

مدل سازی جذب روغن طی فرایند سرخ کردن عمیق رشته خوشکار: مقایسه سرخ کردن در شرایط اتمسفری و تحت خلأ

سید احمد شهیدی^{۱*}، محبت محبی^۲، علی معتمدزادگان^۳، امان محمد ضیائی فر^۴، جواد ابوالفضلی اصفهانی^۵، سید علی مرتضوی^۲

^۱دانش آموخته دوره دکترا، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۲استاد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۳دانشیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

^۴استادیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

^۵استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده

سرخ کردن عملیات واحدی است که به طور عمده برای تغییر کیفیت خوراکی مواد غذایی مورداستفاده قرار می گیرد. رشته های تولیدی در چهار فشار مختلف (۴۷/۴، ۵۷/۸۳، ۷۰/۱ و ۱۰۱/۳۲۵ کیلو پاسکال) سرخ شدند. در هر کدام از فشارهای ذکر شده سه دما جهت سرخ کردن در ۳ مدت زمان مورداستفاده قرار گرفت. برای مدل سازی انتقال رطوبت و روغن در مواد غذایی سرخ شده بسیاری از پژوهشگران از قانون انتشار فیک استفاده کرده اند. در این پژوهش نیز این قانون با فرضیاتی مورد استفاده قرار گرفت. به منظور معادلات حاکم، از روش حجم محدود برای گسسته سازی معادلات استفاده گردید. پروفیل محتوای روغن برای برازش نتایج شبیه سازی به داده های آزمایشگاهی مورداستفاده قرار گرفت. در برازش بین داده های آزمایشگاهی و شبیه سازی شده، نوسانات در بین داده های آزمایشگاهی و شبیه سازی شده به ویژه در شرایط سرخ کردن تحت خلأ بیشتر بود.

واژه های کلیدی: سرخ کردن اتمسفری، سرخ کردن تحت خلأ، مدل سازی جذب روغن.

۱- مقدمه

سرخ کردن عمیق یکی از قدیمی‌ترین فرایندهایی است که باهدف خشک کردن، پختن و فرمولاسیون فرآورده‌های غذایی استفاده می‌شود (۶، ۱۹). سرخ کردن عملیات واحدی است که به‌طور عمده برای تغییر کیفیت خوراکی مواد غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. سرخ کردن عمیق مواد غذایی شامل غوطه‌ور کردن ماده غذایی در روغن داغ خوراکی در دمایی بالاتر از نقطه جوش آب در یک دوره زمانی معین است (۴). این فرایند شامل انتقال جرم (عمدتاً به‌صورت از دست دادن آب و جذب روغن) و انتقال حرارت است (۲۱). سرخ کردن دارای چندین محدودیت است. از جمله به این موارد می‌توان اشاره کرد: در نظر گرفتن پدیده انتقال حرارت و آب به‌طور مستقل دشوار است چراکه به‌طور همزمان در سرخ کردن اتفاق می‌افتند و اینکه تقاضای مشتری برای فرآورده‌های کم‌چرب رو به افزایش است.

به‌خوبی مشخص شده است که علاوه بر ویژگی‌های مواد خام، روش‌های سرخ کردن و شرایط آن نیز بر کیفیت فرآورده تأثیر می‌گذارند. بنابراین، روش‌های دیگری مانند سرخ کردن در خلأ، سرخ کردن تحت فشار و سرخ کردن با ماکروویو برای بهبود کیفیت غذاهای سرخ‌شده مورد بررسی قرار گرفته‌اند. سرخ کردن در خلأ، در فشاری کمتر از فشار اتمسفری انجام می‌شود که در آن شرایط، نقطه جوش رطوبت ماده غذایی کمتر است. بنابراین، سرخ کردن را می‌توان در دماهای پایین‌تر انجام داد. در اروپا، سرخ‌کن‌های تحت خلأ برای تولید خلأ سیب‌زمینی سرخ‌شده مورد استفاده قرار می‌گیرند، زیرا امکان دستیابی به مقدار رطوبت مورد نیاز بدون تیره شدن این فرآورده‌ها وجود دارد (۱۳). سرخ کردن در خلأ دارای مزایایی نظیر کاهش جذب روغن، حفظ رنگ و طعم طبیعی فرآورده به علت دمای پایین‌تر و عدم وجود هوا طی فرایند، هم‌چنین حفظ کیفیت روغن در طولانی‌مدت است (۱۶). باین‌حال، عملیات سرخ کردن تحت خلأ معمولاً در محفظه‌های بسته انجام می‌شود، در نتیجه معایبی نظیر غیر مداوم بودن را دارد. سرخ‌کن‌های تحت خلأ مداوم نیز موجود هستند اما بسیار گران‌قیمت می‌باشند (۷).

