

Derleme Makale - Review Article

Tarımsal Üretimde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemi Kullanım Modelleri

Computational Fluid Dynamics Usage Models in Agricultural Production

Yaşar Serhat Saygılı^{1*}, Bülent Çakmak²

Geliş / Received: 01/10/2022

Revize / Revised: 14/03/2022

Kabul / Accepted: 18/03/2022

ÖZ

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), akışkan davranışının belirlenmesini sağlayan akışkanlar mekaniğinin bir alt dalıdır. Akışkan davranışını belirlemek için kullanılan bir simülasyon yöntemi olarak tanımlanan HAD, akışkan tipi, akış hızı ve akış geometrisi gibi parametrelere bağlıdır. Gelişen teknoloji ve artan bilgisayar işlem kapasitesi ile oluşturulan simülasyonların hassasiyeti ve doğruluğu her geçen gün artmaktadır. Bu yöntem aynı zamanda tarımsal üretimde meydana gelen sorunları çözmek ve akışın her zaman olduğu bir çalışma alanı olan mevcut makine ve sistemleri iyileştirmek için de kullanılmaktadır. Katı, sıvı ve gaz ortamın sıvılarla etkileşimlerinin incelenildiği bu yöntem, tarımsal üretimin başlangıcından sonuna kadar tüm aşamalarda kullanılabilir. Bu adımlar toprak işleme, tohum ekimi, sulama, ilaçlama, hasat-harmanlama, ürün işleme, depolama ve iklimlendirme olarak sıralanabilir. Bu işlemleri gerçekleştiren makinelerin güç kaynağı olarak kullanılan traktörlerde bu yöntem ergonomik özelliklerin iyileştirilmesini sağlar. Bu yöntem ile teknolojinin kullanımının artmasıyla yaygınlaşan akıllı tarım uygulamalarında insansız hava araçlarının tarım alanları üzerindeki etkilerini incelemek mümkündür. Bu makalede, literatürde bildirilen mevcut çalışmalarda incelenmesi düşünülen çeşitli makine ve sistemler için yapılan çalışmalardan elde edilen veriler derlenerek ileride yapılacak çalışmalara örnek olması amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler- *Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, Bitkisel Üretim, Hayvansal Üretim, Akış, Simülasyon*

ABSTRACT

Computational fluid dynamics (CFD) is a sub-branch of fluid mechanics that provides the determination of fluid behavior. CFD, which is defined as a method of simulation used to determine fluid behavior depends on parameters, such as fluid type, flow rate, and flow geometry. The precision and accuracy of the simulations created with the help of developing technology and increasing computer processing capacity are increasing day by day. This method is also used to solve the problems that occur in agricultural production and to improve the existing machinery and systems which is a work area where the flow is always present. This method, in which the interactions of solid, liquid, and gaseous environments with fluids can be examined, can be used for all steps from the beginning to the end of agricultural production. These steps can be listed as tillage, seeding-planting, irrigation, spraying, harvest-threshing, product processing, storage, and air conditioning. In tractors, which are used as the power source of the machines that perform these processes, this method enables the improvement of ergonomic features. This method makes it possible to examine the effects of unmanned aerial vehicles on agricultural areas in smart agriculture applications that have become widespread with the increasing use of technology. This article

^{1*}Sorumlu yazar iletişimi: yasar.serhat.saygili@ege.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-6974-3820>)

Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, Ege Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, İzmir, Türkiye.

²İletişim: bulent.cakmak@ege.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-3587-0933>)

Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, Ege Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, İzmir, Türkiye.

aims to be an example for future studies by compiling the data obtained from the studies carried out for the various machines and systems examined in the existing studies reported in the literature.

Keywords- Computational Fluid Dynamics, Plant Production, Animal Production, Flow, Simulation

I. GİRİŞ

Akışkanlar mekaniğinin bir alt dalı olarak kabul edilen Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi, akışkan kaynaklı problemlerin nümerik algoritmalar ile çözüm yöntemi olarak tanımlanmaktadır [1]. HAD, özellikle akış içeren (sıvı ve gaz) proseslerde çoğunlukla kullanılan bir simülasyon aracı olarak tanımlanmaktadır [2,3]. Bu yöntem çoğunlukla, akışkanın akışı, ısı ve kütle hareketlerini içeren taşınım işlevlerinin tüm çeşitlerinin çalışma davranışlarını belirlemede kullanılır. Ancak akışkan davranışlarının analitik denklemler yardımıyla çözümlenmesi her zaman gerçekleşmeyebilir. Bu gibi durumlarda çözüm için sayısal yaklaşımlar kullanabilmektedir. Analitik metotlar genellikle matematiksel fonksiyonlar şeklinde çözümler üretmekteyken, nümerik çözümlerde genellikle sayısal sonuçlar elde edilebilmektedir. Elde edilen bu sonuçlar gerçekleşen sonuçlara çok yakın ve istenilen ölçüde hassaslaştırılabilir düzeydedir. Daha hassas sonuçlar istenmesi durumunda bilgisayarın çözeceği işlem sayısında artışa neden olmakta ve bu durum hem bilgisayarı zorlamakta hem de çözüm için uzun zaman gerektirmektedir. HAD kullanılarak yapılan çalışmaların başlangıcı 1920'li yıllarda sayısal analizlerin araştırılmasına kadar uzanmasına rağmen, gelişen teknoloji ve artan bilgisayar kullanımına bağlı olarak, özellikle 1990'lardan sonra HAD metodu ile çözümler üretilmesindeki artışın yüksek olduğu görülmektedir [3]. Bu duruma yol açan etmenler bilgisayarların işlem kapasitelerinin, hızlarının ve güçlerinin gün geçtikçe daha iyi seviyelere gelmesi ile deney/test düzeneklerinin maliyetlerinin yüksek olması ve deney/test yardımıyla veri elde edilmesinin uzun süreler alması olarak açıklanabilmektedir. Yüksek hızlı süper bilgisayarların geliştirilmesi ile çözümü zor ve karmaşık akış problemleri daha kolay çözüme ulaştırılabilmektedir. Bu durum çözüm aşamasında HAD metodunun bilgisayar ile akışkan problemleri arasında temel köprü vazifesini görmesini sağlamaktadır [4].

HAD metodunu kullanarak simülasyonlar ve sayısal çözümler sunan farklı firmalara ait yazılımlar ülkemizde ve dünyada yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Ülkemizde yaygın olarak kullanılan ANSYS FLUENT, ANSYS CFX, PHOENICS, Autodesk CFD, OpenFoam CFD, Solidworks Flow Simulation, COMSOL, Star-CCM+, POLYFLOW, simFlow, Abaqus/CFD, ICEM CFD, PAM-FLOW, CFD++ gibi birçok program bulunmaktadır [5]. Oluşturulan bu paket programlar simülasyonlarını gerçekleştirirken, akışkanların akışı ve ısı transferini çözümleneyen denklemler ile akışkanlar mekaniğinde yer alan temel korunum yasalarının matematiksel eşitliklerinden yararlanmakta ve bu eşitlikler Navier-Stokes denklemleri olarak bilinmektedir [5, 6]. Bu eşitlikler, kütle korunumu (süreklilik denklemi), Momentumun korunumu (Newton'un 2. Hareket kanunu) ve enerjinin korunumu (termodinamiğin birinci yasası) olarak söylenebilmektedir [7].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} [-\rho \delta_{ij} + \mu (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})] + \rho g_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho C_a T) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j C_a T) - \frac{\partial}{\partial x_j} (\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j}) = S_t \quad (3)$$

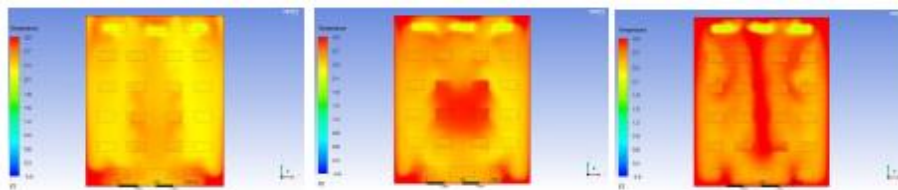
Kullanılacak programlarda oluşturulacak simülasyonlarda ortaya çıkan verilerin doğru ve etkin olabilmesi için belirli basamakların tamamlanmış olması gerekmektedir. Bu basamaklar, modellenmenin ve simülasyon işleminin amacının belirlenmesi, analiz için kullanılacak bölgenin belirlenmesi, belirlenen bölgenin çizimi, mesh oluşturma, ortam koşulları ile akışkan özellikleri tanımlanması, sınır koşulları tanımlanması, çözüm modeli belirlenmesi, sistem çözümlenmesi ve sonuç verilerinin değerlendirilmesi olarak sıralanabilmektedir [7]. Simülasyon işleminin gerçekleştirilebilmesi için hedeflenen sonuçların ne olacağı belirlenmeli ve buna göre akışın türü, çalışma koşulları ve akışın etki alanı gibi girdiler belirlenmelidir. Girdi verilerinin sonucunda simülasyonun akışın neresinde oluşturulacağını belirten sınırlar belirlenmelidir. Elde edilen veriler ışığında bilgisayar destekli tasarım programları yardımıyla simülasyonun gerçekleştirileceği bölgeyi içeren bir geometrik model oluşturulmalıdır. Oluşturulan geometrik modelle birlikte simülasyonda kullanılacak matematiksel modellenimin

