



## مدل‌سازی انتقال جرم و حرارت در فرایند سرخ کردن عمیق و ارزیابی آن در مدل غذایی سیب‌زمینی

آذر نقوی گرگری<sup>۱</sup>، نارملا آصفی<sup>۲\*</sup>، لیلا روفه گری نژاد<sup>۲</sup>

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

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>در پژوهش حاضر، نحوه تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی روغن (h) طی فرایند سرخ کردن عمیق مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، با ثابت نگه داشتن دمای روغن به عنوان محیط انتقال دهنده حرارت، تغییرات دمایی سیب‌زمینی مکعبی شکل، در مرکز و دو کناره راست و چپ خلال در طول سرخ کردن با ترموکوپل سه‌کاناله اندازه‌گیری شد. دمای عملیاتی سرخ کردن ۱۵۰، ۱۶۰ و ۱۷۰°C در نظر گرفته شد. دمای ترموکوپل‌ها در فواصل زمانی ۱۰ ثانیه به وسیله دیتالاگر ثبت گردید. به علت عدم وجود تغییرات معنی‌دار در دمای مکانهای مختلف انتخابی بروی خلال، دمای مرکز در طول فرایند سرخ شدن به عنوان دمای موثر انتخاب گردید. همچنین پارامتر انتقال حرارت شامل ضریب جابجایی روغن در بازه <math>128\_515 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}</math> 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 انتقال جرم شامل ضریب نفوذ موثر رطوبت (<math>D_{\text{eff}}</math>) در محدوده <math>1.26 \times 10^{-7}</math> تا <math>1.31 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}</math> و ضریب جذب روغن (<math>D_{\text{oil}}</math>) در محدوده <math>1.52 \times 10^{-5}</math> تا <math>9.12 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}</math> محاسبه و تعیین شد. سپس با استفاده از ضرایب محاسبه شده، مدل‌سازی انتقال حرارت و جرم توسط معادلات ریاضی انجام گرفت و معادلات مربوطه با روش جداسازی متغیرها حل شد. در پایان شبیه‌سازی با نرم‌افزار کامسول نسخه 5.3a انجام گرفت و پروفایل‌های بدست آمده نیز ارائه گردید.</p>	<p>تاریخ های مقاله:</p> <p>تاریخ دریافت: ۹۹/۰۳/۲۲</p> <p>تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۸/۱۱</p> <p>کلمات کلیدی:</p> <p>شبیه سازی، ضریب انتقال حرارت جابجایی، مدل‌سازی ریاضی، نرم افزار کامسول.</p> <p>DOI: 10.52547/fsct.18.02.27</p> <p>*مسئول مکاتبات: n.asefi@iaut.ac.ir</p>

## ۱- مقدمه

فرایند سرخ‌کردن به دلیل انتقال همزمان مومستوم (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 ماده غذایی به روش هدایت منتقل می‌شود تا سطح ماده غذایی به دمای حباب تر برسد و آب شروع به تبخیر نماید [۲]. درک مکانیسم انتقال جرم و حرارت که در طول فرایند سرخ‌کردن، همزمان مابین دو ناحیه دینامیکی اتفاق می‌افتد می‌تواند برای بهینه‌سازی و کنترل کیفی مواد غذایی که اغلب دارای ساختار پیچیده‌ای هستند مفید باشد [۳]. بدین منظور، آشنایی با ضرایب انتقال حرارت 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 [۴].

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 جدا شدن سلولها، تردی ماده غذایی سرخ‌شده نیز حاصل می‌شود [۵]، که ضریب انتقال حرارت در این مرحله نقش مهمی را ایفا می‌کند.

یکی از موانع انتقال حرارت هنگام سرخ‌شدن، افزایش ضخامت پوسته‌است که باعث کاهش نرخ انتقال حرارت و به دنبال آن کاهش تشکیل بخار و کاهش آشفستگی جریان روغن می‌شود و مرز تبخیر آب را به تدریج به سمت داخل محصول حرکت می‌دهد [۶]. بررسی داده‌های مربوط به انتقال جرم 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 می‌دهد [۷] که دو مورد آخر به میزان نسبتاً کم صورت می‌گیرد و در محاسبات معمولاً ناچیز فرض می‌شود.

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 انتقال جرم 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 [۹ و ۱۰].

در این میان ابزار قدرتمند جهت بررسی روند مکانیسم انتقال حرارت 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 انتقال حرارت، جرم و اندازه حرکت در فرایند غذایی به کمک معادلات ریاضی و با حداکثر دقت ممکن می‌باشد [۳].

تحقیقات گسترده‌ای در ترکیب اصول انتقال حرارت 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 دست دادن آب مواد غذایی در نظر 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 در مورد انتشار رطوبت و همچنین برای پیش‌بینی انتقال حرارت و جرم در تمام فرآیندهای خشک کردن و سرخ‌کردن نیز استفاده گردد [۱۲].

در پژوهشی یک مدل چند فازی برای انتقال جرم و حرارت در فرایند سرخ‌کردن عمیق سیب‌زمینی در روغن توسعه داده شد که در مورد پیش‌بینی پارامترهای مهم کیفی مانند محتوی روغن و آکریل‌امید 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].

