SİDAS MEDYA
Akademik Gıda®
ISSN Print: 1304-7582, Online: 2148-015X
http://www.academicfoodjournal.com

Akademik Gıda 14(4) (2016) 465-471

Derleme Makale / Review Paper

Gıda Mühendisliğinde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Uygulamaları

Özge Süfer[1], Seher Kumcuoğlu[2], Şebnem Tavman[2]

[1]Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Karacaoğlan Yerleşkesi, Osmaniye
[2]Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Bornova, İzmir

Geliş Tarihi (Received): 21.04.2014, Kabul Tarihi (Accepted): 12.01.2015
Yazışmalardan Sorumlu Yazar (Corresponding author): ozgesufer@osmaniye.edu.tr (Ö. Süfer)
0 328 827 10 00 / 3656 0 328 825 00 97

ÖZ

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), bilgisayar temelli simülasyonlar sayesinde ısı transferi, akışkan akışı ve kimyasal reaksiyonlar içeren sistemleri analiz eder. HAD kodları lineer olmayan kısmi diferansiyel denklemleri çözen nümerik algoritmalar çerçevesinde geliştirilmiştir. Sayısal ve deneysel olarak bulunan genel büyüklüklerin karşılaştırılması yoluyla HAD çözümlerini doğrulamak için çoğunlukla deneysel veriler kullanılır. Geometri ve meş (ağ) oluşturma, fiziksel modeli özelleştirme, sınır koşullarını belirleme, nümerik seçeneklerle modelin kesinliğini arttırma aşamalarından sonra çözüme geçilir ve şekil, doğru, vektör çizimi ve/veya animasyonlarla HAD analizi tamamlanmış olur. Günümüzde hem tüketiciler hem de çevre için bilinen yararlarından ötürü HAD uygulamaları, gıda endüstrisinde sistem tasarımında vazgeçilmez hale gelmiştir. Hâlihazırda, gıda maddelerinin ambalajlanması, soğukta depolanması, dondurulması, fırında pişirilmesi, sterilizasyon ve kurutma gibi pek çok proses ile ısı değiştirici, karıştırmalı kazan gibi sistemlerin tasarım ve analizinde hesaplamalı akışkanlar dinamiği teknolojisinden yararlanılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, Isı transferi, Akışkan akışı, Gıda mühendisliği

Computational Fluid Dynamics Applications in Food Engineering

ABSTRACT

Computational fluid dynamics (CFD) analyses systems including heat transfer, fluid flow and chemical reactions by means of computer based simulations. CFD codes have been developed within the scope of numerical algorithms for solving nonlinear partial differential equations. Experimental data are generally used to validate CFD solutions through comparing magnitudes that are found experimentally and numerically. CFD analysis is completed with drawing images, lines, vectors and/or animations after creating geometry and mesh (grid), customizing physical model, determining boundary counditions and increasing the model accuracy by numerical options stages. Today, CFD applications have become indispensable in system design in food industry because of having advantages for both consumers and environment. Various processes (e.g. packaging, cold storage, freezing, baking, sterilization, drying and designing) and analyses of systems (e.g. heat exchanger and agitated vessel) have been already benefited from CFD technology.

Keywords: Computational fluid dynamics, Heat transfer, Fluid flow, Food engineering

GİRİŞ

Gelişen bir uygulama olarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), dijital bilgisayarlardaki ilerlemeler ile birlikte uluslararası çevreler tarafından oldukça dikkat çekmeye başlamıştır. 1960'ların sonlarından beri, HAD'nin uygulamalarında dikkate değer bir büyüme gözlenmektedir [1]. Yeni tasarımların geliştirilmesinden ve proseslerin uygulanmalarından önce performanslarının tahmin edilmesine olanak sağladığından dolayı HAD, mühendislik tasarım ve analizlerinin gerekli kısımlarından birisi haline gelmiştir [2]. Günümüzde araştırmacılar, ekipman tasarımcıları ve proses mühendisleri; fırınlar [3], soğutma kabinleri [4], karıştırmalı kazanlar [5], püskürtmeli kurutucular [6], ısı değiştiriciler [7] ve diğer bazı proses ekipmanlarının performanslarını ve akışlarını analiz etmek için yaygın bir şekilde HAD uygulamalarını kullanmaktadırlar. Tasarım ve geliştirmede, HAD programları yanlızca akışkan davranışı ile ilgilenmeyen, ayrıca ısı ve kütle transferi (buharlaşma ya da çözünme vs.), faz değişimi (dondurma, erime ya da kaynama vb.), kimyasal reaksiyon (yanma ya da paslanma vs.), mekaniksel hareket (karıştırıcının dönmesi, pistonlar, fanlar vb.) ve katılardaki stres ya da deformasyon gibi konularla da ilgilenen standart nümerik araçlardır [8].