مدل‌های متعددی برای پیش‌بینی جذب روغن طی سرخ کردن ارائه شده است. نی و داتا (۱۹۹۹) یک مدل چندمرحله‌ای را در یک محیط متخلخل برای مطالعه سینتیک جذب روغن در برش‌های سیب‌زمینی سرخ‌شده توسعه دادند (۱۵). علاوه بر این

کروکی‌ها و همکاران (۲۰۰۰) از معادلات سینتیک مرتبه اول برای مدل‌سازی محتوای روغن در سیب‌زمینی سرخ‌شده استفاده کردند که مقادیر ثابت سرعت تابعی از متغیرهای فرایند اصلی مانند دمای روغن، ضخامت نمونه و نوع روغن در نظر گرفته شد. برخی پژوهش‌ها در سال‌های اخیر یک مدل محیط متخلخل چند فازي که شامل انتقال جرم و حرارت برای سرخ کردن عمیق در چربی است و در آن تمام فازها در نظر گرفته شده است، توسعه داده‌اند (۹، ۱۰). در این مدل‌ها، شار کل روغن به علت تفاوت بین گاز و فشار موینگی است.

رشته و رشته خوشکار شیرینی‌های سنتی هستند که طرفداران زیادی دارند و از مشهورترین سوغاتی‌های استان گیلان محسوب می‌شوند. محتویات اصلی رشته، برنج و آرد گندم است که پس از آماده‌سازی خمیر، آن را در شانه مخصوص رشته ریزی ریخته، در سینی که روی آتش ملایم گذاشته شده است، می‌ریزند و پس از تا کردن آن را آماده سرخ کردن می‌کنند. برای مصرف این شیرینی، باید رشته‌های آماده‌شده را در روغن سرخ کرده، بعد به شربت (شیره) تهیه‌شده از شکر آغشته نمود. هدف از این پژوهش نیز بررسی سرخ کردن عمیق در شرایط سنتی و تحت خلأ و شبیه‌سازی انتقال روغن در آن است.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش برنج (رقم هاشمی) جهت تهیه آرد برنج و تولید رشته خوشکار از بازار محلی تهیه شد. از روغن آفتابگردان (تولید شرکت نینا، ایران) جهت سرخ کردن استفاده شد. پترولیوم اتر، تولوئن و سایر مواد شیمیایی از شرکت مرک^۱ آلمان خریداری شد.

جهت تولید رشته خوشکار از آرد برنج هاشمی استفاده شد. آب و آرد برنج با نسبت مساوی با یکدیگر مخلوط شده و خمیر حاصل به‌خوبی ورز داده شد. خمیر حاصل با آب مخلوط شده و مخلوطی دوغابی تهیه شد. مخلوط حاصل در ظرف مخصوص شانه ریخته شد. یک سینی مسی بر روی حرارت متوسط قرار گرفته، این مخلوط توسط شانه بر روی آن ریخته شد. پس از آماده شدن رشته، رشته بر روی خود چند تا خورد. رشته‌ها با ابعاد مشخص و تحت شرایط یکسان تولید شدند. جهت دستیابی به اندازه مشخص و یکسان (۱۰×۴×۰/۶۵ سانتیمتر مکعب)، رشته‌ها

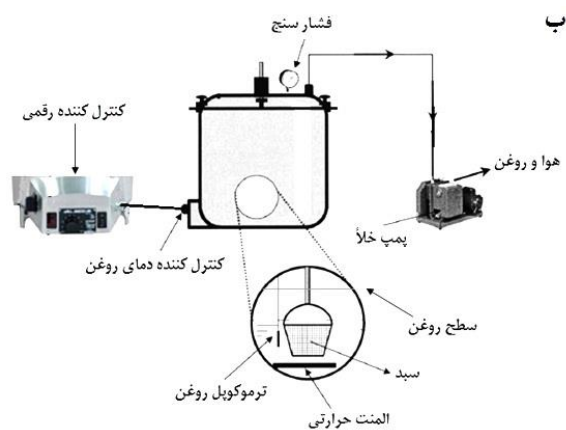
^۱ Merck

با قیچی مناسب بریده شدند. جهت تولید یکسان و یکنواخت رشته‌ها، برنج به مقدار کافی از تولید یک مزرعه خریداری شده و نگهداری شد. هرروز به مقدار لازم از این برنج آسیاب شده و جهت تولید رشته استفاده شد.

