

سنجش دمای مرکز و تغییرات رنگ برش‌های پیاز در طی فرآیند سرخ کردن

فخرالدین صالحی*

استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۹/۱۹

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۶/۲

چکیده

مقدمه: سرخ کردن به‌عنوان قدیمی‌ترین روش آماده‌سازی مواد غذایی به‌طور وسیع در مقیاس خانگی و صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. گسترش رنگ طی فرآیند سرخ کردن یک پدیده سطحی وابسته به دما و زمان فرآیند است. هدف این پژوهش بررسی تغییرات دمای مرکز، تغییرات مساحت سطح نمونه‌ها و توصیف رفتار تغییرات رنگ برش‌های پیاز حین فرآیند سرخ کردن به‌صورت یک مدل ریاضی در دماهای مختلف است.

مواد و روش‌ها: برش‌های پیاز به‌صورت استوانه‌ای با ضخامت ۱ سانتی‌متر در دماهای ۱۴۰، ۱۶۰، ۱۸۰ و ۲۰۰ درجه سلسیوس سرخ و تغییرات دمای مرکز آن‌ها با ترموکوپل دمایی نوع K با ضخامت یک میلی‌متر هر ۵ ثانیه ثبت شد. دمای سطحی محصول، با استفاده از دمانگار لیزری ثبت شد. شاخص‌های رنگی شامل روشنایی (L^*)، قرمزی (a^*)، زردی (b^*) و تغییرات رنگ (ΔE) در طی زمان سرخ کردن ثبت و تغییرات آن‌ها در برابر زمان روی مدل سینتیکی برازش و ضرایب مدل گزارش شد.

یافته‌ها: دمای روغن تأثیر منفی روی روشنایی برش پیاز سرخ‌شده نشان داد و با افزایش دمای فرآیند مقدار شاخص روشنایی در زمان یکسان کاهش یافت. نتایج این آزمایش نشان داد که بخش عمده تغییرات رنگ در مراحل ابتدایی فرآیند رخ می‌دهد. دماهای بالاتر باعث افزایش زردی و قرمزی رنگ سطح برش‌های پیاز به ترتیب از ۱۴/۲۴ به ۲۹/۳۱ و ۵/۷۳ به ۱۷/۸۶ شد. نمونه‌های سرخ‌شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس افت بیشتری از نظر اندازه سطح داشته (۴۰/۴۸ درصد) و اندازه کوچک‌تری داشتند. در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس، دمای مرکز سریع‌تر به نقطه جوش آب نزدیک شده و بعد از کمی توقف در این دما با خروج کامل آب، مجدد دمای مرکز افزایش یافت.

نتیجه‌گیری: سینتیک تغییرات شاخص‌های رنگ سطح و تغییرات کلی رنگ (ΔE) پیاز به ترتیب از تابع‌نمایی افزایشی و تابع توانی تبعیت نمود.

واژه‌های کلیدی: پیاز، تغییرات سطح، رنگ، سرخ کردن، سینتیک

مقدمه

نظارت بر فرآیند مفید باشد. معمولاً در صنعت و حتی در مراکز تحقیقاتی، کنترل کیفیت و بررسی آن به‌وسیله اندازه‌گیری شدت رنگ بعد از سرخ کردن با استفاده از بازرسی چشمی بر اساس جدول‌های رنگ استاندارد و در بهترین حالت با کمک روش‌های پردازش تصویر انجام می‌شود (Rodriguez-Saona and Wrolstad, 1997). میزان تغییرات رنگ و متناسب با آن سطح آکريل آمید با افزایش زمان و دمای فرآیند زیاد می‌شود (Michalak et al., 2011). به‌طور کلی یک روغن مناسب برای سرخ کردن باید مقاومت اکسیداتیو بالا، نقطه دود بالا (سطح پایین اسیدهای چرب آزاد) و حداقل تیره شدن رنگ را در اثر فرآیند نشان دهد. هر دو عامل میزان دمای سرخ کردن و ثبات دمایی روغن در محدوده زمانی موردنظر به حفظ کیفیت محصول کمک می‌کند. هرگونه نوسان دمایی می‌تواند تأثیر منفی بر روی کیفیت رنگ محصول و کنترل آن داشته باشد. از طرفی همان‌طور که زمان تماس بین غذا و روغن سرخ‌کردنی افزایش می‌یابد، حرارت بیشتری از روغن سرخ‌کردنی به غذا منتقل شده و در نتیجه واکنش‌های تجزیه‌ای در سطح و مهاجرت آب از مرکز به بیرون ماده غذایی، بیشتر می‌شود. ضریب انتقال حرارت در طی فاز جوشش می‌تواند دارای نقش بحرانی در تشکیل ویژگی‌های حسی محصول، سرعت بخشیدن به واکنش‌های قهوه‌ای شدن غیرآنزیمی (واکنش مایلارد) و کاراملیزه شدن، که موجب پخش شدن کامل عطر و طعم، رنگ و بافت ماده غذایی می‌شوند، باشد (Farkas and Hubbard, 2000).

