

مدل سازی دوبعدی انتقال حرارت فرایند سرخ کردن عمیق و ارزیابی آن در مدل غذایی سیب زمینی

آذر نقوی گرگری^۱، نارملا آصفی^{۲*}، لیلا روفه گری نژاد^۲

۱- دانشجوی دکتری گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران
۲- دانشیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران
تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۰۵*

چکیده

در پژوهش حاضر مدل سازی دو بعدی انتقال حرارت طی فرایند سرخ کردن عمیق بررسی شد. در مرحله اول سه سطح دمایی ۱۵۰، ۱۶۰ و ۱۷۰ درجه سلسیوس برای سرخ کردن انتخاب و با ترموکوپل نوع کا تعیین و ثبت شد. به منظور ثبت تغییرات دمای نمونه حین فرایند سرخ کردن، ترموکوپل سه کاناله تی در مرکز، سطح و بین این دو نقطه قرار گرفت. سپس دمای ترموکوپل ها با فاصله های زمانی ۱۰ ثانیه به وسیله دیتالاگر ثبت گردید. در مرحله بعد براساس نمودار زمان-دما در پنج بازه زمانی حین سرخ شدن، مقدار رطوبت و میزان روغن نمونه ها در هر سه دمای روغن اندازه گیری شد. با افزایش دمای روغن، کاهش مقدار روغن و میزان رطوبت سیب زمینی ها مشاهده گردید. سپس پارامتر انتقال حرارت شامل ضریب جابه جایی روغن در بازه ۴/۹۷-۸۳/۵۷۸ وات بر متر مربع کلین محاسبه و تعیین شد. نتایج بررسی ها نشان داد که ضریب انتقال حرارت جابه جایی در ماه های بالا به دلیل افزایش شدت خروج رطوبت و ایجاد توربولانسی در روغن بالاتر است و سرخ کردن عمیق به شدت توسط این ضریب کنترل می شود. از این رو ضریب جابه جایی به عنوان مهم ترین پارامتر در مدل سازی انتقال حرارت مطرح گردید و از آن در شبیه سازی با نرم افزار استفاده شد. هندسه برش سیب زمینی ها دیسکی بود. معادلات ریاضی انتقال حرارت به کمک قانون فوریه حل شد و نتایج به دست آمده از حل معادلات در مدل سازی توسط نرم افزار کامسول نسخه ۵،۳،۱ به کار گرفته شد و توزیع دما در سطح و داخل برش با این نرم افزار مدل سازی گردید. نهایتاً توزیع دمای به دست آمده نیز ارائه شد.

واژه های کلیدی

شبیه سازی، ضریب انتقال حرارت جابه جایی، نرم افزار کامسول

مقدمه

روش های مدل سازی است که می تواند برای هدف هایی متفاوت از جمله شناسایی سریع و کم هزینه اثر پارامترهای متفاوت بر فرآیند و خروجی های آن به کار رود. در این روش، از معادله های ریاضی برای توصیف فرایند استفاده می شود.

مدل های ریاضی مورد استفاده را می توان به دو گروه مکانیسمی و تجربی تقسیم کرد. در مدل های

مدل سازی یکی از علوم توسعه یافته دنیای امروز است که ابزاری پیشرفته برای تجزیه و تحلیل و درک دنیای اطراف محسوب می شود. نیاز به درک پدیده هایی که به طور طبیعی در مواد غذایی اتفاق می افتد پژوهشگران را به استفاده از مدل سازی رهنمون می سازد. مدل سازی ریاضی یکی از انواع

حل معادله‌های این مدل به روش تحلیلی با استفاده از جداسازی متغیرها از اولویت‌های پژوهشی محسوب می‌شود.

از فرایندهای متداول صنایع غذایی، سرخ کردن یکی از پیچیده‌ترین فرایندهای فراوری غذا به شمار می‌رود و دلیل آن وجود اثرهای متقابل است (Ghaderi *et al.*, 2018). در زمینه سرخ کردن، نوع عمیق آن به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. طراح فرایند باید علاوه بر بهبود کیفیت، کاهش و کنترل جذب روغن و تولید محصولات سالم‌تر را در نظر بگیرد (Wu *et al.*, 2013). برای ترکیب اصول انتقال اندازه حرکت (مومنتوم)، حرارت و جرم به منظور توصیف توزیع سرعت، دما، مقدار رطوبت و مقدار روغن در محصول در فرآیند سرخ کردن عمیق تلاش‌های زیادی شده است (Naghavi *et al.*, 2018).

مکانیسم حرکت رطوبت و روغن در نمونه حین فرایند سرخ کردن، با پدیده انتشار تابع قانون دوم فیک توصیف می‌شود. انتشار در یک جهت، تقریب خوبی برای اغلب سیستم‌هاست. از این رو انتشار گذرای (وابسته به زمان) رطوبت و روغن در سیستم‌های غذایی می‌تواند با قانون دوم فیک بیان شود (Crank, 1975). مکانیسم تغییر دما هم از قانون موازنه انرژی تبعیت می‌کند (Incropera *et al.*, 2006).

به دلیل اینکه غذاهای سرخ شده از عمده‌ترین مواد غذایی مورد استفاده است، توجه به بهبود کیفیت مواد غذایی سرخ شده با فرایند سرخ کردن عمیق و کاهش مخاطرات ناشی از مصرف روغن جذب شده، توسط طراحان امری لازم به نظر می‌رسد. این موضوع زمینه اصلی توجه پژوهشگران صنایع غذایی است و توسط محققان متعددی بررسی و مدل‌سازی شده است.

صفری و همکاران (Safari *et al.*, 2018) ضرایب انتقال جرم و حرارت را در حین سرخ کردن عمیق به

مکانیسمی باید معادله حاکم بر فرایند را با توجه به مکانیسم آن تعیین کرد. مدل‌های تجربی معمولاً مکانیسم فرآیند را توصیف نمی‌کنند. بنابراین نمی‌توانند دیدگاهی دقیق از فرآیند را ارائه دهند (Crank, 1975) و از این رو مدل‌سازی ریاضی مکانیسمی، اولویت دارد.

پس از تعیین معادله که معمولاً معادله‌های دیفرانسیلی جزئی یا پاره‌ای هستند، از دو روش تحلیلی و عددی می‌توان در حل معادله‌ها استفاده کرد. در روش تحلیلی که حل دقیق معادله‌هاست، به طور معمول حل معادله با انواع شرایط اولیه و مرزی صورت می‌گیرد که این شرایط برای شکل‌های مکعبی، استوانه‌ای و کره‌ای به‌طور جداگانه و با شرایط مرزی مختلف تعریف شده است (Incropera *et al.*, 2006).

روش‌های حل عددی، همان حل تقریبی معادله‌هاست. امروزه استفاده از روش‌های عددی، پیشرفت‌های قابل توجهی را در زمینه تعیین پروفیل‌های توزیع غلظت و ضرایب انتشار فراهم آورده است؛ این روش در زمینه بررسی انتقال حرارت، جرم و اندازه حرکت به خصوص به کمک نرم‌افزارها کاربرد زیادی دارد.

روش‌های عددی متداول شامل تفاضل محدود، اجزای محدود و حجم محدود است. از میان روش‌های حل عددی نیز روش المان محدود یکی از متداول‌ترین روش‌های حل معادله‌های دیفرانسیلی با مشتقات جزئی محسوب می‌شود که معادله‌های حاکم بر اکثر فرایندهای غذایی هستند (Kreyszig, 2009).

مدل‌سازی ریاضی فرایندهای غذایی، برای شناخت و درک پدیده‌های درگیر در فرآیند و پیش‌بینی آنها تحت شرایط متفاوت با هدف کنترل و بهینه‌سازی فرایندها از جمله روش‌های پرکاربرد است. از میان انواع مدل‌های ریاضی، مدل مکانیسمی رایج است و

کامسول نسخه ۵,۳,۱ شبیه‌سازی و نتایج به دست آمده نیز ارائه گردید.

مواد و روش کار

مواد

سیب‌زمینی واریته آگریا، به عنوان مدل غذایی، از بازار محلی خریداری شد. روغن مورد استفاده، روغن مایع سرخ‌کردنی بهار بود. برای اجرای آزمایش سرخ کردن، سیب‌زمینی‌ها پس از شستشو پوست‌گیری شد و توسط کاتر دستی به شکل دیسکی با قطر ۳۶ و ضخامت ۴ میلی‌متر برش داده شدند. دمای اولیه سیب‌زمینی‌ها ۲۰ درجه سلسیوس بود.

روش کار

مرحله اول: عملیات سرخ کردن در یک سرخ‌کن خانگی (برند فیلیپس) دنبال شد. فرایند سرخ کردن در سه سطح دمایی روغن شامل ۱۵۰، ۱۶۰ و ۱۷۰ درجه سلسیوس با قرار دادن ترموکوپل نوع کا در روغن و قرار دادن ترموکوپل سه کاناله تی در مرکز، سطح و بین این دونقطه از برش سیب‌زمینی تا رسیدن نمونه به رنگ دلخواه با ثبت دما در فواصل زمانی ۱۰ ثانیه پی‌گیری شد. داده‌های دمایی در سه نقطه از نمونه به‌وسیله دیتالاگر متصل به سرخ‌کن ثبت گردید.