HAD UYGULAMALARININ AVANTAJLARI

HAD sonuçlarının çoğu, yüksek bir güvenilirliğe ve ürün uygunluğuna, gelişmiş bir performansa, daha güvenilir bir ölçeklemeye ve daha yüksek bir fabrika verimliliğine olanak sağlar [9]. HAD uygulamalarının yararları şu şekilde sıralanabilmektedir [10];

- Akışkan akışının, ağırlık kayıplarının, kütle ve ısı transferinin ve daha bir çok konunun detaylı bir şekilde anlaşılmasını mümkün kılar.
- "Şöyle olsaydı ne olurdu?" sorusunu kısa süre içerisinde cevaplar.
- Ölçeklemede karşılaşılan problemleri en aza indirger, çünkü modeller temel fizik kurallarına dayalıdır ve ölçekten bağımsızdır.
- Bir fırın içerisindeki çok yüksek sıcaklık veya tehlikeli bir çevre koşulu gibi detaylı ölçüm almanın pek olanaklı olmadığı koşulları ayrıntılı bir şekilde simule edebilmede faydalıdır.
- Etkin bir analiz ve tasarım aracı olmasından dolayı, üretimdeki sorunlar değerlendirilirken, yanlızca etkileri değil sorunların kökenleri açığa çıkartılabilmektedir.

HAD MODELLEMENİN TEMELLERİ

CFD kodları tüm akışkan akışlarında, ısı transferinde ve ilgili diğer tüm olaylarda geçerli lineer olmayan kısmi diferansiyel denklemleri çözen nümerik algoritmalar çerçevesinde geliştirilmiştir. Doğru kullanıldığı takdirde, CFD akış sisteminin fiziksel özelliklerinin detaylı bir şekilde anlaşılmasını sağlar [11, 12].

Genel Denklemler

Akışkan akışı ve ısı transferi ile ilgili eşitlikler, korunum yasalarının matematiksel eşitlikleri olarak dikkate alınır ve de Navier-Stokes denkliklerini işaret ederler [8].

Kütlenin korunumu (Süreklilik denklemi)
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_1}(\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

Momentumun korunumu (Newton'un 2. hareket kanunu)
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}[-\rho\delta_{ij} + \mu(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})] + \rho g_i \quad (2)$$

Enerjinin korunumu (Termodinamiğin 1. yasası)
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_a T) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j C_a T) - \frac{\partial}{\partial x_j}(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j}) = s_t \quad (3)$$

Nümerik Analiz

HAD yazılımları çoğunlukla sonlu elemanlar, sonlu hacimler ve sonlu farklar yöntemi olmak üzere 3 temel yöntemi baz alarak problemleri çözebilmektedir. Sonlu farklar yöntemi karmaşık geometrileri içeren çeşitli mühendislik problemlerinin çözümünde yetersiz kalabildiğinden dolayı, sonlu elemanlar ve sonlu hacimler yöntemleri daha sıklıkla kullanılmaktadır [8].

Problemin Çözümü

Bir akış problemini çözmek için HAD kodu, kullanıcı tarafından verilen matematiksel komutları almalı, uygun bir düzen içerisinde bu komutları yapılandırmalı ve belirlenmiş sınır koşullarında problemi çözmelidir. Bir dizi eşitliği çözmek için genellikle iteratif yöntemleri kullanan HAD kodları, bu eşitliklerin tek bir bağımlı değişkene indirgenebilmesini sağlayabilmektedir [8].

Sonucu Yorumlama

Ortaya çıkan çözümün açıklanmasında görsellik çok önemli bir yer tutmaktadır. Şekil, vektör ve doğru çizimleri sonuçların kesin bir şekilde ortaya konulmasını sağlamakta ve sistem tasarımındaki pek çok çalışmada başarılı bir şekilde kullanılabilmektedir [13]. Özellikle animasyonlu akış alanları gittikçe popüler olmaya başlamıştır [14]. Ayrıca, alan verileri daha sonra işlenebilmek amacıyla daha başka farklı modelleme programlarına da kolaylıkla transfer edilebilmektedir.

Ticari HAD Paketleri

Piyasada HAD uygulamalarını içeren yazılımları üreten belli başlı 3 firma bulunmaktadır. Bunlardan birincisi ANSYS Inc. tarafından üretilen CFX'dir. Çok çeşitli akış problemlerini çözebilen CFX ayrıca çoklu faz akışı,

gözenekli ortam, ısı transferi, yanma ve radyasyon modellerini içeren pek çok fonksiyonel fiziksel modeli de içermektedir [15].

