مجله علوم و صنایع غذایی ایران

سایت مجله: www.fsct.modares.ac.ir

مقاله علمی_پژوهشی

مدل‌سازی انتقال‌جرم و حرارت در فرایند سرخ‌کردن عمیق و ارزیابی آن در مدل غذایی سیب‌زمینی

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

اطلاعات مقاله

تاریخ های مقاله:

تاریخ دریافت: ۹۹ /۰۳/۲۲

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۸/۱۱

کلمات کلیدی:

شبیه سازی،

ضریب انتقال حرارت جابجایی،

مدل‌سازی ریاضی،

نرم افزار کامسول.

DOI: 10.52547/fsct.18.02.27

*مسئول مکاتبات:

n.asefi@iaut.ac.ir

چکیده

در پژوهش حاضر، نحوه تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی روغن (h) طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، با ثابت نگه‌داشتن دمای روغن به عنوان محیط انتقال دهنده حرارت، تغییرات دمایی سیب‌زمینی مکعبی شکل، در مرکز و دو کناره راست و چپ خلال در طول سرخ‌کردن با ترموکوپل سه‌کاناله اندازه‌گیری شد. دمای عملیاتی سرخ‌کردن ۱۵۰ ، ۱۶۰ و ۱۷۰ $^{\circ}C$ درنظر گرفته شد. دمای ترموکوپل‌ها در فواصل زمانی ۱۰ ثانیه به وسیله‌ی دیتالاگر ثبت گردید. به علت عدم وجود تغییرات معنی‌دار در دمای مکانهای مختلف انتخابی برروی خلال، دمای مرکز در طول فرایند سرخ‌شدن به عنوان دمای موثر انتخاب گردید. همچنین پارامتر انتقال‌حرارت شامل ضریب جابجایی روغن در بازه $128_515\ W/m^2.K$ محاسبه و تعیین شد. نتایج نشان داد، ضریب انتقال حرارت جابجایی در دماهای بالا به دلیل افزایش نرخ خروج رطوبت و ایجاد تلاطم در روغن بالاتر است. با افزایش دمای روغن، کاهش محتوی روغن و کاهش محتوی رطوبت خلال‌ها مشاهده گردید. پارامترهای انتقال‌جرم شامل ضریب نفوذ موثر رطوبت (D_{eff}) در محدوده $9.12\times10^{-9}_1.31\times10^{-8}\ m^2/s$ و ضریب جذب روغن (D_{oil}) در محدوده $1.26\times10^{-5}_1.52\times10^{-5}\ m^2/s$ محاسبه و تعیین شد. سپس با استفاده از ضرایب محاسبه شده، مدل‌سازی انتقال‌حرارت و جرم توسط معادلات ریاضی انجام گرفت و معادلات مربوطه با روش جداسازی متغیرها حل شد. در پایان شبیه سازی با نرم‌افزار کامسول نسخه 5.3a انجام گرفت و پروفایل‌های بدست آمده نیز ارائه گردید.

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-05-21]

[DOI: 10.52547/fsct.18.111.345]

۱- مقدمه

فرایند سرخ‌کردن به دلیل انتقال همزمان مومنتوم (اندازه حرکت)، حرارت و جرم یکی از فرایندهای پیچیده در صنایع غذایی می باشد [۱]. حرارت از محیط داغ روغن به سطح محصول با جابجایی و از سطح به داخل ماده‌غذایی به روش هدایت منتقل می‌شود تا سطح ماده‌غذایی به دمای حباب تر برسد و آب شروع به تبخیر نماید [۲]. درک مکانیسم انتقال‌جرم و حرارت که در طول فرایند سرخ‌کردن، همزمان مابین دو ناحیه دینامیکی اتفاق می‌افتد می‌تواند برای بهینه‌سازی و کنترل کیفی موادغذایی که اغلب دارای ساختار پیچیده‌ای هستند مفید باشد [۳]. بدین منظور، آشنایی با ضرایب انتقال‌حرارت و جرم براساس اندازه‌گیری دمای محصول، دمای روغن، نفوذ روغن و تبخیر آب از محصول که می‌تواند به مکانیسم‌های مختلفی از قبیل انتشار مولکولی، موئینگی، انتقال حجمی و انتشار سطحی نسبت داده شود ضروری است [٤].

در فرایند سرخ‌کردن، درجه حرارت ماده غذایی تا نقطه جوش بالا می‌رود ولی هرگز به دمای روغن نمی‌رسد زیرا گرمای اضافی صرف تغییر فاز آب داخل ماده غذایی و انجام جوشش سطحی می‌شود. در مرحله جوشش سطحی بطور عمده خواص حسی منحصربفرد ماده غذایی سرخ شده ایجاد می‌گردد. بدلیل فشار حاصل از تبخیر آب و جداشدن سلولها، تردی ماده غذایی سرخ‌شده نیز حاصل می‌شود [۵]، که ضریب انتقال حرارت در این مرحله نقش مهمی را ایفا می‌کند.

یکی از موانع انتقال‌حرارت هنگام سرخ‌شدن، افزایش ضخامت پوسته‌است که باعث کاهش نرخ انتقال حرارت و به دنبال آن کاهش تشکیل بخار و کاهش آشفتگی جریان روغن می‌شود و مرز تبخیر آب را به تدریج به سمت داخل محصول حرکت می دهد[٦]. بررسی داده‌های مربوط به انتقال‌جرم براساس نرخ اتلاف آب، توانایی جابجایی آب داخل یک غذای درحال آبزدایی از تمامی سطوح و لبه‌های آن، جذب روغن، خروج مواد محلول در آب و ورود مواد قابل حل در روغن را نشان می دهد [۷] که دو مورد آخر به میزان نسبتا کم صورت می‌گیرد و در محاسبات معمولا ناچیز فرض می شود.

کاربرد مدل قانون فیک شامل تمام مکانیسم‌های دخیل در انتقال آب می‌باشد بنابراین محاسبه ضریب نفوذ موثر در فرایند سرخ‌کردن می‌تواند برای تمام مکانیسم‌های انتقال در نظر گرفته شود [۸]. برای این منظور در بسیاری از پژوهش‌ها با توجه به معادلات فیک و آرنیوس نتیجه گرفتند که انتقال‌جرم آب تابعی از زمان و دمای سرخ‌کردن قطعات محصول سرخ‌شده بوده و در دماهای بالا به علت افزایش سرعت خروج آب، جذب روغن کمتری صورت می‌گیرد [۹و ۱۰].

در این میان ابزار قدرتمند جهت بررسی روند مکانیسم انتقال‌حرارت و جرم، مدل‌سازی ریاضی و شبیه‌سازی نرم‌افزاری است. مدل‌سازی، اطلاعات لازم را در مورد پدیده‌های درگیر در فرآیند سرخ‌کردن ارائه می‌کند. هدف اصلی مدل‌سازی ریاضی، توصیف انتقال‌حرارت، جرم و اندازه‌حرکت در فرایند غذایی به کمک معادلات ریاضی و با حداکثر دقت ممکن می باشد [۳].

تحقیقات گسترده‌ای در ترکیب اصول انتقال‌حرارت و جرم برای توصیف پروفایل درجه حرارت، محتوی رطوبت و محتوی جذب روغن در یک محصول در فرآیند سرخ کردن عمیق انجام شده است: نتایج عددی بدست آمده در بررسی یک مدل دو بعدی ارائه شده برای فرایند سرخ‌کردن عمیق سیب‌زمینی در سرخ‌کن پیوسته، نشان داد که این مدل قابلیت کاربرد برای بهینه‌سازی شرایط سرخ‌کردن در فرآیندهای گوناگون را دارا می‌باشد و نیز می‌تواند به محققان در بدست-آوردن شرایط بهینه سرخ‌کردن محصولات مشابه کمک کند. ساختار فیزیکی و ریاضی مدل ارائه شده به گونه‌ای است که نه تنها امکان تعمیم و گسترش را دارا می‌باشد، بلکه می‌تواند در سایر مدل‌های غذایی نیز به کار برده شود[۱۱].

محققانی سیستم یکپارچه‌ای برای از دست‌دادن آب موادغذایی درنظر گرفتند که براساس مرزهای متحرک بود و از یک معادله واحد برای توصیف فرآیندهای آب‌زدایی غذاها با هندسه‌های مختلف استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که این روش توسعه‌یافته، می‌تواند درمورد انتشار رطوبت و همچنین برای پیش‌بینی انتقال‌حرارت و جرم در تمام فرآیندهای خشک کردن و سرخ‌کردن نیز استفاده گردد[۱۲].

در پژوهشی یک مدل چند فازی برای انتقال‌جرم و حرارت در فرایند سرخ‌کردن عمیق سیب‌زمینی در روغن توسعه داده شد که درمورد پیش‌بینی پارامترهای مهم کیفی مانند محتوی روغن و آکریل‌آمید تشکیل شده اطلاعات مفیدی ارائه کرد. این تحقیق علاوه بر ارائه اطلاعات مفید در مورد توسعه مدل، نتایج اعتبارسنجی و تحلیل حساسیت را به صورت کامل ارائه نمود [۱۳].