çözümlerini gerçekleştirecek olan mesh (ağ) yapı oluşturulmalıdır. Oluşturulan geometrik modelde uygulanacak mesh kalitesi, simülasyondan elde edilen sonuçlara doğrudan etki edeceği ve analiz süresine etki edeceği göz önünde bulundurulmalıdır. Çözümlemenin gerçekleştirilebilmesi için akışkan özellikleri (yoğunluk, viskozite vb.) ve proses özellikleri (faz oluşum sayısı, ısı enerjisi değişim durumu) programa eklenmelidir. Simülasyonun gerçekleştirileceği akış alanının sınır koşulları (akış giriş-çıkış yönü, basınç-sıcaklık-debi değerleri vb.) eklenmelidir. Oluşturulan simülasyon için akış durumuna (laminer, geçiş ve türbülans) uygun çözümlemenin gerçekleşmesini sağlayacak model tipi seçilmelidir. Kullanılan modeller, laminer, Spalart-Allmaras, k- ϵ (standart, RNG, Realizable), k- ω (standart, Shear-Stress Transport (SST)), Reynould Stress Model (RMS) ve Large Eddy Simulation model olarak sıralanabilir [3,7,8]. Girdi veriler sonucunda oluşturulan simülasyondan elde edilen sonuçlar, yakınsama kriterleri göz önünde bulundurularak değerlendirilmelidir. Oluşturulan simülasyonla elde edilen matematiksel sonuçların yanı sıra akışın özellikleri görsel ya da animasyon çıktısı olarak da elde edilebilmektedir [3,7].

HAD metodu çok çeşitli alanlar için ve farklı mühendislik çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar inşaat, makine, kimya, otomotiv, gıda işleme gibi mühendislik bilimleri, havacılık ve uzay sanayi, nükleer endüstri ve biyomedikal uygulamalar olarak sayılabilmektedir. Son yıllarda her sektör ve bilim dalı için teknoloji kullanımının yaygınlaşması ve bilişim teknolojilerinin kullanılarak işlemlerin yapay zekâyla desteklenmesi ile kullanılan uygulamalar akıllı hale gelmeye başlamıştır. Tarımsal üretim işlemlerinde verimin ve üretim miktarının artırılması amacıyla yapılan bilimsel çalışmalar teknoloji kullanımını da beraberinde getirmektedir. Kullanılan teknolojinin kapsadığı ölçüm cihazları ve sensörlerle saha çalışmaları yapmadan önce HAD metodu ile veri elde etmek artan maliyetleri azaltma açısından önemli bir olgudur. Her türlü akışkan (katı-sıvı-gaz) ve akış durumu (katı-katı, katı-sıvı, katı-gaz, sıvı-sıvı, sıvı-gaz ve gaz-gaz) için uygulanabilen bu metod tarım işletmelerinin problemlerini çözmede değerli veriler elde edilmesinde kullanılması önemlidir. Bu çalışmada ise literatür çalışmalarından elde edilen bilgiler ışığında HAD metodunun tarımsal üretimde kullanılabileceği alanlar ve bu alanlardan çalışmalar derlenmiştir.

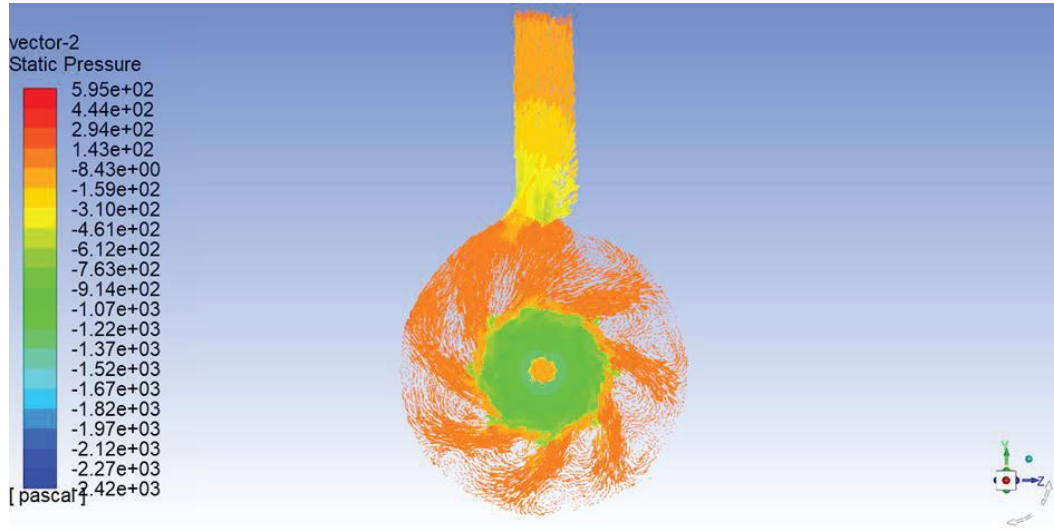
II. TARIMDA HAD KULLANIMI

Her türlü akışkan ve akış durumu için çözümlemelerin yapılabildiği HAD metodunun tarımsal üretimde kullanımı son yıllarda yaygınlaşmaktadır. Yapılan literatür taraması sonucunda bulunan makalelerden elde edilen verilere göre bu yöntemin tarımsal üretimde aşağıda verilen makineler ve prosesler için kullanılabileceği ön görülmektedir. Tarımsal üretimde, traktörler, toprak işleme makinaları, ekim makinaları, hasat ve harman makinaları, ilaçlama ve bitki bakım makinaları, sulama makinaları ve sistemleri (Şekil 2), kurutma makinaları ve ürün işleme makinaları, sera gibi kapalı tarım üretim alanları (Şekil 1) ve insansız hava aracı (İHA), uçak gibi hava taşıtlarının geliştirilmesi olarak sıralamak mümkündür (Tablo 1).



Şekil 1. Kapalı tarım alanlarında sıcaklık dağılımının HAD ile simülasyonu [9].

Traktör kabini havalandırma ve iklimlendirmesi gibi ergonomik problemlerin çözülmesi ile traktör egzoz gazı dağılımının ve optimum tasarım parametrelerinin değerlendirilmesi bu yöntemin kullanılabileceği alanlardandır. Ekim makinalarında tohum akışının ve dağılımının optimize edilmesinde ve makine tasarımının iyileştirilmesi çalışmalarında, hasat ve harman makinalarının çalışma koşullarının ve ürün kalitesinin iyileştirilmesinde bu yöntem kullanılabilir. Bitkilerin zararlılardan korunması için yapılan ilaçlama işlemlerinin etkinliklerinin artması ve pestisit kullanımının azaltılması için ilaçlama makinaları ve sistemlerinin modellerinin oluşturulması ve analizinde HAD metodu kullanımı uygundur. Sulama sistemleri ve makinalarının etkinliklerinin artırılması amacıyla HAD metodu kullanılması etkin su yönetimi sağlamaktadır. Elde edilen ürünlerin uzun süre ve özelliklerini yitirmeden korunabilmesi için uygulanan kurutma ve ürün işleme makinalarının optimizasyonu için HAD metodu kullanılması ürün kaybının minimize ederek karlılığın artışına katkıda bulunabilmektedir.



Şekil 2. Santrifüj pompada basınç dağılımının HAD ile simülasyonu [10].

HAD metodu mühendislikte planlama için ileri bir tekniktir. Hayvan barınaklarının havalandırılmasında olduğu gibi tarımsal çalışmaların diğer alanlarında kullanılması hızlı bir şekilde artmaktadır ve sera yapılarının aerodinamik dayanımlarının deneylerinde de kullanılmaktadır [11]. Ayrıca ürünlerin depolandığı alanlarda oluşturulacak gerekli iklim koşullarının iyileştirilmesinde bu yöntem etkin olarak kullanılmaktadır. Tarım 4.0 ile hayatımıza giren ve akıllı tarım uygulamalarında farklı amaçlarla kullanılan İHA'ların bitkiler ve çevre ile etkileşimlerinin belirlenmesinde HAD metodu kullanımı ve simülasyonlarda doğru veriler elde edilmesi mümkündür.