Fluent şirketi gıda mühendislerinin ihtiyaçlarına yönelik olarak HAD çerçevesinde 3 tane yazılım paketi önermektedir. Bu 3 paketten biri olan FLUENT çoklufizik yeteneklerine sahip genel amaçlı bir yazılım iken, FIDAP karmaşık fizik problemlerini modellemekte, POLYFLOW yazılımı ise polimer modellemede kullanılmaktadır. FLUENT yazılımı çoklu faz akışları için ayrık faz modellerini, çeşitli yüksek kalite reaksiyon modellerini ve ısı değiştiriciler için bir çok model içermektedir [16].

Çok amaçlı bir HAD paketi olan PHOENICS ise, Newtonsu ve Newton dışı akış, gözenekli ortam içinden akış ve konjüge ısı transferi gibi gıda mühendisleri tarafından karşılaşılan pek çok durum için çeşitli modelleme yeteneklerine sahip, çok amaçlı bir HAD yazılımıdır [15].

Gıda Endüstrisi için Modeller

Türbülans Modelleme

Gıda endüstrisinde çeşitli koşullar altında, güvenli ve etkili fabrika prosesleri geliştirmek için, sistemin akış karakteristiklerinin, gıdaların ısıya bağlı özelliklerinin ve de yüzey ısı ve kütle transfer katsayılarının belirlenmesi gereklidir [17]. Bu tip prosesler genellikle karmaşık geometri ve/veya yüksek akış hızlarından dolayı türbülans akışla ilişkilendirilir. Navier-Stokes eşitliği Laminar akış için doğrudan kullanılırken [18], Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) eşitliği ise türbülent akışları simgeleyen prosesler için kullanılmaktadır.

Gözenekli Ortam ve Çoklu Faz Modelleme

Model ürün üzerindeki basınç düşüşüne, partikül boyutu ve şekli, hava özellikleri ve boşluk fraksiyonun etkisi ile ilişkili gözenekli ortam varsayımı, son yıllardaki çalışmalarda kullanılmaktadır [19, 20]. Bu yöntemde temel olarak gözenekler boyunca materyal üzerinde basınç düşüşü ile ilişkili Darcy kanunu kullanılır. Bu kanunun genişletilmiş şekli olan, basınç düşüşü ve hız arasındaki lineer olmayan ilişkiyi gösteren Darcy-Forchheimer eşitliği;

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\mu}{K} v + \rho C_2 v^2 \quad (4)$$

Darcy-Forchheimer eşitliği, paketli yataklardaki basınç düşüşünü ifade etmek için kullanılır. HAD modelinde bu eşitlik, momentum eşitliğine ilave edilir.

Newton Dışı Akışkan Modelleme

Pek çok gıda işleme ortamında Newton dışı davranış özelliklerine sahip akışkanlar bulunmakta ve bu akışkanların kaymayla incelen ya da kaymayla kalınlaşan davranışları onların termal-hidrolik performanslarını önemli oranda etkilemektedir [16]. Son yıllarda HAD, Newton dışı akışkanların karıştırma, soğutma, ısıtma ve taşıma süreçlerinin daha iyi anlaşılmasını sağlamıştır. Isı değiştiriciler, karıştırma tankları, ısıtıcılar ve akış konveyörleri gibi proses ekipmanları gıdaların reolojik özellikleri ile bütünüyle bağlantılıdır ve HAD çalışmaları ekipman tasarımında pek çok yönteme açıklık getirmektedir [21].

Modelin Kesinliğinin Arttırılması İçin Kullanılan Yöntemler

Yapılanmamış Meş (Ağ)

Son yıllarda meşleme teknolojisinde ortaya çıkan en önemli avantajlardan biri, genel kodlarla bütünleştirilen altı yüzlü hibrid meşleme yeteneğidir. Bu yetenek bir meşin, her türlü geometriye uyumunu sağlar, böylelikle pek çok endüstriyel uygulama için HAD çözümü kolaylaşmış olur. Yapılanmamış ve hibrid meşlerin en büyük avantajı, blok yapılarının esnekliğidir. Meşlerin bu değişkenliği, HAD toplulukları tarafından gittikçe ilgi görmekte ve gıda endüstrisindeki pek çok uygulamada kullanımları, daha kesin sonuçlar vermektedir [22].

Dinamik (Değişken) Meş (Ağ)

Bu meşleme tekniği, geometrinin genellikle karıştırma ve hareket etme etkisini modellemek için kullanılır, böylelikle fırında pişirme ve karıştırma gibi fabrika prosesleri simule edilebilir. Bu yöntem, bir meşin ortak bir arayüzde birbirine komşu kısımlara kayabilmesini sağlar. Örneğin, bir karıştırma tankında bıçaklar ve engeller (baffles) arasında ya da fırında ürünün hareket ettiği durumlarda bu teknik uygulanabilir [23, 24].