ضخامت به شکل مکعب برش داده شد. روغن سرخ‌کردنی آفتابگردان بهار به عنوان واسطه سرخ‌کردن برای تهیه نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

## ۲-۲-۲- روش کار

### ۲-۲-۱- مرحله اول

عملیات سرخ‌کردن در یک سرخ‌کن خانگی (برند فیلیپس) انجام شد. فرایند سرخ‌کردن در سه سطح دمایی ۱۵۰، ۱۶۰ 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 انتقال حرارت 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 مجدداً 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- اندازه‌گیری رطوبت

خلال‌های سیب زمینی سرخ‌شده طبق دستورالعمل مخصوص اندازه‌گیری رطوبت نمونه‌های چرب، در آن با دمای ۱۰۳°C به مدت ۱۶ ساعت خشک گردید [۱۶].

### 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

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 می‌شود 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 [۱۴].

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 موثر 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 انتقال جرم آب و روغن و انتقال حرارت 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 مطالعه حاضر، سیب‌زمینی واریته آگریا از بازار محلی خریداری شد. پس از شستشو، پوست‌گیری شده و به صورت خلال‌هایی در ابعاد ۶۰mm طول و ۶\*۶mm عرض و

متغیرها<sup>۴</sup> [۲۱] برای حل این معادله انتخاب گردید. با حل معادله ۱ و جایگذاری معادله ۲ و شرایط مرزی و اولیه در آن، رابطه مربوط به رطوبت بدون بعد به شکل زیر استخراج گردید [۲۲ و ۲۳].

$$MR = \frac{M}{M_0} = \frac{z}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (3)$$

به دلیل اینکه در مرکز تقارن وجود دارد بررسی و اعمال شرایط مرزی در نصف ضخامت آن صورت می گیرد. همچنین از آنجائیکه حین کاهش رطوبت، روغن جذب می گردد و چروکیدگی قابل ملاحظه ای اتفاق نمی افتد، ضخامت را ثابت فرض کرده و در تعیین ضریب نفوذ مؤثر بجای ضخامت متناسب با زمان  $t$ ، نصف ضخامت اولیه استفاده شد. معادله ۳ به صورت یک تابع نمایی<sup>۵</sup>  $(\exp)$  است که با  $\ln$  گیری از آن، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت  $D_{eff}$  را می توان 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 بر همین اصول انجام گرفت.

## ۲-۵- معادله جذب روغن و تعیین ضرایب آن

روند محاسبه ضریب جذب روغن  $D_{oil}$  مطابق محاسبه ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و با استفاده از قانون دوم فیک [۱۷ و ۱۸] 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).

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

با تعریف شرایط مرزی و اولیه به شکل زیر:

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

$$B.C(1) \rightarrow O(0, t) = f \text{ lin } t$$

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

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

$D_{oil}$ : ضریب جذب روغن ( $m^2/s$ )

بوسیله حلال پترولیوم اتر به مدت ۶ ساعت انجام گرفت [۱۶].

## ۲-۶- معادله انتقال رطوبت و تعیین ضرایب آن

معادله قانون دوم فیک [۱۹-۱۷] که برای انتقال جرم در مورد خروج رطوبت از سیب زمینی بکار برده شد عبارت است از:

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

معادله ۱ معادله ای یک بعدی بوده و بعد ضخامت یا ارتفاع خلال ( $Z$ )، مختصه اصلی مدل سازی جرم در نظر گرفته شد که در آن:

$M$ : محتوی رطوبت در لحظه  $t$  (gr. H<sub>2</sub>O/gr. db)

$Z$ : مختصه فضایی (m)

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

$t$ : زمان (s)

همچنین یک معادله دیفرانسیل پاره ای یا جزئی<sup>۱</sup> (PDE) است که برای حل آن بدلیل اینکه نسبت به مکان ( $Z$ ) از مرتبه دوم مشتق می باشد، دو شرط مکانی موسوم به شرط مرزی (B.C)<sup>۲</sup> و بدلیل اینکه نسبت به زمان ( $t$ ) از درجه اول مشتق است یک شرط زمانی موسوم به اولیه<sup>۳</sup> (I.C) نیاز دارد [۲۰] که به شکل زیر بیان می شوند:

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

$$B.C(1) \rightarrow M(0, t) = f \text{ lin } t$$

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

$M_{\infty}$ : رطوبت نهایی (تعادلی) نمونه (gr. H<sub>2</sub>O/gr. db)

$M_0$ : رطوبت اولیه نمونه (gr. H<sub>2</sub>O/gr. db)

$K_c$ : ضریب انتقال جرم (m/s)

$L$ : نصف ضخامت خلال (m)

از طرفی نسبت رطوبت (مقدار رطوبت بدون بعد) با  $MR$  حذف  $M_{\infty}$  رطوبت نهایی نمونه (که معادل صفر است) به شکل زیر تعریف شده است:

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

محتوی رطوبت، مطابق قانون دوم فیک تابعی از مکان و زمان در نظر گرفته شد. سه روش حل ترسیمی، تحلیلی و عددی [۲۰] برای حل معادلات دیفرانسیلی پاره ای وجود دارد که روش عددی و از بین روشهای حل عددی، روش جداسازی

4. Separation of Variables Method  
5. Exponential

1. Partial Differential Equation  
2. Boundary Condition  
3. Initial Condition

حرارت دهی سیب زمینی با  $(\dot{m}cp\Delta T_2)$  و برای تبخیر آب با  $(\Delta H \cdot \dot{W})$  محاسبه می‌شود. بنابراین ضریب انتقال حرارت جابجایی با استفاده از رابطه زیر تخمین زده شد:

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

که در آن  $h$  ضریب انتقال حرارت جابجایی روغن برحسب  $W/m^2.K$ ،  $A$  مساحت جانبی سیب زمینی برحسب  $m^2$ ،  $\Delta T_1$  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  $kg/s$ ،  $\Delta T_2$  اختلاف دمای سیب زمینی بر حسب  $K$  و  $\Delta H$  گرمای نهان تبخیر آب در نمونه به مقدار  $2257 \text{ kJ/kg}$  [۲۴] در دمای  $100^\circ C$  در نظر گرفته شد.