۲-۱- ساخت سرخ‌کن تحت خلأ

جهت انجام این پژوهش یک سرخ‌کن تحت خلأ در مقیاس آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد (شکل ۱). مخزن سرخ‌کن از جنس استیل و با ظرفیت ۸ لیتر تهیه شد. سامانه گرمایشی الکتریکی با قابلیت تأمین دما تا ۲۰۰ درجه سلسیوس به صورت گرمایش مستقیم در داخل مخزن سرخ‌کن مورداستفاده قرار گرفت. جهت کنترل دمای محیط گرمایش (روغن سرخ‌کن) از یک ترموکوپل (Micro-controller X, model PXR4,)

با قابلیت کنترل دما از ۰ تا ۱۲۰۰ درجه سلسیوس استفاده شد. ترموکوپل و سامانه گرمایشی الکتریکی به وسیله سیستم کنترل‌کننده منطقی برنامه‌ریزی شدند به گونه‌ای که محدوده تغییرات دمای روغن در دامنه ± 1 درجه سلسیوس قرار داشت و با افزایش دما گرمایش متوقف و با کاهش دما گرمایش ادامه می‌یافت. جهت تأمین خلأ از پمپ خلأ (DV-48 N 250, Platinum, USA) استفاده شد. همچنین جهت کنترل فشار، گیج فشار در مسیر ایجاد خلأ به کار رفت. ماده غذایی به وسیله یک سبد مشبک با قابلیت بالا و پایین رفتن و همچنین چرخش به داخل روغن فرستاده می‌شد.



شکل ۱- سامانه سرخ‌کن تحت خلأ: الف) سرخ‌کن ساخته شده، ب) نمای شماتیک سرخ‌کن.

زمانی ± 30 ثانیه از این زمان برای مدت‌زمان سرخ کردن تعیین شدند. بر این مبنا سرخ کردن در زمان‌های ۱۳۰، ۱۶۰ و ۱۹۰ ثانیه انجام شد.

۲-۲- شرایط سرخ کردن رشته خوشکار

رشته‌های تولیدی در چهار فشار مختلف (۴۷/۴، ۵۷/۸۳، ۷۰/۱ و ۱۰۱/۳۲۵ کیلو پاسکال) سرخ شدند. در هرکدام از فشارهای ذکر شده سه دما جهت سرخ کردن در ۳ مدت‌زمان مورداستفاده قرار گرفت (جدول ۱). مبنای انتخاب دما، اختلاف دمای سرخ کردن و نقطه‌جوش آب در فشار متناظر بود. در هر فشار، در سه نیروی پیشران حرارتی^۱ ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درجه سلسیوس، سرخ کردن انجام شد. با توجه به این مسئله که سرخ شدن کامل فرآورده بر اساس نظر اشخاص متفاوت است، لذا بر مبنای پیش تیمار، یک‌زمان سرخ کردن مشخص شده و دو زمان دیگر بافاصله

جدول ۱- شرایط فشار و دمای سرخ کردن رشته خوشکار

دمای سرخ کردن (درجه سلسیوس)			فشار مطلق (کیلو پاسکال)
۱۴۰	۱۶۰	۱۸۰	۱۰۱/۳۲۵
۱۳۰	۱۵۰	۱۷۰	۷۰/۱
۱۲۵	۱۴۵	۱۶۵	۵۷/۸۳
۱۲۰	۱۴۰	۱۶۰	۴۷/۴