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-05-21]
[DOI: 10.52547/fsct.18.111.345]

محققانی بررسی ضرایب انتقال جرم و حرارت را در طول سرخ کردن عمیق به صورت مروری انجام دادند و روش‌های تعیین این ضرایب و عوامل موثر بر آنها را ارائه کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که سرخ‌کردن عمیق به شدت، توسط ضرایب انتقال حرارت و جرم کنترل می شود و این ضرایب را به عنوان مهمترین پارامترها در مدل سازی عنوان کردند [۲]. در مطالعه‌ای، مدل سینتیکی جذب روغن در سیب‌زمینی توسعه داده شد. این مدل اثر پارامترهای مختلف بر محتوی جذب روغن مانند فشار را بررسی نمود و اصول حاکم بر روند بررسی سینتیک جذب روغن طی فرایند خنک شدن را نیز ارائه کرد[۱٤].

در پژوهشی، مدل‌سازی فرآیند ناپیوسته سرخ‌کردن عمیق چیپس ترتیلا انجام شد و پارامترهای دما، محتوی رطوبت و میزان جذب روغن به عنوان تابعی از زمان سرخ‌کردن محاسبه گردید. در این پژوهش از روش تفاضل محدود در حل معادلات دیفرانسیلی استفاده شد. برای اعتبارسنجی مدل، دمای چیپس و دمای روغن در طول سرخ‌کردن اندازه‌گیری شده و با مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل مقایسه گردید. نتایج بدست آمده نشان داد که مدل ارائه شده در تطابق با پارامترهای آزمایشگاهی سرخ‌کردن چیپس است [۱۵].

از آنجایی که روشهای زیادی برای اندازه‌گیری و تعیین ضرایب انتقال حرارت و جرم وجود دارد و به دلیل تنوع گسترده‌ای از عوامل مؤثر بر آنها، در مطالعه حاضر ضرایب مهم فرایند سرخ کردن عمیق خلال‌های سیب‌زمینی مانند ضریب جذب روغن، ضریب نفوذ موثر رطوبت و ضریب انتقال حرارت جابجایی و همچنین انرژی فعال‌سازی محاسبه گردید. سپس مختصات دکارتی به دلیل هندسه مکعبی سیب‌زمینی برای مدل‌سازی انتخاب شد. معادلات ریاضی برای فرآیند انتقال‌جرم آب و روغن و انتقال‌حرارت در مختصات دکارتی حل شده و نتایج معادلات در شبیه‌سازی نرم‌افزاری استفاده شد، همچنین پروفایل‌های بدست‌آمده نیز ارائه گردید.

۲- مواد و روش کار

۲-۱-مواد

در مطالعهٔ حاضر، سیب‌زمینی واریته آگریا از بازار محلی خریداری شد. پس از شستشو، پوست‌گیری شده و به‌صورت خلال‌هایی در ابعاد ٦۰mm طول و ٦*٦ mm عرض و ضخامت به شکل مکعب برش داده شد. روغن سرخ‌کردنی آفتابگردان بهار به عنوان واسطه سرخ‌کردن برای تهیه نمونه‌ها مورداستفاده قرار گرفت.

۲-۲-روش کار

۲-۲-۱-مرحله اول

عملیات سرخ‌کردن در یک سرخ‌کن خانگی (برند فیلیپس) انجام شد. فرایند سرخ‌کردن در سه سطح دمایی ۱۵۰ ، ۱٦۰ و ۱۷۰°C با قرار دادن ترموکوپل K در روغن و قراردادن ترموکوپل سه کاناله T در مرکز و کنارهای چپ و راست خلال سیب زمینی تا رسیدن نمونه به رنگ دلخواه با ثبت دما در فواصل زمانی ۱۰ ثانیه انجام گرفت. داده‌های دمایی در سه نقطه از خلال سیب زمینی بوسیله دیتالاگر متصل به سرخ‌کن ثبت گردید. دمای اولیه سیب زمینی ۲۰°C بود.

۲-۲-۲-مرحله دوم

به دلیل عدم وجود اختلاف معنی‌دار بین دمای نقاط مختلف خلال، به منظور تعیین ضرایب انتقال‌حرارت و جرم، داده‌های نموداری مربوط به ترموکوپل تعبیه شده در مرکز نمونه به عنوان پارامتر مبنای محاسبات انتخاب گردید. برای همین منظور خلال سیب‌زمینی در سه دمای روغن مجددا سرخ شد و در هر دمای روغن، پنج بازه زمانی (سه بازه زمانی مربوط به بخش صعودی نمودار و دو بازه زمانی مربوط به زمانی که آب ماده غذایی به دمای جوشش رسیده و افزایش دما داخل ماده غذایی وجود نداشت و انرژی موجود در داخل ماده غذایی فقط صرف تبخیر آب می‌گردید) نمونه برداری شد و میزان رطوبت و جذب روغن در پنج زمان برای هر دمای روغن محاسبه گردید.

۲-۳-آزمون‌ها

۲-۳-۱-اندازه گیری رطوبت

خلال‌های سیب زمینی سرخ‌شده طبق دستورالعمل مخصوص اندازه‌گیری رطوبت نمونه‌های چرب، در آون با دمای ۱۰۳°C به مدت ۱٦ ساعت خشک گردید [۱٦].

۲-۳-۲-تعیین جذب روغن

تغییرات محتوی روغن خلال سیب زمینی طی سرخ‌کردن در دماهای مختلف در زمان‌های انتخابی اندازه‌گیری شد. برای این منظور نمونه خشک حاصل از اندازه‌گیری رطوبت برای اندازه‌گیری روغن به روش سوکسله استفاده گردید. استخراج

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-05-21]

[DOI: 10.52547/fsct.18.111.345]

بوسیله حلال پترولیوم اتر به مدت ٦ ساعت انجام گرفت[١٦].

٢-٤-معادله انتقال رطوبت و تعیین ضرایب آن

معادله قانون دوم فیک [١٩-١٧] که برای انتقال جرم در مورد خروج رطوبت از سیب زمینی بکار برده شد عبارت است از:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff}\frac{\partial^2 M}{\partial z^2} \qquad (1)$$

معادله١ معادله ای یک بعدی بوده و بعد ضخامت یا ارتفاع خلال(z)، مختصه اصلی مدل‌سازی جرم درنظر گرفته شد که در آن:

M : محتوی رطوبت در لحظه t (gr.H_2O/gr.db)

Z : مختصه فضایی(m)

D_{eff} : ضریب نفوذ مؤثر رطوبت (m^2/s)

t : زمان (s)

همچنین یک معادله دیفرانسیل پاره‌ای یا جزئی[1] (PDE) است که برای حل آن بدلیل اینکه نسبت به مکان (z) از مرتبه دوم مشتق می‌باشد، دو شرط مکانی موسوم به شرط مرزی(B.C)[2] و بدلیل اینکه نسبت به زمان (t) از درجه اول مشتق است یک شرط زمانی موسوم به اولیه[3](I.C) نیاز دارد [٢٠] که به شکل زیر بیان می شوند:

$$I.C \rightarrow M(z,0) = M_0$$

$$B.C\ (1) \rightarrow M(0,t) = Finite$$

$$B.C\ (2) \rightarrow D_{eff}\left[\frac{\partial M(L,t)}{\partial z}\right] = Kc\ [M(L,t) - M_\infty]$$

M_∞: رطوبت نهایی (تعادلی) نمونه (gr. H_2O/gr. db)

M_0 : رطوبت اولیه نمونه (gr. H_2O/gr. db)

K_C: ضریب انتقال‌جرم (m/s)

L : نصف ضخامت خلال (m)

از طرفی نسبت رطوبت (مقداررطوبت بدون بعد) با MR حذف M_∞ رطوبت نهایی نمونه (که معادل صفر است) به شکل زیر تعریف شده است :

$$MR = \frac{M - M_\infty}{M_0 - M_\infty} = \frac{M}{M_0} \qquad (2)$$

محتوی رطوبت، مطابق قانون دوم فیک تابعی از مکان و زمان درنظر گرفته شد. سه روش حل ترسیمی، تحلیلی و عددی [٢٠] برای حل معادلات دیفرانسیلی پاره ای وجود دارد که روش عددی و از بین روشهای حل عددی، روش جداسازی متغیرها[4] [٢١] برای حل این معادله انتخاب گردید. با حل معادله١ و جایگذاری معادله ٢ و شرایط مرزی و اولیه در آن، رابطه مربوط به رطوبت بدون بعد به شکل زیر استخراج گردید [٢٢و ٢٣].

$$MR = \frac{M}{M_0} = \frac{8}{\pi^2} exp\left(-\frac{\pi^2\ Deff\ \ t}{4L^2}\right) \qquad (3)$$

به دلیل اینکه در مرکز خلال تقارن وجود دارد بررسی و اعمال شرایط مرزی در نصف ضخامت آن صورت می‌گیرد. همچنین از آنجائیکه حین کاهش رطوبت، روغن جذب می‌گردد و چروکیدگی قابل ملاحظه‌ای اتفاق نمی‌افتد، ضخامت را ثابت فرض کرده و در تعیین ضریب نفوذ مؤثر بجای ضخامت متناسب با زمان t، نصف ضخامت اولیه استفاده شد. معادله3 به صورت یک تابع نمایی [5] (exp) است که با ln گیری از آن، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت D_{eff} را می‌توان محاسبه کرد. در هر دمایی، این ضریب با رسم نمودار ln (MR) به عنوان تابعی از زمان تعیین می شود. ضریب نفوذ مؤثر رطوبت همان شیب زاویه بخش خطی نمودار می باشد که در پژوهش حاضر محاسبه آن نیز برهمین اصول انجام گرفت.