با وجود اینکه تحقیقات زیادی در زمینه بررسی و کنترل رنگ خلال سیب زمینی انجام شده است، اما بررسی سینتیکی تغییرات رنگ پیاز مورد توجه قرار نگرفته است. Moyano و همکاران (۲۰۰۲) سینتیک تغییرات رنگ پوسته خلال‌های سیب‌زمینی را بررسی کردند. در پژوهشی دیگر Krokida و همکاران (۲۰۰۱) تأثیر دمای روغن، نوع روغن و ضخامت نمونه را روی تغییرات رنگ خلال سیب‌زمینی حین سرخ کردن با استفاده از یک مدل سینتیکی نمایی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که دمای روغن و ضخامت ماده غذایی از شاخص‌های مهم فرآیند هستند که تأثیر معنی‌داری بر سرعت تغییر رنگ محصول دارند، در حالیکه استفاده از روغن هیدروژنه به جای روغن غیرهیدروژنه تأثیری بر تغییرات رنگ نداشته

پیاز (*Allium cepa*) به‌صورت خام، سرخ‌شده و یا خشک‌شده در تهیه انواع غذاها به عنوان یک چاشنی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Abbasi et al., 2011; Ganjeh et al., 2013). برخی از محققان در زمینه خشک‌کردن پیاز تحقیق نموده و خشک‌کردن آن را راهی برای افزایش ماندگاری ذکر کرده‌اند. برای مثال مدل‌سازی ریاضی فرآیند خشک‌کردن پیاز به کمک خشک‌کن هوای داغ توسط محققان بررسی شده است (Abbasi et al., 2011). در پژوهشی دیگر مدل‌سازی سینتیک خشک‌کردن پیاز در یک خشک‌کن بستریال مجهز به کنترل‌کننده رطوبت با استفاده از روش‌های رگرسیون، منطق فازی و شبکه‌های عصبی مصنوعی توسط Ganjeh و همکاران (2013) بررسی شده است (Ganjeh et al., 2013). روش متداول برای استفاده و نگهداری پیاز سرخ کردن آن است. فرآیند سرخ کردن از فرآیندهای پیچیده انتقال همزمان حرارت و جرم بوده و به دلیل ایجاد خواص حسی منحصر به فرد در ماده غذایی، از جمله عطر، طعم و رنگ، استفاده می‌شود. رنگ از مهم‌ترین شاخص‌های کیفی مواد غذایی است که حتی قبل از مصرف ماده غذایی مورد توجه قرار می‌گیرد (Choe and Min, 2007).

رنگ محصول سرخ‌شده از نظر سلامت محصول اهمیت دارد. گسترش رنگ طی فرآیند یک پدیده سطحی است که وابسته به دما و زمان فرآیند می‌باشد. آکريل آمید از ترکیبات حاصل از واکنش بین اسیدآمینه آسپاراژین و قندهای احیاکننده طی واکنش مایلارد است و کنترل دما و زمان در حین فرآیند سرخ کردن تأثیر معنی‌داری بر کاهش تشکیل آکريل آمید دارد (Romani et al., 2009). از طرفی دمای سطحی محصول در تشکیل رنگ و واکنش‌های شیمیایی وابسته به آن، اهمیت زیادی دارد. در واقع تشکیل آکريل آمید عمدتاً در سطح و نزدیک سطح محصول اتفاق می‌افتد. بنابراین، کنترل زمان و دمای سطحی محصول و شستشوی سطح برش خورده آن می‌تواند تا حد زیادی تشکیل آکريل آمید را کاهش دهد (Gökmen and Palazoğlu, 2008).