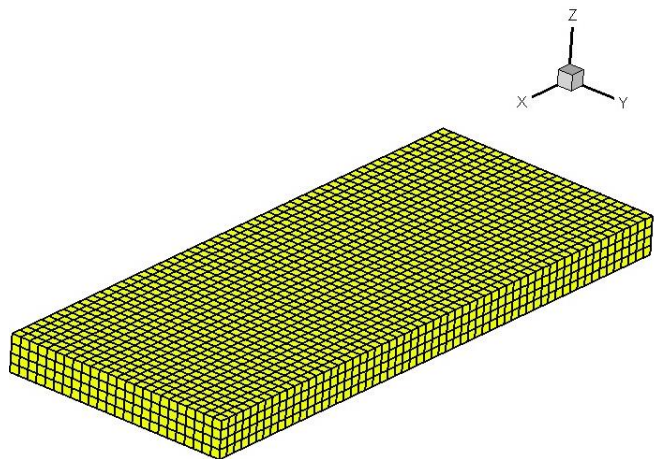
¹ Thermal Driving Force

۳- نتایج و بحث

شبهه‌سازی گرافیکی جذب روغن در رشته خوشکار سرخ شده در فشارهای مختلف و نیروهای پیشران حرارتی متفاوت طی زمان سرخ کردن تا ۱۹۰ ثانیه در شکل ۳ مشاهده می‌شود. آگویلا و گلوریا-هرناندز (۲۰۰۰) گزارش کردند که جذب روغن در فرایند سرخ کردن اساساً یک پدیده سطحی است که عمدتاً پس از مرحله سرد کردن اتفاق می‌افتد به گونه‌ای که حداقل ۶۴ درصد محتوای روغن کل در این مرحله جذب می‌شود (۲). گاریو و موریرا (۲۰۰۲) نیز بیان کردند که هر چه میزان دفع آب سریع‌تر باشد باعث می‌شود چسبندگی روغن در سطح چپس‌ها بیشتر بوده و بعد از آن جذب بالاتر روغن می‌شود (۵). پژوهش حاضر نیز این نتایج را تأیید کرد. همان‌گونه که در شکل ۳ نیز مشاهده می‌شود شبهه‌سازی نتایج توسط نرم‌افزار به خوبی قادر به بیان این مسئله بود. البته شکل‌های گرافیکی که جذب روغن را طی زمان سرخ کردن نشان می‌دهند در حقیقت میزان و شکل جذب روغن را به ازای زمان سرخ کردن انجام شده نشان می‌دهد. از آنجاکه دفع رطوبت در سرخ کردن در شرایط اتمسفری بیشتر بود همان‌گونه که انتظار می‌رفت چسبندگی روغن به سطح رشته خوشکار بیشتر بود در نتیجه جذب روغن نیز بالاتر بود. به هر حال در تمام فشارهای سرخ کردن جذب روغن در سطح بود.

پروفیل محتوای روغن برای برآزش نتایج شبهه‌سازی به داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفت (شکل‌های ۴، ۵، ۶ و ۷). در مراحل ابتدایی سرخ کردن رفتارهای داده‌های جذب روغن نامنظم است. سینگ (۱۹۹۵) این فاز ابتدایی را فاز جوشیدن سطحی نام‌گذاری کرد (۱۷). این بی‌ثباتی به علت تلاطم روغن سرخ کردن در نزدیکی سطح فرآورده است که ناشی از جوشیدن آب‌های سطحی و بالا رفتن حباب بخار آب از محدوده سطح است. به نظر می‌رسد این نتیجه‌گیری که جذب روغن در این دوره کوتاه زمانی عمدتاً به دلیل چسبندگی سطحی است و به احتمال زیاد نفوذ به دلیل مهار حرکت آب در لایه سطحی است منطقی باشد. فقدان انرژی حرارتی کافی برای القاء حرکت رطوبت نیز ممکن است نقش داشته باشد.

با افزایش نیروی پیشران حرارتی جذب روغن افزایش یافت. به‌طور مشابه گوپتا و همکاران (۲۰۰۰) گزارش کردند که جذب چربی ۱۵ و بیشتر از ۱۵ درصد در سیب‌زمینی سرخ شده پس از ۱۴



شکل ۲- شبکه تقسیم‌بندی شده برای حل معادلات حاکم در مدلسازی.

۲-۴-۳- ضریب انتشار جرم (روغن)

ضریب انتشار مؤثر یک پارامتر عملیاتی مهم در طراحی انواع دستگاه‌ها، مدلسازی، شبهه‌سازی و کنترل فرآیند مواد غذایی به شمار می‌رود. حذف رطوبت در فرآیند سرخ کردن عمیق با استفاده از رابطه‌ی زیر تعریف می‌شود (۱):