مرحله دوم: به دلیل وجود اختلاف معنی‌دار بین دمای نقاط مختلف نمونه (مرکز، سطح و بین این دو نقطه)، برش سیب‌زمینی در سه دمای روغن مجدداً سرخ شد و در هر دمای روغن، پنج بازه زمانی نمونه‌برداری شد، سه بازه زمانی مربوط به بخش صعودی نمودار و دو بازه زمانی مربوط به زمانی که مقدار آب موجود به دمای جوش رسید و افزایش دما داخل ماده غذایی وجود نداشت و انرژی موجود در داخل ماده غذایی فقط صرف تبخیر آب می‌گردید. این

صورت مروری بررسی و روش‌های تعیین این ضرایب و عوامل مؤثر بر آنها را ارائه کردند. این محققان به این نتیجه رسیدند که سرخ کردن عمیق به شدت توسط ضرایب انتقال حرارت و جرم کنترل می‌شود و این ضرایب را مهم‌ترین پارامترها در مدل‌سازی عنوان کردند.

در مطالعه‌ای، فرآیند ناپیوسته سرخ کردن عمیق چیپس ترتیلا مدل‌سازی شد و پارامترهای دما، مقدار رطوبت و میزان جذب روغن به عنوان تابعی از زمان سرخ کردن محاسبه گردید. در این پژوهش از روش تفاضل محدود در حل معادله‌های دیفرانسیلی استفاده شد. برای اعتبارسنجی مدل، دمای چیپس و دمای روغن در حین سرخ کردن اندازه‌گیری و با مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل مقایسه شد. نتایج به دست آمده نشان داد که مدل ارائه شده در تطابق با پارامترهای آزمایشگاهی سرخ کردن چیپس است (Chen & Moreira, 1997). در پژوهشی، مدل سینتیکی جذب روغن در سیب‌زمینی توسعه داده شد. این مدل در مورد پارامترهای مؤثر بر مقدار جذب روغن اطلاعات مفیدی ارائه کرد (Bouchon & Pyle, 2005).

به دلیل اینکه فرایند سرخ کردن از روش‌های متداول و غذاهای سرخ شده جزء غذاهای پرمصرف است، در این پژوهش از بین روش‌های سرخ کردن، روش عمیق برای بررسی انتخاب شد. ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی (h) محاسبه گردید. در انتخاب هندسه مناسب با توجه به اینکه مدل‌سازی ریاضی برای اشکالی با هندسه منظم قابل اجراست از میان سه مختصات دکارتی، استوانه‌ای (دیسکی) و کروی، فرم دیسکی به عنوان هندسه برش انتخاب گردید. با استفاده از ضرایب محاسبه شده، انتقال حرارت توسط معادله‌های ریاضی مدل‌سازی شد. در پایان، با نرم‌افزار

دمائابت یا دیریگلت،^۴ شار ثابت یا نیومن^۵ و سطح در معرض جابه‌جایی بنام روبین^۵ وجود دارد (Incropera et al., 2006).

پس از مدل‌سازی، باید فرم‌های مناسبی از شرایط مرزی برای حل معادله‌های استخراج شده انتخاب شود. در این راستا روش المان محدود روش عددی برتر است که مبنای اصلی حل معادله‌های مختلف است و برای تجزیه و تحلیل پدیده انتقال حرارت در حوزه مواد غذایی استفاده می‌شود و مبنای محاسبات نرم‌افزاری است. اما مدل‌سازی ریاضی قادر به توسعه سریع صنایع فرآوری مواد غذایی مانند سایر صنایع نیست. دلیل اصلی این امر این است که غذاها پیچیده و ناهمگن هستند و واکنش‌هایی که در فرآوری غذا رخ می‌دهد هنوز به روشنی مشخص نشده است. بنابراین، مدل‌سازی فرایندهای مواد غذایی در مقایسه با سایر صنایع بسیار پیچیده است.

کامسول مالتی فیزیک^۵ یکی از نرم‌افزارهای پیشرفته و جدید مدل‌سازی و شبیه‌سازی است که مبنای محاسبات آن از میان روش‌های حل عددی روش المان محدود است. همچنین یک محیط ارتباطی قدرتمند برای ایجاد مدل و حل انواع مسائل مهندسی و علمی است. این نرم‌افزار دارای محیط یکپارچه و قدرتمندی است که با استفاده از مدل‌سازی، تصویر کاملی از مدل و امکان دسترسی به تمام قابلیت‌های آن را در اختیار قرار می‌دهد. با استفاده از آن می‌توان به راحتی مدل‌های متداول را برای یک فیزیک خاص توسعه داد. کامسول با جمع‌آوری مجموعه‌ای از معادله‌ها، کل مدل را حل می‌کند. هنگام حل مدل‌ها، با استفاده از مجموعه‌ای از ابزارهای آنالیز عددی پیشرفته مسائل را حل می‌کند. همچنین این آنالیزها را به‌طور همزمان با

عمل از لحظه شروع سرخ‌کردن تا رسیدن سیب‌زمینی‌ها به حالت نهایی سرخ شدن ادامه یافت. برای تعیین مقدار رطوبت و میزان جذب روغن در طول سرخ‌کردن در زمان‌های معین پس از طلایی شدن سیب‌زمینی‌ها، نمونه‌ها از سرخ‌کن خارج گردید و روغن سطحی آنها توسط کاغذ جاذب حذف و بلافاصله آنالیزها آغاز شد.

آزمایش‌ها

اندازه‌گیری مقدار رطوبت

مقدار رطوبت نمونه‌های سرخ شده، از طریق خشک کردن آنها در آون با جریان همرفتی در دمای 103 ± 1 درجه سلسیوس تا رسیدن به وزن ثابت اندازه‌گیری شد. مقدار رطوبت سیب‌زمینی بر حسب گرم آب بر گرم ماده خشک گزارش گردید (AOAC, 1995).

اندازه‌گیری مقدار روغن

مقدار روغن نمونه‌های سرخ شده از طریق استخراج در دستگاه سوکسله، به وسیله حلال پترولیوم اتر به مدت ۶ ساعت تعیین و بر حسب گرم روغن بر گرم ماده خشک گزارش گردید (AOAC, 1995).

توسعه مدل‌سازی

هدف از مدل‌سازی توصیف انتقال حرارت، جرم و اندازه حرکت (پدیده‌های انتقال) در فرایند تولید مواد غذایی است که به کمک معادله ریاضی و با دقیق‌ترین روش ممکن خواهد بود. معادله‌های به دست آمده که معادله دیفرانسیل جزئی هستند به کمک شرایط مرزی حل می‌شوند. سه شکل از شرایط مرزی به نام

4- Robin
5- COMSOL Multiphysics

1- Partial Differential Equation
2- Dirichlet
3- Neumann

مدل سازی دوبعدی انتقال حرارت فرایند سرخ کردن عمیق و ارزیابی آن...

$$T = T(x, y, z, t) \quad (3)$$

که در آن T = دما (کلوین)، α = ضریب پخش گرمایی (مترمربع بر ثانیه)، x, y, z = ابعاد (متر) و t = زمان (ثانیه) است. α با استفاده از معادله زیر قابل محاسبه است:

$$\alpha = \frac{K}{\rho C_p} \quad (\text{Incropera et al., 2006}) \quad (4)$$

ه در آن K = ضریب هدایت حرارتی (وات بر متر کلوین)، ρ = چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب) و C_p ظرفیت حرارتی ویژه سیبزمینی (ژول بر کیلوگرم کلوین) که روابط و مقادیر آن در ادامه ذکر می شود:

$$K = 0.148 + 0.493 X_w \quad (\text{Sweat, 1974}) \quad (5)$$

$$C_p = 0.837 + 3.349 X_w \quad (\text{Sibel, 1892}) \quad (6)$$

X_w = کسر جرمی رطوبت (بدون واحد) که از طریق تجربی به دست می آید.

$$\rho = 1157 \quad (\text{پژوهش حاضر})$$

به منظور بررسی صحت داده ها، ضریب هدایت حرارتی سیبزمینی از رفرنس دیگری نیز استخراج و استفاده شد.

$$K = 0.95 \quad (\text{W/m.K}) \quad (\text{Lioumbas et al., 2012})$$

در نرم افزار کامسول وارد کردن شعاع هم در مختصات دکارتی صورت می گیرد. در این نرم افزار راستای شعاع با x یا y و راستای ضخامت یا ارتفاع با z مشخص می شود. پس معادله ۲ به معادله دیفرانسیل جزئی با مرتبه دوم مشتق در بعد x و z و مرتبه اول مشتق در بعد زمان تبدیل می شود که به شکل معادله ۷ بیان می گردد.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \left(\frac{\rho C_p}{K}\right) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (7)$$

بنابراین، برای حل آن چهار شرط مکانی موسوم به شرط مرزی (برای هر بعد مکان دو شرط مرزی در

مش تطبیقی اجرا و با استفاده از روش های عددی خطاها را کنترل می کند (COMSOLTM, 2005).