ارزیابی ظاهری از نظر گسترش مناطق چرب و قهوه‌ای در سطح محصول، می‌تواند به‌منظور برآورد نهایی کیفیت محصول از نظر محتوای روغن و شدت رنگ و همچنین

رنگی آبی تا زرد) می‌باشد (Salehi, 2017; Salehi and Amin Ekhlash, 2018). مقادیر تغییر رنگ (ΔE) در مقایسه با نمونه تازه، با استفاده از معادله ۱ محاسبه شد.

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2} \quad (1)$$

سطح برش‌های پیاز در طی سرخ کردن با استفاده از روش پردازش تصویر و با استفاده از اسکنر اندازه‌گیری شد. درصد تغییر اندازه سطح برش‌ها که معیاری از چروکیدگی و کاهش سطح محصول است با استفاده از معادله ۲ محاسبه و گزارش شد.

$$\Delta A = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100 \quad (2)$$

A_0 : سطح نمونه در زمان صفر (cm)

A_t : سطح نمونه در زمان t (s)

- اندازه‌گیری تغییرات دما

جهت اندازه‌گیری دمای روغن و مرکز نمونه‌ها، از دماسنج دیجیتالی تماسی دو کاناله لوترون^۲ با دامنه دمایی ۵۰- تا ۱۲۳۰ درجه سلسیوس با دقت ۰/۱± درجه سلسیوس و ترموکوپل دمایی نوع K با ضخامت یک میلی‌متر استفاده گردید. جهت اندازه‌گیری تغییرات دمای سطحی از دمانگار لیزری^۳ با دامنه دمایی ۳۲- تا ۱۰۵۰ درجه سلسیوس با دقت ۰/۱± درجه سلسیوس استفاده شد (Salehi, 2018).

- مدل‌سازی سینتیک تغییر شاخص‌های رنگی

به‌منظور بررسی سینتیک و پیش‌بینی روند تغییرات رنگ پیاز در طی فرآیند سرخ کردن، از مدل Krokida و همکاران (۲۰۰۱) با کمی تغییرات استفاده و همبستگی این مدل سینتیکی با داده‌های تجربی بررسی گردید (Krokida et al., 2001). از ویژگی‌های عمده این مدل می‌توان به سادگی و شکل درجه یک آن اشاره نمود که بیان ساده‌ای از تغییرات رنگ خواهد داشت. بر این اساس رفتار تغییرات رنگ طی سرخ کردن از یک مدل نمایی تبعیت می‌کند که با داده‌های تجربی به‌دست‌آمده سازگاری دارد. سینتیک تغییرات شاخص‌های رنگی به‌صورت معادلات ۳ و ۴ بیان می‌شود (Krokida et al., 2001; Salehi, 2019):

است. شدت تغییرات رنگی با افزایش دما و کاهش ضخامت زیاد می‌شود ولی رفتار تغییرات رنگی و نوع تابع همواره به‌صورت نمایی افزایشی است (Moyano et al., 2002).

یکی از مهم‌ترین الزامات جهت کنترل یک ویژگی کیفی، مانند رنگ، آگاهی از روند تغییرات آن طی فرآوری است. با توجه به منابع منتشرشده مشخص شد تاکنون پژوهشی در خصوص بررسی تغییر دمای مرکز و مدل‌سازی سینتیک تغییرات رنگ در طی فرآیند سرخ کردن پیاز صورت نگرفته است. لذا هدف این تحقیق بررسی اثر دما و زمان فرآیند سرخ کردن بر سرعت انتقال حرارت و تغییرات رنگ پیاز و مدل‌سازی سینتیکی آن می‌باشد. مدل به دست آمده از این پژوهش توصیف‌کننده رفتار تغییرات رنگ حین فرآیند سرخ کردن پیاز، می‌باشد.