٢-٥-معادله جذب روغن و تعیین ضرایب آن

روند محاسبه ضریب جذب روغن D_{oil} مطابق محاسبه ضریب نفوذ موثر رطوبت و با استفاده از قانون دوم فیک [١٧و ١٨] می باشد. تنها تفاوت در این است که مقدار روغن اولیه در خلال برعکس رطوبت که مقدار معینی دارد معادل صفر می باشد و با گذشت زمان محتوی روغن (برعکس رطوبت که کاهش پیدا می کند) در حال افزایش است. همچنین راستای نفوذ روغن به جای Z (خروج رطوبت) در راستای Z- (ورود روغن) می باشد لذا به طرف دوم قانون فیک منفی افزوده می شود (پژوهش حاضر).

$$\frac{\partial O}{\partial t} = -D_{Oil}\left(\frac{\partial^2 O}{\partial z^2}\right) \qquad (4)$$

با تعریف شرایط مرزی و اولیه به شکل زیر:

$$I.C \rightarrow O\ (z,0) = O_0 = 0$$

$$B.C\ (1) \rightarrow O\ (0,t) = finite$$

$$B.C(2) \rightarrow D_{oil}\left(\frac{\partial\ O(L,t)}{\partial z}\right) = -K'_C\ [O(L,t) - O_{eq}]$$

O: محتوی روغن در لحظه t (gr. Oil/gr. db)

D_{oil} : ضریب جذب روغن (m^2/s)

1. Partial Differential Equation
2 . Boundary Condition
3 . Initial Condition
4. Separation of Variables Method
5 . Exponential

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-05-21]
[DOI: 10.52547/fsct.18.111.345]

O_0 : محتوی روغن اولیه نمونه (برابر صفر)

O_{eq} : محتوی روغن تعادلی نمونه (gr. Oil/gr. db)

K'_C: ضریب انتقال جرم روغن (m/s)

L: نصف ضخامت خلال(m)

مقدار روغن بدون بعد به شکل زیر تعریف می گردد:

$$OR = \frac{O_{eq} - O}{O_{eq} - O_0} \quad (5)$$

لذا معادله OR به شکل زیر ساده می شود:(O_0=O)

$$OR = \frac{O_{eq} - O}{O_{eq}} \quad (6)$$

با همان روش محاسبه ضریب نفوذ موثر، ضریب جذب روغن نیز به کمک روش جداسازی متغیرها [۲۱] برآورد گردید که پاسخ معادله به شکل زیر می باشد.

$$OR = \frac{Oeq - O}{Oeq} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 Doil}{4L^2 t}\right) \quad (7)$$

با Ln گیری از معادله ۷ ضریب جذب روغن قابل محاسبه است. در هر دمایی، ضریب جذب روغن با رسم نمودار Ln (OR) به عنوان تابعی از معکوس زمان (1/t) تعیین می شود. ضریب جذب روغن همان شیب زاویه بخش خطی نمودار می باشد [پژوهش حاضر].

۲-۶-بررسی اثر دما بر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و تعیین انرژی فعال‌سازی

تغییرات ضریب نفوذ موثر با دما به کمک رابطه آرنیوس محاسبه شد.

$$D_{eff} = Do\, exp\left(-\frac{\pi^2\ Ea\ t}{RT}\right) \quad (8)$$

در این معادله E_a انرژی فعال‌سازی است که بیشتر به خصوصیات شیمیایی ماده مورد نظر بستگی دارد؛ درحالی‌که D_0 فاکتور پیش نمایی[6] است که بستگی به ویژگی‌های فیزیکی ماده مورد آزمایش دارد. R ثابت جهانی گازها بوده و برابر با j/mol.k8.314 می باشد و T دمای مطلق (K) است. مقادیر انرژی فعال‌سازی و D_0 را می‌توان از رسم منحنی $Ln\ D_{eff}$ به عنوان تابعی از 1/T به دست آورد که شیب این منحنی برابر با -Ea/R و عرض از مبدأ آن $Ln\ D_o$ است [۸].

۲-۷-تخمین ضریب انتقال حرارت جابجایی فرایند سرخ کردن

کل حرارت منتقل شده بر حسب J/s از روغن به سطح برش‌های سیب زمینی با رابطه ($hA\Delta T_1$) برابر است که برای حرارت دهی سیب زمینی با ($\dot{m}cp\Delta T_2$) و برای تبخیر آب با ($\Delta H\ .\dot{W}$) محاسبه می‌شود. بنابراین ضریب انتقال حرارت جابجایی با استفاده از رابطه زیر تخمین زده شد:

$$hA\Delta T_1 = \dot{m}\ cp\ \Delta T_2 + \Delta H.\dot{W} \quad (9)$$

که در آن h ضریب انتقال حرارت جابجایی روغن برحسب $W/m^2.K$ ، A مساحت جانبی سیب زمینی برحسب m^2، ΔT_1 اختلاف دمای روغن و برش‌های سیب زمینی بر حسب K در زمان t بر حسب s ، $\dot{m}$ تغییر جرم برش‌ها با گذشت زمان بدلیل کم شدن آب آنها بر حسب kg /s ، cp ظرفیت گرمایی ویژه سیب زمینی در زمانهای مختلف سرخ کردن برحسب j/kg.k، $\dot{W}$نرخ کاهش آب محصول Kg/s ، ΔT_2 اختلاف دمای سیب زمینی بر حسب K و ΔH گرمای نهان تبخیرآب در نمونه به مقدار kj/kg ۲۲۵۷ [۲۴] در دمای ۱۰۰ °C در نظر گرفته شد.

۲-۸-توسعه مدل‌سازی انتقال حرارت

در این پژوهش مدل‌سازی بر اساس فرضیات ذیل انجام گرفته است:

- خلالهای سیب‌زمینی همگن درنظر گرفته شد و توزیع رطوبت و دمای اولیه در تمامی برش‌ها یکسان بود.
- اثر چروکیدگی کلی در طول سرخ‌کردن نادیده گرفته شد و نمونه به صورت متقارن سرخ گردید.
- انتقال حرارت و جرم تنها در بعد ضخامت (عمود بر سطح قطعه که با مختصه z بیان شده است) بررسی گردید.
- انتقال حرارت درون خلال از طریق هدایت و در روغن از طریق جابجایی انجام گرفت.
- بدلیل اینکه گرمای موردنیاز برای واکنش‌های شیمیایی بعنوان مثال ژلاتینه شدن نشاسته و دناتوره‌شدن پروتئین در مقایسه با گرمای موردنیاز برای تبخیر آب کوچک است در مطالعه حاضر نادیده گرفته شد.
- درجه حرارت سرخ‌کن حین فرایند ثابت بود.
- تلفات حرارتی به محیط قابل اغماض بود.

با استفاده از معادله انتقال‌حرارت در سیستم دکارتی(x,y,z) مدل‌سازی انجام گرفت. علت انتخاب سیستم دکارتی، مکعبی بودن هندسه نمونه بود که معادله مربوط به آن در مختصات سه بعدی به شکل زیر بیان می شود [۲۰].

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \left(\frac{1}{\alpha}\right)\frac{\partial T}{\partial t} \quad (10)$$

$$T = T(x, y, z, t) \quad (11)$$

T دما (K)، α ضریب پخش گرمایی(m^2/s)، x,y, z ابعاد

6. Pre-exponential

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-05-21]

[DOI: 10.52547/fsct.18.111.345]

(m) و t زمان (s) است. α با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد: [۲۰].

$$\alpha = \frac{K}{\rho\, C_p}$$

K : ضریب هدایت حرارتی (W/m^2.K)، ρ (kg/ m^3) چگالی و cp (J/kg. K) ظرفیت حرارتی ویژه سیب زمینی است: [۲۵]

C_P=3450 (J/kg .K)

در مورد K و ρ :

ρ =1157 (kg/m^3) [پژوهش حاضر]

[۲۶] K=0.95 (W/m .K)

پس از محاسبه α، با اندازه‌گیری دما در نقاط مختلف خلال به کمک ترموکوپل‌ها، بدلیل اینکه اختلاف دمای چشمگیری ثبت نشد و دمای مرکز و کناره‌های سیب‌زمینی باهم برابر شدند، ابعاد y و x حذف شد و تنها بعد ضخامت یا ارتفاع (z) به عنوان بعد اصلی در مدل‌سازی انتخاب گردید و معادله ۱۰ به شکل زیر ساده سازی شد:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \left(\frac{1}{2.38\times10^{-7}}\right)\frac{\partial T}{\partial t} \quad , \quad T = T(Z,t) \quad (12)$$

که معادله دیفرانسیل جزئی با مرتبه دوم مشتق در بعد z و مرتبه اول مشتق در بعد زمان است، بنابراین حل آن دو شرط مرزی و یک شرط اولیه نیاز دارد:

۲-۸-۱-شرایط مرزی

۱- تقارن در مرکز سیب زمینی (شرط مرزی نوع دوم[۷])

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

۲- سطح سیب زمینی در معرض جابجایی (شرط مرزی نوع سوم[۸])

$$z = 3mm\ (\text{نصف ضخامت خلال}) \rightarrow K\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right) = h(T - T_{oil})$$

T_{oil} دمای روغن شامل ۱۵۰، ۱۶۰ و ۱۷۰ °C است که یک دما برای ارائه محاسبات انتخاب گردید و h ضریب انتقال حرارت جابجایی روغن می باشد که در بخش قبلی بحث شده است:

فرض:(T_{oil}=150$^{\circ C}$)

۲-۸-۲-شرط اولیه(دمای اولیه خلال)

$$I.C \rightarrow T(z,0) = 20^{\circ C}$$

۲-۸-۳-روش جداسازی متغیرها[۲۱]

جواب معادله ۱۲ :

$$T(z,t) = [C_1 \cos(\beta z) + C_2 \sin(\beta z)][\exp.(-2.38\times10^{-7}\beta^2 t \quad (13)$$

که درآن β جواب معادله مشخصه می باشد. با جایگذاری شرایط مرزی و اولیه، جواب نهایی معادله ۱۲ به شکل زیر استخراج گردید.

$$T(t) = -130\exp.(-0.0017ht) + 150 \quad (14)$$

که دما برحسب درجه سانتیگراد و زمان بر حسب ثانیه می باشد. با جایگذاری h های مربوط به زمانهای متفاوت، دمای خلال محاسبه شده و با داده های اندازه‌گیری شده توسط ترموکوپل مقایسه گردید.

۳-نتایج و بحث

۳-۱-بررسی تغییرات دمای مرکز و کناره‌های نمونه

نمودار۱ تغییرات دمای مرکز و کناره‌های چپ و راست نمونه را هنگام سرخ‌کردن در دمای ۱۵۰°C نشان می‌دهد. مطابق این نمودار افزایش دما در کناره‌های راست و چپ خلال مانند تغییرات دمای مرکز می‌باشد و تغییرات چندانی مشاهده نشد. با رسیدن دمای نمونه به نقطه جوش آب، تغییرات دما در طول فرایند سرخ کردن ثابت مانده است.

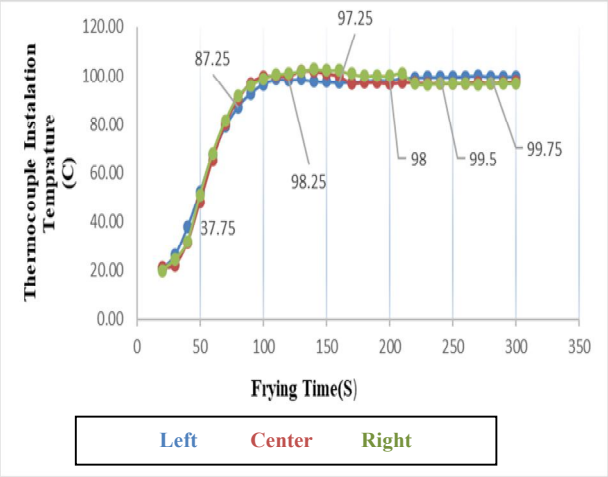


Fig 1 Comparison of temperature changes in different parts of the potato strip during frying at a constant oil temperature 150◦C

مقایسه دمای مرکز با کناره‌های چپ و راست نمونه در هرسه دمای روغن انجام گرفت و نتایج یکسانی بدست آمد. لذا دمای مرکز نمونه، مبنای محاسبات درنظر گرفته شد. خلاصه ویژگیهای فرایند سرخ‌کردن در هر سه دمای روغن و مقایسه آنها در جدول ۱ آمده است:

7 . Neumann
8. Robin

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-05-21]
[DOI: 10.52547/fsct.18.111.345]

Table 1 Summary of process and comparison in three oil temperatures

Oil Temperature (°C)	Time to reach the boiling point of water(s)	Process completion time (S)
150	90	320
160	82	300
170	71	280

با توجه به جدول۱، زمان رسیدن به محدوده‌ی نقطه‌جوش آب با افزایش دمای روغن کاهش یافت. زمان اتمام عمل سرخ کردن، به ازای افزایش ۱۰ درجه‌ای در دمای روغن، با کاهش زمان ۲۰ ثانیه‌ای همراه بود. دوره دمای ثابت، تقریبا در هر سه دما از ثانیه صدم آغاز شده و افزایش دما به سمت دماهای بالای روغن مشاهده نشد.

۳-۲-نتایج محتوی رطوبت و روغن و ارزیابی ضریب نفوذ موثر رطوبت و ضریب جذب روغن

سرخ‌کردن عمیق به شدت، توسط ضرایب انتقال‌حرارت و جرم کنترل می شود و این ضرایب را می‌توان به عنوان مهمترین پارامترها در مدل‌سازی عنوان کرد [۲]. لذا این ضرایب به عنوان پارامترهای موردنیاز در مدل‌سازی ارزیابی شد و در پژوهش حاضر محاسبه گردید. بدین منظور، محتوی رطوبت و میزان جذب روغن مورد بررسی تفصیلی قرار گرفت. در نمودار ۲ تغییرات محتوی رطوبت خلال سیب‌زمینی هنگام سرخ‌کردن به عنوان تابعی از زمان فرآیند نشان داده شده است. شدت تبخیر در۱۲۰ ثانیه ابتدایی فرآیند بیشتر است که به دلیل تبخیر ناگهانی آب آزاد سطحی نمونه می باشد. با گذشت زمان آهنگ کاهش رطوبت محدود شده و تقریبا ثابت گردید. در این خصوص نتایج مشابهی توسط محققان بدست آمده است [۱۰و ٦و ۲۷].

مطابق نمودار ۳ با افزایش دمای روغن، میزان جذب آن کاهش یافت که در تحقیقات متعددی به این کاهش با دلایل مختلفی از قبیل تشکیل پوسته یا مانع شدن رطوبت از ورود روغن به نمونه اشاره شده است[٦و ۲۸].

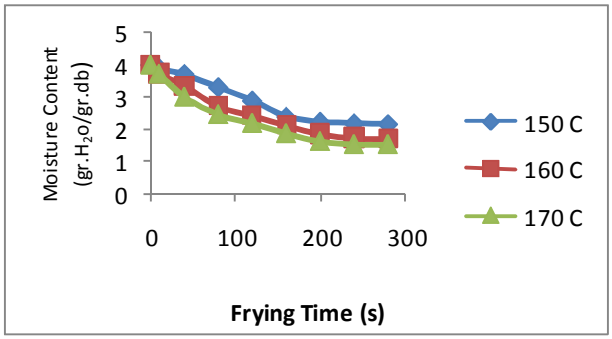


Fig 2 Variation of moisture content during frying at three different oil temperatures

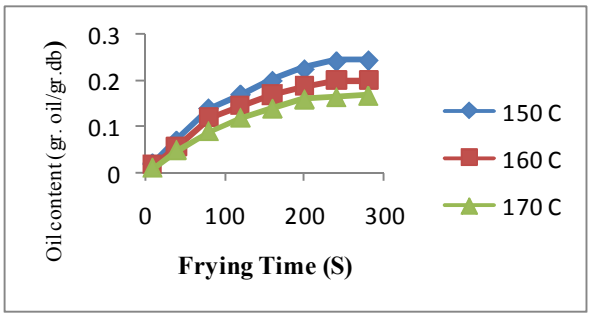


Fig 3 Variation of oil content during frying at three different oil temperatures

بررسی دو نمودار ۲ و۳ به طور همزمان نشان می‌دهد که محتوی جذب روغن تقریبا با رسیدن دمای ماده غذایی به نقطه جوش آب که حدودا بعد از ۱۲۰ ثانیه اتفاق می‌افتد کاهش می‌یابد که می‌توان به فشردگی ساختار ماده‌غذایی نسبت داد. همچنین شدت از دست‌دادن رطوبت در دماهای بالای روغن، بیشتر می‌باشد. با رسم نمودار Ln(MR) برای هر سه دمای روغن و با محاسبه شیب خطوط برازش شده آن نسبت به زمان، ضریب نفوذ موثر رطوبت همچنانکه قبلا بحث شد محاسبه گردید. شیب نمودار که بارابطه $\pi^2 D_{eff}/4L^2$ مساوی می‌باشد مستقیما این ضریب را مشخص می کند. همچنین انرژی فعال‌سازی فرآیند نیز به کمک معادله آرنیوس قابل محاسبه می باشد که اطلاعات این برازش در جدول ۲ نشان داده است.

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-05-21]

[DOI: 10.52547/fsct.18.111.345]

Table 2 Regression information of the kinetic model in moisture reduction

Oil Temperature (°C)	Ln(MR)-t	D_{eff}(m²/s)	Ea (kJ/mole)
150	y= -0.0025x-0.0128 R² = 0.9487	9.12816E-09	
160	y= -0.0032x-0.0677 R² = 0.964	1.1684E-08	25.8668
170	y= - 0.0036x-0.1118 R² = 0.9409	1.31445E-08	

انرژی اکتیواسیون بدست آمده kJ/kg ۲۵.۸٦٦۸بود که مقایسه آن با پژوهشهای سایر محققین [۳۰و ۲۹] تطابق داده‌های ضریب نفوذ موثر و انرژی فعالسازی را نشان می دهد. به عنوان مثال مقدار ضریب نفوذ موثر متداول که در اکثر مقالات به عنوان مرجع در نظر گرفته شده و در مدل‌سازی استفاده می گردد 2.2×10^{-8} می باشد که در تطابق با داده‌های پژوهش حاضر است [۳۱].