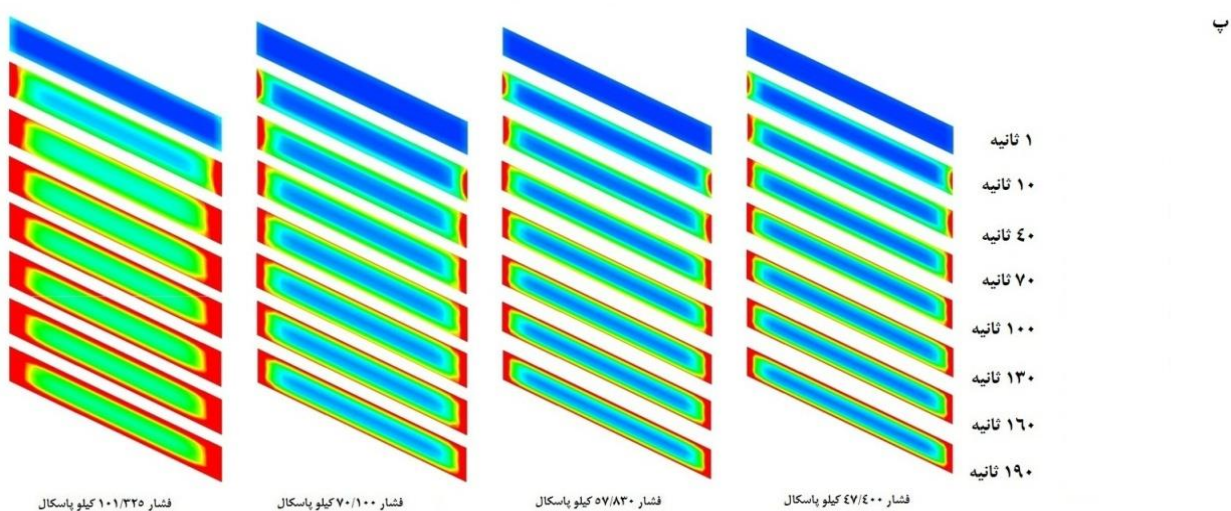
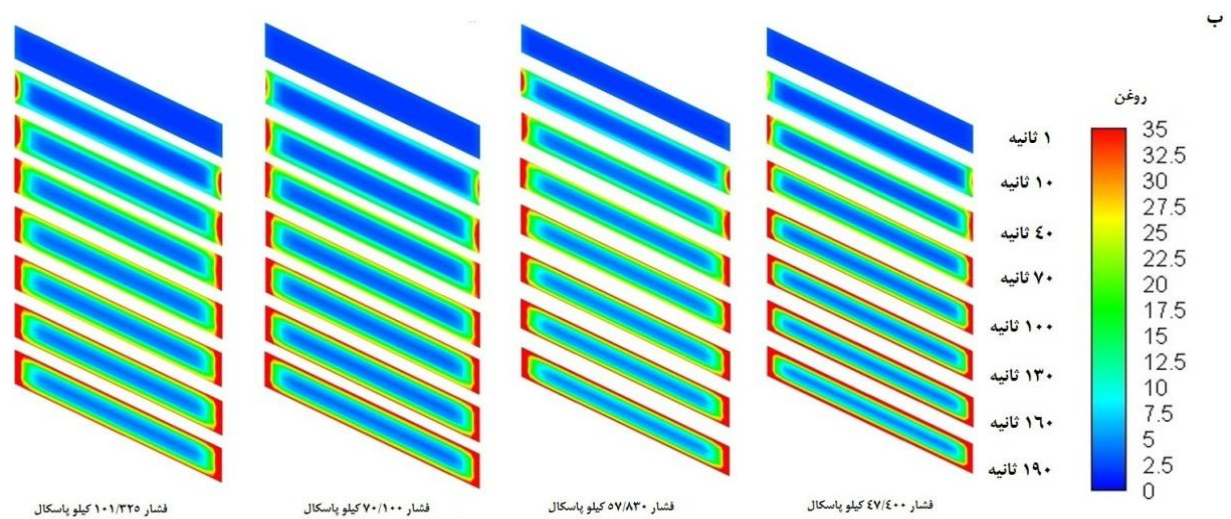
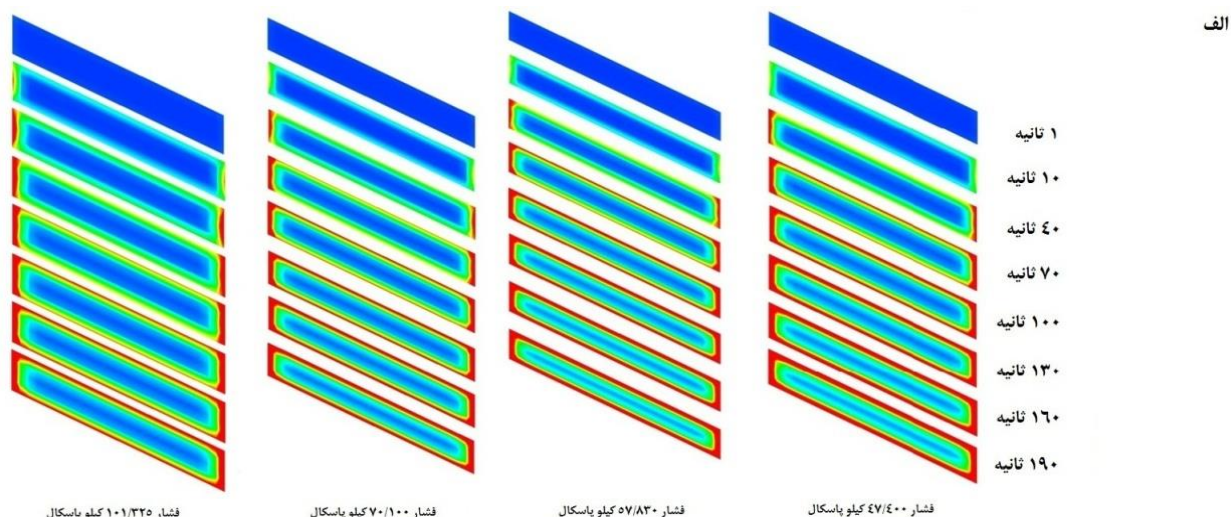
$$\frac{\partial O}{\partial t} = D_{eff,0} \frac{\partial^2 O}{\partial L^2}$$

که در آن L ضخامت نمونه است.

