

Kek ve Diğer Unlu Mamüllerin Fırında Pişirilmesi Sırasında Isı ve Kütle Transferinin Modellenmesi ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) Uygulaması

Özge Süfer¹, Seher Kumcuoğlu², Şebnem Tavman²

¹Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Karacaoğlan Yerleşkesi, Osmaniye

²Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Bornova, İzmir

Geliş Tarihi (Received): 16.11.2014, Kabul Tarihi (Accepted): 28.05.2015

✉ Yazışmalardan Sorumlu Yazar (Corresponding author): ozgesufer@osmaniye.edu.tr (Ö.Süfer)

☎ 0 328 827 10 00 / 3609 📠 0 328 825 00 97

ÖZ

Unlu mamüller endüstrisinin popüler bir üyesi olan kekin üretimi, belirli oranlarda un, şeker, yağ, süt ve yumurtanın karıştırılması ve oluşan bu hamur karışımının fırında pişirilmesi esasına dayanır. Fırında pişirme, unlu mamüller sektöründe oldukça sık kullanılan bir ısıl işlemdir. Bu prosesin, gerek ısı gerekse de kütle transferi yönünden matematiksel olarak modellenmesi, fırın tasarımı, enerji verimliliği, optimizasyon ve ürün kalitesi açısından önem taşımaktadır. Bu çalışmada, başta kek olmak üzere ekmek ve bisküvi gibi ürünlerin fırında pişirilmesi sırasında ısı ve kütle transferini inceleyen ve modelleyen araştırmalar ile matematiksel modelleme çalışmalarında kullanılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) uygulamalar derlenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kek, Unlu mamüller, Modelleme, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, Isı transferi

Modeling Heat and Mass Transfer in Cakes and Other Bakery Products during Baking and Computational Fluid Dynamics (CFD) Applications

ABSTRACT

The production of cake, a popular member of bakery industry, includes steps of mixing flour, sugar, fat, milk and egg at certain amounts and then baking this batter in a convectional oven. Baking process is a thermal process often used in bakery industry. Mathematical modeling of this process from the point of both heat and mass transfer is especially important for oven design, energy performance, optimization and product quality. In this paper, studies on heat and mass transfers and their modeling during cake baking in breads and biscuits and computational fluid dynamics (CFD) applications used in mathematical modeling are reviewed.

Keywords: Cake, Bakery products, Modeling, Computational fluid dynamics, Heat and mass transfer

GİRİŞ

Bir unlu mamül olan kek, belirli miktarlarda un, yumurta, yağ, şeker ve kabartıcı ajanın çırpılarak karıştırılması ile hazırlanan hamurun, yüksek sıcaklıktaki fırında pişirilmesi ile elde edilen süngerimsi ve yumuşak bir gıdadır [1]. Kek hamurunda fırında pişirme sırasında pek çok değişiklik meydana gelmektedir. Yüksek sıcaklıktaki

fırına giren hamur, yüzeyine aktarılan ısıdan dolayı nem kaybeder. Hamurun içindeki nem ise yüzeye doğru hareket eder. Hareketlenen su molekülleri, hamurun iç kısmındaki sıcaklık arttıkça sıvı halden buhar haline geçer. Hamurun karıştırılması sırasında yapıya giren hava kabarcıklarına, kabartma ajanının etkisiyle oluşan CO₂ ve su buharı dolar, kabarcıktaki iç basınç artış gösterir ve böylelikle ürünün hacminde ve

gözenekliliğinde artış görülür [2, 3]. Hamurun sıcaklığı 55°C civarındayken yapısındaki nişasta su alıp, şişer. Sıcaklık yaklaşık 70°C'ye ulaştığında, nişasta jelatinizasyonu görülür. 80°C dolaylarında ise proteinlerin koagülasyonu başlar. Üst yüzeyde oluşan kabuk, gaz çıkışı için engel teşkil ettiğinden, hacim bu noktada sabitlenir ama kekten nem kaybı devam eder. Kekin yüzeylerinde, şekerlerin karamelizasyonu ve Maillard reaksiyonlarından ötürü esmerleşme görülür [3, 4].

Matematiksel modelleme, fırında pişirme prosesine matematiksel bir tanım getirmekte ve ayrıca ürünle fırın çevresi arasındaki etkileşimleri ve pişen ürünlerdeki değişiklikleri ortaya koymaktadır. Fırında pişirme prosesi çoğu zaman eş zamanlı ısı ve kütle transferi olarak incelenir ve modellenir [5, 6].

Bir ısı işlem modelinde; proses sırasındaki fiziksel, kimyasal ve biyolojik değişiklikler tanımlanmalı, uygun varsayımlarla prosesin matematiksel temeli geliştirilmeli, gerekli matematiksel bilgi ile problem çözümlenmeli ve de pek çok proses koşulu için model doğrulanmalıdır [7].