همچنانکه در جدول ۲ مشاهده شد، ضریب نفوذ موثر رطوبت با افزایش دمای روغن از دمای ۱۵۰ تا °C ۱۷۰در حال افزایش است. علت این است که با افزایش دما، سطح ماده غذایی زودتر خشک شده و نیروی محرکه برای نفوذ رطوبت داخل خلال به سطح، افزایش می یابد لذا رطوبت با سرعت بیشتری خارج می گردد. تابعیت ضریب نفوذ موثر با دما در نمودار٤ نشان داده شده است که معادله این تابعیت به صورت $D_{eff}=(2\times10^{-10})\,T-8\times10^{-8}$ و خطی با شیب مثبت می باشد که سیر صعودی آن در نمودار 4 نشان داده شده است.

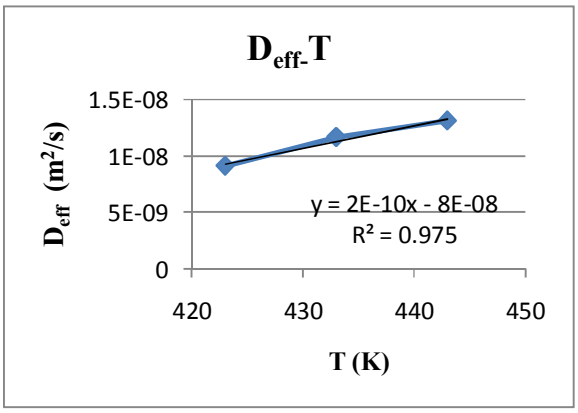


Fig 4 The variation of effective moisture diffusivity with frying temperature

در مورد محتوی جذب روغن و سینتیک مربوط به آن به ترتیب برای سه دمای روغن، اطلاعات شیب خطوط برازش شده Ln(OR) نسبت به 1/t و ضریب جذب روغن محاسبه گردید که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است.

Table 3 Regression information of the kinetic model in oil absorption

Oil Temperature (°C)	Ln(OR)-1/t	D_{Oil}(m²/s)
150	y= - 23.401x-0.1371 R² = 0.9245	1.52E-05
160	y= - 24.78x-0.1832 R² = 0.9073	1.43E-05
170	y= - 28.231x-0.1016 R² = 0.9493	1.26E-05

همچنانکه در جدول ۳ مشاهده شد ضریب جذب روغن با افزایش دمای روغن از دمای ۱۵۰ تا °C ۱۷۰ در حال کاهش است. علت این است که با افزایش دما، نفوذ رطوبت داخل خلال به سطح افزایش می یابد و همچنین پوسته تشکیل می شود که همین مسئله مانع نفوذ روغن می‌شود که از نمودار ۳ نیز کاهش جذب با افزایش دمای روغن قابل مشاهده می باشد. نتیجه آن، کاهش ضریب جذب روغن با افزایش دما می باشد. بحث افزایش یا کاهش جذب روغن با افزایش دما چالش برانگیز است. محققانی

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-05-21]

[DOI: 10.52547/fsct.18.111.345]

کاهش جذب روغن با افزایش دما را گزارش کردند و علت آن راتشکیل پوسته به عنوان مانع خروج رطوبت می دانند [٦]. بعضی پژوهشگران هم افزایش جذب روغن با افزایش دما را گزارش کردند [۳۲]. در اکثر کارهای پژوهشی انجام شده به جای محاسبه ضریب جذب روغن (D_{oil}) از طریق مدل‌سازی که روش نواورانه پژوهش حاضر می باشد ضریب انتقال جرم روغن (K'_c) را از روش سینتیکی محاسبه کرده اند. به عنوان نمونه مقدار (K'_c) برای سیب زمینی مکعبی در محدوده دمایی ۱۵۰-۱۹۰ $^{\circ}C$ در گزارشات 11.2×10^{-6}_ 20.7×10^{-6} (m/s) و برای سیب زمینی دیسکی در همین محدوده دمایی 5.51×10^{-6}_ 9.7×10^{-6} (m/s) گزارش شده است[۳۳و ۳٤] در ادامه تابعیت ضریب جذب روغن با دما در نمودار ۵ نشان داده شده است که معادله این تابعیت به صورت $D_{oil} = 7\times10^{-5} + (-10^{-7})T$ و خطی با شیب منفی می باشد که در نمودار 5 ، سیر نزولی آن با افزایش دما قابل مشاهده است.

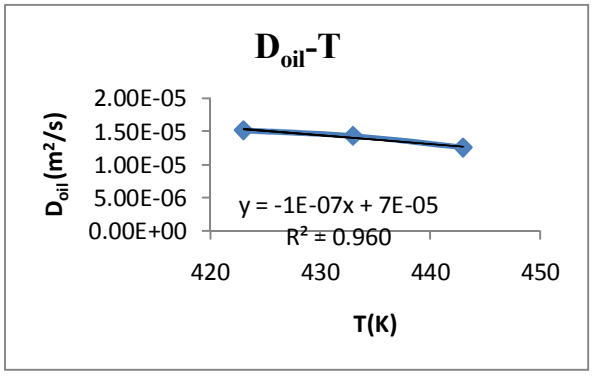


Fig 5 The variation of oil absorption coefficient with frying temperature

۳-۳-نتایج ضریب انتقال حرارت جابجایی

نمودار ٦ تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی را در سه دمای سرخ کردن نسبت به زمان نشان می‌دهد:

با توجه به نمودار ٦ با افزایش دمای روغن، ضریب انتقال حرارت جابجایی افزایش می یابد. همچنین ضریب انتقال‌حرارت جابجایی در زمان‌های اولیه فرآیند بیشتر بوده و با سپری شدن زمان سرخ‌کردن این عدد نیز کاهش می‌یابد.

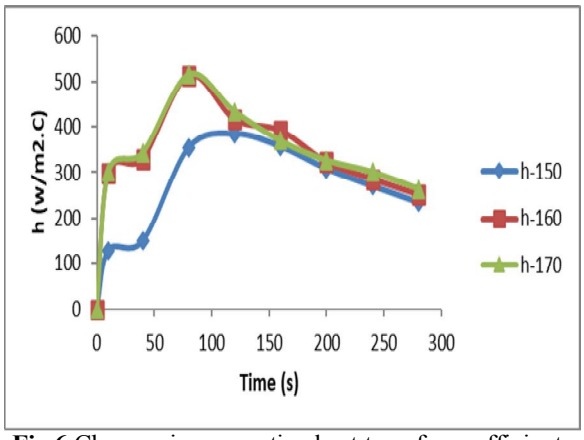


Fig 6 Changes in convective heat transfer coefficient with time at three oil temperatures

در مطالعه‌ای طی سرخ‌کردن قطعات سیب‌زمینی مشاهده شد که ضریب انتقال‌حرارت با افزایش دمای روغن زیاد شده و بعد از تشکیل پوسته با کاهش نرخ تبخیر که عامل اصلی ایجاد تلاطم در روغن است، ضریب انتقال حرارت جابجایی نیز کاهش یافت [۳۵] که همین روند در پژوهش حاضر نیز مشاهده شد.

مقدار ضریب انتقال حرارت محاسبه شده در این پژوهش در بازه ۱۲۸-۵۱۵ $W/m^2.K$ قرار دارد که قابل مقایسه با مقادیر مشابه در سایر مقالات می باشد. به عنوان نمونه در پژوهشی ضرایب انتقال حرارت جابجایی برای فاز غیرجوششی(مرحله تقریبا ثابت نمودار سرخ‌کردن) در محدوده ۲۵۰-۳۰۰ $W/m^2.K$ قرار دارد [۳٦و ۳۷] در مطالعه‌ای دیگر مقدار $W/m^2.K$ ۳۰۰ در شروع جوشش و مقداراوج آن $W/m^2.K$ ۱٤۰ ± ۱۱۰۰ حین سرخ‌کردن نیز گزارش شده است [۳۸]. در پژوهشی دیگر مقدار این ضریب در بازه $W/m^2.K$ ۷۵۰-٤٤۳ محاسبه شده است [۳۹].

بیشترین مقدار h مربوط به ثانیه صد در هر سه دمای سرخ کردن می‌باشد. مقادیر ضریب انتقال حرارت بدست آمده در سرخ کردن وابستگی خطی [۳۹] به نرخ کاهش آب m نمونه دارد (که این تابعیت به عنوان نمونه برای دمای روغن ۱٦۰ $^{\circ}C$ در نمودار 7 نشان داده شده است) و میزان حداکثر آن همزمان با رسیدن به حداکثر نرخ تبخیر آب و تلاطم روغن مشاهده می‌شود.