Tablo 1. Tarımsal üretimde HAD kullanımına yönelik çalışmalar.

Makine-Sistem	HAD Kullanım Amacı	Kullanılan HAD Yazılımı	Kaynak
Traktör	Kabin ortam şartlarının belirlenmesi	ANSYS Fluent	Akdemir ve ark., 2016 [12].
	Egzoz gazı dağılımının sürücüyeye etkisinin belirlenmesi	Solidworks	Jurco et al., 2018 [13].
	Kabin içindeki termal konfor şartlarının belirlenmesi ve teyidi	STAR-CCM+	Oh et al., 2020 [14].
Toprak İşleme Makinaları	Toprak işleme makinalarının toprak ile etkileşimlerinin simülasyon ile doğrulanması	ANSYS CFX	Karmakar et al., 2009 [15].
	Döner kulaklı pulluk ve toprak etkileşiminin belirlenmesi ve simülasyonla doğrulanması	ANSYS Fluent	Zhu et al., 2016 [16].
	Döner kulaklı pullukla yüksek hızlarda yapılan toprak işleminin modellenmesi ve toprak-pulluk etkileşiminin belirlenmesi	ANSYS Fluent	Wei et al., 2019 [17].

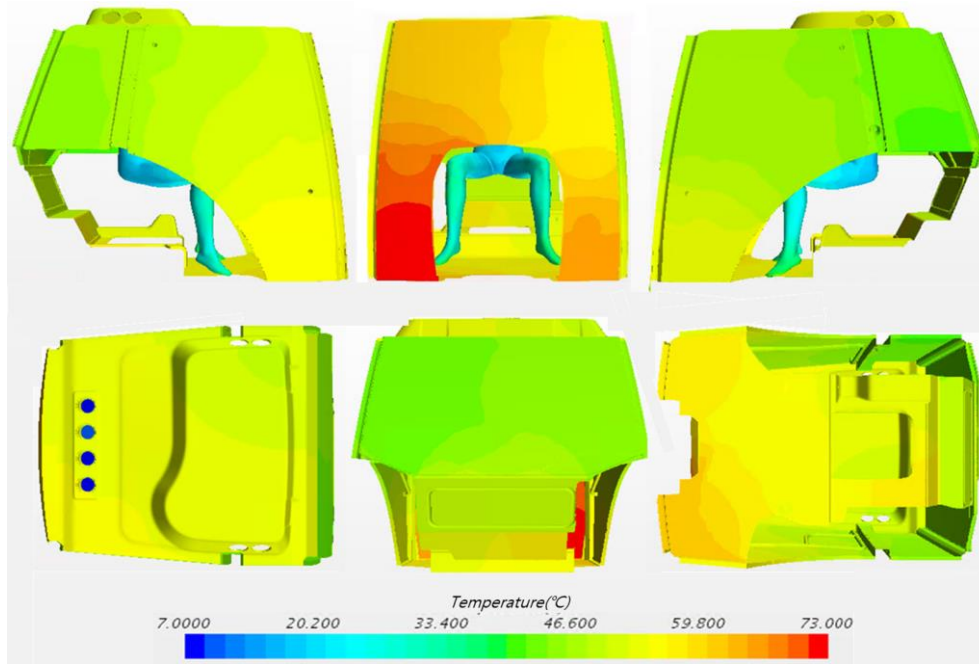
Tablo 1. (Devam)

Ekim Makinaları	Kolza tohumu ve buğday için AEM-HAD birleştirme yaklaşımı ile tohum besleme cihazında tohum hareketinin simülasyonunun belirlenmesi	ANSYS Fluent	Lei <i>et al.</i> , 2016 [18].
	Tarla koşullarında hassas vakumlu ekicilerden pestisit tozu sürüklenmesinin bir Eulerian-Lagrange 3D (HAD) modeli geliştirilmesi	ANSYS CFX	Devarreware <i>et al.</i> , 2018 [19].
	Mısır hassas ekim cihazında gaz-katı akışının simülasyonunu AEM ve HAD yöntemleriyle simülasyonu	ANSYS Fluent	Han <i>et al.</i> , 2018 [20].
	Gelişmiş tohum aralığı ile toprağa tohum katılımı sağlayabilen farklı tohum tüplerinde hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) tabanlı simülasyonları ve görselleştirilmiş tohum yörüngelerini karşılaştırılması ve yörüngeleri ile vakum diskinin çevresel hızı arasındaki ilişkinin belirlenmesi	ANSYS Fluent	Yazgı <i>et al.</i> , 2020 [21].
	HAD ve AEM birleştirme yaklaşımı destekli tohum dağıtım başlığında kolza tohumu hareketlerinin iki fazlı akışla matematiksel modelinin oluşturulması	ANSYS Fluent	Hu <i>et al.</i> , 2021 [22].
	Tek tip ezilmiş saman atma ve tohum ekim makinelerinde taşıma cihazının HAD-AEM bağlantılı yaklaşım kullanılarak simülasyon analizi ve deneysel doğrulaması	ANSYS Fluent	Fenghwei <i>et al.</i> , 2022 [23].
Hasat Harman Makinaları	Harmanlama işleminde dane kayıplarının azaltılması ve farklı çalışma şartları altındaki ürünlerin davranışlarını incelenmesi	ANSYS Fluent	Lim <i>et al.</i> , 2015 [24].
	Harmanlama işleminde dane kayıplarını azaltmak için uygun simülasyonu oluşturulması	ANSYS Fluent	Dai <i>et al.</i> , 2019 [25].
	Pirinç biçerdöverdeki çok kanallı bir temizleme cihazının optimizasyonu	ANSYS Fluent	Liang <i>et al.</i> , 2020 [26].
	Pirinç biçerdöverlerin temizleme performansını tahmin etmek için gaz-katı iki fazlı akışın sayısal simülasyonunu oluşturulması	ANSYS Fluent	Xu <i>et al.</i> , 2020 [27].
	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak kendinden tahrikli bir yerfıstığı hasadında toz difüzyonunun analizi	ANSYS Fluent	Xu <i>et al.</i> , 2022 [28].
İlaçlama ve Bitki Bakım Makinaları	Hava destekli meyve bahçesi püskürtücüsünden armut bahçesine doğru pestisit sprey akışı ve farklı çevresel sistemlerde birikimin, yeni bir entegre hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yaklaşımı kullanılarak tahminlenmesi	ANSYS	Endalew <i>et al.</i> , 2010 [29].
	Hava destekli bir pestisit püskürtücü tarafından üflenen ağaç gölgeliklerinin içindeki ve etrafındaki hava hızı dağılımlarını tahminlenmesi	ANSYS Fluent	Hong <i>et al.</i> , 2018 [30].
	Pirinç ilaçlamasında azot kayıplarının azaltmak üzere bir jet nozül tasarlamak	ANSYS Fluent	Zheng <i>et al.</i> , 2019 [31].
	Tarımsal gübre serpm makinesinde 4000 rpm devirde kullanılan iki farklı tip radyal fanın sayısal ve deneysel karşılaştırması	ANSYS CFX	Fogal <i>et al.</i> , 2021 [32].
Sulama Makinaları ve Sistemleri	Su kısıtlaması altında bir serada yetiştirilen süs bitkilerinin mikro ikliminin ve terlemesinin simülasyonu	ANSYS Fluent	Ali <i>et al.</i> , 2018 [33].
	Farklı kalınlıklara sahip damlama sulama borularında aynı damlatıcı kullanılması durumunda, damlatıcı hidrolik özelliklerinin tasarıma etkisinin belirlenmesi	ANSYS Fluent	Demir <i>et al.</i> , 2019 [34].