Sistem ve proseslerin matematiksel modellemesinde kullanılan yöntemlerden biri olan hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), bilgisayar temelli simülasyonlar sayesinde ısı transferi, akışkan akışı, 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 yoğunlukla deneysel veriler kullanılır. Gıda mühendisleri tarafından HAD teknolojisinin benimsenmesi, 1990'lı yıllarda ucuzlayan ve bir o kadar da gelişen bilgisayarlar ile HAD yazılımındaki ilerlemeler sonucu başlamıştır. Bugün, hem tüketiciler hem de çevre için bilinen yararlarından ötürü HAD uygulamaları, gıda endüstrisinde sistem tasarımında vazgeçilmez hale gelmiştir. Halihazırda, gıda maddelerinin ambalajlanması, soğukta depolanması, dondurulması, fırında pişirilmesi, sterilizasyon, kurutma gibi pek çok prosede ve ısı değiştirici, karıştırıcı kazan gibi sistemlerin tasarım ve analizinde hesaplamalı akışkanlar dinamiği teknolojilerinden yararlanılmaktadır [8-10].

FIRINDA PIŞİRME SIRASINDA ISI TRANSFERİ

Ürün olarak kek, çok sayıda bileşen ile yapılır ve bu bileşenlerin fonksiyonları ve kullanılan teknoloji kaliteli kek üretimini gerçekleştirmede büyük rol oynar [11]. Kaliteli bir kek yapımında etkili olan 3 esas faktör; kullanılan malzemelerin kek cinsi için uygunluğu, kek formülasyonundaki bileşenlerin oranı ve karıştırma ve pişirme işlemlerinde izlenen metot olarak sıralanabilir [12, 13]. Kullanılan yöntemle bağlı olarak, kek içerisindeki sıcaklık dağılımı ve kekin nem içeriği de kek kalitesinde önem teşkil etmekte, bu nedenle, kekin sıcaklık dağılımı ve nem içeriği, ısı (ısı transfer katsayısı ve ısı difüzyon katsayısı) transferi parametrelerinin belirlenmesiyle kontrol edilmelidir [1, 3, 14, 15].

Isı transfer katsayısı (h) değerindeki değişimlerin ortaya çıkarılması, fırında pişirme prosesinin modelleme ve optimizasyon çalışmalarında önemlidir. Ayrıca, fırının ısınan yüzeylerindeki ve içerisindeki sıcaklık dağılımı, fırın tasarımcıları için pişirme prosesinin ve fırının performansının değerlendirilmesinde yararlı olacaktır [14]. Tünel tipi endüstriyel bir fırında iki farklı kek örneğinin pişirilmesinde etkin olan ısı transfer katsayılarının araştırıldığı bir çalışmada, 186-225°C arasındaki pişirme sıcaklıklarında, 0.02-0.437 m/s arasındaki hava hızlarında ve 0.0267-0.0428 kg H₂O/kg kuru hava arasındaki bağıl nem değerlerinde ısı transfer katsayıları 20 - 48 W/m²K aralığında değişen değerler olarak hesaplanmış ve basit bir regresyon modeli oluşturulmuştur [16]. Aynı araştırmacıların bir diğer çalışmasında ise, kap kekin pişirilmesi sırasında kekin ısı özelliklerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Piknometrik/geometrik kesme yöntemiyle yoğunluğun 236-803 kg/m³, diferansiyel tarama kalorimetresi ile özgül ısının 2516-2658 J/kgK ve ısı kaynağı probu (line heat source probe) yardımıyla ısı iletkenliğinin 0.1064-0.2064 W/mK aralığında değiştiği belirlenmiştir [17].

Sakin ve ark. [18], geleneksel bir fırında kap kek pişirme prosesini, eş zamanlı ısı ve kütle transferi açısından deneysel ve nümerik yöntemlerle incelemişlerdir. Modelin nümerik çözümü prosesi simule etmiş, pişen kek içerisindeki sıcaklık ve nem profilleri hacim artışı da dikkate alınarak, çıktı olarak kabul edilmiştir. Nümerik modelin sonuçları, sabit ısı özellikleri içeren yalnız ısı ya da yalnız kütle transferinin söz konusu olduğu analitik model ile karşılaştırılmıştır. İki model arasında yüksek bir uyumluluk olduğu belirtilmiştir.