Çok Yönlü Koordinat Sistemleri

Bu tip bir meşleme, dinamik meş simülasyonlarında bir akışın herhangi bir sabit parçası için ek bir varsayım ortaya koymaktadır. Direkt olarak ağ örgüsünün (grid) dönmeye başlamasının yerine dönme olayı, momentum eşitliğine uygun cisim kuvveti teriminin ilave edilmesiyle simule edilir. Dönen ve durgun akış rejimleri arasındaki arayüzeyde HAD hesaplamalarına uygun dönüşümler yapılarak, kararlı hal simülasyonu statik bir meş üzerine iletilir [25].

Konveksiyon Şemaları

Bir nümerik şema ya da konveksiyon şeması, sınır koşullarını bilgisayar alanına ileten ve ilgili eşitlikleri çözen bir araç olarak düşünülebilir. Konveksiyon şemasının performansı, meş ilk defa düzenlendiğinde hatayı azaltma yeteneği ile sınırlıdır. Birinci dereceden HYBRID ve UPWIND konveksiyon şemaları sınırlandırılmış ve sabittir, gridlerin geliştirilmesinde yavaş cevap verirler. Güçlü taşınımın varlığında ise, yüksek dereceden QUICK şeması, sınırlandırılmamış bir yapıya sahip olduğundan gridlerin analizinde daha kesin ve hassas cevaplar verir [14, 23, 26].

Konumsal Yaklaşım Tekniği

Richardson ekstrapolasyonu [27] temeline dayanan, Roache [28] tarafından tasarlanan bu teknik, HAD'ın pek çok uygulamasında kullanılmaktadır [29]. Bu yöntemin

temel üstünlüğü, CFD kullanıcısına, grid çözümü ve bilinmeyen kesin çözüm arasındaki hatayı (conservative estimate of error = GCI) göstermesidir. İki farklı grid çözümünden elde edilen eşitliklerin çözüm kümesine ihtiyaç vardır.

$$\mathrm{GCI} = \frac{F_S\,|\varepsilon|}{(r^p - 1)} \quad (5)$$

Gridlerin kaba ve ayrıntılı çözümleri arasındaki bağıl hata (ε);

$$\varepsilon = \frac{f_2 - f_1}{f_1} \quad (6)$$

5 numaralı denklemde yer alan F_s güvenlik faktörü olarak bilinir ve de genellikle hesaplamalarda 3 olarak alınır (30), p ise konveksiyon şemasının derecesidir. 6 numaralı denklemdeki yer alan f_n çözüm fonksiyonudur (örneğin bir konumdaki hız).

GIDA ENDÜSTRİSİNDEKİ HAD UYGULAMALARI

Kurutma

Kurutma, gıda endüstrisinde çok yaygın bir prosestir. Kurutma hızı hava hızının ya da hava akımının bir fonksiyonudur. Bu nedenle, bir kurutma ortamında hava akımını ve hava hızını bilmek büyük önem taşımaktadır. Buna rağmen, bu parametreleri, işlem sırasında ölçmek zor olabilmekte, çünkü hava akımının farklı yerlerine konumlandırılması gereken pek çok sensöre ihtiyaç duyulmakta, özellikle türbülans olduğunda ise bu durum daha da zorlaşmaktadır [31]. Bu noktada HAD, kurutma prosesinin tanımlanmasında oldukça yardımcı olabilmektedir.

Mathioulakis ve ark. [32] kesikli tip, endüstriyel bir tepsili kurutucuda hava hareketlerini simule etmişlerdir. Bir çok meyvenin kurutma testleri yapılarak, meyvelerin kuruma derecelerinin kurutucu içerisindeki pozisyonlara bağlı olarak değiştiği vurgulanmıştır. Basınç ve hava profillerinin HAD tarafından belirlenmesiyle elde edilen sonuçlar, kurutma hızlarındaki ve nem içeriklerindeki farklılıkların, kurutucu içerisindeki havanın homojen olmayan dağılımından kaynaklandığını açığa çıkartmıştır. Mirade ve Daudin [33] yaptıkları çalışmalarında bir sosis kurutucusunda, kurutucu içerisindeki havanın hareketine dair verilere erişebilmek amacıyla HAD teknolojisinden yararlanmışlardır. Ölçüm verileri ile, modelden elde edilen verileri karşılaştırdıklarında hava hızları arasında yaklaşık 0.6 m/s'lik farklılıklar tespit etmişlerdir.