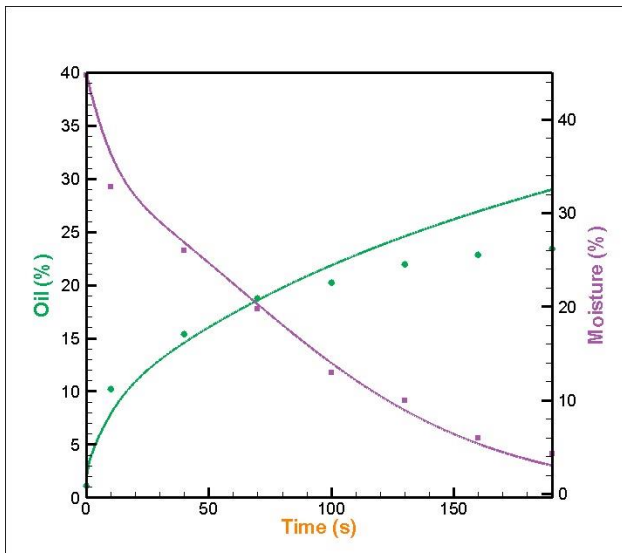
۲-۴-۴- الگوریتم حل

برای حل تغییرات ویژگی‌ها با دما از روش گسسته‌سازی ضمنی^۱ برای تقریب جملات نفوذ استفاده گردید (۲۰). در این روش تمامی متغیرها در لحظه حل انتخاب شده و در نهایت با حل دستگاه معادلات، تغییر هر متغیر در زمان موردنظر به دست می‌آید. با توجه به وابستگی تغییرات دما به رطوبت، حل همزمان آن‌ها در هر مرحله زمانی صورت می‌گیرد. به این منظور، ضرایب با در نظر گرفتن شرایط مفروض به دست آمده و پس از حل معادله انرژی، ضرایب انتشار روغن تصحیح و انتشار روغن محاسبه می‌گردد. با استفاده از مقادیر جدید روغن و دما، ضرایب تصحیح شده و این روند تا رسیدن به همگرایی مناسب تکرار می‌شود. شبهه‌سازی با استفاده از کد نویسی در نرم‌افزار فرترن ۹۵ انجام شد.

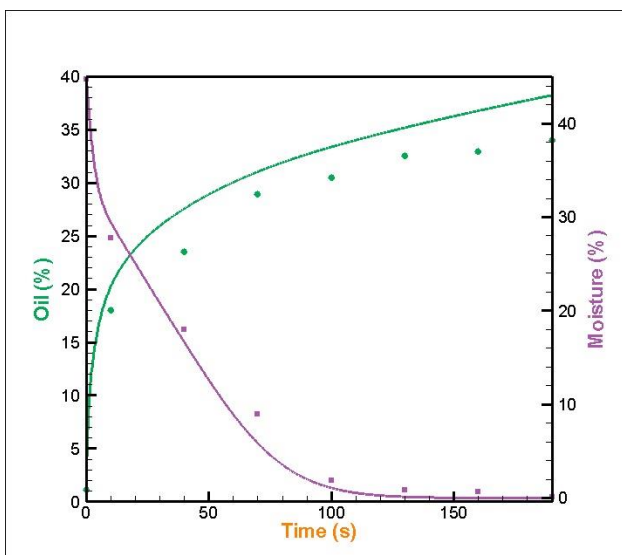
¹ Implicit



شکل ۳- شبیه سازی گرافیکی مقطع عرضی رشته در زمینه تغییرات محتوای روغن طی سرخ کردن در فشارهای مختلف: الف) نیروی پیشران حرارتی ۴۰ درجه سلسیوس، ب) نیروی پیشران حرارتی ۶۰ درجه سلسیوس و پ) نیروی پیشران حرارتی ۸۰ درجه سلسیوس.