Lastie ve ark. [19, 20] fırında kek pişirme prosesi için 2 evre tanımlamıştır; "ısınma" ve "kabuk-iç oluşumu". Isınma evresinde, iç kısımdan yüzeye nem difüzyonu ve yüzeyden iç kısma ısı iletimi olduğu, yüzeyde ise buharlaşma ve yoğunlaşma gözlemlendiği belirtilmiştir. 2. evrede ise, kabuktan geçen ısının iç kısımlara iletimle transfer edildiği ve su buharının yüzeyden taşınım ile ayrıldığı irdelenmiştir. 1. evre için tek boyutlu ısı ve kütle transfer modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen modelin deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu belirtilmiştir. Lastie ve ark. [21], "kabuk-iç oluşumu" evresinde kekin iç yapısını akışkan, kabuğunu ise gözenekli olarak tanımlamışlardır. İç yapıdaki ve kabuk bölgesindeki sıcaklık profilleri ve kekin toplam kalınlığı modelin çözümü ile belirlenebilmiştir.

Putranto ve ark. [22] tarafından, fırında kek pişirme işleminin modellenmesi "Lumped reaksiyon mühendisliği yaklaşımı (L-REA)" kullanılarak yapılmıştır. Fırının pişirme sıcaklığı ve onu karşılayan nem içeriğine göre denge aktivasyon enerjisi ölçülmüş, daha sonra bu değer bağıl aktivasyon enerjisi ile kombine edilmiştir. Modelleme sonuçları, L-REA yaklaşımının nem içeriği ve sıcaklık profillerini çok iyi bir biçimde tanımlayabileceğini göstermiştir. Li ve Walker [23], geleneksel fırından farklı olarak, mikrodalga fırın ve hava üfleme gibi diğer bazı fırın tiplerinde de kek pişirme konusunda çalışmışlar, ürün yapısı, hacim artışı ve kabuk rengi bakımından fırınları kıyaslamışlardır.

Araştırmada, ısı transfer hızları ve keklerin pişme süreleri tespit edilmiştir.

Literatürde unlu mamüllerde kek ile yapılan çalışmalar haricinde ekmek ve bisküvi ile yapılan çalışmalar da mevcuttur. Thorvaldsson ve Skjöldebrand [24], ekmeğin pişirilmesi sırasındaki ısı ve kütle transferini incelemişler, 225°C'de fırında pişirme işlemi sırasında ekmeğin nem ve sıcaklık değerlerini kaydetmişlerdir. Thorvaldsson ve Janestad [25], önceden pişirilmiş ekmek dilimlerinin kurutulması sırasında geçerli olacak eşzamanlı ısı ve kütle transfer modeli geliştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada, 210°C'deki kurutma boyunca ürünlerdeki nem ve sıcaklık profilleri kaydedilmiş, model ile deneysel veriler arasında yüksek bir uyumluluk gözlemlendiği belirtilmiştir. Zaroni ve ark. [26], ekmeğin pişirilmesi sırasında kabuk ve iç arasında yaklaşık 100°C'deki buharlaşmanın etkisiyle sıcaklık ve nem içeriğindeki değişimlerin tanımlandığı fenomenolojik bir model geliştirmişlerdir. Bu buharlaşmanın ürün içerisinde sağladığı avantajın, ekmekte "kabuk" ve "iç" şeklinde iki farklı bölge oluşturması olduğu, kabukta nemin çok düşük ve sıcaklığının fırın sıcaklığına çok yakın, fakat iç bölgede ise nemin sabit ve sıcaklığın 100°C'ye yakın olduğu bildirilmiştir. Purlis ve Salvadori [27], ekmek pişirme prosesi için bir matematik model geliştirmişlerdir. Pişirme sırasında elde edilen deneysel veriler (sıcaklık, nem içeriği, ağırlık kaybı, kabuk kalınlığı), proses sırasında gerçekleşen ısı ve kütle transferinin iyi bir şekilde anlaşılabilmesi için kullanılmıştır. Buharlaşma-yoğunlaşma mekanizmasının gözenekli matriksin hızlı ısınmasından sorumlu olduğu ifade edilmiştir. Purlis [28], ekmeğin pişirilmesi sırasındaki ısı ve kütle transferini tanımlayan, önceden geliştirmiş ve sağlamasını yapmış olduğu matematik modeli, nişasta jelatinizasyonu ve esmerleşmeyi tanımlayan kinetik modellerle birleştirmiştir. Modelin girdileri olarak fırın sıcaklığı, ısı transfer katsayısı ve ekmek çapı kabul edilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak toplamda 105 işlem koşulu simule edilmiştir.