HAD ayrıca gıda endüstrisindeki püskürtmeli kurutucuların tasarım ve performans değerlendirmelerinde de kullanılmaktadır. Bu tip kurutucular, kurutucu içerisindeki havanın karmaşıklığından ve de püskürtmeli akış düzeninden oldukça etkilendiğinden dolayı, tasarımları oldukça zor ekipmanlardır. Bu yüzden bu cihazların optimum tasarımları, duvarlarında oluşan birikimler gibi önemli problemlerinin çözümleri HAD simulasyonları sayesinde yapılabilmektedir [34]. Geçmiş yıllarda, pilot ölçekli sprey kurutucuda hava hareketlerini belirleyen ve modelleyen çalışmalar yapılmış olduğu gibi [35], kurutucunun iç duvarındaki birikimin hızının ve havanın giriş yaptığı geometrinin etkisini inceleyen çalışmalar da [36] literatürde mevcuttur.

Sterilizasyon

Sterilizasyon, gıdaların depolanmasında ve de korunmasında yararlanılan belli başlı tekniklerden birisidir. HAD, gıda ürünlerinin kalite optimizasyonunu sağlamak amacıyla sterilizasyon prosesi sırasında hem sıcaklık dağılımın hem de akış düzeninin belirlenebilmesi için kullanılabilir.

Isıl işleme mikrobiyal inaktivasyonu sağlayan, sterilizasyonun en önemli tekniğidir ancak aynı zamanda üründe aroma ve kalite kayıplarına sebep olur. HAD uygulamaları ile optimize edilmiş, gıdaların sterilizasyonu konu eden pek çok çalışma bulunmaktadır [37-41]. Bu çalışmalar prosesin optimal kontrolünde kayda değer gelişmeler sağlamakla birlikte, gıdanın besinsel ve duyusal özelliklerinin nasıl korunabileceğine ilişkin önemli bilgiler de sunmaktadır. Abdul Ghania ve ark. [39, 40] HAD simulasyonları ile konserve gıdaların sterilizasyonunu çalıştıkları bir dizi araştırmaya imza atmışlardır.

Son yıllarda, poşetli gıdalar marketlerdeki raflarda yerlerini almıştır ancak poşet içerisindeki gıdaların sterilizasyonuna yönelik olarak yapılmış çalışmalar oldukça kısıtlıdır. Abdul Ghania ve ark. [41] yaptıkları bir başka çalışmada ise, poşet içerisindeki havuç çorbasının sterilizasyonundaki sıcaklık ve hız profillerini simule etmek için HAD kodu kullanmışlardır.

Karıştırma

Karıştırma işleminde gaz, sıvı ve katı parçacıklar yer almaktadır. Gıda işleme endüstrisi için özellikle sıvıların karıştırılması prosesi en önemli temel işlemlerden birisidir. Buna rağmen, karıştırıcı tasarımı ve karıştırma sırasındaki çoklufaz türbülanstan dolayı karıştırma, en karmaşık prosesler arasında da yer almaktadır.

Karıştırma prosesinin modellenmesinde, HAD etkin araçlardan bir tanesidir. Akış davranışı ve gıda prosesi hakkında bilgi edinilmesini sağlar. HAD yardımı ile karıştırmalı kazan içerisindeki akış olayları tahmin edilebilir [42]. Karıştırma sırasında, prosesin geliştirilmesi için yaygın olarak bir karıştırıcı ya da kanatçık kullanılır. HAD kodları enerji girişini minimize etmek ve karıştırma süresini kısaltmak amacıyla, prosesi optimize etmede kullanılmaktadır. Sahu ve ark. [43] karıştırmalı tank içerisindeki akış davranışını HAD ile modellemişlerdir. Çalışmada herhangi bir deney yapılmamış olmakla birlikte, literatürde yayınlanmış olan deneysel verilerle elde edilen model kıyaslanmıştır.

Karıştırma prosesinin analiz edilmesinde, karıştırıcı tasarımı çok önemli bir konudur. Bu nedenle, HAD uygulamalarına yoğunlaşmış çalışmaların bir kısmı karıştırıcı dizaynına da eğilmektedir [44, 45]. Bu çalışmaların sonucunda; damlacık boyut dağılımının kolay bir şekilde ölçülebilmekte, fazların hızları ve

karıştırıcı içerisindeki vorteksler (girdaplar) belirlenebilmektedir. Bu yüzden, karıştırma işleminin HAD uygulamaları, prosesin kontrol ve optimizasyonunda önem taşımaktadır.