مواد و روش‌ها

- فرآیند سرخ کردن

برای انجام آزمایش‌ها پیاز سفید با قطر متوسط ۵ سانتیمتر از استان همدان تهیه گردید. برای انجام فرآیند سرخ کردن ابتدا پیازها به قطعاتی به شکل استوانه با قطر ۵ سانتی‌متر و با ضخامت ۱ سانتی‌متر با استفاده از کاتر برش داده شدند. برش‌های پیاز بلافاصله جهت سرخ کردن در چهار سطح دمای ۱۴۰، ۱۶۰، ۱۸۰ و ۲۰۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند. جهت سرخ کردن از روغن آفتابگردان (لادن، ایران) استفاده شد.

- بررسی تغییرات رنگ سطحی

جهت بررسی تغییرات رنگ سطح نمونه‌ها از روش پردازش تصویر استفاده شد. در این روش از یک اسکنر اچ‌پی^۱ جهت تصویربرداری استفاده شد. ابتدا تصاویر با فرمت JPG و در فضای رنگی RGB ذخیره شدند. تصاویر گرفته‌شده توسط نرم‌افزار Image J (Image J software) (version 1.42e, USA) و برنامه آن (Color-Space Converter) از فضای رنگی RGB به $L^* a^* b^*$ تبدیل گردیدند (Salehi, 2017). مدل رنگی Lab مرکب از جزء روشنایی (مقدار L که دامنه‌ای از صفر تا ۱۰۰ را دارد) و دو جزء رنگی (دامنه‌ای از ۱۲۰- تا ۱۲۰+) که شامل جزء a^* (دارای طیف رنگی سبز تا قرمز) و جزء b^* (دارای طیف

¹ Hp Scanjet 300

² Lutron, TM-916, Taiwan

³ Mastech, MS6540B, China

$$\Delta E = \Delta E_e (1 - \exp(-K_E t)) \quad (7)$$

$$\Delta E = at^b \quad (8)$$

در این مطالعه به منظور مدل کردن داده‌های تجربی سرخ کردن و به دست آوردن ثابت‌های مدل‌ها، از نرم‌افزار Curve Expert ویرایش ۱/۳۴ استفاده شد. دما به‌عنوان متغیر مستقل و تغییر دمای مرکز، شاخص‌های رنگ و سطح به‌عنوان متغیرهای وابسته انتخاب شدند. آزمایش‌ها در سه تکرار و در قالب فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی مورد بررسی قرار گرفتند. برای رسم نمودارها از برنامه (۲۰۰۷) Excel استفاده شد.

یافته‌ها

به‌طور کلی برش‌های روشن و طلایی پیاز نسبت به رنگ تیره ترجیح داده می‌شوند. تغییر رنگ و سطح برش‌های پیاز در طی سرخ شدن در مدت‌زمان ۲۷۰ ثانیه (هر ۳۰ ثانیه یک عکس) در شکل ۱ به نمایش درآمده است. در تمامی دماها چنین تغییراتی مشاهده شد، اما شدت آن با افزایش دما افزایش می‌یافت. اثر دما بر تغییر شاخص روشنایی (L^*) طی سرخ کردن پیاز در شکل ۲ گزارش شده است. دمای روغن تأثیر منفی روی روشنایی برش پیاز سرخ‌شده نشان داد و با افزایش دمای فرآیند میزان شاخص روشنایی از ۴۴/۱۶ به ۳۰/۵۷ کاهش یافت. کاهش این شاخص به‌عنوان یک عامل منفی در رنگ محصول در نظر گرفته می‌شود. با توجه به جذب روغن کمتر در دماهای بالا، کنترل رنگ به‌عنوان یکی از ویژگی‌های کیفی در این شرایط اهمیت زیادی دارد.

$$\frac{dC}{dt} = -K_c (C - C_e) \quad (3)$$

$$\left(\frac{C - C_e}{C_i - C_e} \right) = \exp(-K_c t) \quad (4)$$

در معادلات فوق C مقدار شاخص رنگی (a یا b) در زمان مشخص، C_e مقدار شاخص در زمان بی‌نهایت یا مقدار تعادلی (بدون بعد) است. K_c ثابت سینتیکی تغییرات هر یک از شاخص‌ها (برحسب عکس ثانیه) و t زمان برحسب دقیقه می‌باشد. در لحظه صفر هر شاخص مقدار اولیه خود یعنی C_i را داشته و با توجه به تغییرات نامی بعد از زمان صفر می‌توان معادله ۵ را به‌عنوان مدل تجربی کلی و بیانی دیگر از معادله ۴ در نظر گرفت.

$$C = C_i + a.(1 - \exp(K_c t)) \quad (5)$$

حرف a در معادله ۵ شاخص مدل می‌باشد. با حل و برازش معادله ۵ روی میانگین داده‌های تجربی شاخص‌های رنگی، تغییرات شاخص‌های رنگی نسبت به زمان، K_c و a قابل محاسبه خواهند بود (Sabbaghi et al., 2017).