Hussein ve Becker [29], ekmek pişirme işlemi için Boltzmann eşitliğini kullanarak mikro- ve makro- ölçekte ısı ve kütle transfer modelleri geliştirmişlerdir. Isı ve kütle transferi ile etkin nem difüzyon hızı, ısı difüzyon hızı ve ısı iletkenlik modelleri yapılmıştır. Hamur örneklerinin mikro yapısı, pişirmeden önce örneklerden elde edilen mikro bilgisayar tomografi resimleri sayesinde tayin edilmiştir. Sluimer ve Krist-Spit [30] buharlaşma-yoğunlaşma mekanizmasını, ekmeğin hamur ve iç kısmındaki ısı ve kütle transferi modeli ile birleştirirken, kabuk bölgesini buna dahil etmemişlerdir. Deneysel ve teorik olarak belirlenen merkez sıcaklıkları karşılaştırıldığında çok iyi sonuçlar elde ettiklerini belirtmişlerdir. Nicolas ve ark. [31] ekmeğin pişirilmesi sırasındaki termo-hidrolik davranışını incelemişlerdir. Geliştirdikleri model ısı ve kütle transferini içermesinin yanı sıra, kabarma olayını da kapsamaktadır. Bu model sayesinde Fransız baget ekmeğinde; sıcaklık, nem, gaz basıncı ve deformasyon tahmin edilebilmektedir.

Özilgen ve Heil [32], bisküvinin pişme sırasındaki kuruma davranışını 2 boyutlu, eşzamanlı ısı ve kütle transferi olarak modellemişlerdir. Deneysel sonuçlarla

model sonuçlarının uygunluk gösterdiği belirtilmiştir. Nitin ve Karwe [33] tarafından, hava üflemeli fırında bisküvi pişirme işlemi sırasında, çeşitli işlem değişkenlerinin ısı transfer katsayısı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Isı transfer katsayısı değerlerinin 100-225 W/m²K aralığında değiştiği ve hava hızının bir fonksiyonu olarak bulunduğu ifade edilmiştir. Ferrari ve ark. [34], sürekli olmayan bisküvi pişirme prosesini tanımlamak için eş zamanlı ısı ve kütle transfer modeli oluşturmuşlardır. Matematik model pişirme işlemi sırasında, kabuk ile iç arasındaki buharlaşma bölgesinin hareketini ve kabuğun oluşumunu kapsamaktadır. Problem iki boyutlu geometride sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Sıcaklık ve nem değerlerinin deneysel ve teorik verileri arasında yüksek oranda bir uyumun olduğu belirtilmiştir. Broyart ve Trystram [35] ise, endüstriyel ölçekte sürekli sistemde çalışan bir bisküvi fırınının fonksiyonlarını simule eden bir matematiksel model elde etmek için, tümevarım ve tümdengelim prensiplerini benimsemişlerdir. Çalışmanın ilk aşamasında [36], sürekli sistemde çalışan gazlı bir fırında ısı ve kütle transferini hesaplayabilmek için kararlı halde bir model geliştirilmiştir. Pişirme atmosferinin kompozisyonu ve sıcaklığı homojen olarak kabul edilmiştir. Model ısı transferinde suyun buharlaşmasını dikkate almasının yanı sıra, iletim, taşınım ve radyasyonla olan tüm etkileri de hesaba katmaktadır. Kütle denklıklarında ürünün kuruması ve de suyun uzaklaşması da göz önünde bulundurulmuştur. Çalışmanın ikinci aşamasında ise araştırmacılar tümdengelim modelleme yaklaşımı ile geliştirilen klasik ısı ve kütle transfer modeli ile, tümevarım yaklaşımı ile pişirme sırasında bisküvinin renk ve kalınlık kinetiğini modellemek için kullandıkları iki yapay sinir ağını kombine etmişlerdir. Fahloul ve ark. [37] tünel bir bisküvi fırında çok benzer bir çalışmaya imza atmışlar ve de elde ettikleri deneysel veriler ile model verilerin birbirine çok uyumlu olduğunu kaydetmişlerdir.

FIRINDA PIŞİRME PROSESİ İLE İLGİLİ HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD) ÇALIŞMALARI

Ucuz ve daha güçlü bilgisayarlar ve ticari yazılım paketlerinin üretimi ile HAD teknikleri, yıllardan beri gıda endüstrisinin pek çok alanında artan bir şekilde kullanılmaktadır [38, 39]. Bu teknikler, unlu mamüllerin fırında pişirilmesi prosesine ışık tutmak amacıyla örneğin; hava hızı değerlerini tahmin etmek, pişirme ortamı içerisindeki kompozisyon ve sıcaklık dağılımını belirlemek için [36, 40, 41, 42] uygulanabilmektedir. HAD, ısı transferi ile birlikte akışkan akışı problemlerini çözmek amacıyla bilgisayar ortamında mesh (ağ) kullanan ve her bir ağ hücresi için belirli algoritmalar gerektiren iteratif yöntemlere göre Navier-Stokes eşitliğini çözen nümerik tekniklerdir [43].