Tablo 1. (Devam)

Kurutma ve Ürün İşleme Makinaları	Kayıp kurutma işleminde ısı ve kütle transferinin HAD ile modellenmesi	ANSYS Fluent	Carlescu <i>et al.</i> , 2017 [35].
	Deneysel kurutulmuş elma dilimlerinin dehidrasyonu sayısal analiz programı ile simülasyonu	COMSOL Multiphysics	Aliç ve Daş, 2019 [36].
	Tohum kurutması için bir pilot tesis tasarımı	ANSYS Fluent	Arsenoaia <i>et al.</i> , 2019 [5].
	Gıdaların kurutulmasında kullanılan türbülans modelleri ve kurutma yöntemlerinin karşılaştırılması	ANSYS Fluent, ANSYS CFX, COMSOL Multiphysics, OpenFOAM CFD	Malekjani and Jafari, 2018 [6].
Kapalı tarım alanlarının iklimlendirilmesi ve havalandırılması	Bir test odasında sıcaklık ve nem dağılımını incelemek ve tarımsal ürünlerin daha uzun sürelerle ekonomik olarak saklanabilmesi için önerilerde bulunulması	ANSYS CFX	Akdemir <i>vd.</i> , 2012 [37].
	Üç tip serada, doğal havalandırma çalışması için geçici bir HAD-2D modelinin kullanımı	ANSYS Fluent	Villagrán <i>et al.</i> , 2019 [38].
	Doğal havalandırılmış binaların iç hava akışının modellenmesi ve hava akış oranlarının belirlenmesi	OpenFOAM CFD	Kim <i>et al.</i> , 2020 [39].
	Sensör destekli sera iklimlendirmesinin HAD metodu ile doğrulanması	ANSYS Fluent	Cheng <i>et al.</i> , 2021 [40].
	Tarımsal üretim binalarında doğal havalandırmanın farklı türbülans modellerine göre karşılaştırılması	OpenFOAM CFD	Hong <i>et al.</i> , 2017 [41].
	Baca gazı ve sıcak su ısı emici boru ağları kullanılarak sera ısıtmasının HAD analizi	ANSYS Fluent	Dhiman <i>et al.</i> , 2019 [42].
	HAD metodu kullanarak harici karıştırma işleminin biyogaz üretim tesisinde optimizasyonu	OpenFOAM CFD	Müller <i>et al.</i> , 2020 [43].
	Ticari domuz binasının tam ölçekli HAD simülasyonu ve hayvanların yaşadığı bölgenin gözenekli ortam yaklaşımıyla karşılaştırması	ANSYS Fluent	Guatam <i>et al.</i> , 2021 [44].
	Süt ineği ahırları için farklı mekanik havalandırma sistemlerinin karşılaştırılmasında HAD simülasyonları kullanılması ve saha ölçümleri ile karşılaştırılması	ANSYS Fluent	Pakari and Ghani, 2021 [45].
	Bir soğuk hava deposunda farklı menfez kanat açılırlarına göre hava dağılımını hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile tahmini	ANSYS Fluent	Akdemir, 2016 [46].
Hava taşıtları	HAD metodu ile tarımsal amaçlı kullanılacak bir hava aracının kavramsal tasarımının geliştirilmesi	ANSYS CFX	Bravo-Mosquera <i>et al.</i> , 2018 [47].
	Dikey rotorlu İHA'ların tarım ürünlerine hava taşınımı üzerinden etkilerinin incelenmesi	ANSYS	Yang <i>et al.</i> , 2020 [48].
	Gelişmiş aerodinamik verimlilik ve performansa sahip oktokopter İHA'ların tasarımı ve değerlendirilmesi	ANSYS Fluent	Zhu <i>et al.</i> , 2020 [49].
	Tarımsal amaçlı kullanılan İHA'larda tek bir rotor kanadı tarafından oluşturulan aşağı yönlü hava akışının ortalama ve türbülanslı akış özelliklerinin incelenmesi		Shouji <i>et al.</i> , 2021 [50].

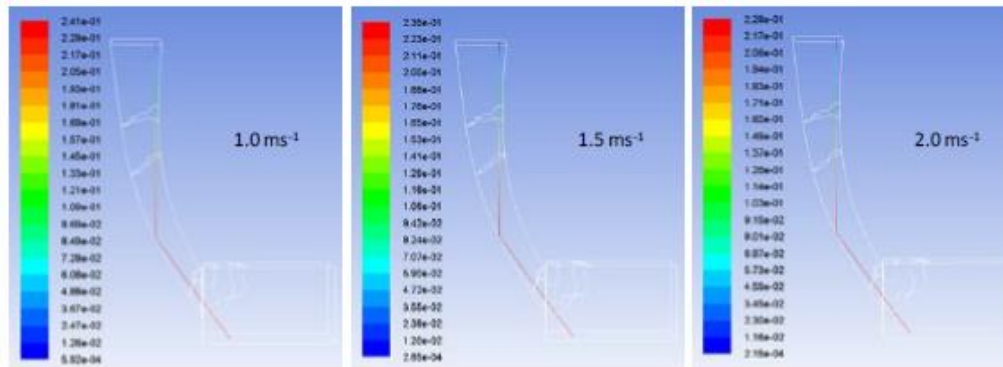
1) *Traktörler üzerine yapılan çalışmalar:* Traktörler tarımsal işlemler için kullanılan başlıca güç kaynağıdır. Kabin içindeki klimadan çıkan havanın sıcaklık ve hava hızı değişimlerini ortaya koymak amacıyla Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi kullanılarak modellemeler yaparak kabin içerisindeki sıcaklık ve hava hızının dağılımlarını belirlemişlerdir. Ayrıca modelin geçerliliğini test etmek ve daha geçerli modeller geliştirebilmek amacıyla aynı noktalardan alınan ölçüm değerleri ile model değerlerini karşılaştırmışlardır [12]. Orta büyüklükteki bir traktörün egzoz borusunun optimum konumunu belirleme için yaptıkları çalışmada Solidworks programı ile yapmış oldukları traktör tasarımının iki farklı koşul altındaki durumunu incelemişlerdir. Bu çalışmada, kabinsiz orta büyüklükteki traktörlerin sürücüleri için çalışma koşullarının iyileştirilmesini amaçlamışlardır [13]. Akış analizi yardımıyla termal konfor düzeyini simüle etmişler ve bir traktör kabini içindeki klimanın en uygun konumu belirlemişlerdir (Şekil 3). Termal dengede altında sıcaklık verilerini elde edebilmek için traktörün çevre odasındaki ısıtma testini gerçekleştirmişler ve elde ettikleri sonuçları simülasyonda sınır koşulu olarak kullanmışlardır [14].



Şekil 3. Traktör Kabininde sıcaklık dağılımının HAD ile simülasyonu [14]

2) *Toprak İşleme Makinalarında Yapılan Çalışmalar:* Toprak işleme makinaları işleyici organlarının toprakla etkileşimlerini incelemek üzere yaptıkları çalışmada dikey bir bıçağı toprak içerisinde ilerleterek incelemişlerdir. Farklı toprak çeşitleri ve ilerleme hızları için yaptıkları denemeleri, oluşturdukları simülasyonlar ile karşılaştırmışlardır [15]. Yatay tersinir pulluklar üzerinde yaptıkları çalışmada çekme direncinin pulluk okunda oluşturduğu olumsuzlukları gidermek için iyileştirmeler yapmak üzere HAD metodunu kullanmışlardır. Farklı toprak işleme derinlikleri ve ilerleme hızlarında yaptıkları denemelerden elde ettikleri verileri oluşturdukları simülasyonlardan elde ettikleri verilerle karşılaştırmışlardır [16]. Farklı toprak işleme hızları ve derinlikleri için HAD ve AEM(Ayrık elemanlar metodu) metotları tabanlı simülasyonlar yaparak pullukların toprakla etkileşimlerini incelemişlerdir. HAD metodu ile toprakla etkileşimini, SEM kullanarak da işleyici elemanlardaki aşınma durumunu araştırmışlardır [17].

3) *Ekim Makinalarında Yapılan Çalışmalar:* Hava destekli merkezi ölçüm sisteminin tohum besleme cihazında gaz-katı akışının sayısal bir çalışmasını, ayrık eleman yöntemi (AEM) ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) birleştirme yaklaşımı ile gerçekleştirmişlerdir. Boğaz alanı, boğaz uzunluğu, hava akışı giriş hızı ve tohum besleme hızının etkilerini çalışmışlar ve gaz alanı ve tohum hareketi açısından analiz etmişlerdir [18]. Tarla koşullarında hassas vakumlu ekicilerin oluşturduğu pestisit tozu sürüklenmesini incelemek üzere bir üç boyutlu hesaplamalı akışkan dinamiği modeli geliştirmişlerdir. Traktör ve ekici modellerini, alanı ve kenarlarını temsil eden modeli atmosferik bir hesaplama alanına yerleştirmişler ve mısır tohumlarından aşındırılan tozun fizikokimyasal özelliklerini (parçacık boyutu, şekli, gözeneklilik, yoğunluk), ekici fan çıkışlarındaki toz emisyon oranlarını ve egzoz hava hızı değerlerini deneysel olarak ölçmüş ve modelle karşılaştırmışlardır. Farklı rüzgâr koşulları, toz özellikleri, ekici tasarımları ve vakum basınçları ile çeşitli mısır ekim senaryolarını simüle etmişlerdir [19]. Mısır hassas tohum ölçme cihazında gaz-katı akış simülasyonunu, ayrık eleman yöntemi (AEM) ve hesaplamalı akışkan dinamiğini (HAD) metotlarının birleşimi yaklaşımı aracılığıyla gerçekleştirmişlerdir. Yanal deliğin pozisyonlarını, genişliğini ve ortalama yay uzunluğunun etkilerini incelemişlerdir ve gaz alanı ve tohum hareketi açısından analiz etmişlerdir [20]. Gelişmiş tohum aralığı ile toprağa tohum ekimini sağlayabilen farklı tohum tüplerinde hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) tabanlı simülasyon oluşturmuşlar ve gözelleştirilmiş tohum yörüngelerini kullanarak karşılaştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada ayrıca tohum yörüngeleri ile vakum diskinin çevresel hızı arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Çalışmalarında farklı tohumlar, ilerleme hızları ve farklı serbest bırakma noktalarını kullanmışlardır (Şekil 4). Tohum tüplerini modellemişler ve tohumların tohum tüplerine bırakılması HAD kullanılarak simüle etmişlerdir [21].



