülmesi HAD ile çalışılan önemli alanlardır [29]. Literatürde kardiyovasküler sistemle ilgili yer alan son çalışmalarda, hastaya spesifik verilerle yürütülen HAD simülasyonu sonucunda, kişiye özgü tanı ve tedavi yöntemlerinin geliştirildiğine dair başarılı raporlar mevcuttur. Bonfanti ve arkadaşları [30] tarafından yürütülen araştırmada bireyin hemodinamik özellikleri kişiselleştirilmiş HAD simülasyonu ile incelenmiş ve aort diseksiyon durumundaki kan akış profili görüntülenmiştir. Benzer bir çalışmada, stent uygulaması öncesi ve sonrasında hastaya özgü HAD simülasyonu ile boyun arter hemodinamiği izlenerek operasyon başarısı belirlenmiştir [31]. HAD simülasyonunun solunum sistemi için kullanımına dair yürütülen araştırmalarda ise temel amaç insan vücudunda havanın dağılımı ve aerosol ilaçların iletimine dair analizlerin yürütülmesidir [32].

iv. İklimlendirme çalışmaları: HAD ile geliştirilmiş modeller kullanılarak coğrafi alanların, kapalı sistemlerin, endüstriyel ısıtma ve soğutma cihazlarının hava akımına bağlı olarak analizi yapılabilmektedir. Kapalı alanlarda etkili bir iklimlendirmenin sağlanabilmesi için kabinlerin yerleşimi, kullanılacak olan cihazların güç/kapasite seçimleri, döşeme altından yapılan iklimlendirme sistemlerinde yerleştirilecek ızgaraların açıklık oranları, yönleri ve konumları, soğuk/sıcak hava koridorlarının belirlenmesi, data ve elektrik kablolarının döşenmesinde hava akımına etkileri gibi konularda HAD analizleri ile planlama yapılmaktadır. Açık alanlarda ise genel olarak belirli bir şehirdeki/bölgedeki atmosferik olayların, sıcaklık değişimlerinin, yapıların yerleşimi ile ısı verim arasındaki ilişkinin, hava kirleticilerin dağılımı ve atmosfere etkisinin analizi üzerine çalışmalarda HAD teknolojisinden yararlanılmaktadır [33].

v. Diğer uygulama alanları: HAD teknolojisi yukarıda bahsedilen alanlara ek olarak denizcilik, kimya endüstrisi, çevre mühendisliği, inşaat sektörü, enerji, gıda mühendisliği, spor gibi alanlarda çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır [34-36]. Günümüzde HAD ile gerçekleştirilen çalışmaların geldiği noktayı ortaya koymak adına çeşitli güncel çalışmalar derlenmiş ve sonuçlar Tablo 1’de özetlenmiştir [37-48]. Bu verilerden de görüldüğü üzere HAD uygulaması pek çok endüstride kullanılmakta ve verdiği başarılı sonuçlar sayesinde her geçen gün daha da yaygınlaşmaktadır.

Tablo 1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği kullanılarak yürütülen çalışmalar

Model	Amaç	Ref.
Realizable k-ε	Sodyum-soğutmalı hızlı reaktör içerisinde termal tabakalaşma analizi	[37]
SST	Enerji kazanımı ve atık su arıtımı için akışkan yataklı ultrafiltrasyon membran reaktörünün optimizasyonu	[38]
SST k-ω	İkiz rüzgâr türbinlerinin çeşitli yapılandırma parametrelerinin değiştirilmesiyle performansının incelenmesi	[39]
RNG k-ε	Yatay emici yüzeye sahip güneş bacalarının performans değerlendirilmesi	[40]
k-ε	Biyokütle piroliz buharının katalitik aktivitesini arttırmak için geliştirilen siklon reaktörünün performans incelemesi	[41]
Multiphase particle-in-cell	Stenotik arterlerde kan hücrelerinin, akış hareketinin ve stres dağılımının incelenmesi	[42]
Realizable k-ε	Lefkoşa'daki yoğun ve heterojen bölgeler için mikroiklim simülasyonu	[43]
Realizable k-ε	Buhar sterilizatöründe bakteri inaktivasyonu için sıvı akışı, akışkan sıcaklığı gibi parametrelerin incelenmesi	[44]
SST k-ω	Farklı keskinliğe sahip geometrilere erozyon görülme olasılığının simülasyonu	[45]
RNG k-ε		
Standart k-ε		
Realizable k-ε	Durgun sularda gemi direncinin sayısal ifadesi	[46]
Standard k-ε	Seralarda doğal havalandırmanın analizi	[47]
Realizable k-ε	Dental aletlerin buharla sterilizasyonunda <i>Geobacillus stearothermophilus</i> bakterisinin inaktivasyonu	[48]