De Vries ve ark. [40], kesikli sistemde çalışan laboratuvar tipi fırın içerisindeki sıcaklığı, ısı akısını, hız dağılımını ve basınç düşüşünü, laminar akış özelliklerini varsayarak HAD modelinden hesaplamışlardır. Verboven, Scheerlinck, De Baerdemaeker ve Nicolai [44, 45], bir metreküpten daha düşük hacimli endüstriyel elektrikli zorlamalı konveksiyonlu bir fırında hava hızı ve

sıcaklık dağılımını üç boyutlu türbulans HAD hesaplamalarıyla belirlemiştir. Nümerik grid (örgü) yoğunluğu ve türbulans modellemedeki kısıtlamalardan ötürü, HAD hesaplamalarındaki hata payı sıcaklık için 4.6°C, hız için ise %22 olmuştur. Therdtai ve ark. [42], 16.5 m uzunluğa, 3.65 m genişliğe ve 3.75 m yüksekliğe sahip endüstriyel sürekli ekmek fırınında sıcaklık profili ve hava akış özelliklerini iki boyutlu olarak simule etmişlerdir. HAD sonuçları, optimum pişirme sıcaklığı profili ve denetleyici sensörlerin en iyi hangi konuma konulması gerektiği hakkında yapıcı bilgiler sağlamıştır. Bu çalışma daha sonra üç boyutlu dinamik modele genişletilmiştir [46]. Üç boyutlu model hareket eden her bir tepsi için farklı sıcaklık profillerini tanımlayabilmektedir. Buna rağmen, kullanılan yazılımdan kaynaklanan sınırlamalardan ötürü fırın yapılandırılması basitleştirilmek zorunda kalmış, özellikle fırın içerisindeki tepsilerin yaptığı U-dönüşü hareketleri ihmal edilmiştir. Bilgisayarın kapasitesinden kaynaklanan sınırlamalardan ötürü yapılan varsayım ve basitleştirmeleri ortadan kaldırmak amacıyla Wong ve ark. [47], tepsideki ekmeğin yaptığı U-dönüşü hareketini, çözüm kümesini iki kısma ayırarak başarı ile simule etmiştir. Boulet ve ark. [48], pilot ölçekli bir fırında HAD yazılımını kullanarak modelleme yapmışlardır. Tüm ısı transfer mekanizmaları dikkate alınmış ve türbulans akış ile ilişkilendirilmiştir. Türbulans için k-ε model, radyasyon için ise yüzey yüzeye (YY) modeli kullanılmıştır. HAD modeli, fırın için düşük giriş hava hızında radyasyonun en etkili ısı transfer mekanizması olduğunu göstermiştir. Chhanwal ve ark. [49], ayırık ordinat (AO), yüzey yüzeye (YY) ve ayırık transfer radyasyon model (ATRM) isimli üç farklı radyasyon modelini elektrikli fırın için karşılaştırmışlar ve ayrıca ekmeğin pişmesi sırasındaki sıcaklık ve nişasta jelatinizasyon profilini de çalışmışlardır. Anishaparin ve ark. [50], ekmeğin pişirme prosesi için sıcak hava dağılımının etkisini ve ekmeğin nişasta jelatinizasyon indeksindeki yerini belirlemek amacıyla bir HAD modeli geliştirmişlerdir. Bu çalışma, ekmeğin indeksteki yerleşiminin son ürün kalitesini etkilediğini göstermiştir.

Ekmek pişirme prosesi üzerine yapılan HAD çalışmalarının çoğu, pişme sırasındaki buharlaşma-yoğunlaşma mekanizması ile su evaporasyonu nedeniyle oluşan faz değişimini dikkate almamaktadır. Bu HAD modelleri, deneysel veriler ile kıyaslandığında ekmek kabuğu için oldukça yüksek sıcaklık değerleri tahmin etmektedir. Kabuk sıcaklığı pişme süresini belirler. Bu nedenle, ekmeğin kalitesi ve enerji tüketimi pişme süresine bağlıdır ve ekmek için yapılan en yakın sıcaklık tahminleri bu prosenin HAD modellenmesinde büyük önem arz etmektedir [51].