تخمین ضریب انتقال حرارت جابه جایی فرایند

کل حرارت منتقل شده بر حسب ژول بر ثانیه از روغن به سطح برش های سیبزمینی با رابطه $(hA\Delta T_1)$ برابر است که برای حرارت دهی سیبزمینی با $(\dot{m}c_p\Delta T_2)$ و برای تبخیر آب با $(\Delta H \cdot \dot{W})$ محاسبه می شود. بنابراین، ضریب انتقال حرارت جابه جایی بر حسب وات بر مترمربع کلوین با مجموع حرارت انتقالی به سیبزمینی و تبخیر آب و با استفاده از رابطه ۱ تخمین زده شد:

$$hA\Delta T_1 = \dot{m}c_p\Delta T_2 + \Delta H \cdot \dot{W} \quad (1)$$

که در آن A = مساحت جانبی سیبزمینی (مترمربع)، ΔT_1 = اختلاف دمای روغن و برش های سیبزمینی (کلوین)، \dot{m} = تغییر جرم برش ها با گذشت زمان به دلیل کم شدن آب آنها (کیلوگرم بر ثانیه)، C_p = ظرفیت گرمایی ویژه سیبزمینی در زمان های مختلف سرخ کردن (ژول بر کیلوگرم کلوین)، \dot{W} = میزان کاهش آب محصول (کیلوگرم بر ثانیه)، ΔT_2 = اختلاف دمای سیبزمینی با گذشت زمان (کلوین) و ΔH = گرمای نهان تبخیر آب در نمونه به مقدار ۲۲۵۷ (ژول بر کیلوگرم) (Perry et al., 1984) در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شد.

معادله انتقال حرارت

معادله مربوط به انتقال حرارت در مختصات سه بعدی به شکل زیر بیان می شود:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \left(\frac{1}{\alpha}\right) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

جواب معادله توزیع دما در صورت سه بعدی بودن به همراه متغیرهای مستقل به شکل زیر خواهد بود:

اثر چروکیدگی کلی به‌هنگام سرخ‌کردن نادیده گرفته شد و نمونه‌ها به صورت متقارن سرخ گردید. پوسته تشکیل شده بسیار ناچیز بود و خواص آن با کل نمونه یکسان در نظر گرفته شد. حرارت درون نمونه از طریق هدایت و در روغن از طریق جابه‌جایی انتقال یافت. گرمای موردنیاز برای واکنش‌های شیمیایی، برای مثال ژلاتینه شدن نشاسته و دناتوره‌شدن پروتئین، در مقایسه با گرمای مورد نیاز برای تبخیر آب، کوچک بود. در نتیجه در مطالعه حاضر نادیده گرفته شد. دمای سرخ‌کن (روغن) حین سرخ کردن ثابت بود. تلفات حرارتی به محیط قابل چشم‌پوشی بود.

ابزار محاسباتی و راه حل عددی

فیزیک انتخابی، انتقال حرارت در سیالات و جامدات (HTS) بود. ابتدا مدل غذایی با اندازه معین طراحی گردید. معادله‌های حاکم با شرایط مرزی و اولیه شرح داده شده کوپل و همراه شدند. شرایط مرزی مورد استفاده، تقارن در مرکز و سطح در معرض جابه‌جایی (شار معین) بود. به منظور بررسی استقلال حل عددی از مش، چندین بار تجزیه و تحلیل حساسیت مش با تعداد متفاوتی از المان‌ها صورت گرفت. تراکم بالاتری از مش‌های محاسباتی (مثلی بسیار ریز) در برش سیب‌زمینی انتخاب گردید. همه شبیه‌سازی‌های محاسباتی با انواع مختلفی از طرح‌های مش (از بسیار بزرگ تا بسیار ظریف) اجرا شد. تأثیر کیفیت مش بر همگرایی و انسجام نتایج با تجزیه و تحلیل حساسیت مش ارزیابی شد. دما در فاصله‌های ۱۰ ثانیه تا زمان اتمام فرایند شبیه سازی شد. نتایج، شامل توزیع دمای نمونه (سطح و مرکز) محاسبه و با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه گردید.

مجموع چهار) و یک شرط زمانی موسوم به شرط اولیه نیاز است.

شرایط مرزی مورد نیاز

۱. تقارن در مرکز سیب‌زمینی در راستای z (شرط مرزی نیومن)

$$z = 0 \rightarrow K \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0$$

۲. سطح بالایی سیب‌زمینی در معرض جابه‌جایی است. (شرط مرزی روبین)

$$z = 2\text{mm (نصف ضخامت)} \rightarrow K \frac{\partial T}{\partial z} = h(T - T_{\infty})$$

۳. تقارن در مرکز سیب‌زمینی در راستای x (شرط مرزی نیومن)

$$x = 0 \rightarrow K \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) = 0$$

۴. بخش نواری سیب‌زمینی در معرض جابه‌جایی است. (شرط مرزی روبین)

$$x = 18\text{mm (شعاع)} \rightarrow K \frac{\partial T}{\partial x} = h(T - T_{\infty})$$

T_{∞} دمای روغن شامل ۱۵۰، ۱۶۰ و ۱۷۰ درجه سلسیوس است. دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس برای ارائه محاسبات انتخاب گردید. h ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی روغن است که محاسبه آن در بخش قبلی شرح شده است.

شرط اولیه موردنیاز

$$T(x, z, 0) = T_0 = 20^{\circ}\text{C}$$

فرضیات مدل

در مطالعه حاضر برای توسعه مدل و شبیه‌سازی فرضیات زیر در نظر گرفته شد:

انتقال حرارت در بعد شعاع و ضخامت (دو بعدی) بررسی شد.

برش‌های سیب‌زمینی همگن در نظر گرفته شد و توزیع رطوبت و دمای اولیه در تمامی برش‌ها یکسان بود.

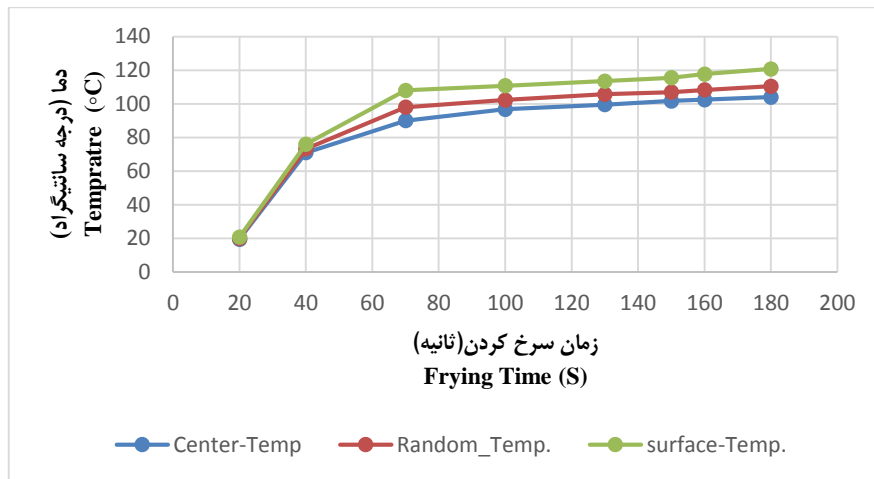
مدل‌سازی دوبعدی انتقال حرارت فرایند سرخ کردن عمیق و ارزیابی آن...

ترموکوپل آن در شکل ۴ نشان داده شده است هنگام سرخ کردن به ترتیب در دمای ۱۵۰، ۱۶۰ و ۱۷۰ درجه سلسیوس روغن نشان می‌دهد. مطابق شکلها دمای نقاط مختلف نمونه، متفاوت از هم است یعنی تغییر دما در نقاط مختلف نمونه کاملاً مشهود است.