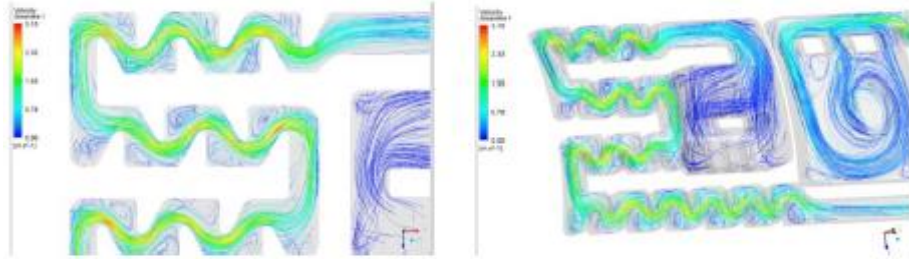
Şekil 4. Ekim makinalarında tohum düşüş hızının HAD ile simülasyonu [21]

4) *Hasat ve Harman Makinalarında Yapılan Çalışmalar*: *Jatropha* (Hint Fıstığı) bitkisinin yağ açısından zengin olan çekirdeklerini ayıklamak ve soymak için kullanılan bir makinenin performans değerlendirmesini yapmışlardır. Tasarladıkları makineyi, farklı üfleyici hava hızlarında ve meyve nemi içeriklerinde test etmişlerdir. Sistemi simüle etmek için HAD metodunu kullanmışlardır. Makine denemeleri sırasında hafif olan kabukların üfleyici yardımıyla ayrılabilceğini ve değişik hava hızlarının bu değeri etkilediğini bildirmişlerdir [24]. Biçerdöver üzerinde, konik harmanlama cihazının çalışma performansını iyileştirmek ve cihazda kalan tohumları azaltmak için, makine içerisindeki malzemelerin hareket sürecini HAD-AEM yöntemi kullanarak simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Farklı tutma türlerindeki hareket yörüngelerini ve parçacık formlarını da incelemişlerdir. Dahili akış geçidindeki dinamik ve statik hesaplama alanı modellemesinde HAD metodunu kullanmışlardır. Oluşturdukları simülasyon sonuçlarına göre, hava akışının etkisi altındaki partiküllerin ve kısa sapların aksel yönde harmanlanmasının ve aktarılmasının gerçekleştirilebileceğini bildirmişlerdir [25]. Bir pirinç biçerdöverinde çok kanallı bir temizleme cihazını optimize etmek üzere farklı fan kanalları için eşdeğer dirençleri, akışkanlaştırılmış tahılın bir direnç modelini ve temizleme eleği için bir hava akışı direnci modelini kullanarak denemeler yapmışlardır. Katı modelini oluşturdukları tasarımın HAD simülasyonunu oluşturmuşlardır. Çalışma yüklerinin kanallardaki hava akış hızı ve hacim dağılımına ve fan içindeki toplam basınç dağılımına etkilerini simülasyon ve deneylerle incelemişlerdir. Çalışma yükleri simüle etmek için farklı açılma oranlarına sahip delikli plakalar tasarlamışlardır. Bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) modeliyle oluşturdukları simülasyon sonuçlarını sıcak telli anemometre ölçümleriyle karşılaştırılarak doğrulamışlardır [26]. Pirinç hasat ve harmanında kullanılan bir biçerdöver, farklı çalışma koşulları altında HAD-AEM kullanarak oluşturulan simülasyonlar, deneyler sonucunda elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular sonucunda biçerdöverin dane kayıpları ve tohum temizleme performansı matematiksel modelleme ile açıklanmıştır [27].

5) *İlaçlama ve Bitki Bakım Makinalarında Yapılan Çalışmalar*: Hava destekli meyve bahçesi püskürtücüsünden armut bahçesine doğru pestisit sprey akışını ve farklı çevresel sistemlerde birikimini, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yaklaşımı kullanılarak simüle etmişlerdir. Modelde hedef meyve bahçesi kanopisini ve komşu ortam ile püskürtücüden gelen rüzgârı, hava ve sprey akışı arasındaki karmaşık etkileşimlerin incelenmesidir. HAD simülasyonu, hava ve sprey akışı üzerindeki etkisini ve damlacıkların dallar üzerinde birikmesini simüle etmek için gerçek 3D kanopi mimarisinin modele dahil edilmesini içermektedir. Yaprakların etkisini temsil etmek için dalların etrafında oluşturulan ayrıntılı bir alt alanda temel momentum ve türbülans denklemlerine kaynak-yutak terimlerini eklemişlerdir. Sprey damlacıklarını atomizasyon modelinden üretmişler ve bir Lagrange partikül taşıma modeli kullanılarak izlemişlerdir [29]. Hava destekli bir pestisit püskürtücü tarafından üflenen akışkanın ağaç gölgeliklerinin içindeki ve etrafındaki hava hızı dağılımlarını tahmin etmek için entegre bir HAD modeli geliştirmişlerdir. HAD modelinin teyidini, HAD sonuçlarının önceki ölçümlerle karşılaştırılarak sağlamışlardır. HAD modelinin geçerliliğini, hesaplanan sonuçların önceki ölçüm çalışmalarıyla karşılaştırılmasıyla üç adımda gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, HAD simülasyonunun, hava destekli püskürtücülerden gelen hava dağılımlarına ilişkin makul bir tahminde bulunabileceği sonucuna varmışlardır [30]. Pirinç üretiminde yapılan kimyasal gübre uygulamalarında kullanılan mevcut yöntemlerin, buharlaşma yoluyla önemli miktarda azot kayıplarına neden olduğunu bildirmiştir. Yaptıkları çalışmada bu sorunu minimize etmek üzere sıvı gübre enjeksiyonu için bir sıvı jet nozülün geliştirmişlerdir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği metodunu yardımıyla memenin kritik tasarım parametrelerini kullanarak bir simülasyon gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları bu simülasyonu testlerle doğrulamışlar ve sıvı püskürtme memesinin performansını üre Amonyum Nitrat çözeltisinin killi-tınlı bir toprağa enjekte edilmesiyile değerlendirmişlerdir

[31]. Tarımsal gübre serpmeye makinesinde kullanılan iki farklı tipteki radyal fanın 4000 d d⁻¹'de sayısal ve deneysel bir karşılaştırmasını incelemişlerdir. Uygulama nozulları boyunca hava dağılım davranışını değerlendirmek için radyal fanların matematiksel modellerini test tezgahında deneysel olarak doğrulamışlar ve sonra tarımsal gübre serpmeye makinesinin simülasyonunu gerçekleştirerek deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Sayısal analizleri, hız ölçümleri için sıcak telli bir anemometre ve basınç okumaları için bir pitot tüpü kullanılarak bir test tezgahında gerçekleştirilen deneylerle doğrulamışlardır [32].

6) *Sulama Makine ve sistemlerinde yapılan çalışmalar*: Su kısıtlaması koşullarında seralarda saksılarda yetiştirilen bitkiler sırasında dağılmış terleme ve mikro iklimi simüle etmek için belirli bir alt model geliştirmişlerdir. 2D geçici HAD modeli uygulamışlar ve sera içindeki iklim ile mahsul etkileşimlerini hesaba katmak için kullanıcı tanımlı fonksiyonlar uyarlamışlardır [33]. Farklı türbülans modellerini ve seçeneklerini düz tip bir damlatıcının hidrolik özelliklerini belirlemek amacıyla hesaplamalı akışkanlar dinamiği metodunu kullanmışlardır. Ayrıca farklı et kalınlıklarına sahip damlama sulama borularında aynı damlatıcı kullanılması durumunda, damlatıcı hidrolik özelliklerinin tasarıma etkisini araştırmışlardır (Şekil 5). Damla sulama borusunun et kalınlığının damlatıcı debisi üzerinde önemli bir parametre olduğunu bildirmişlerdir. Bu nedenle damlatıcı tasarımı üzerinde yapılan simülasyon çalışmalarında bu parametrenin dikkate alınması gerektiğini belirtmişlerdir [34].