## ۲-۸- توسعه مدل‌سازی انتقال حرارت

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

- خللهای سیب‌زمینی همگن در نظر گرفته شد و توزیع رطوبت و دمای اولیه در تمامی برش‌ها یکسان بود.
- اثر چروکیدگی کلی در طول سرخ کردن 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 دناتوره شدن 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 انتقال حرارت 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 می‌شود [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 ( $K$ )،  $\alpha$  ضریب پخش گرمایی ( $m^2/s$ )،  $x, y, z$  ابعاد

$O_0$ : 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 می‌گردد:

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

لذا معادله  $OR$  به شکل زیر ساده می‌شود: ( $O_0=0$ )

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

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 می‌باشد.

$$OR = \frac{O_{eq} - O}{O_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (7)$$

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 می‌شود. ضریب جذب روغن همان شیب زاویه بخش خطی نمودار می‌باشد [پژوهش حاضر].

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

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

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (8)$$

در این معادله  $E_a$  انرژی فعال‌سازی است که بیشتر به خصوصیات شیمیایی ماده مورد نظر بستگی دارد؛ درحالی‌که  $D_0$  فاکتور پیش نمایی<sup>۱</sup> است که بستگی به ویژگی‌های فیزیکی ماده مورد آزمایش دارد.  $R$  ثابت جهانی گازها بوده و برابر با  $8.314 \text{ J/mol.k}$  می‌باشد 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  $-E_a/R$  و عرض از مبدأ آن  $Ln D_0$  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

$$T(z,t) = [C_1 \cos(\beta z) + C_2 \sin(\beta z)] \exp(-2.38 \times 10^{-7} \beta^2 t) \quad (13)$$

که در آن  $\beta$  جواب معادله مشخصه می باشد. با جایگذاری شرایط مرزی و اولیه، جواب نهایی معادله ۱۲ به شکل زیر استخراج گردید.

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

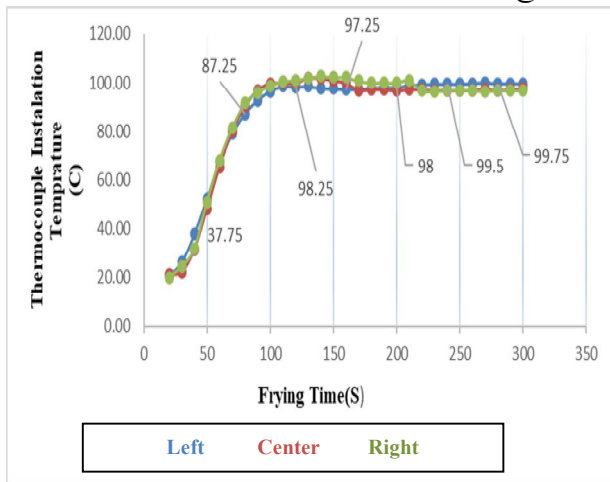
که دما برحسب درجه سانتیگراد و زمان بر حسب ثانیه می باشد. با جایگذاری  $h$  های مربوط به زمانهای متفاوت، دمای خلال محاسبه شده و با داده های اندازه گیری شده توسط ترموکوپل مقایسه گردید.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی تغییرات دمای مرکز و کناره های

##### نمونه

نمودار ۱ تغییرات دمای مرکز و کناره های چپ و راست نمونه را هنگام سرخ کردن در دمای  $150^\circ\text{C}$  نشان می دهد. مطابق این نمودار افزایش دما در کناره های راست و چپ خلال مانند تغییرات دمای مرکز می باشد 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  $150^\circ\text{C}$

مقایسه دمای مرکز با کناره های چپ و راست نمونه در هر سه دمای روغن انجام گرفت و نتایج یکسانی بدست آمد. لذا دمای مرکز نمونه، مبنای محاسبات در نظر گرفته شد. خلاصه ویژگیهای فرایند سرخ کردن در هر سه دمای روغن و مقایسه آنها در جدول ۱ آمده است:

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

$$\alpha = \frac{K}{\rho C_p} \quad (20)$$

که در آن  $K$  ضریب هدایت حرارتی ( $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ )،  $\rho$  چگالی ( $\text{kg/m}^3$ ) و  $C_p$  ظرفیت حرارتی ویژه سبب زمینی است: [۲۵]

$$C_p = 3450 \text{ (J/kg} \cdot \text{K)}$$

در مورد  $K$  و  $\rho$ :

$$\rho = 1157 \text{ (kg/m}^3 \text{ [پژوهش حاضر])}$$

$$K = 0.95 \text{ (W/m} \cdot \text{K) [۲۶]}$$

پس از محاسبه  $\alpha$ ، با اندازه گیری دما در نقاط مختلف خلال به کمک ترموکوپل ها، بدلیل اینکه اختلاف دمای چشمگیری ثبت نشد و دمای مرکز و کناره های سبب زمینی باهم برابر شدند، ابعاد  $x$  و  $y$  حذف شد و تنها بعد ضخامت یا ارتفاع ( $z$ ) به عنوان بعد اصلی در مدل سازی انتخاب گردید و معادله ۱۰ به شکل زیر ساده سازی شد:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \left( \frac{1}{2.38 \times 10^{-7}} \right) \frac{\partial T}{\partial t}, \quad T = T(z, t) \quad (12)$$

