

مدلسازی انتقال حرارت همبرگر طی سرخ کردن عمیق

نجمه واحد دهکردی^۱، نفیسه جهان‌بخشیان^{۱*}، محمد حجت الاسلامی^۱

۱- گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۶/۰۵/۱۷ تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۶/۲۹)

چکیده

سرخ کردن عمیق یکی از قدیمی‌ترین فرآیندهای پخت می‌باشد که با فرو بردن ماده غذایی در روغن یا چربی خوراکی داغ صورت می‌گیرد و پدیده انتقال حرارت جز جدایی ناپذیر آن می‌باشد. در این پژوهش به منظور بررسی تغییرات دمایی در نقاط مختلف همبرگر و روغن یک مدل انتقال حرارت بر روی نرم افزار COMSOL توسعه داده شد. جهت تأیید مدل، نمونه همبرگر در یک سرخ کن آزمایشگاهی به مدت ۳۰۰ ثانیه در دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد سرخ گردید و دمای مرکز و سطح آن با قرار دادن ترموکوپل (نوع K) در این قسمت‌ها تعیین و با استفاده از دیتالاگر در فواصل زمانی ۱ ثانیه ثبت گردید. همبستگی بالای بین پروفیل‌های دمایی پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده، نشان داد که مدل توسعه داده شده می‌تواند به خوبی تغییرات دما در هر نقطه از همبرگر را پیش‌بینی نماید. همچنین، پس از تعیین ضرایب هدایت حرارتی و انتقال حرارت در سطح، مدل آرنیوس به خوبی توانست اثر دما بر این خصوصیات را توصیف نماید. با بررسی دمای نقاط مختلف همبرگر نشان داده شد که به دلیل کاهش اثر همرفت در قسمت بالای آن، دمای این قسمت کمتر از سایر نقاط بود که باعث عدم یکنواختی در پخت می‌گردد و می‌توان با ایجاد همرفت اجباری یا زیر و رو کردن نسریتر همبرگر این نقص را برطرف نمود.

کلید واژگان: همبرگر، مدل‌سازی، انتقال حرارت، ضریب هدایت حرارتی

*مسئول مکاتبات: n.jahanbakhshian@ag.iut.ac.ir

۱- مقدمه

هدف از این مطالعه تعیین خواص ترموفیزیکی همبرگر در دماهای مختلف و توسعه یک مدل ریاضی به منظور بررسی اثر دما بر خصوصیات ترموفیزیکی و همچنین تعیین تغییرات دما در نقاط مختلف روغن و همبرگر طی سرخ کردن در سرخ کن خانگی به منظور دستیابی به بهترین دما و زمان سرخ کردن می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- سرخ کردن

نمونه‌های همبرگر تهیه شده از کارخانه پاپلس اصفهان و حاوی ۱۳/۲۵٪ پروتئین، ۹/۹۵٪ چربی، خاکستر ۲/۵۹٪، کربوهیدرات ۱۱/۱۳٪ و ۶۲/۴۶٪ رطوبت بر مبنی مرطوب تا زمان انجام آزمون در فریزر (۱۸- درجه سلسیوس) نگهداری شد. نمونه‌ها پیش از انجام آزمون از فریزر خارج شد و پس از رسیدن به دمای محیط (دمای مرکز چند نمونه با ترموکوپل اندازه‌گیری شد تا از رسیدن دمای مرکز به دمای محیط اطمینان حاصل شود)، در سرخ کن پارس خزر (مدل ناگت) قابل تنظیم در دمای ۱۷۰ درجه سلسیوس و با استفاده از روغن آفتابگردان لادن بهمدت ۳۰۰ ثانیه سرخ شدند.

۲-۲- تعیین پروفیل دمایی همبرگر

دمای مرکز و سطح همبرگر در طی سرخ شدن با قرار دادن ترموکوپل (نوع K) با قطر ۰/۳ میلی‌متر (Omga, Stamford USA) در این قسمت‌ها تعیین و با استفاده از دیتالاگر DL2 ساخت انگلستان در فواصل زمانی ۱ ثانیه ثبت گردید.