نتایج و بحث

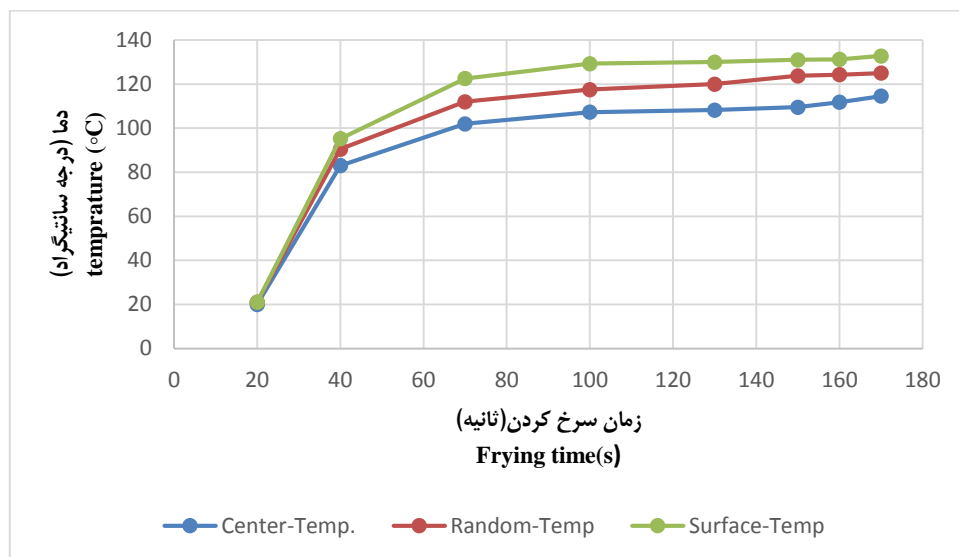
بررسی تغییرات دمای نمونه

شکل‌های ۱ و ۲ و ۳ تغییرات دمای مرکز، سطح و بین این دو نقطه با نام نقطه تصادفی (نصف شعاع و نصف ضخامت) از نمونه را که محل قرارگیری



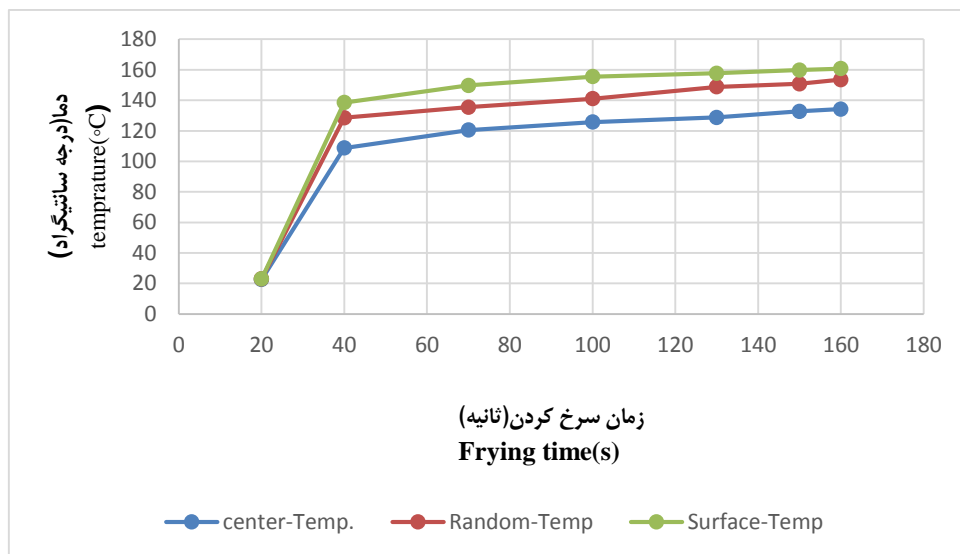
شکل ۱- مقایسه تغییرات دما در قسمت‌های مختلف برش سیب زمینی هنگام سرخ کردن در دمای ثابت ۱۵۰ درجه سلسیوس

Fig.1. Comparison of temperature changes in different parts of the potato slice during frying at a constant oil temperature 150 °C



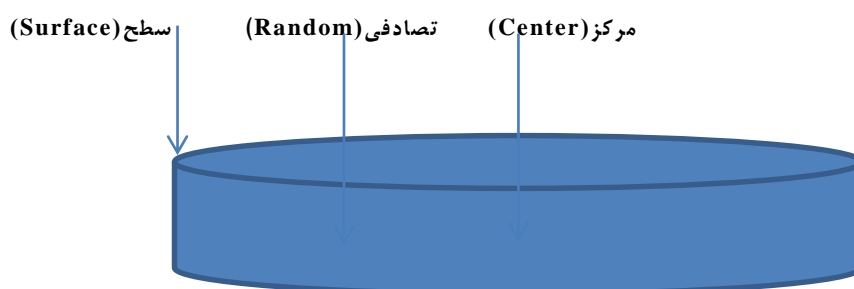
شکل ۲- مقایسه تغییرات دما ی قسمت‌های مختلف برش سیب زمینی هنگام سرخ کردن در دمای ثابت ۱۶۰ درجه سلسیوس

Fig.2. Comparison of temperature changes in different parts of the potato slice during frying at a constant oil temperature 160°



شکل ۳- مقایسه تغییرات دمای قسمت های مختلف برش سیب زمینی هنگام سرخ کردن در دمای ثابت ۱۷۰ درجه سلسیوس

Fig.3. Comparison of temperature changes in different parts of the potato slice during frying at a constant oil temperature 170°C



شکل ۴- شماتیک محل قرارگیری ترموکوپل ها در نمونه

Fig. 4. Schematic of the location of thermocouples in the sample

کردن، جبهه تبخیر به سمت مرکز حرکت می کند و پوسته سطحی تشکیل می شود و در نهایت دمای سطح سیب زمینی به اندازه دمای روغن بالا می رود. سرعت خارج شدن بخار به میزان از دست رفتن آب وابسته است و همزمان با پیشرفت فرایند سرخ شدن، تشکیل حباب تا حد اکثر افزایش و پس از آن کاهش می یابد. در حین تبخیر، دمای آب نمونه که عامل اصلی افزایش دمای نمونه است ثابت باقی می ماند و منجر به ثبات نسبی دمای نمونه می شود. در ادامه، گرمای اضافی پس از تبخیر صرف افزایش دمای نمونه می گردد. پس، تغییر دما نسبت به فاز قبل زیاد مشهود

مکانیسم حاکم بر فرایند جوشش در سرخ کردن بدین شرح است که پس از غوطه وری نمونه در روغن داغ، دمای سیب زمینی افزایش می یابد و آب شروع به تبخیر می کند. میزان از دست دادن آب تا خشک شدن کامل سطح سیب زمینی افزایش و تا پایان سرخ شدن کاهش می یابد. پس از وارد شدن در محیط سرخ کردن، مقدار کمی هوای مسدود شده در بافت سیب زمینی متصاعد می شود و موجب تشکیل اولین حباب هایی می شود که از سیب زمینی فرار می کنند. سطح سیب زمینی تا دمای حباب مرطوب گرم می شود و آب شروع به تبخیر می کند. با ادامه فرایند سرخ

مدل سازی دوبعدی انتقال حرارت فرایند سرخ کردن عمیق و ارزیابی آن...

بالای روغن مشاهده نمی شود. افزایش اختلاف بین دمای مرکز و دمای سطح به سمت دماهای بالاتر روغن مشهود است. ویژگی های فرایند سرخ کردن در هر سه دمای روغن و مقایسه آنها در جدول ۱ آمده است:

نیست و با شیب ملایمی در حال افزایش است که دوره دما ثابت نامیده می شود. با حرکت از مرکز به سمت سطح نمونه، مطابق هر سه شکل، دما در حال افزایش است. دوره تقریباً دمای ثابت در هر سه شکل از ثانیه ۷۰ آغاز شده است و افزایش دما به سمت دماهای

جدول ۱- خلاصه فرایند و مقایسه سرخ کردن در سه دمای روغن

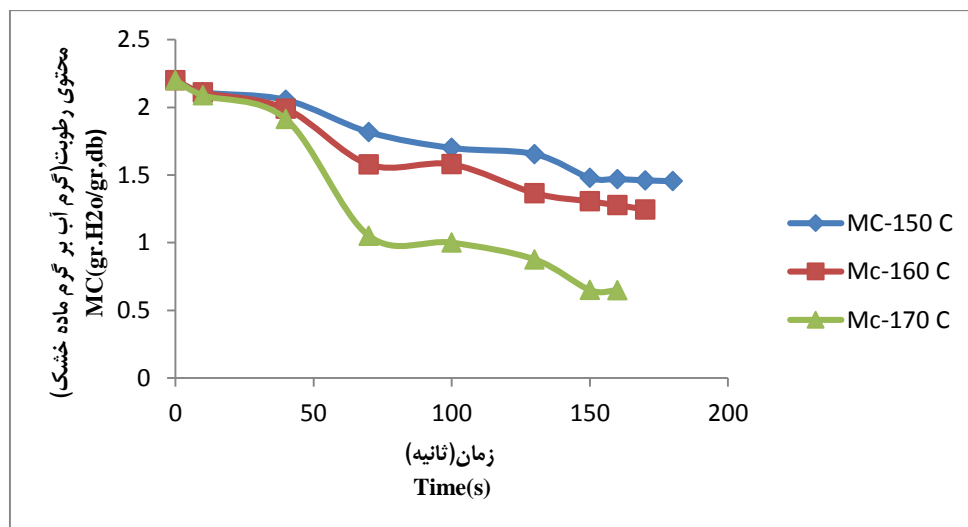
Table 1- Summary of the process and comparison in three oil temperatures

دمای روغن (درجه سلسیوس) Oil Temperature (°C)	زمان رسیدن به نقطه جوش آب (ثانیه) (Time to reach the boiling point of water)s	زمان اتمام فرایند ارزیابی با رنگ و پخت (ثانیه) (S) Process completion time
150	60	180
160	40	170
170	35	160