Şekil 5. Sulama makinelerinde HAD ile simülasyon [21]

7) *Kurutma ve Ürün İşleme Makinalarında Yapılan Çalışmalar*: HAD (hesaplamalı akışkanlar dinamiği) simülasyonu ile kayısının konvektif kurutma işlemindeki nem ve sıcaklık değişimlerini karşılaştırmak için bir ısı ve kütle transferi modeli geliştirmişlerdir. Kurutma simülasyonunu, sınır tabakasından gelen nem içeriği ve sıcaklığını takip ederek, ağartılmış ve ağartılmamış kayısılar için değişken akış rejimi için gerçekleştirmişlerdir. Kayısılar, hava hızı ve sıcaklığının izlenmesine ve ayarlanmasına izin veren bir sistem kullanarak sıcak hava ile kurutulmuştur. Deneyler ile elde ettikleri veriler ile oluşturdukları simülasyondan elde ettikleri verileri karşılaştırmışlardır [35]. Hava ısıtılmalı güneş kolektörlü bir kurutucu sistem tasarlamışlardır. Tasarladıkları bu sistemle kurutulan elma ürünü için yaş ve kuru baz nem içerik değerleri hesaplanmışlardır. Deneylerle elde ettikleri verileri HAD metodu ile simüle ederek karşılaştırmasını gerçekleştirmişlerdir [36]. Tahıl tohumlarının yapay olarak kurutulması, su içeriğinin azaltılması amacıyla bir kurutma tesisi tasarlamışlardır. Önerdikleri kurutma tesisi, kurutma işleminin bir dizi önemli parametresini gerçek zamanlı olarak değiştirebilen ve izleyebilen düşük kapasiteli bir pilot sistem olarak bildirilmiştir. HAD simülasyonu sayesinde silindirik kutunun ve deflektörlerin yapısını optimize etmişlerdir. Bu durumun homojen bir kurutmaya ulaşılmasının ve enerji tüketiminin azalmasını sağlandığını bildirmişlerdir [35].

8) *Kapalı Tarımsal Alanların İklimlendirilmesi ve Havalandırılması üzerine yapılan çalışmalar*: Bir test odasında sıcaklık ve nem dağılımını inceleyerek ve tarımsal ürünlerin daha uzun süreler için ekonomik olarak saklanabilmesini araştırmışlardır. Araştırmada, deneysel ölçümler ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri (HAD) yapmışlardır. Elde edilen sonuçları her aşamada deneysel verilerle karşılaştırılarak sağlanmasını yapmışlardır [37]. Tarımsal üretim için kullanılan üç farklı tip sera için, hava akışlarını ve havalandırma oranlarını analiz etmişlerdir. Modelin dış ortamın ana meteorolojik değişken dinamiklerini ve geleneksel havalandırma yönetimini içerdiği 36.000 s (10 saat) bir süre için sonlu hacim yöntemi aracılığıyla çözülen bir geçici HAD-2D modeli geliştirerek kalibre etmişlerdir. Simülasyonlardan ve deney sonuçlarından elde ettikleri verilere göre çalışmada önerdikleri alternatif tipteki seraların yüksek And tropiklerinde bulunan koşullarda bahçecilik veya süs bitkileri üretimi için uygun olduğunu bildirmişlerdir [38]. Başlangıçta tarımsal binalara odaklanarak, doğal olarak havalandırılan binalarının iç hava akışı modellerini ve havalandırma oranlarını analiz etmek için kullanıcı dostu bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) simülatörü geliştirmişlerdir. Oluşturdukları bu simülatörler yardımıyla kullanıcılara ücretsiz ve açık kaynaklı olarak bir görselleştirme aracı sunmuşlardır. Kullanıcıların, kullanıcı dostu

grafik kullanıcı ara yüzleri aracılığıyla bina ve havalandırma konfigürasyonlarını, dış rüzgâr koşullarını, topografik koşulları ve bitkiler veya hayvanlarla ilgili bilgileri kolayca girebildiğini bildirmişlerdir. Programın çalıştırdıktan sonra, son işlem için üç boyutlu etkileşimli bir görselleştirme modülünü kullandığını belirtmişlerdir. Önceden geliştirilmiş prosedürleri kullanıcı etkileşimli bir şekilde otomatikleştirerek modelin esnekliğini ve yönetilebilirliğini sağlamakta, böylece zaman ve çabayı azaltabildiğini bildirmektedirler [39]. Sonlu hacimli bir serada HAD metodu yardımıyla kapalı döngü bir ağ oluşturmak amacıyla, bir iklim modelinin dış ortamına dayalı sanal sensör sistemini kurmuşlardır. Modelden bir regresyon yöntemi kullanarak dış sera ortamına dayalı bir sıcaklık modeli oluşturmuşlar ve geri besleme yöntemi kullanarak da sanal bir sera sıcaklığı sensör modeli oluşturmuşlardır. Bir çiçek serası üzerinde denemelerini gerçekleştirmişler ve MATLAB ara yüz programında bir ağ oluşturma ve türbülans modeli içeren bir üç boyutlu HAD uygulaması gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlarda, simülasyonun sıcaklık dağıtım yasağını karşıladığını ve sanal sensörler ile fiziksel sensörlerin sera ortamını izlemek için birlikte kullanılabileceğini bildirmişlerdir [40]. Süt ineği ahırlarındaki hava kalitesini iyileştirilmesi için farklı mekanik havalandırma yöntemleri kullanılmış ve HAD simülasyonları ile ahırlarda gerçekleştirilen ölçümler karşılaştırılmıştır. Oluşturulan modeller ve denemelerde elde edilen sonuçların, farklı sayıdaki fanların ve ahır uzunluklarının ölçülerinin, hava akış hızı ve toplam hacim akış oranı değerlerine oranlarını karşılaştırmışlardır [45].

9) *Hava Taşıtları üzerine yapılan çalışmalar:* Temel özelliği kanat uçlarına takılan uyarlanabilir çok kanatlı bir cihaz olan ve misyonunda sunulan ana aerodinamik sorunları bu şekilde optimize eden gelişmiş bir tarım uçağı prototipinin kavramsal tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Uçağın tasarım gereksinimlerine odaklanmışlar ve ağırlıktan, boyutlandırmaya, pilotların ergonomik gereksinimleri, aerodinamik, stabilite ve performansla ilgili önceki çalışmaları inceleyerek uygun uçağı geliştirmek ve değerlendirmek için geleneksel uçak tasarım yöntemlerini kullanmışlardır. Daha sonra, kendi geometrisi bir devrilme tankına yerleştirilmiş üç kanatçıktan oluşan uyarlanabilir çok kanatlı cihazı tasarlamak için analitik ve hesaplama yöntemlerini kullanmışlardır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) simülasyonu yardımıyla en iyi aerodinamik özellikleri sağlayan düzenlemeyi belirlemek için, her bir kanatçığın sadece eğim açısı değiştirilerek altı konfigürasyon oluşturmuşlardır. Öncelikli olarak uçağın kanat etrafındaki akış ve çok kanatlı bölümünü özel olarak incelemişlerdir. Daha sonra, temel konseptin genel aerodinamik performansını uçağı takılan optimum çoklu kanatçık konfigürasyonu ile karşılaştırmak için tüm uçağın etrafındaki hava akışını incelemişlerdir [47]. Tarımsal üretimde kullanılan İHA'ların pervanelerinin oluşturdukları aşağı yönlü rüzgârın etkilerini yaptıkları çalışmada incelemişlerdir. Bu amaçla İHA'yı temsilen gerçek bir İHA'nın 1/10 ölçekli halini kullanmışlardır. Daha sonra oluşturdukları modeli HAD metodu ile simüle ederek, deney çalışmalarından elde ettikleri verileri karşılaştırmışlardır. Bu çalışmanın tarımsal İHA'ların HAD modellemesini ve doğrulamasını araştırmak için ön ama temel bir girişim olduğunu ve aşağı yönlü doğrulama için yeni bir düşünce sağladığını bildirmişlerdir [48]. Düşük hızlı ses altı rejiminde çalışabilen oktokopter İHA'larının aerodinamik verimliliğini ve performansını optimize etmek amacıyla, literatürde verilen yöntemleri, hesaplamalı akışkanlar dinamiğini (HAD) ve doğrulama deneylerini birleştiren bir hibrit yaklaşımın gelişimini araştırmışlardır. Tek katmanlı ve koaksiyel konfigürasyonlara sahip geleneksel oktokopterlerin dezavantajlarını düzeltmek için, teorik analizin ön aerodinamik değerlendirmesine ve deneyim özetine dayalı olarak yeni bir oktokopter konfigürasyonu önermişlerdir. Sistematik ve doğru bir aerodinamik analiz elde etmek için model analitiğini, geleneksel konfigürasyon, koaksiyel konfigürasyon ve yeni konfigürasyon dahil olmak üzere üç farklı konfigürasyona sahip beş farklı oktokopter İHA modeli ile gerçekleştirmişlerdir. Rotor kanat boyutunun, rüzgârın ve rotorlar arasındaki girişimin çok rotorlu sistemlerin performansı ve verimliliği üzerindeki etkilerini araştırmak için HAD simülasyonlarını kullanmışlardır [49].