۲-۳- گرمای ویژه

گرمای ویژه همبرگر بر اساس ترکیبات تشکیل دهنده آن و بر اساس یک مدل موازی، با استفاده از رابطه (۱) برآورد گردید [۱۲]:

$$C_p = 1.424m_c + 1.549m_p + 1.675m_f + 0.837m_a + 4.187m_m$$

در رابطه ۱، m کسر وزنی هر یک از اجزاء، Cp گرمای ویژه همبرگر و اندیس‌های c, f, p, m و a به ترتیب معرف رطوبت، پروتئین، چربی، کربوهیدرات و خاکستر می‌باشند.

۲-۴- تعیین ضریب انتقال حرارت در سطح

جهت تعیین ضریب انتقال حرارت در سطح (h_m)، از روش اندازه‌گیری دما در حالت ناپایا استفاده شد. در این روش، یک

سرخ کردن یکی از مهمترین عملیات‌های مورد استفاده در صنایع غذایی می‌باشد که به شکل‌های مختلفی از جمله سرخ کردن تحت خلاء، تحت فشار، استفاده از امواج مایکروویو، سرخ کردن سطحی و عمیق انجام می‌شود. سرخ کردن عمیق یا سرخ کردن غوطه‌وری^۲ به عنوان یکی از قدیمی‌ترین فرایندهای پخت شناخته می‌شود که با فرو بردن ماده غذایی در روغن یا چربی خوراکی داغ صورت می‌گیرد. این فرایند یک فرایند انتقال جرم و حرارت هم‌زمان می‌باشد که گرما از روغن به ماده غذایی منتقل شده، آب از ماده غذایی تبخیر می‌شود و در مقابل، روغن توسط آن جذب می‌شود [۱-۳]. سرخ کردن معمولاً در روغن داغ ۱۶۰ تا ۱۸۰ درجه سلسیوس انجام می‌شود. این شرایط دمایی منجر به انتقال حرارت با سرعت بالا، پخت سریع، قهوه‌ای شدن، بهبود بافت و عطر و طعم می‌شود [۴ و ۵]. از طرفی تغییرات فیزیکی و شیمیایی متعددی در اثر واکنش‌های مختلف در روغن داغ و ماده غذایی رخ می‌دهد که تحلیل این فرایند را دشوارتر می‌کند. به طور کلی لازمه طراحی، بهینه‌سازی و کنترل صحیح و دقیق فرایندهای انتقال حرارت طی عملیات سرخ کردن و تعیین دمای بهینه روغن، آگاهی از پارامترهای انتقال حرارت نظیر ضریب هدایت حرارتی و ضریب انتقال حرارت در سطح و همچنین مدلسازی این فرایند می‌باشد. در همین زمینه آتبا و همکاران (۱۹۹۴) یک مدل ریاضی جهت توصیف انتقال حرارت، رطوبت و روغن طی سرخ کردن عمیق گلوله‌های گوشت گوساله توسعه دادند [۶]. ساهین و همکاران (۱۹۹۹) به بررسی ضریب انتقال حرارت جایجایی طی سرخ کردن سیب‌زمینی پرداختند [۷]. صباغی و همکاران (۲۰۱۵) ضریب انتقال حرارت جایجایی را به عنوان تابعی از نرخ کاهش رطوبت طی فرایند سرخ کردن مورد مطالعه قرار دادند [۸]. امروزه مطالعات زیادی در زمینه جنبه‌های مختلف تولید و نگهداری محصولات گوشتی از جمله همبرگر صورت گرفته است [۹-۱۱]. اما بررسی منابع نشان می‌دهد، تاکنون مطالعه‌ای در زمینه تعیین خواص ترموفیزیکی و مدلسازی انتقال حرارت آن صورت نگرفته است. همچنین بیشتر مطالعات صورت گرفته در زمینه انتقال حرارت محصولات در دمای ثابت انجام شده است. بنابراین،

1. Deep Fat Frying
2. Immersion Frying

۷-۲- توسعه مدل ریاضی

یک مدل عددی برای توصیف انتقال حرارت در همبرگر و روغن طی فرایند حرارتی بعنوان تابعی از عوامل درونی (دمای اولیه و ترکیب روغن و همبرگر) و عوامل بیرونی (دمای حرارت‌دهی و ویسکوزیته روغن) در نرم افزار COMSOL Multiphysics 5.2 جهت پیش‌بینی پروفیل دما و تعیین نقطه سرد همبرگر توسعه داده شد.