SONUÇ

Bu makalede, HAD tekniğini genel özelliklerinden bahsedilmiş ve simülasyon teknolojilerinde geline nokta bu metodun uygulama alanları belirtilmiştir. Son zamanlarda havacılık, otomotiv, biyomedikal başta olmak üzere pek çok sektörde HAD metodunun uygulanması ve geliştirilmesine dair çalışmalar hız kazanmaktadır. Zaman, maliyet ve iş gücü gereksinimi açısından sağladığı kazançlar, tasarım parametrelerinin belirlenmesinde ortaya koyduğu başarılı sonuçlar ve çeşitli sektörlerde uygulanabilirliği gibi avantajlar sayesinde HAD kullanımının gün geçtikçe daha da artması beklenmektedir. Bu metodun daha güvenilir hale gelmesi için simülasyon sonuçlarının deneysel sonuçlar ile desteklendiği çalışmalara ağırlık verilmesi gerekmektedir.

Teşekkür. Bu makale, ES1408 COST aksiyonu kapsamında olup Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TUBİTAK) 115M014 proje kapsamında finansal olarak desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Snape, J. B., Dunn, I. J., Ingham, J., Prenosil, J. E. (1995). Dynamics of Environmental Bioprocesses: Modelling and Simulation, VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim: 2-12.
- [2] Wang, G., Tang, W., Xia, J., Chu, J., Noorman, H., van Gulik, V. M. (2015). Integration of microbial kinetics and fluid dynamics toward model-driven scale-up of industrial bioprocesses. *Engineering in Life Sciences* 15: 20-29.
- [3] Ali, N. B., Petersen, K., Wohlin, C. (2014): A systematic literature review on the industrial use of software process simulation. *Journal of Systems and Software* 97: 65-85.
- [4] Çelen, S. (2017): Sanayi 4.0 ve Simülasyon. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry* 1: 9-26.
- [5] Tu, J., Yeoh, G. H., Liu, C. (2018): *Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach*. 3rd ed., Butterworth-Heinemann.
- [6] Blazek, J. (2005): *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*, 3rd ed., Butterworth-Heinemann: 1-5.
- [7] Ochienga, A., Onyangob M., Kiriamiti, K. (2009): Experimental measurement and computational fluid dynamics simulation of mixing in a stirred tank: A review. *South African Journal of Science* 105: 421-426.
- [8] Versteeg, H. K., Malalasekera, W. (2007): *An introduction to computational fluid dynamics, The finite volume method*, 2nd ed., Pearson Education Limited.
- [9] Wendt J. F. (2009): *Computational Fluid Dynamics: Governing Equations of Fluid Dynamics*. 3rd ed., Springer.
- [10] Süfer, Ö., Kumcuoğlu, S., Tavman, Ş. (2016): Gıda Mühendisliğinde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Uygulamaları. *Akademik Gıda* 14(4): 465-471.
- [11] Xia, B., Sun, D. (2002): Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the food industry: A review. *Computers and Electronics in Agriculture* 34(1-3): 5-24.
- [12] Norton, T., Sun, D. (2006): Computational fluid dynamics (CFD) – an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: A review. *Trends in Food Science & Technology* 17(11): 600-620.
- [13] Esionwu, C. (2014): Further Aerodynamics and Propulsion and Computational Techniques-CFD Solution Methodology. https://www.academia.edu/6690577/CFD_Methodology_and_Governing_Equations / (Erişim Tarihi: Nisan, 1, 2020).
- [14] Malekjani, N., Jafari, S. M. (2018): Simulation of food drying processes by Computational Fluid Dynamics (CFD); Recent advances and approaches. *Trends in Food Science & Technology* 78: 206-223.
- [15] Gawande, V. B., Dhoble, A. S., Zodpe, D. B., Chamoli, S. (2016): A review of CFD methodology used in literature for predicting thermo-hydraulic performance of a roughened solar air heater. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 54: 550-605.
- [16] Ferziger, J. H., Peric, M. (2002): *Computational methods for fluid Dynamics*. 3rd rev. ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.
- [17] Andersson, B., Andersson, R., Hakansson, L., Mortensen, M., Sudiyo, R., Wachem, B. van. (2012): *Computational Fluid Dynamics for Engineers*, 1st ed., United States of America by Cambridge University Press, New York.
- [18] ANSYS, Inc. Introduction to the CFD Methodology and CFX. https://www.academia.edu/16970121/INTRODUCTION_CFD_CFX_16.0 / (Erişim Tarihi: Nisan, 3, 2020).
- [19] Hirsch, C. (2007): *Numerical Computation of Internal and External Flows*. 2nd ed., Butterworth-Heinemann, 1-5.
- [20] Johnson, F. T., Tinoco, E. N., Yu, N. J. (2005): Thirty years of development and application of CFD at Boeing Commercial Airplanes, Seattle. *Computers & Fluids* 34: 1115-1151.
- [21] Chavan, S. V., Pawar, S. S. (2018): The modified design of aeroplane fuselage to overcome drag resistance acting due to flow of air. *Materials Today: Proceeding* 5: 13383-13391.