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 انتقال‌حرارت ثابتی بدست می‌آید که

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-05-21]

[DOI: 10.52547/fsct.18.111.345]

نشان دهنده وابستگی شدید این فاکتور به وجود حرکت حجمی یا آشفتگی جریان در محیط حرارتی است. با کاهش دما مقدار h نیز کاهش می‌یابد که این روند در نمودار ٦ قابل مشاهده می باشد.

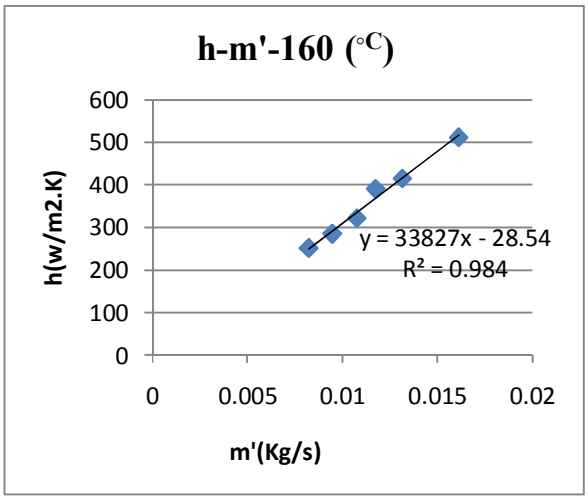


Fig 7 Linear dependence of water reduction rate with convective heat transfer coefficient

٣-٤-نتیجه مدل‌سازی انتقال حرارت

جواب معادله بدست آمده در بخش مدل‌سازی انتقال حرارت (معادله ١٤) در نمودار ٨ ترسیم شده و با داده های آزمایشگاهی دمای مرکز نمونه مقایسه گردید. این معادله تطابق خوبی نشان داد.

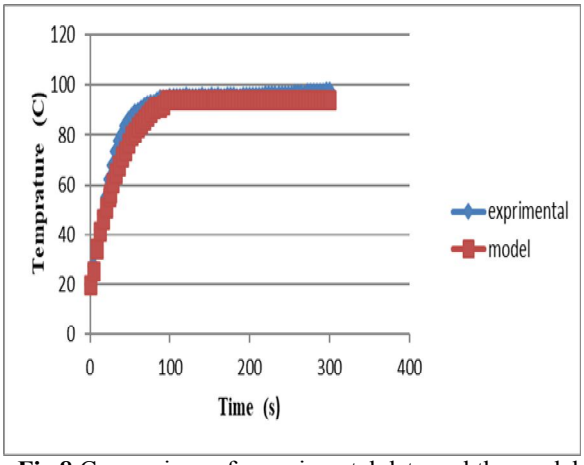


Fig 8 Comparison of experimental data and the model

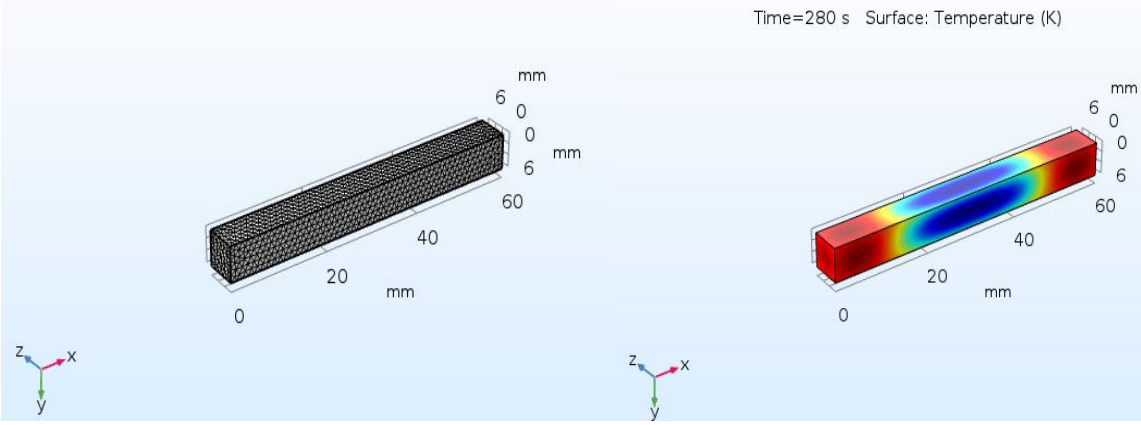
٣-٥-نتایج بررسی نرم افزاری فرایند

خلال سیب‌زمینی در ابعاد معین به کمک نرم‌افزار کامسول نسخه 5.3a طراحی شد و مش بندی آن انجام گرفت. مدل غذایی و ساختار مش‌های مختلف به کاررفته در شبیه‌سازی سه بعدی خلال سیب زمینی با ابعاد mm ٦ * ٦ *٦٠ در شکل٩ نشان داده شده است: a. مش بسیار ظریف، b . مش نرمال و c. مش بسیار درشت.

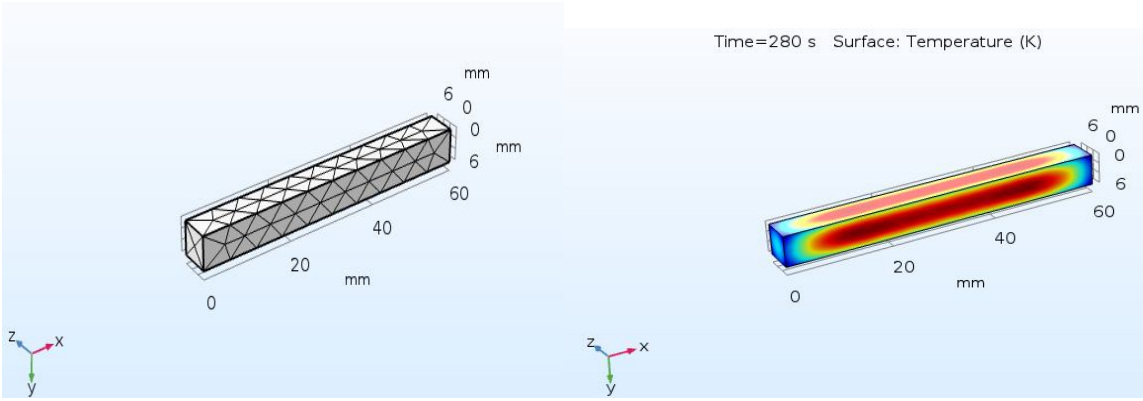
با مقایسه تأثیر انواع مختلف مش‌بندی در پیش‌آنالیزها و عدم یافتن منابع بررسی‌کننده این زمینه، از مش بسیار درشت در شبیه‌سازی استفاده شد زیرا این مش‌بندی توزیع یکنواخت دما را در مدل ایجاد می کرد که در تطابق با فرضیات بود. رنگهای سرد (سبز و آبی) بیانگر دمای پایین بوده و رنگهای گرم (قرمز و نارنجی) دمای بالا را نشان می دهند.

در شکلa- ٩ استفاده از مش بسیارظریف، توزیع غیریکنواخت دما در نتیجه نادرست را نتیجه داد. شکلb- ٩ یا مش نرمال، توزیع یکنواخت ولی نادرست دارد چون دماهای پایین را در سطوح و دماهای بالا را در داخل نمونه نشان می‌دهد درحالیکه هنگام سرخ‌شدن ابتدا سطوح گرم شده سپس گرما به داخل نمونه نفوذ می کند. شکل c- ٩ یا مش بسیار درشت، توزیع درست و یکنواخت را نشان می دهد چون سطوح و لبه های نمونه گرم‌تر - شده و سپس گرما به داخل آن نفوذ می کند. به منظور بالابردن وضوح توزیع دما، خلال بار دیگر بصورت دوبعدی در کامسول (بدلیل وجود تقارن در ابعاد mm ٣٠ طول و با نصف ضخامت یعنی mm ٣) طراحی گردید.

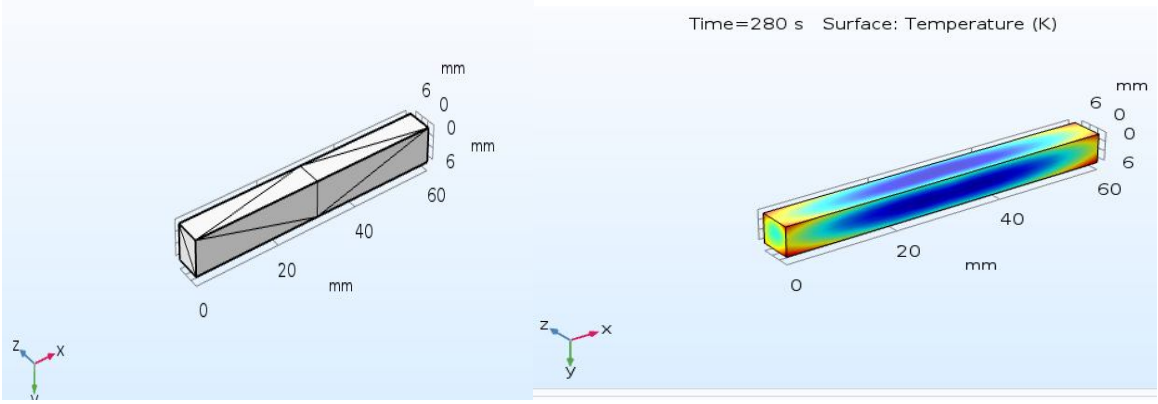
[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-05-21]
[DOI: 10.52547/fsct.18.111.345]