Dondurma

Dondurulmuş gıdalar, yüksek bir kaliteye ve güvenliğe sahip olduklarından dolayı geçmiş yıllardan beri yaygın bir şekilde tüketilmektedir. Dondurma mikrobiyel gelişmeyi yavaşlatabilmekte ve gıdayı koruyabilmektedir. Bu nedenle araştırmacılar son zamanlarda dondurma sırasındaki ısı ve kütle transferinin HAD ile modellenmesi üzerine çalışmaktadırlar.

Pişmiş jambonun hava üflemeli dondurma prosesi sırasında soğutma hızı ve ağırlık kaybını tahmin edebilmek için, geçerli olan ısı ve nem transferi HAD simulasyonları ile incelenmiştir [46]. Deneysel ve teorik verilerin tümü merkez sıcaklığının 74.4°C'den 4°C'ye yaklaşık 540 dakikada geldiğini göstermiştir. Ağırlık kaybı deneysel olarak %4.25, teorik olarak standart k – ε model ile %4.07 ve LRN k – ε model ile %4.22 olarak belirlenmiştir. Aynı zamanda hava giriş sıcaklığındaki dalgalanmaların etkisi de çalışılmıştır [47].

Mirade ve Daudin [48] endüstriyel iki et soğutucusunda hava akışını modelleyen 2 boyutlu bir model geliştirmişlerdir. Moureh ve Derens [49] ise paletler üzerine istiflenmiş ambalajlı, dondurulmuş gıdalarda sıcaklık artışını HAD modelleme çerçevesinde araştırmışlardır. Çalışma, soğuk zincir sırasındaki sıcaklık kontrolünün gıdadaki yüksek kaliteyi sağlamak için gerekli olduğunu göstermiştir.

Dondurulmuş gıdalar katı bir sıcaklık kontrolüne ihtiyaç duyduklarından dolayı, soğuk depoların ve dondurucu ekipmanların tasarımı bu noktada oldukça önem taşımaktadır. HAD teknolojisinin kullanımı ile tasarımcılar imalattan önce ekipmanda pek çok modifikasyon yapabilecekleri gibi, aynı zamanda kısa süre içerisinde en düşük maliyetle ekipmanı tasarlayabilirler [50]. Cortella ve ark. [51] soğutucu kabinlerde HAD simulasyonlarını kullanarak hız ve sıcaklık dağılımlarını analiz etmişlerdir. Tahmin edilen sıcaklık değeri (6.54°C), ölçülen ortalama sıcaklık değerinden (6.3°C) çok da farklılık göstermemiştir, bu nedenle nedeysel ve teorik veri arasında uyum söz konusudur [51]. Tassou ve Xiang [52] nemli hava kullanılarak soğutulan bir sebze deposundaki ortam için bir model geliştirmişlerdir. Depoda pancarların soğutulması işleminde 15 saat sonra ölçülen ve tahmin edilen sıcaklık değerleri arasındaki farkın 0.5°C olduğu tespit edilmiştir.

SONUÇ

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) uygulamaları gıda endüstrisinin hemen hemen her kolunda gittikçe yaygınlaşmaktadır. Bu teknoloji gıda işleme ekipmanlarının tasarımında kullanılabileceği gibi gıda proseslerinde (kurutma, sterilizasyon vs.) de rahatlıkla uygulanabilmektedir. Her ne kadar HAD yazılımları pahalı olsa da ya da üç boyutlu problemlerin çözüm aşamalarında bilgisayar kaynaklı sıkıntılarla karşılaşılsa da gıda işleme endüstrisinde bu teknolojinin uygulama alanlarının gün geçtikçe artacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Parviz, M., John, K., 1997. Tackling turbulence with supercomputers. *Scientific American* 1: 276.

[2] Schaldach, G., Berger, L., Razilov, I., Berndt, H., 2000. Computer simulation for fundamental studies and optimisation of ICP spray chambers. ISAS (Institute of Spectrochemistry and Applied Spectroscopy) Current Research Reports, Berlin, Germany.

[3] Mills, D., 1998–1999. Development and validation of a preliminary model for optimisation of baking ovens. The Food and Packaging Cooperative Research Centre Annual Report, Australia.

[4] Cortella, G., Manzan, M., Comini, G., 1998. Computation of air velocity and temperature distributions in open display cabinets. In: Advanced in the Refrigeration Systems, Food Technologies and Cold Chain. International Institute of Refrigeration, Paris, France, pp. 617–625.

[5] Sahu, A.K., Kumar, P., Patwardhan, A.W., Joshi, J.B., 1999. CFD modelling and mixing in stirred tanks. *Chemical Engineering Science* 54(13–14): 2285–2293.

[6] Kieviet, F.G., Van, R.J., De Moor, P.P.E.A., Kerkhof, P.J.A.M., 1997. Measurement and modelling of the air flow pattern in a pilot-plant spray dryer. *Chemical Engineering Research and Design* 75(A3): 321–328.