۸-۲- فرضیات مدل

- زیر همبرگر لایه‌ای از روغن به ضخامت ۱ میلی‌متر و اطراف همبرگر به طور کامل روغن وجود دارد.
- مقدار دمای اولیه برای روغن ۴۴۳K و برای همبرگر ۲۹۳K است.

- انتقال حرارت درون همبرگر از طریق هدایت است.
- انتقال حرارت در روغن هم از طریق هدایت و هم جابجایی صورت می‌گیرد.
- انتقال حرارت بین ظرف و روغن در نظر گرفته نشده است.
- در حین انتقال حرارت، خصوصیات ترموفیزیکی همبرگر ثابت فرض شد.
- فرضیه شرایط No slip در شرایط مرزی روغن معتبر است.

۹-۲- سیستم معادلات انتقال حرارت مورد

استفاده

انتقال حرارت در روغن

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (4)$$

انتقال حرارت در همبرگر

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (5)$$

۱۰-۲- شرایط مرزی

شرایط مرزی برای نمونه و روغن در مدل‌سازی به صورت یکنواخت در نظر گرفته شد
شرایط مرزی برای همبرگر

$$-n \cdot (-k \nabla T) = h_m A (T_{surf} - T_{oil}) \quad (6)$$

۱۱-۲- شرایط مرزی برای روغن

$$T = 443 \text{ K} \quad \text{کف روغن} \quad (7)$$

$$-n \cdot (-k \nabla T) = 0 \quad \text{بالا و دیواره‌های روغن} \quad (8)$$

قطعه آلومینیوم صیقلی شده مشابه همبرگر که در دیواره آن سوراخی به قطر ۲ میلی‌متر ایجاد شده بود، مورد استفاده قرار گرفت. دو عدد ترموکوپل از نوع K در سطح و مرکز قطعه کار گذاشته شد. سپس، تغییرات دما در نقاط مذکور طی حرارت‌دهی در سرخ‌کن بوسیله دیتالاگر ثبت گردید. ضریب انتقال حرارت در سطح با استفاده از شیب بخش خطی نمودار $\ln(T_\infty - T_{aluminium})$ نسبت به زمان، بوسیله رابطه (۲) برآورد گردید [۱۲]:

$$h_m = \frac{MC_p}{A} \quad (2)$$

M جرم قطعه آلومینیومی، C_p گرمای ویژه آلومینیوم، m شیب نمودار $\ln(T_\infty - T_{aluminium})$ نسبت به زمان و A مساحت قطعه آلومینیومی می‌باشد.

۱۲-۵- هدایت حرارتی

هدایت حرارتی (k_w) همبرگر با استفاده از پروب هدایت حرارت خطی اندازه‌گیری شد [۱۲]. برای جلوگیری از تبادل رطوبت میان همبرگر و محیط اطراف در هنگام آزمایش، برش‌های همبرگر با اندازه‌های ۱/۵ در ۱/۵ سانتیمتر روی هم قرار داده شد تا به ارتفاع ۶ سانتیمتر برسد. سپس، مکعب مستطیل حاصل شده درون پوششی از پلی اتیلن قرار گرفت. پس از رسیدن نمونه به دمای ۳۰ درجه سلسیوس در داخل آون، جریان مشخصی از پروب عبور داده شد و افزایش دما توسط ترموکوپل تعبیه شده در داخل آن اندازه‌گیری و در فواصل زمانی نیم ثانیه توسط دیتالاگر ثبت گردید. میزان شدت جریان مورد استفاده در حدی تنظیم شد که بتواند یک افزایش دمای ۱۰ درجه‌ی سلسیوسی در مدت ۱۰ ثانیه ایجاد نماید. هدایت حرارتی ماده، از شیب بخش خطی نمودار دما-لگاریتم زمان که برابر با $m = Q / \lambda 4\pi$ است، تعیین گردید. در این رابطه $Q = RI^2$ است که I شدت جریان اعمالی بر حسب آمپر و R مقاومت سیم تعبیه شده در داخل پروب بر حسب اهم بر متر است.