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 سبب زمینی (شرط مرزی نوع دوم<sup>۷</sup>)

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

۲- سطح سبب زمینی در معرض جابجایی (شرط مرزی نوع سوم<sup>۸</sup>)

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

که در آن  $T_{oil}$  دمای روغن شامل  $150$ ،  $160$ ، و  $170^\circ\text{C}$  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:

$$(T_{oil} = 150^\circ\text{C}) \text{ فرض}$$

#### ۲-۸-۲- شرط اولیه (دمای اولیه خلال)

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

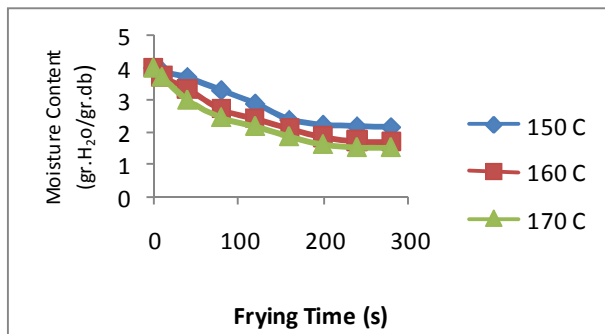
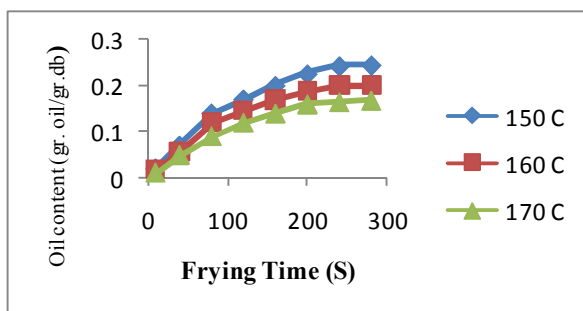
#### ۲-۸-۳- روش جداسازی متغیرها [۲۱]

جواب معادله ۱۲:

7. Neumann  
8. Robin

**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

**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 و ۳ به طور همزمان نشان می‌دهد که محتوی جذب روغن تقریباً با رسیدن دمای ماده غذایی به نقطه جوش آب که حدوداً بعد از ۱۲۰ ثانیه اتفاق می‌افتد کاهش می‌یابد که می‌توان به فشردگی ساختار ماده غذایی نسبت داد. همچنین شدت از دست دادن 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 قبلاً بحث شد محاسبه گردید. شیب نمودار که با رابطه  $\pi^2 D_{eff} / 4L^2$  مساوی می‌باشد مستقیماً این ضریب را مشخص می‌کند. همچنین انرژی فعال سازی فرآیند نیز به کمک معادله آرنیوس قابل محاسبه می‌باشد که اطلاعات این برازش در جدول ۲ نشان داده است.

با توجه به جدول ۱، زمان رسیدن به محدوده‌ی نقطه جوش 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، تقریباً 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

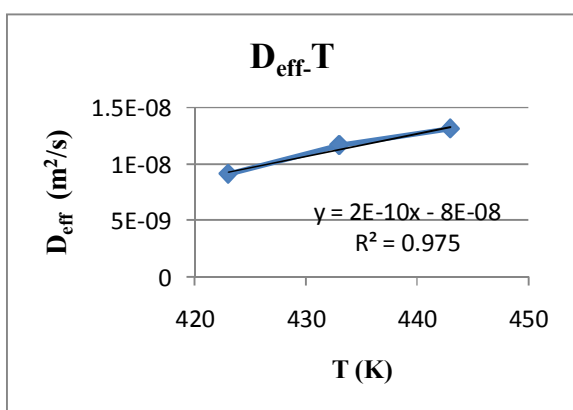
#### ضریب نفوذ موثر رطوبت و ضریب جذب روغن

سرخ کردن عمیق به شدت، توسط ضرایب انتقال حرارت و جرم کنترل می‌شود و این ضرایب را می‌توان به عنوان مهمترین پارامترها در مدل سازی عنوان کرد [۲]. لذا این ضرایب به عنوان پارامترهای مورد نیاز در مدل سازی 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 سیب زمینی هنگام سرخ کردن به عنوان تابعی از زمان فرآیند نشان داده شده است. شدت تبخیر در ۱۲۰ ثانیه ابتدایی فرآیند بیشتر است که به دلیل تبخیر ناگهانی آب آزاد سطحی نمونه می‌باشد. با گذشت زمان آهنگ کاهش رطوبت محدود شده و تقریباً ثابت گردید. در این خصوص نتایج مشابهی توسط محققان بدست آمده است [۱۰ و ۶ و 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 [۶ و ۲۸].

**Table 2** Regression information of the kinetic model in moisture reduction

Oil Temperature (°C)	Ln(MR)-t	$D_{eff}(m^2/s)$	Ea (kJ/mole)
150	$y = -0.0025x - 0.0128$ $R^2 = 0.9487$	9.12816E-09	
160	$y = -0.0032x - 0.0677$ $R^2 = 0.964$	1.1684E-08	25.8668
170	$y = -0.0036x - 0.1118$ $R^2 = 0.9409$	1.31445E-08	

**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)	$\ln(OR)-1/t$	$D_{oil}(m^2/s)$
150	$y = -23.401x - 0.1371$ $R^2 = 0.9245$	1.52E-05
160	$y = -24.78x - 0.1832$ $R^2 = 0.9073$	1.43E-05
170	$y = -28.231x - 0.1016$ $R^2 = 0.9493$	1.26E-05