[7] Kumar, A., 1995. Numerical investigation of secondary flows in helical heat exchangers. Institute of Food Technologists Annual Meeting. Anaheim, CA, USA. pp. 148.

[8] Xia, B., Sun, D-W., 2002. Applications of Computational Fluid Dynamics (CFD) in the food industry: a review. *Computers and Electronics in Agriculture* 34: 5-24.

[9] Bakker, A., Ahmad, H.H., Lanre, M.O., 2001. Realize greater benefits from CFD. Fluid/Solids Handling March, pp. 45–53.

[10] Wanot, J., 1996. Computational fluid dynamics methods in ship design. R&D projects, Germany.

[11] Süfer, Ö., 2012. Gıda Mühendisliğinde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics) Uygulamaları. Yüksek Lisans Semineri. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir.

[12] Sun, D.-W., 2007. Computational Fluid Dynamics (CFD) in Food Processing. CRC Press, Taylor & Francis Group, 776p.

[13] Foster, A.M., Madge, M., Evans, J.A., 2005. The use of CFD to improve the performance of a chilled multi-deck retail display cabinet. *International Journal of Refrigeration* 28: 698-705.

[14] D'Agaro, P., Cortella, G., Croce, G., 2006. Two- and three dimensional CFD applied to vertical display cabinets simulation. *International Journal of Refrigeration* 29: 178-190.

[15] Norton, T., Sun, D.-W., 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: 600-620.
[16] Fernandes, C.S, Dias, R.P., Nobrega, J.M., Afonso, I.M., Melo, L.F., Maia, J.M., 2006. Thermal behaviour of stirred yoghurt during cooling in plate heat exchangers. *Journal of Food Engineering* 76: 433-439.
[17] Wang, L., Sun, D.-W., 2003. Recent developments in numerical modeling of heating and cooling processes in the food industry—a review. *Trends in Food Science and Technology* 14: 408–423.
[18] Friedrich, R., Huttl, T.J., Manhart, M., Wagner, C., 2001. Direct numerical simulation of incompressible turbulent flows. *Computers and Fluids* 30: 555-579.
[19] Hoang, M.L., Verboven, P., De Baerdemaeker, J., Nicolai, B.M., 2000. Analysis of the air flow in a cold store by means of computational fluid dynamics: Analyse du de´bit d'air dans un entrepoˆ t frigorifique a` l'aide de la dynamique des fluides informatise´e. *International Journal of Refrigeration* 23: 127–140.
[20] Verboven P., Hoang, M.L., Baelmans, M., Nicolai, B.M., 2004. Airflow through beds of apples and chicory roots. *Biosystems Engineering* 88: 117–125.
[21] Liu S., Hrymak, A.N., Wood, P.E., 2006. Laminar mixing of shear thinning fluids in a SMX static mixer. *Chemical Engineering Science* 61: 1753–1759.
[22] Foster, A.M., Barrett, R., James, S.J., Swain, M.J., 2002. Measurement and prediction of air movement through doorways in refrigerated rooms. *International Journal of Refrigeration* 25: 1102–1109.
[23] Aubin, J., Fletcher, D.F., Xuereb, C., 2004. Modeling turbulent flow in stirred tanks with CFD: the influence of the modeling approach, turbulence model and numerical scheme. *Experimental Thermal and Fluid Science* 28: 431–445.
[24] Wong S., Zhou, Y.W., Hua, J., 2007. CFD modeling of an industrial continuous bread-baking process involving U-movement. *Journal of Food Engineering* 78(3): 888–896.
[25] Gosman A.G., 1998. Developments in industrial computational fluid dynamics. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers* 76: 153–160.
[26] Verboven, P., Datta, A.K., Anh, N.T., Scheerlinck, N., Nicolai, B., 2003. Computation of airflow effects on heat and mass transfer in a microwave oven. *Journal of Food Engineering* 59: 181–190.
[27] Richardson L.F., 1910. The approximate arithmetical solution by finite differences of physical problems involving differential equations, with an application to the stresses in a masonry dam. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A 210: 307–357.
[28] Roache P.J., 1998. Verification and Validation in Computational Science and Engineering. Albuquerque, New Mexico: Hermosa.
[29] Sorensen D.N., Nielsen, P.V., 2003. Quality control of computational fluid dynamics in indoor environments. *Indoor Air* 13: 2–17.
[30] Slater, J.W., 2006. Examining spatial (grid) convergence. Public tutorial on CFD verification and validation, NASA Glenn Research Centre, MS 86 and 21000 Brookpark Road, Cleveland, Ohio, 44135.
[31] Oakley, D.E., 1994. Scale-up of spray dryers with the aid of computational fluid dynamics. *Drying Technology* 12(1-2): 217–233.
[32] Mathioulakis, E., Karathanos, V.T., Belessiotis, V.G., 1998. Simulation of air movement in a dryer by computational fluid dynamics: application for the drying of fruits. *Journal of Food Engineering* 36(2): 183–200.
[33] Mirade, P.S., Daudin, J.D., 2000. A numerical study of the airflow patterns in a sausage dryer. *Drying Technology* 18(1–2): 81–97.
[34] Langrish, T.A.G., Fletcher, D.F., 2001. Spray drying of food ingredients and applications of CFD in spray drying. *Chemical Engineering and Processing* 40(4): 345–354.
[35] Kieviet, F.G., Van, R.J., de Moor, P.P.E.A., Kerkhof, P.J.A.M., 1997. Measurement and modelling of the air flow pattern in a pilot-plant spray dryer. *Chemical Engineering Research and Design* 75 (A3): 321–328.
[36] Langrish, T.A.G., Zbicinski, I., 1994. Effects of air inlet geometry and spray cone angle on the wall deposition rate in spray dryers. *Chemical Engineering Research and Design* 72(A3): 420–430.
[37] Datta, A.K., Teixeira, A.A., 1987. Numerical modelling of natural convection heating in canned liquid foods. *Transactions of the ASAE* 30(5): 1542–1551.
[38] Akterian, S.G., Fikiin, K.A., 1994. Numerical simulation of unsteady heat conduction in arbitrary shaped canned foods during sterilisation processes. *Journal of Food Engineering* 21(3): 343–354.
[39] Abdul Ghania, A.G., Farid, M.M., Chen, X.D., Richards, P., 1999a. Numerical simulation of natural convection heating of canned food by computational fluid dynamics. *Journal of Food Engineering* 41(1): 55–64.
[40] Abdul Ghania, A.G., Farid, M.M., Chen, X.D., Richards, P., 1999b. An investigation of deactivation of bacteria in a canned liquid food during sterilisation using computational fluid dynamics (CFD). *Journal of Food Engineering* 42(4): 207–214.
[41] Abdul Ghania, A.G., Farid, M.M., Chen, X.D., Richards, P., 2001. Thermal sterilisation of canned food in a 3-D pouch using computational fluid dynamics. *Journal of Food Engineering* 48(2): 147–156.
[42] Delaplace, G., Torrez, C., Andre, C., Leuliet, J.C., Fillaudeau, L., 2000. CFD simulation of foodstuff flows in an agitated vessel. In: Proceedings of the 1st International Conference on Simulation in Food and Bio-industries. Society of Computer Simulation International, The Netherlands, 179–186.
[43] Sahu, A.K., Kumar, P., Patwardhan, A.W., Joshi, J.B., 1999. CFD modelling and mixing in stirred tanks. *Chemical Engineering Science* 54: 2285–2293.
[44] Rousseaux, J.M., Vial, C., Muhr, H., Plasari, E., 2001. CFD simulation of precipitation in the sliding-