III. SONUÇ VE TARTIŞMA

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği; yüksek işletme maliyeti olmayan, problemlere hızlı çözüm sağlayabilen, karmaşık olmayan çözümlerle ilgili problemler üzerinde yeni eklemeler yapılarak tekrarlama imkânı sunabilen bir analiz yöntemidir. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) metodu ile akış alanlarının modellenmesinde büyük gelişmeler sağlamıştır. Daha önceden anlaşılmayan pek çok akış özelliklerinin yapısı bu yöntemle anlaşılır hale gelmiştir. Endüstride birçok uygulamalı mühendislik probleminde kullanılan HAD metodunun, deneysel gözlemleri de destekleyen bir yöntem olarak kullanımı, her geçen gün artan yeni bir teknoloji alanı oluşturmuş durumdadır.

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yöntemlerinin birçok avantajı bulunmaktadır.

- Tasarımda önemli ölçüde zaman kazancı sağlamaktadır.

- Deneysel çalışmalarda tekrarlanamayan koşulları kolayca yeniden oluşturulabilmektedir
- Bilgisayar grafik teknolojisi ile birleştirilerek; ayrıntılı, hayal gücüne yardımcı veriler sağlamaktadır.
- Rüzgâr tüneli deneylerine ucuz alternatif oluşturmaktadır.
- Deneysel olarak incelenmesi zor ve pahalı olan koşulların analizi için alternatif yöntemdir [51].

Otomotivden, savunma ve havacılık uygulamalarına, turbo makinalardan, akış kontrol sistemlerine, termal konfordan, karayolu ve demiryolu tünel yangınlarına kadar akışkanlar mekaniği, ısı transferi ve termodinamik uzmanlığı gerektiren tüm uygulamalarda HAD metodu ile gerçekleştirilebilmektedir. HAD metodunda oluşturulan simülasyonlar ile olası problemler önceden tespit edilip, gerekli düzenlemeler yapılabilmektedir. Fiziksel prototip imalatı ve deneme-yanılma gibi uygulamaları minimize edebilmektedir. Tasarımın daha ilk aşamasında, daha verimli sistemler tasarlanabilmektedir. HAD metodunda oluşturulan simülasyon sonuçları, simülasyon tabanlı ürün tasarım sürecinde ürünün çalışmasını, varsa problemleri bilgisayar ortamında görebilmeye ve ürün performansını optimize etmekte önemli faydalar sağlamaktadır.

Tarımsal üretimin birçok aşamasında akış mevcuttur. Toprak işleme sırasında toprağın yer değiştirmesi, tohumun ekim makinası içerisindeki akışı, sulama suyunun akışı, zararlı canlılarla mücadele için kullanılan pestisitlerin uygulanması, ürün hasat ve harmanı sırasında tanelerin ayrılması, ürünlerin kurutulması ve depolanan hacimlerin iklimlendirilmesi ile akıllı tarım uygulamalarında kullanılan İHA'lar bu örneklerden bazılarıdır. Akışın olduğu her yerde HAD metodu kullanarak simülasyonlar gerçekleştirilebilmekte ve deneylerle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmaktadır. Mevcut çalışmalardan elde edilen veriler ışığında HAD metodu ile oluşturulan simülasyonların deneylerle elde edilen verilere yakın değerler olduğunu göstermektedir. Tarım makinaları üretimi yapan firmaların, ürün oluşturma ve geliştirme aşamalarında HAD metodu ile oluşturacakları simülasyonlardan edinecekleri veriler üretimde iyileşmeye katkıda bulunabilir. Bu iyileşmeler, zaman tasarrufu, girdi maliyetlerinde azalma ve ürün geliştirme için yapılan testlerin azaltılabilmesi olarak sıralanabilir. Tarım 4.0 ile kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşan akıllı tarım uygulamalarında kullanılan İHA'ların kapasite artırımı ve çevreye etkilerinin incelenmesinde HAD metodunun yaygın olarak kullanılabilmesi düşünülmektedir. Gelişen teknoloji ve mevcut yazılımlarda gerçekleştirilen iyileştirmeler yardımıyla, simülasyonların kapasitesi, doğruluk payı ve hassasiyetleri gün geçtikçe artmaktadır. Bu sebeplerle tarımsal üretimde akışkanların kullanıldığı her durum için bu metod kullanılabilir. Tarımsal üretimde farklı akışkan ortamlarına yönelik verimli, çevre dostu ve ekonomik süreçlerin gerçekleştirilebilmesi için hesaplamalı akışkanlar dinamiği yönteminin yarar sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Keskin, G. (2019). *Doğal Havalandırmalı Plastik Serada Bazı İklim Parametrelerinin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) İle Belirlenmesi: Hatay İli Örneği*. Yüksek Lisans Tezi, Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.
- [2] Cemek, B., Atış, A., & Küçüktopçu, E. (2017). Evaluation of temperature distribution in different greenhouse models using computational fluid dynamics (CFD). *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, 32, 54-63. DOI: 10.7161/omuanajas.289354
- [3] Aslanbay Güler B., & İmamoğlu, E. (2020). Bilgisayar destekli simülasyon ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, 13(1), 42-52.
- [4] Küçüktopçu, E. (2016). *Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) Kullanarak Kümes İçi Çevre Koşullarının Belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- [5] Arsenoia, V., Vlăduț, V., Țenu, I., Voicea, I., Moiceanu, G., & Cârlescu, P. M. (2019). Mathematical Modeling and Numerical Simulation of the Drying Process of Seeds in a Pilot Plant. *INMATEH-Agricultural Engineering*, 57(1), 55-62.
- [6] 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.
- [7] Süfer Ö., Kumcuoğlu, S., & Tavman, Ş. (2016). Gıda Mühendisliğinde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Uygulamaları. *Akademik Gıda*, 14(4), 465-471.
- [8] Özcan, O.A. (2004). *Uçak Kanatlarının CFD Analizi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [9] Akdemir, S. & Bal, E. (2014). Elma Depolamada Kasa İçi Ortam Koşullarının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Modellenmesi. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 11(1), 53-62.