۱۲-۶- اثر دما بر h_m و k_w

پس از تعیین h_m و k_w با در دماهای ۱۷۰، ۱۸۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد به منظور بررسی اثر دما بر این پارامترها از معادله آرنیوس استفاده گردید.

$$A = A_0 e^{-E_a/RT} \quad (3)$$

همبرگر با افزایش دما را نیز می‌توان به این دلیل دانست که بخش زیادی از همبرگر را آب (حدود ۶۰٪) تشکیل داده است. ضریب هدایت حرارتی آب اشباع حدود ۰/۶ وات بر متر درجه سلسیوس است که با افزایش دما افزایش می‌یابد [۵]. همرفت به انتقال انرژی به دلیل جابه‌جایی مایع یا گاز گفته می‌شود. جریان مایع یا گاز ممکن است با فرایندهای بیرونی به صورت اجباری ایجاد شود یا گاهی زمان‌ها به دلیل منبسط شدن در اثر افزایش دما ایجاد شود که در نتیجه باعث انتقال خودبخودی می‌شوند. فرایند دوم را گاهی اوقات همرفت طبیعی می‌نامند. با افزایش دما شدت تحرک مولکول‌ها افزایش یافته که این فرایند باعث افزایش ضریب همرفت حرارتی می‌شود [۴-۵]. پن^۱ و همکاران گزارش کردند با افزایش دمای همبرگر گوشت گاو، k_m و h_m افزایش می‌یابد که در مورد k_m با افزایش دما از صفر به ۱۰۵ درجه سلسیوس، میزان آن از ۰/۴۱۲ به ۰/۴۴۷ رسیده که با نتایج تحقیق حاضر تطابق دارد [۱۳]. با توجه به ضریب تبیین معادله آرنیوس (جدول ۳)، مشاهده می‌شود که این مدل به خوبی نتوانسته اثر دما بر ضریب هدایت حرارتی را پیش‌بینی نماید، ولی برای ضریب انتقال حرارت در سطح، R^2 مناسبی به دست آمده است.

Table 2 Thermal conductivity and heat convection coefficient of hamburger

h_m (W/m ² K)	k_w (W/mK)	Temperature (°C)
95.93	0.407	170
140.09	0.418	180
155.32	0.481	190

Table 3 Parameter estimates from Arrhenius model describing the influence of temperature on thermal conductivity and heat convection coefficient of hamburger

R^2	E_a	A_0	Variable
0.85	14740	21.77	k_w
0.91	41252	7275332	h_m

۲-۳- تایید مدل انتقال حرارت

مساله انتقال حرارت و جرم همزمان، سرخ کردن را به یکی از مشکل‌ترین عملیات‌های واحد قابل درک تبدیل می‌کند [۱۴]. با مقایسه پروفیل‌های دمای پیش‌بینی شده توسط مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده از طریق ترموکوپل برای مرکز همبرگر، طی سرخ کردن همبرگر در دمای ۱۷۰ درجه سلسیوس فرضیات

Table 1 Thermophysical properties of hamburger and oil

Hamburger	Oil	Item
0.11	0.24	Length (m)
0.007	0.043	Height (m)
0.39	0.169	Thermal conductivity (W/mK)
3520	1670	Specific Heat (J/kgK)
1081	900	Density (kg/m ³)
1E+9	0.04	Viscosity (Pa.s)
293	443	Initial temperature (K)

۲-۱۲- تایید مدل و اعتبارسنجی

ارزیابی مدل با استفاده از مقایسه داده‌های تئوری حاصل از روش تفاضل محدود با نتایج آزمایشگاهی صورت گرفت. ضریب تبیین (R^2) بالای بین مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل با داده‌های اندازه‌گیری شده و ریشه مربعات میانگین خطا (RMSE) کم می‌تواند نشانگر اعتبار مدل باشد:

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{exp,i} - T_{pred,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- هدایت حرارتی و ضریب انتقال حرارت