- [22] Chen, L., Wang, S., Li, G., Li C. H., Zhang, T. (2016): CFD modeling of moisture accumulation in the insulation layers of an aircraft. *Applied Thermal Engineering* 102: 1141-1156.
- [23] Fujii, K. (2005): Progress and future prospects of CFD in aerospace—Wind tunnel and beyond. *Progress in Aerospace Science* 41(6): 455-470.
- [24] Soares, R. F., Souza, F. J. (2014): Investigation of CFD Setup For Automotive Applications. POSMEC 2014 – Simpósio do Programa de Pós - Graduação em Engenharia Mecânica, Uberlândia, Brezilya.
- [25] Hettel, M., Daymo, E., Schmidt, T., Deutschmann, O. (2020): CFD-Modeling of fluid domains with embedded monoliths with emphasis on automotive converters. *Chemical Engineering Process.: Process Intensification* 147: 107728.
- [26] Wu, D., Li, S., Wu, P. (2015): CFD simulation of flow-pressure characteristics of a pressure control valve for automotive fuel supply system. *Energy Conversion and Management* 101: 658–665.
- [27] Malizia, F., Montazeri, H., Blocken, B. (2019): CFD simulations of spoked wheel aerodynamics in cycling: Impact of computational parameters. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 194: 103988.
- [28] Das, R. C., Riyad, M. (2017): CFD Analysis of Passenger Vehicle at Various Angle of Rear End Spoiler. *Procedia Engineering* 194: 160-165.
- [29] Basri, E. I., Basri, A. A., Riazuddin, V. N., Shahwir, S. F., Zuber, M., Ahmad, K. A. (2016): Computational Fluid Dynamics study in biomedical applications: A review. *International Journal of Fluids and Heat Transfer* 1(2): 2-14.
- [30] Bonfanti, M., Franzetti, G., Maritati, G., Homer-Vanniasinkam, S., Balabani, S., Díaz-Zuccarini, V. (2019): Patient-specific haemodynamic simulations of complex aortic dissections informed by commonly available clinical datasets. *Medical Engineering & Physics* 71: 45–55.
- [31] Conti, M., Long, C., Marconi, M., Berchiolli, R., Bazilevs, Y., Reali, A. (2016): Carotid artery hemodynamics before and after stenting: A patient specific CFD study. *Computers & Fluids* 141: 62–74.
- [32] Kharat, S. B., Deoghare, A. B., Pandey, K. M. (2018): Development Of Human Airways Model For CFD Analysis. *Materials Today: Proceedings* 5: 12920–12926.
- [33] Toparlar, Y., Blocken, B., Maiheu, B., van Heijst, G. J. F. (2017): A review on the CFD analysis of urban microclimate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 80: 1613-1640.
- [34] Sogancı, S., Tutkun, M. O. (2019): Akış analizleri (CFD) ve mühendislik süreçlerine katkıları. 14. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir, Türkiye.
- [35] Raynal, L., Augier, F., Bazer-Bachi, F., Haroun, Y., Pereira da Fonte, C. (2016). CFD Applied to Process Development in the Oil and Gas Industry – A Review. *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP Energies nouvelles* 71 (3): 42.
- [36] Kiran Kumar, V. R., Kiran Kumar, C., Sreenivasa Reddy, Dr. K. (2013). A Practical Review Approach of CFD in Engineering Applications. *Research Inventy: International Journal of Engineering and Science* 3(12): 78-82.
- [37] Wang, M., Chen, J., Zhang, D., Zhang, J., Tian, W., Su G. H., Qiu, S. (2020): Numerical study on the thermal stratification characteristics in the upper plenum of sodium-cooled fast reactor (SFR). *Annals of Nuclear Energy* 138: 107222.
- [38] Horstmeyer, N., Thies, C., Lippert, T., Drewes, J. E. (2020): A hydraulically optimized fluidized bed UF membrane reactor (FB-UF-MR) for direct treatment of raw municipal wastewater to enable water reclamation with integrated energy recovery. *Separation and Purification Technology* 235: 116165.
- [39] Peng, H. Y., Han, Z. D., Liu, H. J., Lin, K., Lam, H. F. (2020): Assessment and optimization of the power performance of twin vertical axis wind turbines via numerical simulations. *Renewable Energy* 147(1): 43-54.