HAD hesaplamalarında yer alan k-ε model gibi türbulans modellerin gerçek değerlere kabataslak bir biçimde yaklaşıkları kanıtlanmıştır. Pek çok araştırmacı ısı transferi hesaplamaları için bu tip modellerin performansını değerlendirmek amacıyla bir dizi çalışma yapmaktadır. Çoğu durumda, bu yarı-empirik modeller ısıtma ortamından gıdaya taşınım ile olan ısı transferini tanımlayan ürün yüzeyi yakınındaki davranışı doğru bir şekilde tahmin etmekte yetersiz kalmaktadır [44, 52, 53]. Bu çalışmaların çoğu basitleştirilmiş bir geometri ve

homojen hava akışının olduğu durumlar için gerçekleştirilmiştir. Zorlamalı konveksiyonlu fırının HAD modelinin söz konusu olduğu durumlarda, türbulansın seviyesi, geometrinin karmaşıklığı ve sayısal grid (örgü) düzenlenmesindeki kısıtlamalardan ötürü problem daha fazla zorlaşacaktır. Buna rağmen k-ε modelleri hala popülerliğini korumaktadır, çünkü hesaplama zamanlarına göre oldukça ucuzdur ve kullanıcı dostu kodlara sahiptir [54].

Literatürde unlu mamüllerin fırında pişirilmesini konu eden HAD çalışmalarının çok büyük bir çoğunluğunun ekmek çevresinde yoğunlaştığı görülmektedir. Kek ile ilgili hesaplamalı akışkanlar dinamiği kapsamında yapılan herhangi bir uluslararası çalışmaya rastlanılmamıştır. Süfer [1], hava üfleme geleneksel bir fırında yaptığı çalışmada, tepsi keki pişirme prosesini HAD yazılımlarından birisi olan Fluent programı ile 3 farklı sıcaklık değeri için modellemiştir. Kek hamurunun ve pişmiş kekin yoğunluğu, merkez noktasındaki yüksekliğin fonksiyonu olarak kabul edildiğinden, kekin pişme öncesindeki, son ürün yüksekliğinin yarısındaki ve pişme sonrasındaki yoğunlukları model çözümü için esas alınmıştır. Modelleme çalışmasının yanında, kekin farklı sıcaklıklardaki pişirme işlemleri sırasındaki sıcaklık profilleri belirlenmiş ve fiziksel, kimyasal ve duyuusal analizleri yapılmıştır.

SONUÇ

Bu çalışmada başlıca kek olmak üzere unlu mamüller endüstrisinin vazgeçilmez ürünleri olan ekmek ve bisküvi ile ilgili yapılan ve ısı transferinin modellenmesini konu edinen çalışmalar incelenmiştir. Unlu mamüller küçük büyük herkesin günün her anında gerek atıştırılmalı, gerekse de karın doyurma maksatlı tükettiği gıdalardır. Bu nedenle, bu ürünler özellikle Türk toplumunda büyük öneme sahiptir. Unlu mamüllerin fırında pişirilmesi sırasındaki ısı transferinin modellenmesinin en büyük yararlarından biri, kişileri modelleme sırasında sistem veya işlemi tam olarak anlamaya zorlamasıdır. Bunun sonucunda da çok değerli fikirler ve yorumlar geliştirilebilmektedir. Matematiksel modelleme gıda sanayiinde büyük bir uygulama potansiyeline sahiptir. Bu durumun aktif hale geçirilmesi ile birlikte, tasarım ve üretim aşamasında önemli ekonomik kazançlar ortaya çıkabilecektir [54].

KAYNAKLAR

- [1] Süfer, Ö., 2012. Bazı Gıda Maddelerinin Pişirilmesinde Sıcaklık Dağılımının Nümerik ve Deneysel Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bornova, İzmir.
- [2] Manley, D., 1996. Technology of Biscuits, Crackers and Cookies. 2nd Edition, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 476p.
- [3] Sakin, M., 2005. Fırında Kek Pişirme İşleminin Eşzamanlı Isı ve Kütle Transferi Olarak Modellenmesi. Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bornova, İzmir.