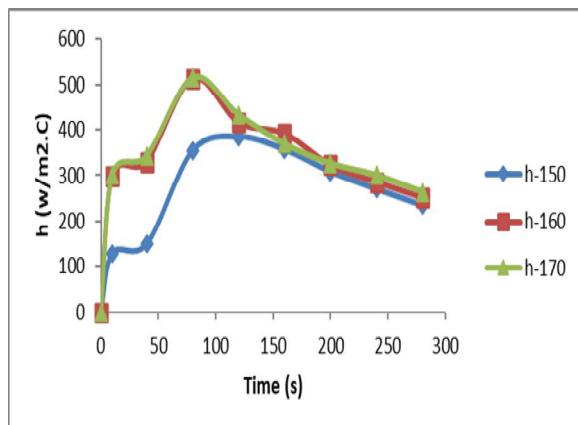
مسئله مانع نفوذ روغن می شود که از نمودار ۳ نیز کاهش جذب با افزایش دمای روغن قابل مشاهده می باشد. نتیجه آن، کاهش ضریب جذب روغن با افزایش دما می باشد. بحث افزایش یا کاهش جذب روغن با افزایش دما چالش برانگیز است. محققانی

انرژی اکتیواسیون بدست آمده  $25.8668 \text{ kJ/kg}$  بود که مقایسه آن با پژوهشهای سایر محققین [۲۹ و ۳۰] تطابق داده های 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  $2.2 \times 10^{-8}$  می باشد که در تطابق با داده های پژوهش حاضر است [۳۱].

همچنانکه در جدول ۲ مشاهده شد، ضریب نفوذ موثر رطوبت با افزایش دمای روغن از دمای  $150^\circ\text{C}$  تا  $170^\circ\text{C}$  در 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 نمودار ۴ نشان داده شده است که معادله این تابعیت به صورت  $D_{eff} = 8 \times 10^{-8} (2 \times 10^{-10}) T$  و خطی با شیب مثبت می باشد که سیر صعودی آن در نمودار ۴ نشان داده شده است.

همچنانکه در جدول ۳ مشاهده شد ضریب جذب روغن با افزایش دمای روغن از دمای  $150^\circ\text{C}$  تا  $170^\circ\text{C}$  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



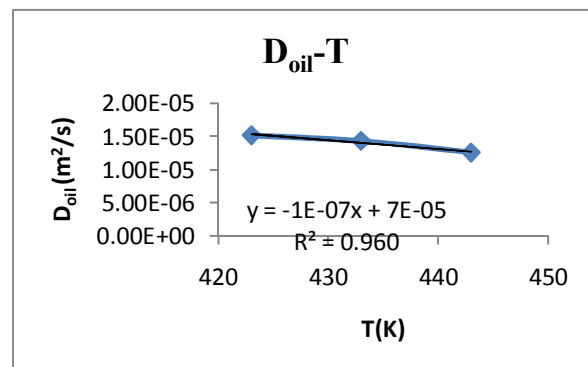


**Fig 6** Changes in convective heat transfer coefficient with time at three oil temperatures

در مطالعه‌ای طی سرخ کردن قطعات سیب‌زمینی مشاهده شد که ضریب انتقال حرارت 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  $128-515 \text{ W/m}^2.\text{K}$  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 تقریباً ثابت نمودار سرخ کردن) در محدوده  $250-300 \text{ W/m}^2.\text{K}$  قرار دارد [۳۶ و ۳۷] در مطالعه‌ای دیگر مقدار  $300 \text{ W/m}^2.\text{K}$  در شروع جوشش و مقدار اوج آن  $1100 \pm 140 \text{ W/m}^2.\text{K}$  در  $1100 \pm 140$  حین سرخ کردن نیز گزارش شده است [۳۸]. در پژوهشی دیگر مقدار این ضریب در بازه  $443-750 \text{ W/m}^2.\text{K}$  محاسبه شده است [۳۹].

بیشترین مقدار  $h$  مربوط به ثانیه صد در هر سه دمای سرخ کردن می باشد. 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  $160^\circ\text{C}$  در نمودار 7 نشان داده شده است) و میزان حداکثر آن همزمان با رسیدن به حداکثر نرخ تبخیر آب و تلاطم روغن مشاهده می شود. 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 بدست می آید که

کاهش جذب روغن با افزایش دما را گزارش کردند و علت آن راتشکیل پوسته به عنوان مانع خروج رطوبت می دانند [۶]. 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 مدل سازی که روش نوآورانه 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  $150-190^\circ\text{C}$  در گزارشات  $11.2 \times 10^{-6} - 20.7 \times 10^{-6} \text{ (m/s)}$  و برای سیب زمینی دیسکی در همین محدوده دمایی  $5.51 \times 10^{-6} - 9.7 \times 10^{-6} \text{ (m/s)}$  است [۳۳ و ۳۴] در ادامه تابعیت ضریب جذب روغن با دما در نمودار ۵ نشان داده شده است که معادله این تابعیت به صورت  $T(10^{-7}) + 7 \times 10^{-5} D_{oil} =$  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

### ۳-۳-۳ نتایج ضریب انتقال حرارت جابجایی

نمودار ۶ تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی را در سه دمای سرخ کردن نسبت به زمان نشان می دهد: با توجه به نمودار ۶ با افزایش دمای روغن، ضریب انتقال حرارت جابجایی افزایش می یابد. همچنین ضریب انتقال حرارت جابجایی در زمان های اولیه فرآیند بیشتر بوده و با سپری شدن زمان سرخ کردن این عدد نیز کاهش می یابد.