surface mixing device. *Chemical Engineering Science* 56(4): 1677–1685.
[45] Ranade, V.V., Tayalia, Y., 2001. Modelling of fluid dynamics and mixing in shallow bubble column reactors: influence of sparger design. *Chemical Engineering Science* 56(4): 1667–1675.
[46] Hu, Z., Sun, D.-W., 2000. CFD simulation of heat and moisture transfer for predicting cooling rate and weight loss of cooked ham during air-blast chilling process. *Journal of Food Engineering* 46(3): 189–197.
[47] Hu, Z., Sun, Da-Wen, 2001. Effect of fluctuation in inlet airflow temperature on CFD simulation of air-blast chilling process. *Journal of Food Engineering* 48(4): 311–316.
[48] Mirade, P.S., Daudin, J.D., 1995. Two-dimensional simulation of the airflow in two industrial meat chillers. *International Journal of Refrigeration* 18(6): 403–412.
[49] Moureh, J., Derens, E., 2000. Numerical modelling of the temperature increase in frozen food packaged in pallets in the distribution chain. *International Journal of Refrigeration* 23(7): 540–552.
[50] Foster, A., James, S.J., 1996. Using CFD in the design of food cooking, cooling and display plant equipment. Paper presented in Second European Symposium on Sous Vide, Belgium.
[51] Cortella, G., Manzan, M., Comini, G., 2001. CFD simulation of refrigerated display cabinets. *International Journal of Refrigeration* 24(3): 250–260.
[52] Tassou, S.A., Xiang, W., 1998. Modelling the environment within a wet air-cooled vegetable store. *Journal of Food Engineering* 38: 169–187.