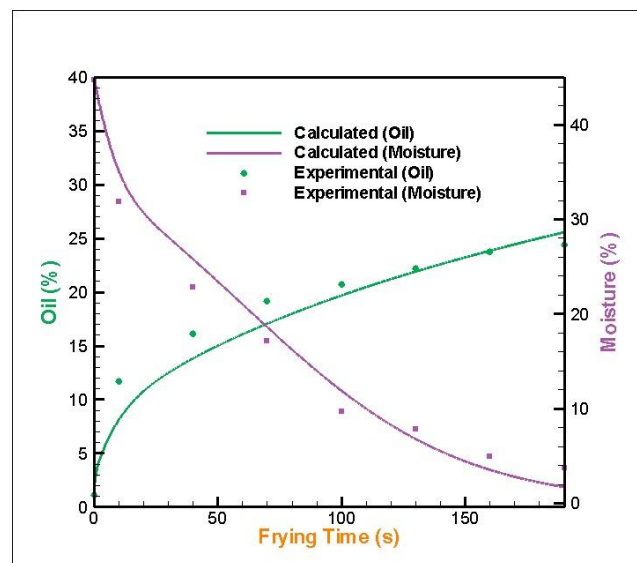
شکل ۵- تغییرات محتوای رطوبت و روغن نمونه رشته طی سرخ کردن (اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده) در فشار ۷۰/۱۰۰ کیلو پاسکال و نیروی پیشران حرارتی ۴۰ درجه سلسیوس.



شکل ۶- تغییرات محتوای رطوبت و روغن نمونه رشته طی سرخ کردن (اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده) در فشار ۱۰۱/۳۲۵ کیلو پاسکال و نیروی پیشران حرارتی ۸۰ درجه سلسیوس.

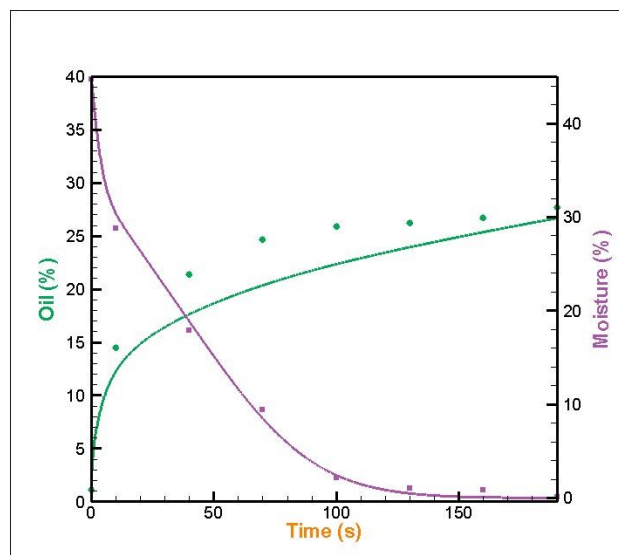
دقیقه سرخ کردن به ترتیب در درجه حرارت ۱۷۰ و ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد به دست آمد (۸). اما برخی پژوهشگران گزارش کردند که جذب روغن در دماهای بالاتر سرخ کردن کاهش می‌یابد (۱۴).

در برازش بین داده‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده، نوسانات در بین داده‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده به‌ویژه در شرایط سرخ کردن تحت خلأ بیشتر بود. جذب روغن در مراحل مختلف سرخ کردن ممکن است به خاطر برهمکنش موقت بین نفوذ روغن و ایجاد بخار آب در شرایط آزمایشگاهی باشد. ممکن است منافذ مویینه‌ای که با منافذ عمیق‌تر متصل نیستند با نفوذ روغن به‌طور کامل و همیشگی مسدود شوند درحالی‌که انسداد منافذی که با ساختارهای عمیق‌تر مربوط هستند با روغن ممکن است برطرف شود چراکه فشار کافی در عمق بافت وجود دارد. تغییرات ساختاری نیز ممکن است درگیر باشند. این عوامل در شبیه‌سازی مدنظر نبوده‌اند.



شکل ۴- تغییرات محتوای رطوبت و روغن نمونه رشته طی سرخ کردن (اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده) در فشار ۱۰۱/۳۲۵ کیلو پاسکال و نیروی پیشران حرارتی ۴۰ درجه سلسیوس.