- [40] Nguyen, Y. O., Wells, J. C. (2020): A numerical study on induced flowrate and thermal efficiency of a solar chimney with horizontal absorber surface for ventilation of buildings. *Journal of Building Engineering* 28: 101050.
- [41] Zhang, Y., Yi, W., Fu, P., Li, Z., Bai, X., Tian, C., Wang, N., Li, Y. (2019). Flow and reaction characteristics on catalytic upgrading of biomass pyrolysis vapors in novel cyclone reactors. *Energy* 189: 116052.
- [42] Sia, S. F., Zhao, X., Yu, Y., Zhang, Y. (2019): Multiphase particle-in-cell simulation in severe internal carotid artery stenosis. *Powder Technology* 358: 62-67.
- [43] Antoniou, N., Montazeri, H., Neophytou, M., Blocken, B. (2019). CFD simulation of urban microclimate: Validation using high-resolution field measurements. *Science of The Total Environment* 695: 133743.
- [44] Feurhuber, M., Burian, P., Magno, M., Miranda, M., Hochenauer, C. (2019): Development of a spatially and timely resolved CFD model of a steam sterilizer to predict the load temperature and the theoretical inactivation of bacteria based on sterilization parameters. *Physics in Medicine* 8: 100020.
- [45] Zhang, J., Darihaki, F., Shirazi, S. A. (2019): A comprehensive CFD-based erosion prediction for sharp bend geometry with examination of grid effect. *Wear* 430-431: 191-201.
- [46] Niklas, K., Pruszko, H. (2019): Full-scale CFD simulations for the determination of ship resistance as a rational, alternative method to towing tank experiments. *Ocean Engineering* 190: 106435.
- [47] Villagrán, E. A., Romero, E. J. B., Bojacá, C. R. (2019): Transient CFD analysis of the natural ventilation of three types of greenhouses used for agricultural production in a tropical mountain climate. *Biosystems Engineering* 188: 288-304.
- [48] Feurhuber, M., Burian, P., Magno, M., Miranda, M., Hochenauer, C. (2019): CFD simulation of the inactivation of *Geobacillus stearothermophilus* on dental handpieces. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 144: 118649.