مقادیر ΔE نیز برای دماهای مختلف در طی زمان سرخ کردن محاسبه شد و داده‌های تجربی حاصل از آن با مدل‌های سینتیکی ۶ و ۷ برازش شدند. معادله ۶ به‌صورت سه شاخصی می‌باشد و حروف b_1 ، b_2 ، b_3 ثابت‌های معادله می‌باشند. در معادله ۷، حرف a شاخص مدل و K_E ثابت سینتیکی برحسب عکس ثانیه می‌باشد. معادله ۸ نیز یک مدل توانی می‌باشد که a و b ثابت‌های معادله و t زمان برحسب ثانیه می‌باشد.

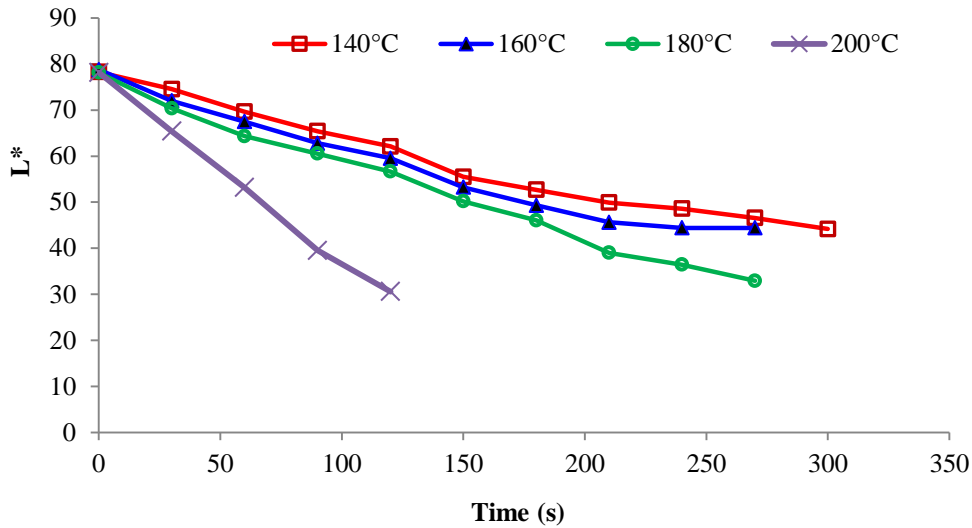
$$\Delta E = b_1 + b_2 \exp\left(\frac{-t}{b_3}\right) \quad (6)$$



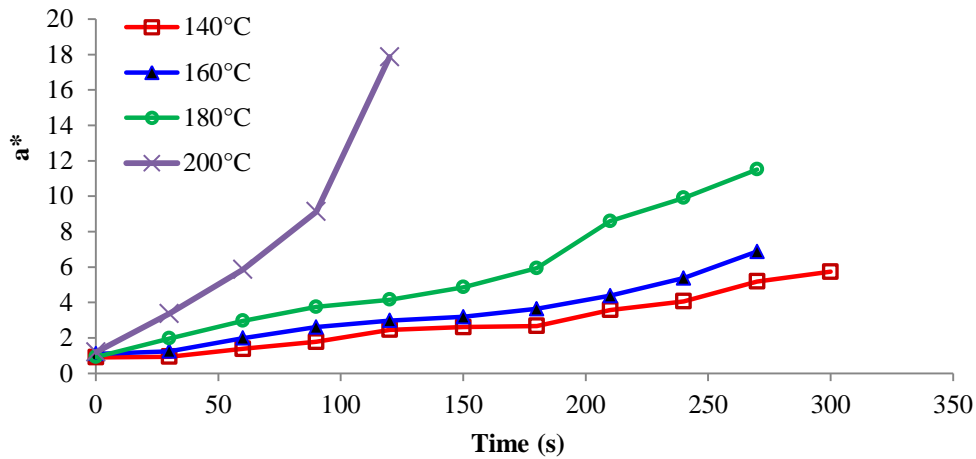
شکل ۱- تغییر رنگ و سطح برش‌های پیاز در طی سرخ شدن

اثر دما بر تغییر شاخص زردی (b^*) طی سرخ کردن پیاز در شکل ۴ گزارش شده است. مقدار این شاخص با افزایش دمای روغن و زمان فرآیند از ۱۴/۲۴ به ۲۹/۳۱ افزایش یافت.