### ۳-۵- نتایج بررسی نرم افزاری فرایند

خلال سیب زمینی در ابعاد معین به کمک نرم افزار کامسول نسخه 5.3a طراحی شد و مش بندی آن انجام گرفت. مدل غذایی و ساختار مش های مختلف به کاررفته در شبیه سازی سه بعدی خلال سیب زمینی با ابعاد  $6 \text{ mm} * 6 \text{ mm} * 6 \text{ mm}$  در شکل ۹ نشان داده شده است: a. مش بسیار ظریف، b. مش نرمال و c. مش بسیار درشت.

با مقایسه تأثیر انواع مختلف مش بندی در پیش آنالیزها و عدم یافتن منابع بررسی کننده این زمینه، از مش بسیار درشت در شبیه سازی استفاده شد زیرا این مش بندی 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 شکل a- ۹ استفاده از مش بسیار ظریف، توزیع غیریکنواخت دما در نتیجه نادرست را نتیجه داد. شکل b- ۹ یا مش نرمال، توزیع یکنواخت ولی نادرست دارد چون دماهای پایین را در سطوح و دماهای بالا را در داخل نمونه نشان می دهد درحالی که هنگام سرخ شدن ابتدا سطوح گرم شده سپس گرما به داخل نمونه نفوذ می کند. شکل c- ۹ یا مش بسیار درشت، توزیع درست و یکنواخت را نشان می دهد چون سطوح و لبه های نمونه گرم تر - شده و سپس گرما به داخل آن نفوذ می کند. به منظور بالا بردن وضوح توزیع دما، خلال بار دیگر بصورت دوبعدی در کامسول (بدلیل وجود تقارن در ابعاد  $30 \text{ mm}$  طول و با نصف ضخامت یعنی  $3 \text{ mm}$ ) طراحی گردید.

نشان دهنده وابستگی شدید این فاکتور به وجود حرکت حجمی یا آشفستگی جریان در محیط حرارتی است. با کاهش دما مقدار  $h$  نیز کاهش می یابد که این روند در نمودار ۶ قابل مشاهده می باشد.

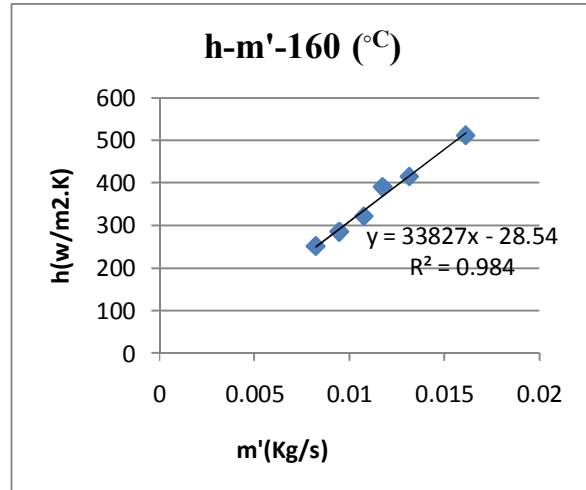


Fig 7 Linear dependence of water reduction rate with convective heat transfer coefficient

### ۳-۴- نتیجه مدل سازی انتقال حرارت

جواب معادله بدست آمده در بخش مدل سازی انتقال حرارت (معادله ۱۴) در نمودار ۸ ترسیم شده و با داده های آزمایشگاهی دمای مرکز نمونه مقایسه گردید. این معادله تطابق خوبی نشان داد.

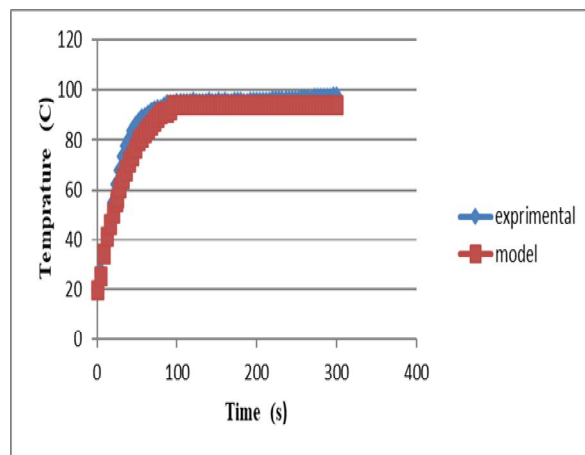
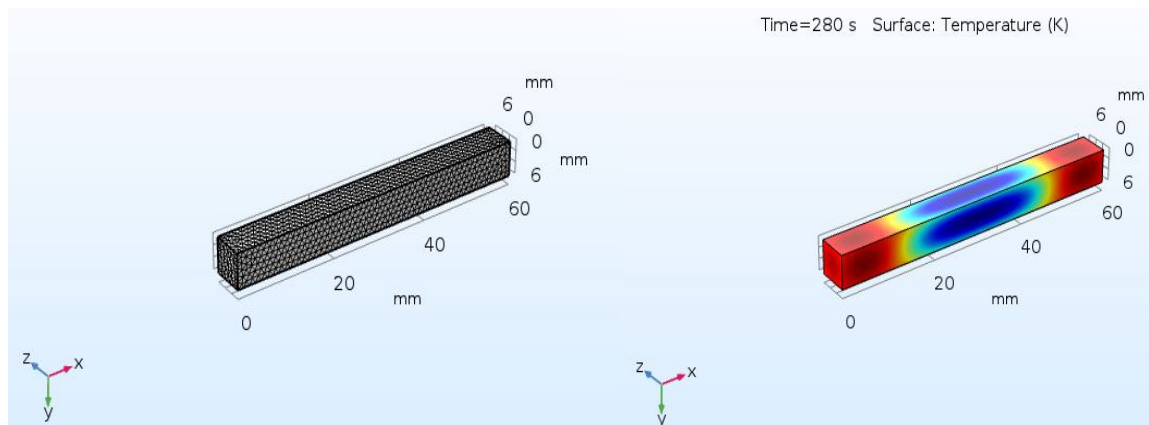
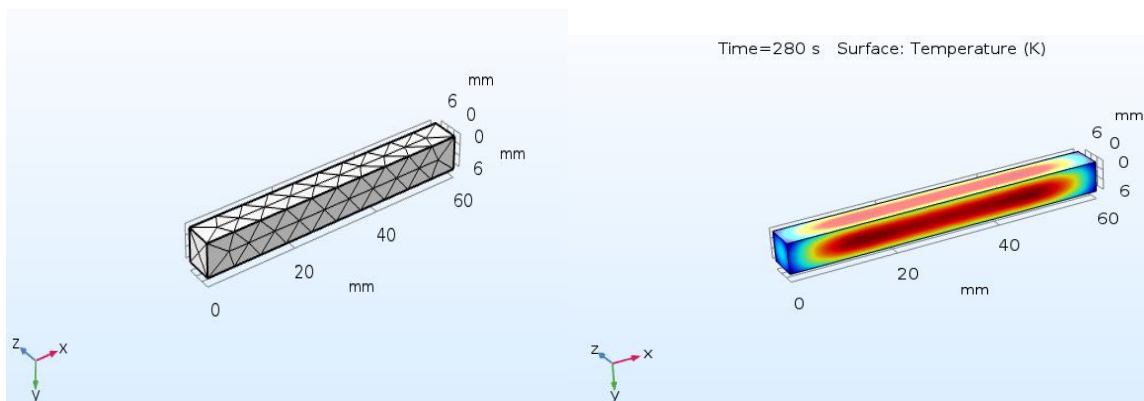