در سطح همبرگر

نتایج تغییرات k_w و h_m همبرگر در دماهای مختلف و همچنین مقادیر ثابت‌های مدل آرنیوس برای وابستگی دمایی این پارامترها در جدول‌های ۲ و ۳ آورده شده است. با افزایش دما، میزان هر دو پارامتر k_w و h_m افزایش پیدا می‌کند. k_w یک خاصیت مهم حرارتی اجسام است و به نوع جسم و شرایط آن بستگی دارد. هر چه میزان k_w جسم بیشتر باشد، جسم هادی‌تر بوده و مقدار بیشتری حرارت از آن می‌گذرد. در مقابل، هر چه این مقدار کمتر باشد، جسم عایق‌تر یا نارساناتر می‌باشد. مقدار k_w اجسام با تغییر دما تغییر می‌کند و همواره با گرم شدن مواد k_w آن‌ها افزایش یافته و رساناتر می‌شوند (بجز یخ که با افزایش دما و تبدیل شدن به آب، k_w آن کاهش می‌یابد). ضریب هدایت حرارتی بیشتر مایعات (بجز آب) با تغییر دما چندان تغییر نکرده و در حدود ۰/۵ وات بر متر درجه سلسیوس ثابت می‌ماند [۴]. افزایش ضریب هدایت حرارتی

سطح زیرین همبرگر منتقل می‌شود. همچنین، انتقال حرارت از طریق همرفت-هدایت از کف به روغن و از روغن به همبرگر با شدت بیشتری انجام می‌پذیرد. بنابراین، کف همبرگر دمایی بالاتر از سایر نقاط دارد. مطابق شکل ۴، در قسمت‌های کناری همبرگر نیز دما بالاتر از مرکز و سطح بالای همبرگر می‌باشد. با گرم شدن روغن در قسمت‌های زیرین، روغن به سمت ناحیه‌های سردتر اطراف جریان پیدا می‌کند و در کناره‌های همبرگر جریانی از روغن داغ و به سمت بالا به وجود می‌آید، و در اثر جریان همرفتی روغن، حرارت به کناره‌های همبرگر منتقل و باعث بالا رفتن دما در این نقاط می‌شود. دلیل پایین بودن دمای مرکز همبرگر نیز این است که پدیده انتقال حرارت به مرکز همبرگر هدایت حرارتی می‌باشد که در این روش انتقال حرارت کمتر از نقاط کناری است که انتقال به آنها از طریق هدایت و همرفت صورت می‌پذیرد. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، روند افزایش دما در بالای همبرگر در سطحی پایین‌تر از سایر نقاط قرار می‌گیرد. انتقال حرارت از طریق همرفت در بالای همبرگر بیشتر به صورت همرفت اختیاری بوده در نتیجه از شدت کمتری برخوردار است. همچنین، عدم وجود منبع حرارتی در قسمت سطح (فاصله بیشتر آن از محل منبع حرارتی در کف) می‌تواند عامل کمتر بودن دمای سطح باشد.

با بررسی نقاط مرکز، کف، بالا و کناره‌های روغن (شکل ۵) مشاهده می‌شود که دمای کناره‌های روغن طی زمان تغییر نکرده است، این در حالی است که دمای کف روغن ابتدا کاهش یافته سپس به سرعت به ۱۷۰ درجه سلسیوس رسیده است. همچنین، دمای مرکز و بالای روغن در ابتدا کاهش نشان داده و طی زمان دوباره دمای آنها افزایش یافته است. دمای کناره‌های روغن به دلیل فاصله زیاد (۵/۵ سانتی‌متر) با همبرگر و همچنین کم بودن سطح کناری همبرگر جهت انتقال حرارت تغییر نکرده است. در قسمت کف روغن، به دلیل کم بودن حجم روغن موجود در این ناحیه و شدت انتقال حرارت روغن به همبرگر در اثر کم بودن دمای همبرگر (۲۰ درجه سلسیوس)، ابتدا دما کاهش یافته ولی بعد از مدتی به دلیل وجود منبع حرارتی دوباره دما افزایش می‌یابد. در قسمت مرکز روغن به دلیل نزدیکی به بالای همبرگر و اختلاف زیاد بین دمای سطح همبرگر (۲۰ درجه سلسیوس) و روغن (۱۷۰ درجه سلسیوس)، انتقال حرارت شدت زیادی دارد. در نتیجه، حرارت

مدل انتقال حرارت تایید گردید. ضرایب تبیین و ریشه مربعات میانگین خطا به دست آمده بین داده‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده (شکل ۲) نشان می‌دهند مدل توسعه داده شده توانسته است تغییرات دما را در مرکز همبرگر به خوبی پیش‌بینی نماید.