- [4] Benninon, E.B. and Bamford, G.S.T., 1973. The Technology of Cake Making, 5th Edition, Int. Textbook Comp. Lmt.
- [5] Thorvaldsson, K., Janestad, H., 1999. A model for simultaneous heat, water and vapor diffusion. *Journal of Food Engineering* 40: 167-172.
- [6] Zaroni, B., Peri, C., Pierucci, S., 1994. A study of the bread baking process II: Mathematical modeling. *Journal of Food Engineering* 23: 321-336.
- [7] Erdođdu, F., 2011. Mathematical modeling approaches for thermal processing conditions. Novel Approaches in Food Industry, NAFl 2011, May 26-29, 2011, Çeşme, İzmir, Turkey, Book of Proceedings 238p.
- [8] Çengel, Y., Turner, R.H., 2005. Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences, 2nd Edition, McGraw-Hill Companies, Inc., New York, 1206p.
- [9] Sun, D.-W., 2007. Computational Fluid Dynamics (CFD) in Food Processing. CRC Press, Taylor & Francis Group, 776p.
- [10] Süfer, Ö., Kumcuoğlu S., 2012. Gıda Mühendisliğinde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics) Uygulamaları. Türkiye 11. Gıda Kongresi, 10-12 Ekim 2012, Mustafa Kemal Üniversitesi, Hatay, Bildiri Kitabı Sayfa 273.
- [11] Dizlek, H., 2001. Kremalı kek (yaş pasta) yapımı. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Semineri, Adana, Türkiye.
- [12] Pyler, E.J., 1988. Baking Science and Technology. Sosland Publishing Company, U.S.A., 1345p.
- [13] Dizlek, H., Altan, A., 2013. Pişirme öncesinde hamurun kısa süre bekletilmesinin pandispanya nitelikleri üzerine etkisi. *Gıda*, 38 (1): 31-38.
- [14] Demirkol, E., Erdođdu, F., Palazođlu, T.K., 2006. A numerical approach with variable temperature boundary conditions to determine the effective heat transfer coefficient values during baking of cookies. *Journal of Food Process Engineering* 29: 478-497.
- [15] Carson, J.K., Willix, J., North, M.F., 2006. Measurements of heat transfer coefficients within convection ovens. *Journal of Food Engineering* 72(3): 293-301.
- [16] Baik, O.-D., Sablani, S.S., Marcotte, M., Castaigne, F., 1999. Heat Transfer Coefficients on Cakes Baked in a Tunnel Type Industrial Oven. *Journal of Food Science* 64(4): 688-694.
- [17] Baik, O.-D., Sablani, S.S., Marcotte, M., Castaigne, F., 1999. Modeling the thermal properties of a cup cake during baking. *Journal of Food Science* 64(2): 295-299.
- [18] Sakin, M., Kaymak-Ertekin, F., Ilıcalı, C., 2007. Simultaneous heat and mass transfer simulation applied to convective oven cup cake baking. *Journal of Food Engineering* 83(3): 463-474.
- [19] Lostie, M., Peczalski, R., Andrieu, J., Laurent, M., 2002a. Study of sponge cake batter baking process. Part I: Experimental data. *Journal of Food Engineering* 51: 131-137.
- [20] Lostie, M., Peczalski, R., Andrieu, J., Laurent, M., 2002b. Study of sponge cake batter baking process. II: Modeling and parameter estimation. *Journal of Food Engineering* 55(4): 349-357.
- [21] Lostie, M., Peczalski, R., Andrieu, J., 2004. Lumped model for sponge cake baking during the "crust and crumb" period. *Journal of Food Engineering* 65(2): 281-286.
- [22] Putranto, A., Chen, X.D., Zhou, W., 2011. Modeling of baking of thin layer of cake using the lumped reaction engineering approach (L-REA). *Journal of Food Engineering* 105: 306-311.
- [23] Li, A., Walker, C.E., 1996. Cake baking in conventional, impingement and hybrid ovens. *Journal of Food Science* 61(1): 188-191.
- [24] Thorvaldsson, K., Skjöldebrand, C., 1998. Water diffusion in bread during baking. *Lebensmittel Wiss. u. Technol.* 31: 658-663.
- [25] Thorvaldsson, K., Janestad, H., 1999. A model for simultaneous heat, water and vapor diffusion. *Journal of Food Engineering* 40: 167-172.
- [26] Zaroni, B., Peri, C., Pierucci, S., 1993. A study of the bread baking process I: A phenomenological model. *Journal of Food Engineering* 19: 389-398.
- [27] Purlis, E., Salvadori, V.O., 2009. Bread baking as a moving boundary problem. Part 1: Mathematical modelling. *Journal of Food Engineering* 91(3): 428-433.
- [28] Purlis, E. 2011. Bread baking: Technological considerations based on process modelling and simulation. *Journal of Food Engineering* 103: 92-102.
- [29] Hussein, M.A., Becker, T. 2010. An innovative micro-modelling of simultaneous heat and moisture transfer during bread baking using the Lattice Boltzmann Method. *Food Biophysics* 5: 161-176.
- [30] Sluimer, P., Krist-Spit C.E., 1987. Heat transport in dough during the baking of bread, ed. by I.D. Morton (Cereals in a European Context, New York, VCH), 355-363p.
- [31] Nicolas, V., Salagnac, P., Glouannec, P., Ploteau, J.-P., Jury, V., Boillereaux, L. 2012. Modelling heat and mass transfer in bread baking with mechanical deformation. 6th European Thermal Sciences Conference (Eurotherm 2012), *Journal of Physics: Conference Series* 395, 012146.
- [32] Özilgen, M., Heil, J.R., 1994. Mathematical modeling of transient heat and mass transport in a baking biscuit. *Journal of Food Processing and Preservation* 18: 133-148.
- [33] Nitin, N., Karwe, M.V., 2001. Heat transfer coefficient for cookie shaped objects in a hot air jet impingement oven. *Journal of Food Process Engineering* 24: 51-69.
- [34] Ferrari, E., Marai, S.V., Guidetti, R., Piazza, L. 2012. Modelling of heat and moisture transfer phenomena during dry biscuit baking by using finite element method. *International Journal of Food Engineering* 8(3): 29-35.
- [35] Broyart, B., Trystram, G. 2003. Modelling of Heat and Mass Transfer Phenomena and Quality Changes During Continuous Biscuit Baking Using Both Deductive and Inductive (Neural Network) Modeling Principles. Institution of Chemical Engineers, Trans IChemE, Vol 81, Part C.
- [36] Broyart, B., Trystram, G. 2002. Modelling heat and mass transfer during the continuous baking of biscuits. *Journal of Food Engineering*, 51(1): 47-57.