4. Farkas, B. E., Singh R. P. & Rumsey T. R. 1996. Modeling heat and mass transfer in immersion frying. I, Model development. *Journal of Food Engineering*, 29: 211-226.
5. Garayo, J. & Moreira, R. 2002. Vacuum frying of potato chips. *Journal of Food Engineering*, 55: 181-191.
6. Gertz, C. 2000. History of Frying. In *Optimal Operation, 3rd International symposium on deep fat frying*, 20–21 March, Hagen, Germany.
7. Gupta, M.K., Grant, R., & Stier, R. F. 2004. Critical factors in the selection of an industrial fryer. In *Frying technology and practices*, ed. M.K. Gupta, K. Warner, and P.J. White, 91–109. Champaign, IL: AOCS Press.
8. Gupta, P., Shivhare, U. S. and Bawa. A. S. 2000. Studies on frying kinetics and quality of French fries. *Drying Technology*, 18 (1 & 2): 311-321.
9. Halder, A., Dhall, A. & Datta, A. 2007. An Improved, Easily Implementable, Porous Media Based Model for Deep-Fat Frying: Part I: Model Development and Input Parameters. *Food and Bioproducts Processing*, 85: 209-219.
10. Krokida, M.K., Oreopoulou, V., and Maroulis, Z.B. 2000a. Water loss and oil uptake as a function of frying time. *Journal of Food Engineering*, 44: 39-46.
11. Krokida, M. K., Oreopoulou, V., Maroulis, Z. B. & Marinos-Kouris, D. 2001b. Effect of pre-drying on quality of french fries. *Journal of Food Engineering*, 49: 347-354.
12. Moreira, R, Palau, J. and Sun, X. 1995. Simultaneous heat and mass transfer during deep fat frying of tortilla chips. *Journal of Food Process Engineering*. 18(3), 307–320.
13. Moreira, R., Castell-Perez, M. E., and Barrufet, M. A. 1999. *Deep-fat Frying: fundamentals and applications*. Maryland: Aspen Publishers, Inc.
14. Moyano, P. C., Río seco, V. K. & González, P. A. 2002. Kinetics of crust color changes during deep-fat frying of impregnated french fries. *Journal of Food Engineering*, 54: 249-255.
15. Ni, H. & Datta, A. K. 1999. Moisture, Oil and Energy Transport During Deep-Fat Frying of Food Materials. *Food and Bioproducts Processing*, 77: 194-204.
16. Shyu, S. L., Hau, L. B., & Hwang. L. S. 2005. Effects of processing conditions on the quality of vacuum-fried carrot chips. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85: 1903–1908.
17. Singh, P. R. 1995. Heat and mass transfer in foods during frying. *Food Technology*. Presented at a symposium sponsored by the IFT Food Engineering Division: 134-137.



شکل ۷- تغییرات محتوای رطوبت و روغن نمونه رشته طی سرخ کردن (اندازه گیری شده و شبیه سازی شده) در فشار ۷۰/۱۰۰ کیلو پاسکال و نیروی پیشران حرارتی ۸۰ درجه سلسیوس.

۴- نتیجه گیری

پروفیل محتوای روغن برای برازش نتایج شبیه سازی به داده های آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفت. در اغلب موارد برازش مناسبی بین داده های آزمایشگاهی و شبیه سازی شده مشاهده نشد. نوسانات در بین داده های آزمایشگاهی و شبیه سازی شده به ویژه در شرایط سرخ کردن تحت خلأ بیشتر بود. جذب روغن در مراحل مختلف سرخ کردن ممکن است به خاطر برهمکنش موقت بین نفوذ روغن و ایجاد بخار آب در شرایط آزمایشگاهی باشد. قابل ذکر است فرایند جذب روغن طی سرخ کردن پیچیده بوده و به طور کامل شناخته شده نیست. به نظر می رسد مدل بر مبنای قانون نفوذ فیک، مدل کامل و مناسبی برای پیش بینی میزان روغن جذب شده توسط نمونه ها نیست.

۵- منابع

1. 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: 146-153.
2. Aguilera, J. & Gloria-Hernandez, H. 2000. Oil Absorption During Frying of Frozen Parfried Potatoes. *Journal of Food Science*, 65: 476-479.
3. AOAC. 1990. *Official methods of analysis*. Washington, DC: Association of Official Analytical Chemists.

18. Troncoso, E., and Pedreschi, F. 2009. Modeling water loss and oil uptake during vacuum frying of pre-treated potato slices. *LWT - Food Science and Technology*, 42: 1164–1173.
19. Varela, G. 1998. Current facts about the frying of food. In *Frying of food: Principles, changes, new approaches*, ed. G. Varela, A.E. Bender and I.D. Morton, 9–23. New York: VCH.
20. Versteeg, H. K. & Malalasekera, W. 2007. *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*, Prentice Hall.
21. Vitrac, O., Dufour, D., Trystram, G., & Raoult-Wack, A. L. 2002. Characterization of heat and mass transfer during deep-fat frying and its effect on cassava chip quality. *Journal of Food Engineering*, 53: 161-176.