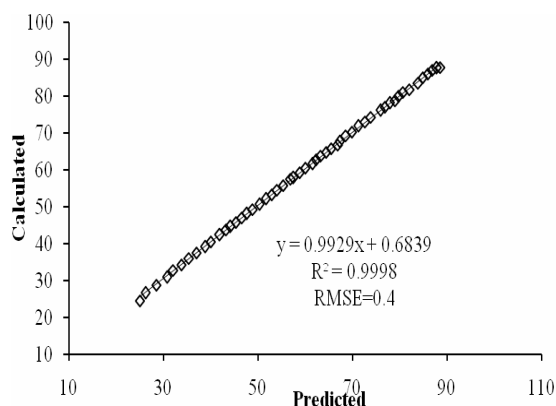


Fig 2 Model validation for center temperature of hamburger during heating at 170°C

شکل ۳ موقعیت نقاط مورد نظر برای مرکز، کف، بالا و دیواره‌های روغن و همبرگر را نشان می‌دهد که برای مقایسه تغییرات دما در نقاط مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای نقاط مرکزی روغن و همبرگر دقیقاً مرکز هندسی، برای بالا و کف روغن و همبرگر و دیواره‌های همبرگر نقاط صفر مرزی و برای دیواره روغن فاصله یک سانتی‌متری از دیواره ظرف برای نرم‌افزار تعیین شد و تغییرات دمایی این نقاط با هم مقایسه گردید.

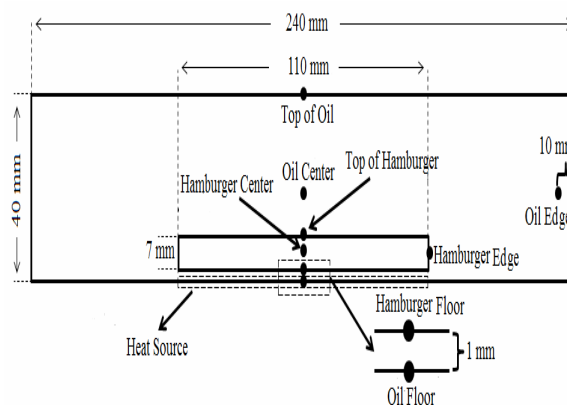


Fig 3 Points for model validation

با مقایسه نقاط مختلف همبرگر با همدیگر مشاهده می‌شود دمای کف همبرگر همواره بالاتر از سایر نقاط می‌باشد (شکل ۴). دلیل این امر این است که در قسمت کف، منبع حرارتی قرار دارد و حرارت‌دهی به روغن در ناحیه کف روغن اتفاق می‌افتد. به همین دلیل روغن زیر همبرگر گرم شده و گرما به

۳- نتیجه گیری

با توجه به اینکه همبرگر یکی از پرطرفدارترین محصولات گوشتی می‌باشد، انجام مطالعات در زمینه‌های مختلف تولید، نگهداری و سرخ کردن آن ضروری است. طی سرخ کردن مهمترین عامل تأثیرگذار بر کیفیت همبرگر سرخ شده، دمای روغن و تغییرات دما در نقاط مختلف همبرگر می‌باشد. به منظور بررسی این تغییرات، یک مدل ریاضی بر روی نرم افزار COMSOL توسعه داده شد که همبستگی بالای بین پروفیل‌های دمایی پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده، نشان داد که مدل توسعه داده شده می‌تواند به خوبی تغییرات دما در هر نقطه از همبرگر را پیش‌بینی نماید. با بررسی دمای نقاط مختلف همبرگر نشان داده شد که به دلیل کاهش اثر همرفت در قسمت بالای آن، دمای این قسمت کمتر از سایر نقاط می‌باشد که باعث عدم یکنواختی در پخت می‌گردد و با ایجاد همرفت اجباری با برگرداندن سریعتر همبرگر می‌توان این نقص را برطرف نمود.