در شکل ۵ تغییرات مقدار رطوبت نمونه هنگام سرخ کردن به عنوان تابعی از زمان فرایند نشان داده شده است. شدت تبخیر در لحظات ابتدایی فرایند بیشتر است که به دلیل تبخیر ناگهانی آب آزاد سطحی نمونه است. با گذشت زمان، آهنگ کاهش رطوبت محدود و تقریباً ثابت گردید. در این خصوص نتایج مشابهی توسط محققان به دست آمده است. (Krokida et al., 2000; Pedreschi et al., 2005; Ziaifar et al., 2010)

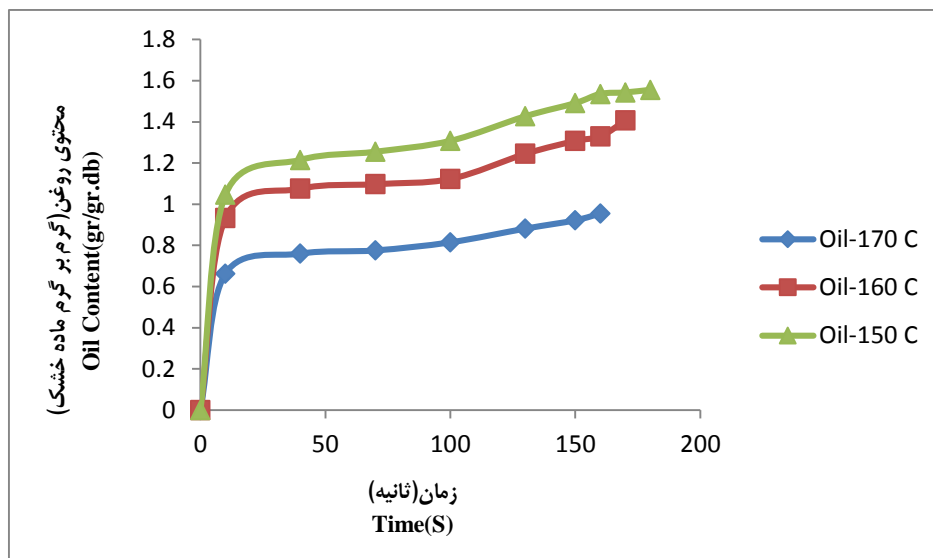
جدول ۱ نشان می دهد که زمان رسیدن به محدوده نقطه جوش آب (۱۰۰ درجه سلسیوس) با افزایش دمای روغن کاهش می یابد. زمان اتمام فرایند نیز به ازای افزایش هر ۱۰ درجه در دمای روغن، با کاهش زمان ۱۰ ثانیه ای همراه است.

نتایج اندازه گیری مقدار رطوبت و میزان جذب روغن



شکل ۵- تغییر محتوای رطوبت نمونه هنگام سرخ کردن در سه دمای متفاوت روغن

Fig. 5. Variation of moisture content during frying at three different oil temperatures



شکل ۶- تغییر در میزان جذب روغن حین سرخ کردن در سه دمای متفاوت روغن

Fig. 6. Variation in the oil content during frying at three different oil temperatures

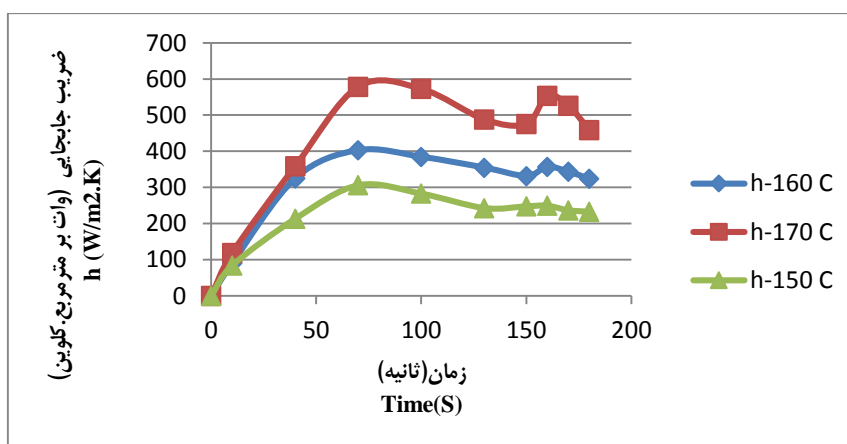
ماده غذایی به نقطه جوش آب کاهش می‌یابد که می‌توان آن را به فشردگی ساختار ماده غذایی نسبت داد.

نتایج ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی

شکل ۷ تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی را در سه دمای سرخ کردن نسبت به زمان نشان می‌دهد:

مطابق شکل ۶، با افزایش دمای روغن میزان جذب آن کاهش می‌یابد که در تحقیقات متعددی به این کاهش با دلایل مختلفی مانند تشکیل پوسته یا مانع شدن رطوبت خروجی از ورود روغن به نمونه اشاره شده است (Diaz *et al.*, 1999; Pedreschi *et al.*, 2005).

بررسی دو شکل ۵ و ۶ به طور همزمان نشان می‌دهد که مقدار جذب روغن تقریباً با رسیدن دمای



شکل ۷- تغییر ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی با زمان در سه درجه حرارت روغن

Fig.7. Changes in convective heat transfer coefficient with time at three oil temperatures

مطالعه‌ای دیگر، مقدار ۳۰۰ وات بر متر مربع کلوین در شروع جوشش و مقدار اوج آن 1140 ± 110 وات بر متر مربع کلوین حین سرخ کردن خلال گزارش شده است (Hubbard & Farkas, 1998). در پژوهشی دیگر، مقدار این ضریب برای خلال در محدوده ۷۵۰-۴۴۳ وات بر متر مربع کلوین و برای دیسکی در محدوده ۷۵۰-۵۹۴ وات بر مترمربع کلوین نیز محاسبه شده است (Costa et al., 1999).

در مورد مقادیر این ضریب در سیب‌زمینی خلالی منابع گسترده وجود دارد ولی در مورد دیسکی منابع محدود است. در این پژوهش بیشترین مقدار ضریب جابه‌جایی مربوط به ثانیه ۷۰ (شروع محدوده دما ثابت در هر سه دمای سرخ کردن) در هر سه دمای سرخ کردن است. پس از خشک شدن سطح نمونه در دماهای مختلف و کاهش تلاطم با وجود افزایش دمای سطحی نمونه به سمت دمای روغن، تقریباً میزان ضریب انتقال حرارت ثابتی به دست می‌آید که نشان دهنده وابستگی شدید این فاکتور به وجود حرکت حجمی یا آشفتگی جریان در محیط حرارتی است. با کاهش دما و زمان سرخ کردن، مقدار این ضریب نیز کاهش می‌یابد که این روند نیز در شکل ۷ قابل مشاهده است.

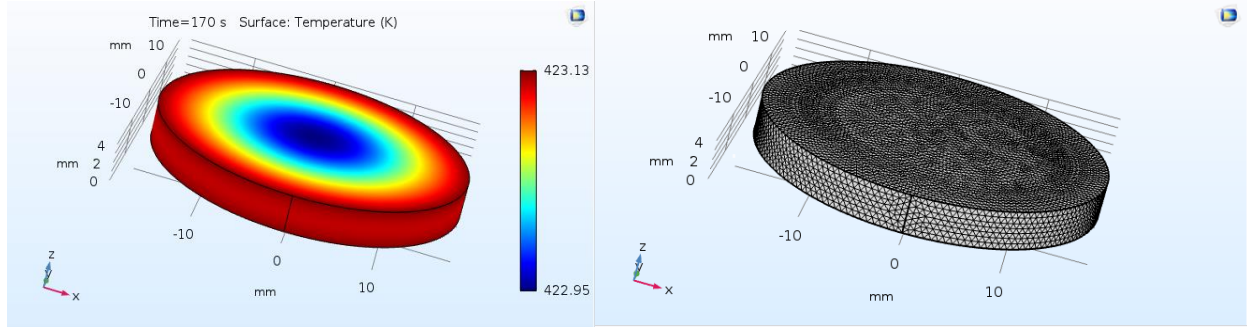
نتایج بررسی نرم‌افزاری فرایند

دیسک سیب‌زمینی در ابعاد معین ذکر شده به کمک نرم‌افزار کامسول نسخه ۵,۳,۱ طراحی و مش بندی شد. مدل غذایی و ساختار مش‌های مختلف به کار رفته در شبیه‌سازی سه بعدی برش سیب‌زمینی با قطر ۳۶ و ضخامت ۴ میلی‌متر در شکل ۸ نشان داده شده است:

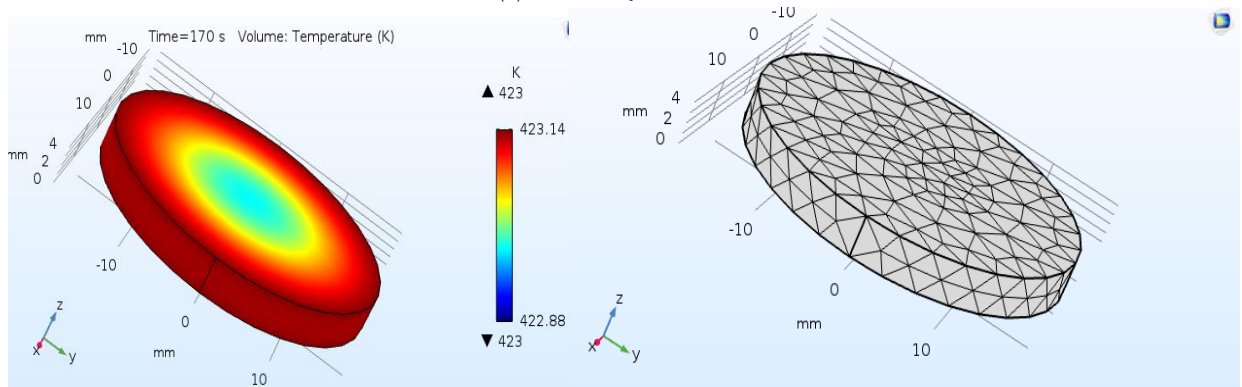
در شکل ۷ دیده می‌شود با افزایش دمای روغن، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی افزایش می‌یابد. این ضریب در زمان‌های اولیه فرآیند بیشتر است و با سپری شدن زمان سرخ کردن کاهش می‌یابد. در مطالعه‌ای، طی سرخ کردن قطعات سیب‌زمینی مشاهده شد که ضریب انتقال حرارت با افزایش دمای روغن زیاد می‌شود و بعد از تشکیل پوسته با کاهش شدت تبخیر که عامل اصلی ایجاد تلاطم در روغن است، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی کاهش می‌یابد (Sahin et al 1999) که همین روند نیز در پژوهش حاضر مشاهده شده است. موج دوم افزایش نسبی این ضریب مربوط به زمان خروج رطوبت داخلی حرکت کرده از مرکز به سطح و ترک خوردن سطح نمونه است که تلاطم جدیدی ایجاد کرده است.

جوشش از مکانیسم‌های مختلفی تبعیت می‌کند ولی در حین سرخ کردن، جوشیدن فقط از نوع هسته‌ای است. حباب بخار آب در سطوح مختلف نمونه‌های سیب‌زمینی شکل می‌گیرد و رو به بالای محفظه سرخ کردن حرکت می‌کند. حباب‌های خارج شده از سطح بلافاصله پس از تشکیل بالا می‌روند و تأثیر بسیار خوبی بر تلاطم روغن و در نتیجه در مقدار ضریب جابه‌جایی دارند.

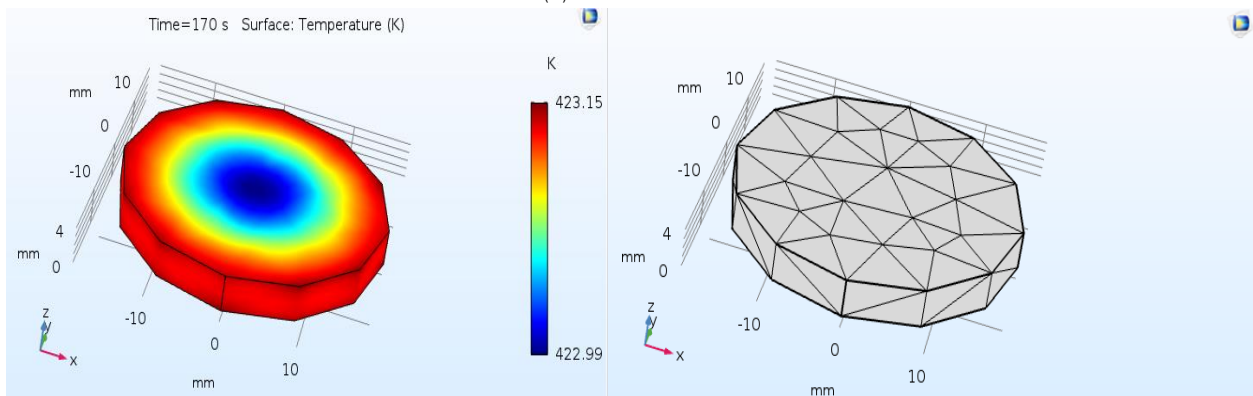
مقدار ضریب انتقال حرارت محاسبه شده در این پژوهش در بازه ۴ / ۹۷-۸۳/۵۷۸ وات بر متر مربع کلوین قرار دارد که قابل مقایسه با مقادیر مشابه در سایر مقالات است. برای نمونه، در پژوهشی ضریب‌های انتقال حرارت جابه‌جایی سیب‌زمینی خلالی برای فاز غیرجوششی (مرحله تقریباً ثابت نمودار سرخ کردن) در محدوده ۳۰۰-۲۵۰ وات بر متر مربع کلوین قرار دارد (Miller et al., 1994; Moreira et al., 1995). در



الف- مش بسیار ظریف
(a)-Extremely fine mesh



ب- مش نرمال
(b)-Normal mesh



ج- مش بسیار درشت
(C)-Extra Coarse mesh

شکل ۸- مدل غذایی و ساختار مش های مختلف طراحی شده با نرم افزار کامسول

الف- مش بسیار ظریف، ب- مش نرمال و ج- مش بسیار درشت

Fig.8. Food model and different mesh structure designed by COMSOL Multi physics
a:Extremely fine mesh b. :Normal mesh C.: Extra coarse mesh

آن عملیات توسط خود نرم افزار پیش می رود. با مقایسه تأثیر انواع مختلف مش بندی در پیش آنالیزها و نیافتن منابع بررسی کننده این زمینه، از مش بسیار ظریف در

از آنجایی که نمونه همگن در نظر گرفته شده است (پوسته و هسته مشخصات یکسانی دارند) در مش بندی از نوع کنترل فیزیکی استفاده شده است که در

1. physics control

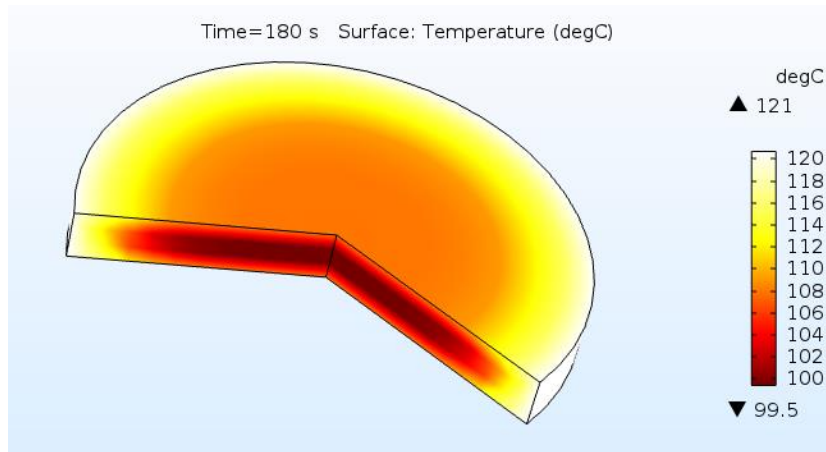
مدل سازی دوبعدی انتقال حرارت فرایند سرخ کردن عمیق و ارزیابی آن...

یکنواخت دما و پوشش دهی کل بازه دمایی و افزایش دما با حرکت از مرکز به سمت سطح مدل، نتایج صحیحی در پژوهش حاضر ارائه کرد و به عنوان مش قابل قبول انتخاب گردید. به منظور بالا بردن وضوح توزیع دما، مدل بار دیگر به صورت دوبعدی متقارن در کامسول طراحی و نتایج آن ارائه شد. داده های مورد نیاز برای مدل سازی، اندازه گیری و محاسبه گردید و با استفاده از همین داده ها انتقال حرارت داخل نمونه مدل سازی شد. پروفایل انتقال حرارت برای تمام زمان ها به دست آمد که به عنوان نمونه برای زمان نهایی سرخ کردن در دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس روغن در شکل ۹ ارائه شده است.

شبهه سازی استفاده شد زیرا این مش بندی توزیع یکنواخت دما را در مدل ایجاد می کرد که در تطابق با فرضیات بود. رنگ های سرد (سبز و آبی) بیانگر دمای پایین است و رنگ های گرم (قرمز و نارنجی) دمای بالا را نشان می دهند.

شکل ۸-ب یا مش نرمال، توزیع یکنواخت ولی نادرست دارد چون بازه کاملی از توزیع دما در آن مشاهده نمی شود و دمای مربوط به رنگ آبی را پوشش نمی دهد.