- [37] Fahloul, D., Trystram, G., Duquenoy, A., Barbotteau, I. 1994. Modelling Heat and Mass Transfer in Band Oven Biscuit Baking. *Food Science and Technology* 27(2): 119-124.
- [38] Scott, G., Richardson, P., 1997. The application of computational fluid dynamics in the food industry. *Trends in Food Science and Technology* 8(4): 119-124.
- [39] 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.
- [40] De Vries, U., Velthuis, H., Koster, K., 1995. Baking ovens and product quality – a computer model. *Food Science and Technology Today* 9: 232-234.
- [41] Noel, J.Y., Ovenden, N.A., Pochini, I., 1998. Prediction of flow and temperature distribution in a domestic forced convection electric oven. In Proceedings of ACoFoP IV, Goteborg, Sweden, September 21-23, 491-496pp.
- [42] Therdthai, N., Zhou, W., Adamczak, T., 2003. two-dimensional CFD modeling and simulation of an industrial continuous bread baking oven. *Journal of Food Engineering* 60(2): 211-217.
- [43] Versteeg, H.K., Malalasekera, W., 1995. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method, Harlow, England: Longman, 57-62,74 pp.
- [44] Verboven, P., Scheerlinck, N., De Baerdemaeker, J., Nicolai, B.M., 1997. Performance of different turbulence models for the calculation of the surface heat transfer coefficient. In Z. Mayer and P. Nesvadba, Proceedings of the conference / workshop on modelling of thermal properties and behaviour of foods during production, storage and distribution, Prague: Food Research Institute, 242-248 pp.
- [45] Verboven, P., Scheerlinck, N., De Baerdemaeker, J., Nicolai, B.M., 2000. Computational fluid dynamics modeling and validation of the temperature distribution in a forced convection oven. *Journal of Food Engineering* 43: 61-73.
- [46] Therdthai, N., Zhou, W., Adamczak, T., 2004. Three-dimensional CFD modeling and simulation of the temperature profiles and airflow patterns during a continuous industrial baking process. *Journal of Food Engineering* 65(4): 599-608.
- [47] Wong, S.-Y., Zhou, W., Hua, J., 2007b. CFD modeling of an industrial continuous bread baking process involving U-movement. *Journal of Food Engineering* 78(3): 888-896.
- [48] Boulet, M., Marcos, B., Dostie, M., Moresoli, C., 2010. CFD modeling of heat transfer and flow field in a bakery pilot oven. *Journal of Food Engineering* 97: 393-402.
- [49] Chhanwal, N., Anishaparvin, A., Indrani, D., Raghavarao, K.S.M.S., Anandharamakrishnan, C., 2010. Computational fluid dynamics (CFD) modeling of an electrical heating oven for bread baking process, *Journal of Food Engineering* 100: 452-460.
- [50] Anishaparvin, A., Channwal, N., Indrani, D., Raghavarao, K.S.M.S., Anandharamakrishnan, C., 2010. An investigation of bread baking process in a pilot-scale electrical heating oven using computational fluid dynamics. *Journal of Food Science* 75 (9): E605-E611.
- [51] Chhanwal, N., Indrani, D., Raghavarao, K.S.M.S., Anandharamakrishnan, C., 2011. Computational fluid dynamics (CFD) modeling of bread baking process. *Food Research International* 44: 978-983.
- [52] Launder, B.E., 1988. On the computation of convective heat transfer in complex turbulent flows. *Journal of Heat Transfer* 110: 1112-1128.
- [53] Hsieh, W.D., Chang, K.C., 1996. Calculation of wall heat transfer in pipe-expansion turbulent flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 39(18): 3813-3822.
- [54] Devres, Y.O., Pala, M., 1993. Gıda sanayiinde matematiksel modellemenin önemi ve uygulama alanları. *Gıda* 18(3): 173-181.
-