(9-a)



(9-b)



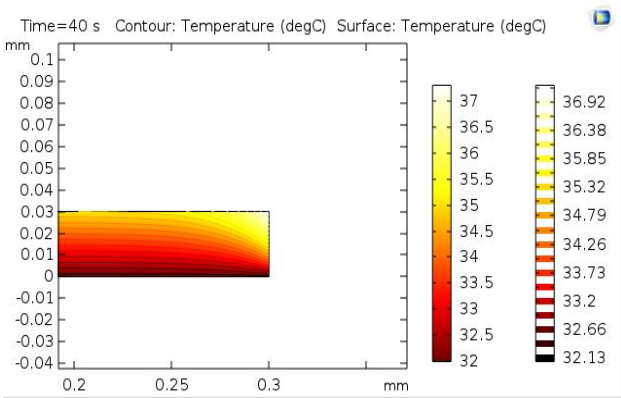
(9-C)

Fig 9 Food model and different mesh structure designed by COMSOL Multiphysics
a: Extremely fine mesh- b: Normal mesh -C: Extremely coarse mesh

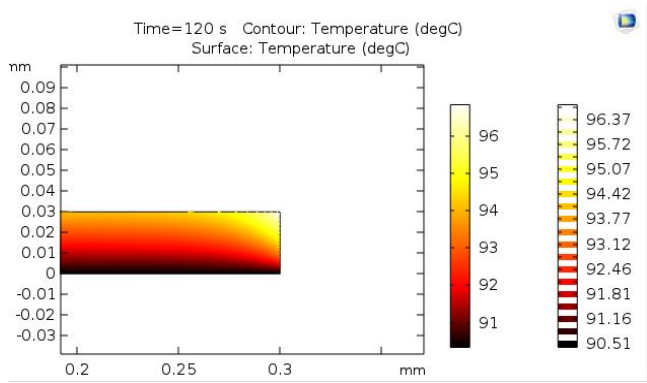
مدل‌سازی انتقال حرارت با این نرم‌افزار انجام گرفت و توزیع دما در خلال در کلیه زمان‌ها معین گردید. در پژوهش حاضر داده‌های مورد نیاز اندازه‌گیری و محاسبه شد و با استفاده از داده‌های محاسبه‌شده انتقال حرارت داخل خلال مدل‌سازی گردید و توزیع دمای بدست آمده در زمانهای مهم که تغییر دمای واضحی را نشان دادند شامل ۴۰، ۱۲۰ و ۲۸۰ ثانیه برای دمای روغن $^{\circ}C$ ۱۵۰در شکل ۱۰ ارائه گردید:

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-05-21]

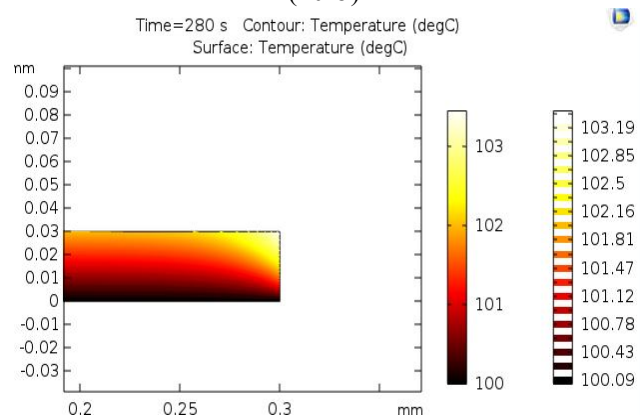
[DOI: 10.52547/fsct.18.111.345]



(10-a)



(10-b)



(10-c)

Fig 10 Heat transfer profiles obtained by COMSOL Multiphysics at T_{Oil}=150°C for a- 40 seconds, b- 120 seconds and c- 280 seconds

دمای ثبت شده بوسیله ترموکوپل همچنانکه در نمودار ۱ نشان داده شده است، برای زمانهای ٤٠، ۱۲۰ و ۲۸۰ ثانیه به ترتیب ۳۷.۷۵، ۹۸.۲۵ و ۹۹.۷۵°C است که درتطابق با توزیع دمای نرم افزاری می باشد. مهترین نکته بدست آمده از نمودار ۱۰ این است که حتی در زمان نهایی(۲۸۰ ثانیه) دمای داخل نمونه غذایی در محدوده °C ۱۰۰ و در سطح ماده نهایتا °C ۱۰۳ می باشد که در تطابق با این نکته است که دمای داخل ماده غذایی از دمای جوش آب فراتر نمی رود. خطوط موجود در داخل نمونه خطوط ایزوترم یا دماثابت را نشان می دهند که از مرکز به سمت سطح نمونه گسترش یافته‌اند. پژوهشگرانی شبیه‌سازی با روش المان محدود را برای تعیین ضرایب انتقال‌جرم فرایند سرخ‌کردن عمیق سیب‌زمینی انجام دادند و پارامترهای کاربردی را در انتقال‌جرم معرفی کرده و از نرم‌افزار کامسول برای این شبیه‌سازی بهره گرفته اند [٤٠]. محققانی شبیه‌سازی سه‌بعدی پدیده‌های انتقال سرخ‌کن ناپیوسته را در فرایند سرخ‌کردن عمیق انجام دادند و تاثیر دمای روغن را با استفاده از همین نرم افزار بررسی کرده و پروفایل‌های دمایی ارائه دادند که پروفایل‌های پژوهش حاضر نیز مشابه با همین موارد می باشد[۳]. در تحقیقی مدل‌سازی سرخ‌کن پیوسته در فرایند سرخ‌کردن عمیق با استفاده از همین نرم‌افزار انجام گرفت و توزیع دما، رطوبت و روغن در سرخ‌کن شبیه‌سازی شده و پروفایل‌های توزیع نیز ارائه گردید[۱۱]. تفاوت پژوهش حاضر با موارد ذکر شده در این است که اکثر پژوهش‌ها مدل‌سازی با کامسول را برای سیستم سرخ‌کن انجام دادند ولی در این تحقیق برای خود نمونه انجام شده است.

٤-نتیجه‌گیری

در اندازه‌گیری دمای مرکز و کناره‌های چپ و راست خلال، تغییرات دما معنی‌دار نبود لذا دمای مرکز در طول سرخ‌شدن به عنوان پارامتر موثر انتخاب گردید. ضرایب انتقال‌حرارت و جرم شامل ضریب نفوذ موثر رطوبت، ضریب جذب روغن و ضریب انتقال حرارت جابجایی و همچنین انرژی فعال‌سازی فرایند به عنوان پارامترهای موثر در مدل‌سازی درنظر گرفته شد. مقدار ضریب انتقال‌حرارت جابجایی محاسبه شده در این پژوهش در بازه $W/m^2.K$ ۵۱۵-۱۲۸ قرار داشت. مقدار آن در دماهای بالا به دلیل افزایش نرخ خروج رطوبت، بالاتر بوده و با سپری شدن زمان سرخ‌کردن، مقدار آن نیز کاهش یافت. این ضریب وابستگی

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-05-21]
[DOI: 10.52547/fsct.18.111.345]

خطی به نرخ کاهش آب نمونه داشت و میزان حداکثر آن همزمان با رسیدن به حداکثر نرخ تبخیر آب و تلاطم روغن مشاهده شد. با افزایش دمای روغن، میزان جذب روغن نمونه‌ها کاهش یافت. زمان اتمام فرایند سرخ‌کردن، به ازای افزایش ۱۰ درجه‌ای در دمای روغن، با کاهش زمان ۲۰ ثانیه‌ای همراه بود. بدلیل ناهمگن بودن ساختار موادغذایی مش‌بندی با مش بسیار درشت نتایج بهتری ارائه کرد. در زمان اتمام سرخ‌کردن دمای داخل نمونه غذایی در محدوده $۱۰۰^{\circ}C$ و در سطح ماده نهایتا $۱۰۳^{\circ}C$ بوده و دمای داخل ماده غذایی از دمای جوش آب فراتر نرفت.

۵-منابع

[1] Ghaderi, A., Dehghannya, J., & 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. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.08.035

[2] Safari, A., Salamat, R., & 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, Vol. 230, pp. 114–123. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.01.022

[3] Naghavi, E. A., Dehghannya, J., & 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. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.04.026

[4] Alvis, A., Vélez, C., Rada-Mendoza, M., Villamiel, M., & Villada, H. S. (2009). Heat transfer coefficient during deep-fat frying. Food Control, 20, 321–325. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2008.05.016

[5] Loon, W. Van. (2005). Process innovation and quality aspects of French fries Wil van Loon. PhD thesis Wageningen University, The Netherlands, 2005 – with summary in Dutch.