شکل ۸-ج یا مش بسیار درشت، به دلیل درشتی تمامی نقاط مرزی دیسک را پوشش نمی دهد و شکل را از حالت دیسکی خارج می کند لذا کارایی ندارد. در شکل ۸-الف استفاده از مش بسیار ظریف، با توزیع



شکل ۹- پروفایل انتقال حرارت به دست آمده توسط کامسول در روغن ۱۵۰ درجه سلسیوس در زمان نهایی (۱۸۰ ثانیه)

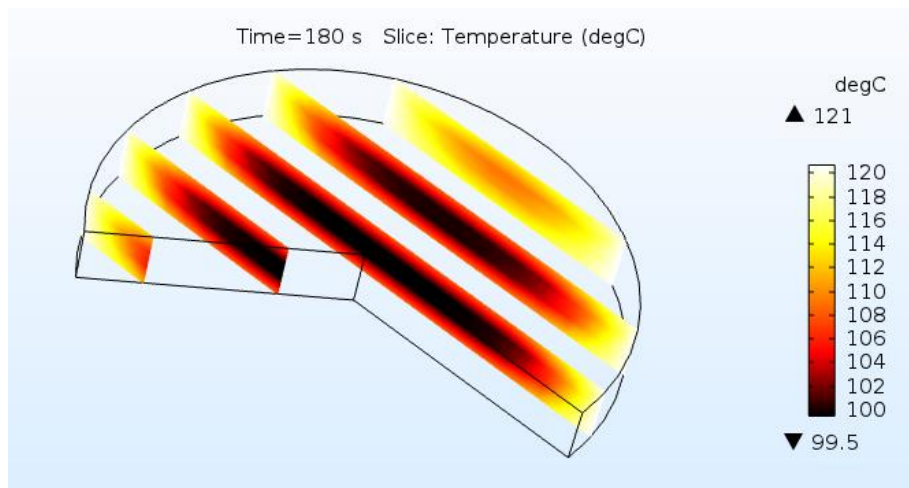
Fig.9. Heat transfer profile obtained by COMSOL Multi physics in 150 °C at 180 S

زمان نهایی ۱۸۰ ثانیه نزدیک به ۱۲۰ درجه سلسیوس است. به منظور ایجاد وضوح در توزیع دمای شکل ۹، از ایجاد برش ها در مدل استفاده و در شکل ۱۰ نشان داده شد. این شکل توزیع دمای داخل نمونه و نفوذ حرارت از سطح به داخل را نشان می دهد.

در شکل ۹ توزیع دما در بعد شعاع و ضخامت قابل مشاهده است. سطوح و کناره های برش گرم ترند و با حرکت از مرکز به سمت سطح، دما در حال افزایش است. بالاترین دما ۱۲۱ درجه سلسیوس است که با شکل ۱ که حاصل اندازه گیری دما به کمک ترموکوپل است قابل مقایسه است. روی شکل ۱ دمای سطح در

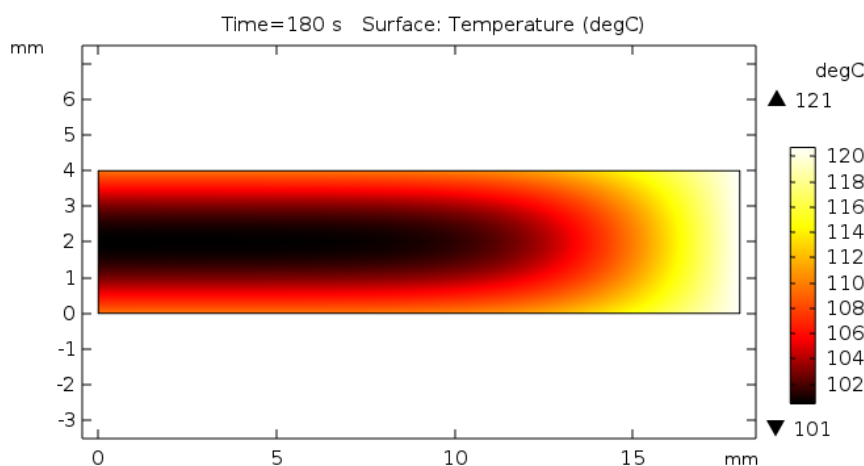
دما را به وضوح نشان می‌دهد.

یکی از برش‌های ایجاد شده به صورت دو بعدی مدل‌سازی و در شکل ۱۱ ارائه شد که توزیع شعاعی



شکل ۱۰- برش‌های ایجاد شده در مدل برای نشان دادن توزیع دمای داخل مدل در دمای روغن ۱۵۰ درجه سلسیوس و زمان نهایی

Fig. 10. Temperature distribution inside the model at 150 °C oil temperature in final time



شکل ۱۱- پروفایل دو بعدی نشان دهنده توزیع دمای شعاعی در دمای ۱۵۰ درجه روغن

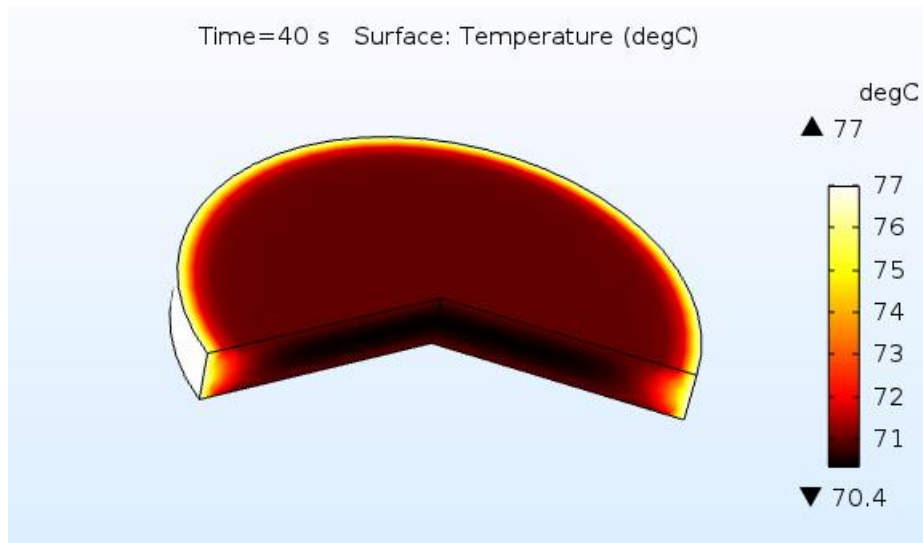
Fig. 11- Two-dimensional profile showing the distribution of radial temperature at 150°C

مشهود است. بازه دمایی مربوط به داده‌های ترموکوپل که در شکل ۱ (داده‌های آزمایشگاهی) ارائه شده است در زمان ۴۰ ثانیه از ۷۱ تا ۷۶ درجه سلسیوس، در زمان ۱۰۰ ثانیه از ۹۶/۷۵ تا ۱۱۰/۷۵ درجه سلسیوس و در زمان نهایی ۱۸۰ ثانیه از ۱۰۴ تا ۱۲۰/۷۵ درجه

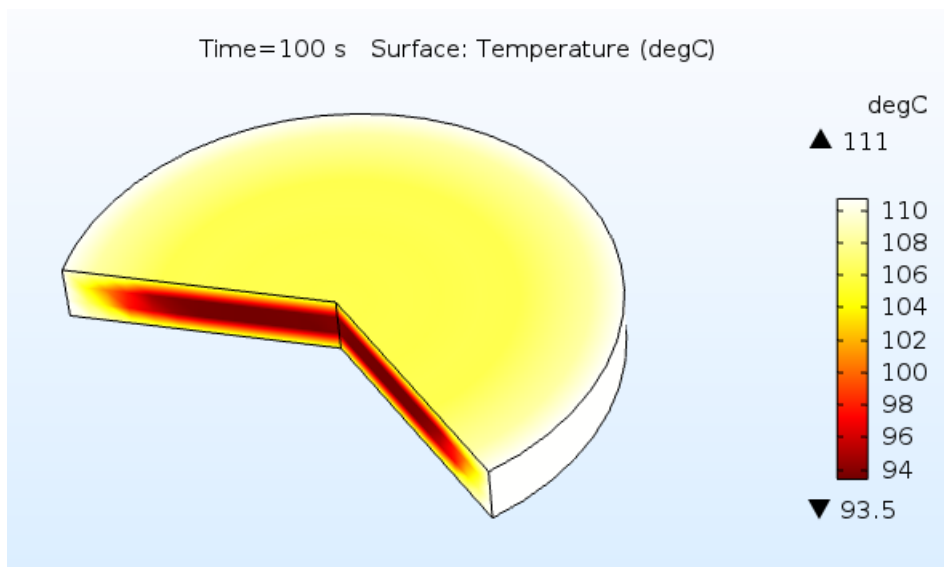
به منظور مقایسه توزیع دما علاوه بر زمان نهایی که در شکل ۹ ارائه شد، مدل‌سازی مربوط به زمان ۴۰ ثانیه و ۱۰۰ ثانیه نیز در همان دمای روغن در شکل-های ۱۲ و ۱۳ ارائه شده است. با مقایسه شکل ۹، ۱۲ و ۱۳ تفاوت توزیع دما با اختلاف در توزیع رنگ‌ها نیز

مدل سازی دوبعدی انتقال حرارت فرایند سرخ کردن عمیق و ارزیابی آن...