۴- منابع

- [1] Debnath, S, Bhat, K.K, Rostagi, N.K. 2003. Effect of pre drying on kinetics of moisture loss and oil uptake during deep fat frying of chicken pea flour-based snack food. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie*, 36, 91-98.
- [2] Fritsch, C.W, 1981, Measurements of frying deterioration: A Brief View: *Journal of the American Oil Chemists Society*, 58(3), 272-274.
- [3] Krokida, M.K, Oreopoulou, V, Maroulis, Z.B, Marinos-Kouris, D. 2001. Deep fat frying of potato strips - quality issues, *Drying Technology*, 19(5), 879-935.
- [4] Baumann, B, Escher, E, 1995. Mass and heat transfer during deep-fat frying of potato slices. Rate of drying and oil uptake. *Lebensmittel Wissenschaft und-Technologie*, 28, 395-403.
- [5] Farkas, B.E, Singh, R.P, Rumsey, T. R, 1996, Modeling heat and mass transfer in immersion frying, part I: model development, *Journal of food engineering*, 29, 211-226.
- [6] Ateba, P, Mittal G.S, 1994, Dynamics of crust formation and kinetics of quality changes during drying of meat balls, *Journal of Food Science*, 59, 1275-1278.

با نرخ زیادی به سطح همبرگر منتقل شده و دمای روغن کاهش می‌یابد. با ادامه این روند بین مرکز روغن با سایر نقاط اطراف و سطح روغن، اختلاف دما ایجاد شده و حرارت از این نقاط به مرکز روغن انتقال می‌یابد. از طرفی به دلیل افزایش دمای سطح همبرگر، گرادیان دمایی بین مرکز روغن و سطح همبرگر کاهش یافته و در نتیجه، دمای مرکز روغن افزایش می‌یابد. علاوه بر این، بالای روغن چون فاصله بیشتری از سطح همبرگر دارد، انتقال حرارت نسبت به مرکز روغن کمتر است. این نتایج با نتایج ایکدیالا^۱ و همکاران حین سرخ کردن پتی^۲ در ماهیتابه یک طرفه همخوانی دارد [۱۵]. همچنین، سانز-سرنانو^۳ و همکاران (۲۰۱۶)، او و میتال^۴ (۲۰۰۶) و پن و همکاران (۲۰۰۰) نتایج مشابهی را گزارش نمودند [۱۳ و ۱۷، ۱۶].

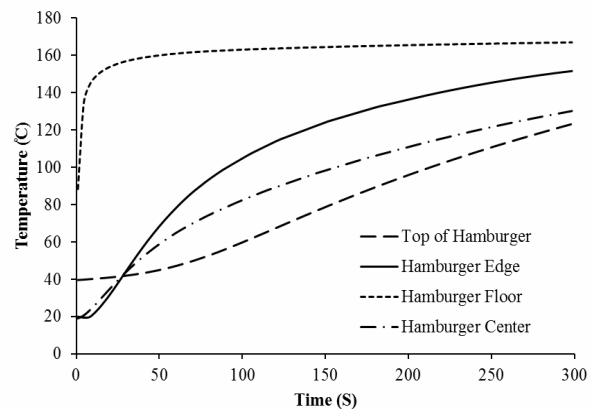


Fig 4 Predicted temperatures for hamburger during heating at 170°C.

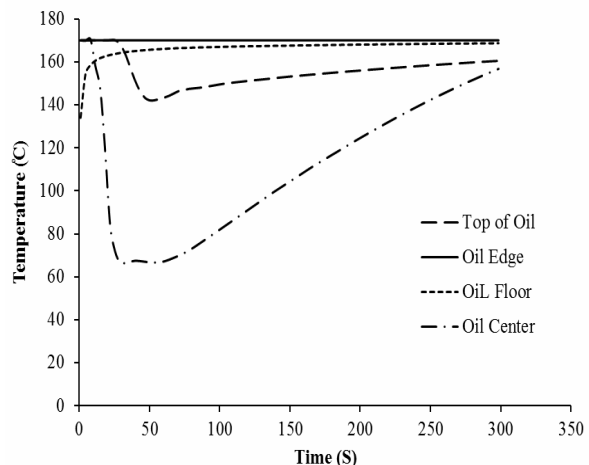


Fig 5 Predicted temperatures for oil during heating at 170°C.