- [10] Ovalı, İ., Atay, Ö., & Yılmaz, E. (2021). Santrifüj Pompa Tasarımında Sayısal Yöntemlerin(HAD/CFD) Kullanımı. *Mühendis ve Makina*, 62(705), 654-664.
- [11] Atış, A. (2011). *Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) Kullanılarak Samsun Koşullarına Uygun Farklı Sera Modellerinde Doğal Havalandırma Etkinliğinin Belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Samsun Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- [12] Akdemir, S., Öztürk, S., & Ülger, P. (2016). Bir Traktör Kabininde Ortam Şartlarının Yaz koşullarında HAD ile Belirlenmesi. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 13(02), 46-54.
- [13] Jurco, A.N., Gheres, M., Jurco, E.C., & Scurtu, I.L. (2018). CFD Study of the Exhaust Gases Distribution for Tractors Without Cab. *ISB-INMA TEH*. 149- 152.
- [14] Oh, J., Choi, K., Son, G., Park, Y., Kang, Y., & Kim, Y. (2020). Flow analysis inside tractor cabin for determining air conditioner vent location. *Computers and Electronics in Agriculture*, 169.
- [15] Karmakar, S., Ashrafzadeh, S. R., & Kushwaha, R. L. (2009). Experimental validation of computational fluid dynamics modellingfor narrow tillage tool draft. *Journal of Terramechanics*, 46, 277-283.
- [16] Wei, M., Zhu, L., Luo, F., Zhang, J. W., Dong, X. W., Jen, & T. C. (2019). Share-soil interaction load and wear at various tillage conditions of a horizontally reversible plough. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162, 21-30.
- [17] Zhu, L., Cheng, X., Peng, S. S., Qi, Y. Y., Zhang, W. Z., Jiang, R., & Yin, C. L. (2016). Three-dimensional computational fluid dynamic interaction between soil and plow breast of horizontally reversal plow. *Computers and Electronics in Agriculture*, 123, 1-9.
- [18] Devarrewaere, W., Foqué, D., Nicolai, B., Nuyttens, D., & Verboven, P. (2018). Eulerian-Lagrangian CFD modellingof pesticide dust emissions from maize planters. *Atmospheric Environment*, 184, 304-314.
- [19] Han D., Zhang D., Jing H., Yang L., Cui T., Ding Y., Wang Z., Wang Y. & Zhang T. (2018). DEM-CFD coupling simulation and optimization of an inside-filling air blowing maize precision seed-metering device. *Computers and Electronics in Agriculture*, 150, 426-438.
- [20] Lei, X., Liao, Y., & Liao, Q. (2016). Simulation of seed motion in seed feeding device with DEM-CFD coupling approach for rapeseed and wheat. *Computers and Electronics in Agriculture*, 131, 29-39.
- [21] Yazgi, A., Demir, V., & Değirmencioglu, A. (2020). Comparison of computational fluid dynamics-based simulations and visualized seed trajectories in different seed tubes. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 44, 599-611.
- [22] Hu, H., Zhou, Z., Wu, W., Yang, W., Li, T., Chang, C., Ren, W. & Lei, X. (2021). Distribution characteristics and parameter optimisation of an air-assisted centralised seed-metering device for rapeseed using a CFD-DEM coupled simulation. *Biosystems Engineering*, 208, 249-259.
- [23] Fenghui, G., Youqun, Z., Feng, W., Zhichao, H., & Lili, S. (2022). Simulation analysis and experimental validation of conveying device in uniform rushedstraw throwing and seed-sowing Machines using CFD-DEM coupled approach. *Computers and Electronics in Agriculture*, 193, 106720.
- [24] Lim, B. Y., Shamsudin, R., Baharudin B. T. H. T., & Yunus, R. (2015). Performance evaluation and CFD multiphase modellingfor Multistage Jatropha Fruit Shelling Machine. *Industrial Crops and Products*, 85, 125-138.
- [25] Dai, F., Song, X., Zhao, W., Han, Z., Zhang, F., & Zhang, S. (2019). Motion simulation and test on threshed grains in tapered threshing and transmission device for plot wheat breeding based on CFD-DEM. *Int J Agric & Biol Eng.*, 12(1), 66-73.
- [26] Liang, Z., Xu, L., De Baerdemaeker, J., Li, Y., & Saeys, W. (2020). Optimization of a multi-duct cleaning device for rice combine harvesters utilizing CFD and experiments. *Biosystems Engineering*, 190, 25-40.
- [27] Xu, L., Li, Y., Chai, X., Wang, G., Liang, Z., Li, Y. & Li B. (2020). Numerical simulation of gas solidtwo-phase flow to predict the cleaning performance of rice combine harvesters. *Biosystems Engineering*, 190, 11-24.
- [28] Xu, H., Znahg, P., Hu Z., Mao, E., Yan, J. & Yang, H. (2022). Analysis of dust diffusion from a self-propelled peanut combine using computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering*, 215, 104-114.
- [29] Endalew, A. M., Debaer, C., Rutten, N., Vercammen, J., Delele, M. A., Ramon, H., Nicolaï, B. M., & Verboven, P. (2010). Modellingpesticide flow and deposition from air-assisted orchard spraying in orchards: A new integrated CFD approach. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150, 1383-1392.
- [30] Hong, S.W., Zhao, L., & Zhu, H. (2018). CFD simulation of airflow inside tree canopies discharged from air-assisted sprayers. *Computers and Electronics in Agriculture*, 149, 121-132.
- [31] Zheng, W., Jiang, Y., Ma, X., & Qi, L. (2019). Development of a liquid-jet nozzle for fertilizer injection in paddy fields using CFD. *Computers and Electronics in Agriculture*. 167, 105061.

- [32] Fogal, M. L. F., Micheli, G. B., Scaloni, V. L., & Padilha, A. (2021). Numerical-experimental comparison of radial fans applied in pneumatic transport of agricultural fertilizer spreaders. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering)*, 25(1), 58-64.
- [33] Ali, H.B., Bournet, P.E., Cannavo, P., & Chantoiseau, E. (2018). Development of a CFD crop submodel for simulating microclimate and transpiration of ornamental plants grown in a greenhouse under water restriction. *Computers and Electronics in Agriculture*, 149, 26-40.
- [34] Demir, V., Yürdem, H., Yazgı, A., & Günhan T. (2020). Determination of the Hydraulic Properties of a Flat Type Drip Emitter using Computational Fluid Dynamics. *Journal of Agricultural Sciences (Tarım Bilimleri Dergisi)*, 26, 226-235.
- [35] Cârlescu, P.M., Arsenoia, V., Roşca, R., & Țenu, I. (2017). CFD simulation of heat and mass transfer during apricots drying. *LWT - Food Science and Technology*, 85, 479-486.
- [36] Alıç, E. & Daş, M. (2019). Güneş Enerjisi Destekli Kurutma Sisteminde Ürün Nem Oranının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analizi. *KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22, Özel Sayı, 78-82.
- [37] Akdemir, S., Öztürk, S., Edis, F.O., & Ülger, P. (2012). Soğuk Hava Depolarında Ortam Koşullarının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) ile Modellenmesi. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 8(2), 241-248.
- [38] 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.
- [39] Kim, R., Hong, S., Norton, T., Amon, T., Youssef, A., Berckmans, D., & Lee I. (2020). Computational fluid dynamics for non-experts: Development of a user-friendly CFD simulator (HNVR-SYS) for natural ventilation design applications. *Biosystems Engineering*, 193, 232-246.
- [40] Cheng, X., Li, D., Shao, L., & Ren, Z. (2021). A virtual sensor simulation system of a flower greenhouse coupled with a new temperature microclimate model using three-dimensional CFD. *Computers and Electronics in Agriculture*, 181, 105934.
- [41] Hong, S-W., Exadaktylos, V., Lee, I-B., Amon, T., Youssef, A., Norton, T. & Berckmans, D. (2017). Validation of asource open-source CFD code to simulate natural ventilation for agricultural buildings. *Computers and Electronics in Agriculture*, 138, 80-91.
- [42] Dhiman, M., Sethi, V.P., Singh, B. & Sharma, A. (2019). CFD analysis of greenhouse heating using flue gas and hot water heat sink pipe networks. *Computers and Electronics in Agriculture*, 163, 104853.
- [43] Müller, J., Schenk, C., Keicher, R., Schmidt, D., Schulz, V. & Velten, K. (2020). Optimization of an externally mixed biogas plant using a robust CFD method. *Computers and Electronics in Agriculture*, 171, 105294.
- [44] Guatam, K. R., Rong, L., Iqbal, A. & Zhang, G. (2021). Full-scale CFD simulation of commercial pig building and comparison with porous media approximation of animal occupied zone. *Computers and Electronics in Agriculture*, 186, 106206.
- [45] Pakari, A. & Ghani, S. (2021). Comparison of different mechanical ventilation systems for dairy cow barns: CFD simulations and field measurements. *Computers and Electronics in Agriculture*, 186, 106207.
- [46] Akdemir, S. (2016). Bir soğuk hava deposunda farklı menfez kanat açılımlarına göre hava dağılımının hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile tahmini. *Anadolu Tarım Bilim. Dergisi*, 31, 84-95.
- [47] Bravo-Mosquera, P. D., Cerón-Muñoz, H. D., Díaz-Vázquez, G., & Catalano, F. M. (2018). Conceptual design and CFD analysis of a new prototype of agricultural aircraft. *Aerospace Science and Technology*, 80, 156-176.
- [48] Yang, S., Tang, Q., Zheng, Y., Liu, X., Chen, J., & Li, X. (2020). Model migration for CFD and verification of a six-rotor UAV downwash. *Int J Agric & Biol Eng.*, 13(4), 10-18.
- [49] Zhu, H., Nie, H., Zhang, L., Wei, X., & Zhang, M. (2020). Design and assessment of octocopter drones with improved aerodynamic efficiency and performance. *Aerospace Science and Technology*, 106, 106206.
- [50] Shouji, C., Dafsari, R. A., Yu, S-H., Choi, Y. & Lee, J. (2021). Mean and turbulent flow characteristics of downwash airflow generated by a single rotor blade in agricultural drones. *Computers and Electronics in Agriculture*, 190, 106471.
- [51] Koca, F., (2015). *Traktör Soğutma Pompasının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Optimum Tasarımı ve Analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.