[6] Pedreschi, F., Hernandez, P., Figueroa, C., & Moyano, P. (2005). Modeling water loss during frying of potato slices. International Journal of Food Properties, 8, 289–299. https://doi.org/10.1081/JFP-200059480

[7] Debnath, S., Rastogi, N. K., Krishna, A. G. G., & Lokesh, B. R. (2009). Oil partitioning between surface and structure of deep-fat fried potato slices: A kinetic study. LWT - Food Science and Technology, 42(6), 1054–1058. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2009.01.006

[8] Troncoso, E., & Pedreschi, F. (2009). Modeling water loss and oil uptake during vacuum frying of pre-treated potato slices. LWT - Food Science and Technology,42(6),1164_1173. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2009.01.008

[9] Gupta, P., Shivhare, U. S., & Bawa, A. S. (2000). Studies on frying kinetics and quality of french fries. Drying Technology, 18(1–2), 311–321. https://doi.org/10.1080/07373930008917706

[10] Krokida, M. K., Oreopoulou, V., & Maroulis, Z. B. (2000). Water loss and oil uptake as a function of frying time. Journal of Food Engineering, 44(1), 39–46. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(99)00163-6

[11] Wu, H., Karayiannis, T. G., & 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. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.10.002

[12] Farid, M., & Kizilel, R. (2009). A new approach to the analysis of heat and mass transfer in drying and frying of food products. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 48(1), 217–223. https://doi.org/10.1016/j.cep.2008.03.013

[13] Halder, A. Dhall, A & Datta, A.K, (2007). An improved, easily implementable, porous media based model for deep-fat frying, Part II: results, validation and sensitivity analysis, Trans IChemE, Part C, Food and Bioproducts Processing 85 (C3), 220-230.

[14] Bouchon, D.L. Pyle, (2005). Modeling oil absorption during post-frying cooling: II: solution of the mathematical model, model testing and simulations, Food and Bioproducts Processing 83, 261_272. https://doi.org/10.1205/fbp.05114

[15] Chen, R.G. Moreira, Modeling of a batch

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-05-21]

[DOI: 10.52547/fsct.18.111.345]

https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.12.012
[27] Ziaiifar, A. M., Courtois, F., & Trystram, G. (2010). Porosity development and its effect on oil uptake during frying process. Journal of Food Process Engineering, 33(2), 191–212. https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2008.00267.x
[28] Diaz, A., Trystram, G., Vitrac, O., Dufour, D., & 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. https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(199902)79:2<291::AID-JSFA194>3.0.CO;2-I
[29] McMinn, W. A. M., & Magee, T. R. A. (1996). Air drying kinetics of potato cylinders. Drying Technology, 14(9), 2025–2040. https://doi.org/10.1080/07373939608917194
[30] Yildiz, A., Koray Palazoğlu, T., & Erdoğdu, F. (2007). Determination of heat and mass transfer parameters during frying of potato slices. Journal of Food Engineering, 79(1), 11–17. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.01.021
[31] Granda, C., & Moreira, R. G. (2005). Kinetics of acrylamide formation during traditional and vacuum frying of potato chips. Journal of Food Process Engineering, 28(5), 478–493. https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2005.034.x
[32] Alipour, M., Kashaninejad, M., Maghsoudlou, Y., & Jafari, M. (2009). Effects of carrageenan, oil temperature and time of frying on oil uptake of fried potato products. Iranian Food Science and Technology Research Journal 5(1): 21-27 (In Farsi).
[33] Yıldız, A., Palazoglu, T.K. & Erdogdu, F.,(2007). Determination of heat and mass transfer parameters during frying of potato slices. Joutnal of Food Engineering. 79 (1), 11_17.
[34] Mosavian, M.T.H., Karizaki, V.M., 2012. Determination of mass transfer parameters during deep fat frying of rice crackers. Rice Science. 19 (1), 64_69. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2018.01.022
[35] Sahin, S., Sastry, S. K., & Bayindirli, L. (1999). Determination of convective heat transfer coefficient during frying. Journal of Food Engineering, 39(3), 307–311. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(98)00171-
deep-fat frying process for tortilla chips, (1997).Transactions of Ischemia, Part C: Food and Bio products Processing 75 (C3) 181_190
[16] Chemists, A. of O. A. (1995). Official methods of analysis of AOAC International. Association of Official Analysis Chemists International, p. CD-ROM. https://doi.org/10.3109/15563657608988149
[17] Crank, J. (1975). The mathematics of diffusion. 2nd Edn. Physics Bulletin, 7(10). https://doi.org/10.1088/0031-9112/7/10/004
[18] Treybal, R. E. (1980). Mass transfer operations. New York, 466.
[19] Bird, R. B., Stewart, W. E., & Lightfoot, E. N. (2006). Transport Phenomena, Revised 2nd Edition. John Wiley & Sons, Inc., 780. https://doi.org/10.1002/aic.690070245
[20] Incropera P. Frank , David P. DeWitt, Theodore L. Bergman and Adrienne S. Lavine,2006, Introduction to Heat Transfer. Wiley;
[21]. Kreyszig, E. (2009). Advanced Engineering Mathematics, 10th Eddition. john wiley & sons.
[22] Adedeji, A.A. , Ngadi, M.O. & Raghavan G.S.V. (2009). Kinetics of mass transfer in microwave precooked and deep-fat fried chicken nuggets, Journal of Food Engineering, 91(1), 146–153 https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.08.018
[23] Motevali, A., Abbaszadeh, A., Minaei, S., Khoshtaghaza, M. H., & Ghobadian, B. (2012). Effective Moisture diffusivity, activation energy and energy consumption in thin-layer drying of jujube (Zizyphus jujube Mill). Journal of Agricultural Science and Technology, 14(3), 523–532.
[24] Robert, H. P., Don, W. G., & James, O. M. (1984). Perry's chemical engineers' handbook. Nova Iorque.
[25] Farid, M. M., & Chen, X. D. (1998). The analysis of heat and mass transfer during frying of food using a moving boundary solution procedure. Heat and Mass Transfer, 34(1), 69–77. https://doi.org/10.1007/s002310050233
[26] Lioumbas, J. S., Kostoglou, M., & 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.

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-05-21]
[DOI: 10.52547/fsct.18.111.345]

X
[36] Miller, K. S., Singh, R. P., & Farkas, B. E. (1994). VIiscosity and heat transfer coefficient s for canola,corn,palm and soybean oil. Journal of Food Processing and Preservation, 18(6), 461–472. https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.1994.tb00268.x
[37] .Moreira, R. G., Palau J., Sweat, V. E., & 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. https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.1995.tb00287.x
[38] Hubbard, L. J., & Farkas, B. E. (1999). Method for determining the convective heat transfer coefficient during immersion frying. Journal of Food Process Engineering, 22(3), 201–214. https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.1999.tb00481.x
[39] Costa, R. M., Oliveira, F. A. R., Delaney, O., & Gekas, V. (1999). Analysis of the heat transfer coefficient during potato frying. Journal of Food Engineering, 39(3), 293–299. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(98)00169-1
[40] Farinu, A., Baik, O. D., (2007). Convective mass transfer coefficients in finite element simulations of deep fat frying of sweetpotato. Journal Food Engineering. 89 (2), 187-194. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2007.05.006

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-05-21]

[DOI: 10.52547/fsct.18.111.345]

Iranian Journal of Food Science and Technology

Homepage: www.fsct.modares.ir

Scientific Research

Modeling of Mass and Heat Transfer in Deep Fat Frying Process and Evaluation in Potato Food Model

Naghavi Gargari, A. [1], Asefi, N. [2], Roufegarinejad, L. [2]

1. Phd Student in the Faculty of Sciences and Food Industries, Faculty of Agriculture, Islamic Azad University of Tabriz, Tabriz, Iran
2. Associate Professor of the Faculty of Sciences and Food Industries, Faculty of Agriculture, Islamic Azad University of Tabriz, Tabriz, Iran

ARTICIE INFO

Article History:

Received 11 June 2020
Accepted 01 November 2020

Keywords:

Simulation,
Convective Heat Transfer Coefficient,
Mathematical Modeling,
COMSOL Multiphysics.

DOI: **10.52547/fsct.18.02.27**

*Corresponding Author E-Mail: n.asefi@iaut.ac.ir

ABSTRACT

In the present study, a convective heat transfer coefficient (h) changes during deep fat frying was investigated. So, by keeping the oil temperature constant as a heat transfer medium, temperature changes in a potato strip (cube-shaped), in the center and left-right sides of the strip during frying by a three-channel thermocouple was measured. Processing temperature of oil was 150, 160 and 170°C. The strip temperature was recorded by a data logger at ten-second intervals. Due to no significant changes in the temperature of different selected locations in potato strip, the center temperature was selected and recorded as an effective temperature. Also, heat transfer parameter included convective coefficient (h) was calculated in the range of 128_515 W/m2.K .Result showed that (h) is high in high levels temperature because of increasing rate of moisture exiting and turbulence in the oil. Also, with increasing oil temperature, decreasing of oil content and decreasing in moisture content of slices were observed. The mass transfer parameters including the effective moisture diffusivity (D_{eff}) and the oil diffusivity (D_{oil}) were calculated in the range of 9.12×10-9 _1.31×10-8 m2/s and 1.26×10-5_1.52×10-5 m^2/s, respectively. By using the calculated coefficients, heat and mass transfer modeling, was done by mathematical equations and the relevant equations were solved by the method of separation variables. Simulation was also done with COMSOL Multiphysics version 5.3a and the resulted profiles were also presented.

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-05-21]

[DOI: 10.52547/fsct.18.111.345]