1. Ikediala
2. Patty
3. Sanz-Serrano
4. Ou and Mittal

- cheese, *Journal of Food Research*, 3(2), 45-60 [in Persian].
- [13] Pan, Z, Singh R.P, Rumsey T.R, 2000. Predictive modeling of contact-heating process for cooking a hamburger patty, *Journal of Food Engineering*, 46, 9-19.
- [14] Baumann, B, Escher, E, 1995, Mass and heat transfer during deep-fat frying of potato slices. Rate of drying and oil uptake, *LebensmittelWissenschaft und Technologie*, 28, 395-403.
- [15] Ikediala, J.N, Correia L.R, Fenton, G.A, Ben-Abdallah, N, 1996, Finite element modeling of heat transfer in meat patties during single-sided pan-frying, *Journal of Food Science*, 61, 797-802.
- [16] Sanz-Serrano, F, Sagues C, Liorente, S, 2016, Inverse modeling of pan heating in domestic cookers, *Applied Thermal Engineering*, 92, 137-148.
- [17] Ou, D, Mittal, G.S, 2006, Double-sided pan-frying of unfrozen/frozen hamburgers for microbial safety using modelling and simulation, *Food Research International*, 39, 133-134.
- [7] Sahin, S, Sastry, S.K, Bayindirli, L, 1999, The determination of convective heat transfer coefficient during frying, *Journal of Food Engineering*, 39, 307-311.
- [8] Sabbaghi, H, Ziaifar, M. A, Sadeghi Mahonak, A. R, Kashaninejad, M, Mirzaei, H, 2015, Estimation of convective heat transfer coefficient as function of the water loss rate during frying process, *Iranian Food Science and Technology (in Persian)*, 11(4), 473-484.
- [9] Heydari, M, 2016, Study of the effects of antimicrobial and anti-oxidative properties of cinnamon and ginger essential-oil on shelf life and organoleptic properties of chicken and beef burgers, M.Sc Thesis of Azad University (Khorasan Branch).
- [10] Ramadhan K, Huda N, Ahmad R, 2011, Physicochemical characteristics and sensory properties of selected Malaysian commercial chicken burgers, *International Food Research Journal*, 18(4), 1349-1357.
- [11] KavousiNejad M, Fazlara A, Morovati H, 2008, Detection of unauthorized tissue in hamburger with histological method. 15th Congress of Veterinary of Iran, Iran 2008 [in Persian].
- [12] Dalvi M, Hamdami N, 2010, Numerical heat transfer modeling in ultrafiltered white

Heat Transfer Modeling of Hamburger during Deep Frying

Vahed Dehkordi, N.¹, Jahanbakhshian, N.^{1*}, Hojataleslami, M.¹

1. Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Shahrekord Branch, Islamic Azad University, Shahrekord, Iran

(Received: 2017/08/08 Accepted: 2018/09/20)

One of the baking processes that carried out by dipping the food in hot oil or fat is deep frying, and the heat transfer phenomenon is an inseparable part of it. In this study, in order to investigate the temperature changes in different parts of hamburger and oil, a heat transfer model was developed in COMSOL software. To validate the model, the hamburger was fried in a laboratory fryer for 300 seconds at 170°C and its center and surface temperatures were determined by placing the thermocouple (K type) in these areas and recorded by the data logger. The high correlation between predicted and measured temperature profiles showed that the developed model could well predict the temperature changes at each point of the hamburger. Also, after determining the heat conduction and heat transfer coefficients, the Arrhenius model could well describe the effect of temperature on these characteristics. The temperature profile of different parts of the hamburger showed that due to the reduce convection effect in the upper parts, the temperature of this part was lower than other points, which results in a lack of uniformity in baking, and it can be remedied by creating forced convection or quicker return of the burger.

Keywords: Hamburger, Modeling, Heat transfer, Thermal conductivity

* Corresponding Author E-Mail Address: n.jahanbakhshian@ag.iut.ac.ir