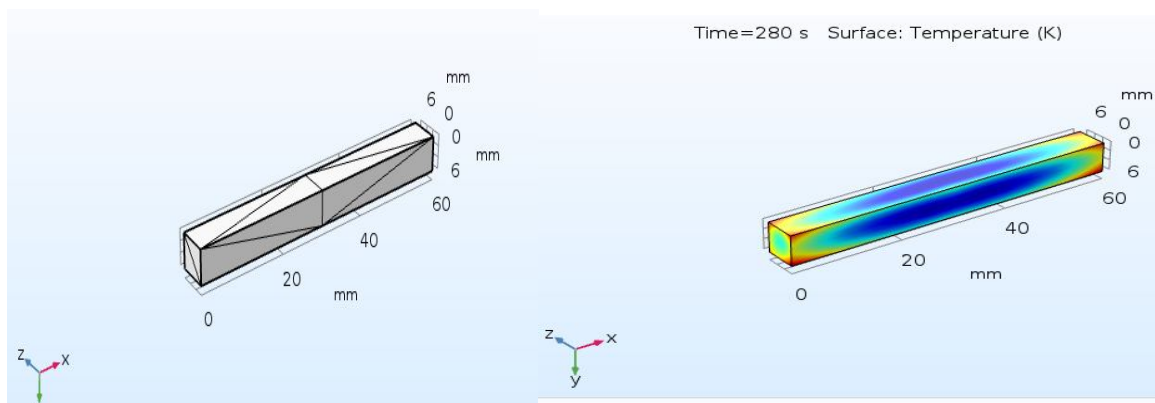
Fig 8 Comparison of experimental data and the model



(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

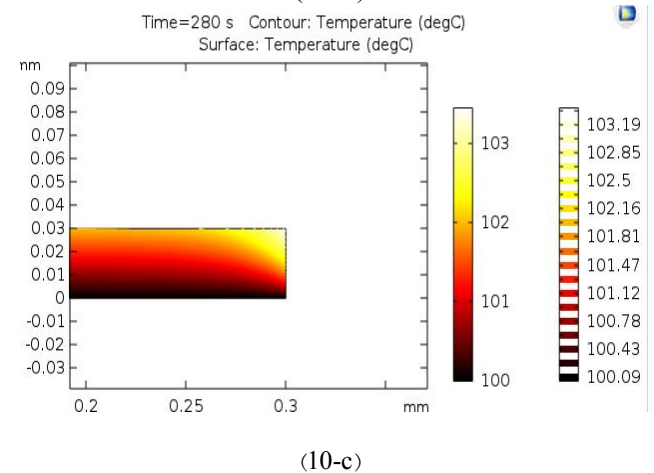
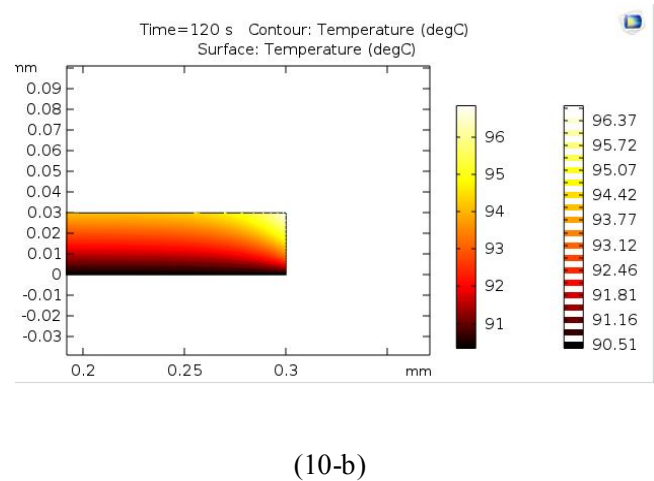
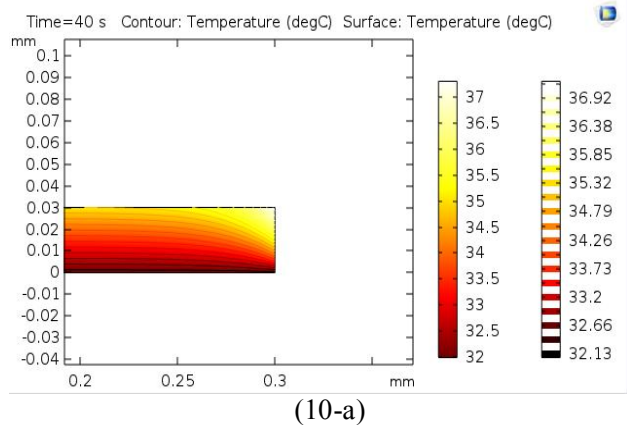
دمای بدست آمده در زمانهای مهم که تغییر دمای واضحی را نشان دادند شامل ۴۰، ۱۲۰ و ۲۸۰ ثانیه برای دمای روغن °C ۱۵۰ در شکل ۱۰ ارائه گردید:

مدلسازی انتقال حرارت با این نرم افزار انجام گرفت و توزیع دما در خلال در کلیه زمانها معین گردید. در پژوهش حاضر دادههای مورد نیاز اندازه گیری و محاسبه شد و با استفاده از دادههای محاسبه شده انتقال حرارت داخل خلال مدلسازی گردید و توزیع

۳۷.۷۵، ۹۸.۲۵ و ۹۹.۷۵ °C است که در تطابق با توزیع دمای نرم افزاری می باشد. مهم ترین نکته بدست آمده از نمودار ۱۰ این است که حتی در زمان نهایی (۲۸۰ ثانیه) دمای داخل نمونه غذایی در محدوده ۱۰۰ °C و در سطح ماده نهایتاً ۱۰۳ °C 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 یافته اند. پژوهشگرانی شبیه سازی با روش المان محدود را برای تعیین ضرایب انتقال جرم فرایند سرخ کردن عمیق سیب زمینی انجام دادند و پارامترهای کاربردی را در انتقال جرم معرفی کرده و از نرم افزار کامسول برای این شبیه سازی بهره گرفته اند [۴۰]. محققانی شبیه سازی سه بعدی پدیده های انتقال سرخ کن ناپیوسته را در فرایند سرخ کردن عمیق انجام دادند و تاثیر دمای روغن را با استفاده از همین نرم افزار بررسی کرده و پروفایل های دمایی ارائه دادند که پروفایل های پژوهش حاضر نیز مشابه با همین موارد می باشد [۳]. در تحقیقی مدل سازی سرخ کن پیوسته در فرایند سرخ کردن عمیق با استفاده از همین نرم افزار انجام گرفت و توزیع دما، رطوبت و روغن در سرخ کن شبیه سازی شده و پروفایل های توزیع نیز ارائه گردید [۱۱]. تفاوت پژوهش حاضر با موارد ذکر شده در این است که اکثر پژوهش ها مدل سازی با کامسول را برای سیستم سرخ کن انجام دادند ولی در این تحقیق برای خود نمونه انجام شده است.

#### ۴- نتیجه گیری

در اندازه گیری دمای مرکز و کناره های چپ و راست خلال، تغییرات دما معنی دار نبود لذا دمای مرکز در طول سرخ شدن به عنوان پارامتر موثر انتخاب گردید. ضرایب انتقال حرارت و جرم شامل ضریب نفوذ موثر رطوبت، ضریب جذب روغن و ضریب انتقال حرارت جابجایی و همچنین انرژی فعال سازی فرایند به عنوان پارامترهای موثر در مدل سازی در نظر گرفته شد. مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی محاسبه شده در این پژوهش در بازه  $515-128 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  قرار داشت. مقدار آن در دماهای بالا به دلیل افزایش نرخ خروج رطوبت، بالاتر بوده و با سپری شدن زمان سرخ کردن، مقدار آن نیز کاهش یافت. این ضریب وابستگی



**Fig 10** Heat transfer profiles obtained by COMSOL Multiphysics at  $T_{Oil}=150^{\circ}\text{C}$  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 ۴۰، ۱۲۰ و ۲۸۰ ثانیه به ترتیب

- 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](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 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 مواد غذایی مش‌بندی با مش بسیار درشت نتایج بهتری ارائه کرد. در زمان اتمام سرخ‌کردن دمای داخل نمونه غذایی در محدوده ۱۰۰°C و در سطح ماده نهایتاً ۱۰۳°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*

- <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.12.012>
- [27] Ziiaifan, 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](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., & Erdoğan, 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. *Journal 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\(98\)00171-1](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(98)00171-1)
- 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 Edition. 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.

- 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](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>
- X
- [36] Miller, K. S., Singh, R. P., & Farkas, B. E. (1994). Viscosity and heat transfer coefficients 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.

## Iranian Journal of Food Science and Technology

Homepage: [www.fsct.modares.ir](http://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. <sup>1</sup>, Asefi, N. <sup>2</sup>, Roufegarinejad, L. <sup>2</sup>

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

## ARTICLE INFO

## ABSTRACT

**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

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/m<sup>2</sup>.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  $9.12 \times 10^{-9}$  \_  $1.31 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s and  $1.26 \times 10^{-5}$  \_  $1.52 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/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.