سلسیوس متغیر است که با توزیع دمای نرم افزاری ارائه شده در شکل های ۹ تا ۱۳ همخوانی دارد.



شکل ۱۲- پروفایل انتقال حرارت به دست آمده توسط کامسول در روغن ۱۵۰ درجه سلسیوس در زمان ۴۰ ثانیه
 Fig.12. Heat transfer profile obtained by COMSOL Multi physics in 150 °C at 40 S



شکل ۱۳- پروفایل انتقال حرارت به دست آمده توسط کامسول در روغن ۱۵۰ درجه سلسیوس در زمان ۱۰۰ ثانیه
 Fig.13. Heat transfer profile obtained by COMSOL Multi physics in 150 °C at 100S

شعاع و ضخامت معنی دار بود. افزایش اختلاف بین دمای مرکز و دمای سطح به سمت دماهای بالاتر روغن مشهود بود. ضریب انتقال حرارت جابه جایی به عنوان پارامتر مؤثر در مدل سازی انتخاب و با داده های

نتیجه گیری

نقاطی که در شعاع یکسان از مرکز نمونه قرار گرفته اند دمای ثابت داشتند. تغییر دما در نقاط مختلف با حرکت از مرکز به سمت سطح در راستای

ثانیه همراه بود. با افزایش دمای روغن، میزان جذب روغن نمونه‌ها کاهش یافت. مقدار ضریب انتقال حرارت محاسبه شده در این پژوهش در بازه ۴/۹۷-۸۳/۵۷۸ وات بر متر مربع کلوین قرار داشت. مش بندی با مش بسیار ظریف نتایج بهتری با نرم‌افزار ارائه کرد. نرم‌افزار کامسول ابزار قدرتمند مدل‌ساز و شبیه‌ساز قابل کاربرد در سایر فرایندهای صنایع غذایی است.

اندازه‌گیری شده محاسبه شد. مقدار ضریب انتقال حرارت در دماهای بالا به دلیل افزایش شدت خروج رطوبت، بالاتر بود و با سپری شدن زمان سرخ کردن این عدد نیز کاهش یافت. میزان حداکثر این ضریب همزمان با رسیدن به حداکثر شدت تبخیر آب و تلاطم روغن مشاهده شد. زمان اتمام سرخ کردن، به ازای افزایش ۱۰ درجه در دمای روغن، با کاهش زمان ۱۰

تعارض منافع

نویسندگان در خصوص انتشار مقاله ارائه شده به طور کامل از سوء اخلاق نشر، از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و یا ارسال و انتشار دوگانه، پرهیز نموده‌اند و منافعی تجاری در این راستا وجود ندارد.

مراجع

- AOAC. 1995. Official Methods of Analysis of AOAC International. Association of Official Analysis Chemists International, p. CD-ROM.
- Bouchon, P., and Pyle, D. L. 2005. Modelling oil absorption during post-frying cooling: II: solution of the mathematical model, model testing and simulations. *Food and Bioproducts Processing*. 83(4): 261-272.
- Chen, Y. and Moreira, R. G. 1997. Modelling of a batch deep-fat frying process for tortilla chips. *Food and Bioproducts Processing*. 75(3): 181-190.
- COMSOLTM. 2005. COMSOLTM Multi physics: Model Library – Heat Transfer Module. Los Angeles, pp. 192-202.
- Costa, R. M., Oliveira, F. A. R., Delaney, O. and Gekas, V. 1999. Analysis of the heat transfer coefficient during potato frying. *Journal of Food Engineering*. 39(3): 293-299.
- Crank, J. 1975. The mathematics of diffusion. 2nd Edn. *Physics Bulletin*, 26 500.
- Diaz, A., Trystram, G., Vitrac, O., Dufour, D. and Raoult-Wack, A. L. 1999. Kinetics of moisture loss and fat absorption during frying for different varieties of plantain. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 79(2): 291-299.
- Ghaderi, A., Dehghannya, J. and Ghanbarzadeh, B. 2018. Momentum, heat and mass transfer enhancement during deep-fat frying process of potato strips: Influence of convective oil temperature. *International Journal of Thermal Sciences*. 134, 485-499.
- Hubbard, L. J. and Farkas, B. E. 1999. Method for determining the convective heat transfer coefficient during immersion frying. *Journal of Food Process Engineering*. 22(3): 201-214.
- Incropera P. Frank , David P. DeWitt, Theodore L. Bergman and Adrienne S. Lavine. 2006. Introduction to Heat Transfer. John Wiley & Sons.
- Kreyszig, E. 2009. Advanced Engineering Mathematics, 10th Eddition. john wiley & sons.
- Krokida, M. K., Oreopoulou, V. and Maroulis, Z. B. 2000. Water loss and oil uptake as a function of frying time. *Journal of Food Engineering*. 44(1): 39-46.
- Lioumbas, J. S., Kostoglou, M. and Karapantsios, T. D. 2012. On the capacity of a crust-core model to describe potato deep-fat frying. *Food Research International*. 46(1): 185-193.
- Miller, K. S., Singh, R. P., and Farkas, B. E. 1994. Viscosity and heat transfer coefficient s for canola, corn, palm and soybean oil. *Journal of Food Processing and Preservation*. 18(6): 461-472.

- Moreira, R. G., Palau J., Sweat, V. E. and Sun, X. 1995. Thermal and Physical properties of tortilla chips as a function of frying time.. *Journal of Food Processing and Preservation*. 19(3): 175–189.
- Naghavi, E. A., Dehghannya, J. and Ghanbarzadeh, B. 2018. 3D computational simulation for the prediction of coupled momentum, heat and mass transfer during deep-fat frying of potato strips coated with different concentrations of alginate. *Journal of Food Engineering*. 235, 64–78.
- Pedreschi, F., Hernández, P., Figueroa, C. and Moyano, P. 2005. Modeling water loss during frying of potato slices. *International Journal of Food Properties*. 8, 289–299.
- Perry, R. H., Green, D. W. and Maloney, J. O. 1984. *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (5th ed., pp. 3_239). Singapore: McGraw-Hill.
- Safari, A., Salamat, R. and Baik, O. D. 2018. A review on heat and mass transfer coefficients during deep-fat frying: Determination methods and influencing factors. *Journal of Food Engineering*. 230, 114–123.
- Sahin, S., Sastry, S. K. and Bayindirli, L. 1999. Determination of convective heat transfer coefficient during frying. *Journal of Food Engineering*. 39(3): 307–311.
- Siebel, J. E. 1892. Specific heat of various products. *Ice and Refrigeration*. 2, 256.
- Sweat, V.E. 1974. Experimental values of thermal conductivity of selected fruit and vegetables. *Journal of Food Science*. 39, 1080-1083.
- Wu, H., Karayiannis, T. G. and Tassou, S. A. 2013. A two-dimensional frying model for the investigation and optimisation of continuous industrial frying systems. *Applied Thermal Engineering*. 51(1–2): 926–936.
- Ziaifar, A. M., Courtois, F. and Trystram, G. 2010. Porosity development and its effect on oil uptake during frying process. *Journal of Food Process Engineering*. 33(2): 191–212.



Original Research

A Two-Dimensional Model of Deep Fat Frying Heat Transfer and its Evaluation in a Potato Food Model

Azar Naghavi Gargari¹, Narmela Asefi^{*2}, Leila Roofegarinejad²

1-Ph.D. Student, Department of Food Science and Technology, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

2- Associate Prof. Dr., Department of Food Science and Technology, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran.

*Corresponding author (n.asefi@iaut.ac.ir)

Received: 07 May 2020, Accepted: 25 December 2020

[http://doi: 10.22092/FOODER.2020.342853.1268](http://doi:10.22092/FOODER.2020.342853.1268)

Abstract

In the present study, the two-dimensional modelling of heat transfer during the deep-fat frying process was investigated. In the first stage, three temperature levels of 150, 160, and 170 °C were selected for frying and recorded by a K-type thermocouple. In order to record the temperature changes of the sample during the frying process, a three-channel T-thermocouple was placed in the center, on the surface, and between these two points of the sample. In the next step, based on the temperature-to-time diagram, during five periods of frying, the moisture and oil content were measured at all three oil temperatures. As the temperature of the oil increased, both the oil and moisture content of the potatoes decreased. Then, the heat transfer parameter, including the convective heat transfer coefficient, in the range of 83.97578.4 W/m².K, was calculated and determined. The result showed that the convective heat transfer coefficient is high at high temperatures because of moisture exiting and the high turbulence of the oil flow. This coefficient also has a large influence on frying. The convective heat transfer coefficient was considered the most important parameter in heat transfer modeling, and it was used in software simulation. The geometry of the potato slices was disc-shaped. The mathematical equations of heat transfer were solved using Fourier's law, and the results of solving the equations in modelling were used by COMSOL Multi-Physics software version 5.3.1, and the temperature distribution at the surface and inside the sample was modelled with this software. Finally, the available profiles were represented.

Key words: Simulation; Convective heat transfer coefficient; COMSOL software.