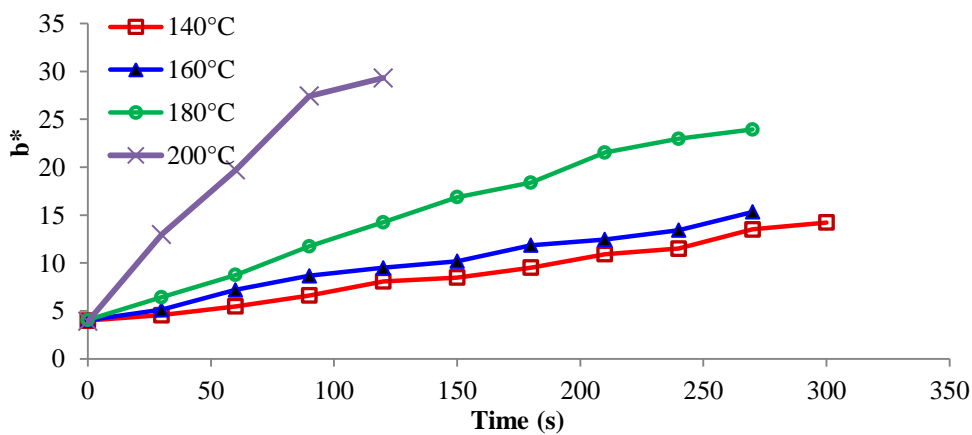
شکل ۳ تغییرات شاخص قرمزی (a^*) رنگ سطح پیاز را در برابر زمان در دماهای مختلف سرخ کردن نشان می‌دهد. مقدار این شاخص با افزایش دمای روغن و زمان فرآیند از ۵/۷۳ به ۱۷/۸۶ افزایش یافت.



شکل ۲- اثر دما بر تغییر شاخص روشنایی (L^*) طی سرخ کردن پیاز



شکل ۳- اثر دما بر تغییر شاخص قرمزی (a^*) طی سرخ کردن پیاز



شکل ۴- اثر دما بر تغییر شاخص زردی (b^*) طی سرخ کردن پیاز

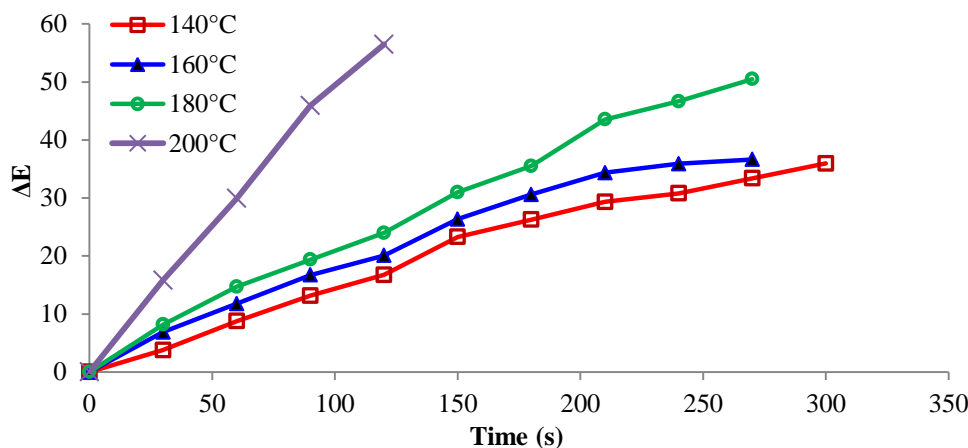
مقدار آن از ۳۵/۹۶ به ۵۶/۴۸ افزایش یافت. برش‌های پیاز در حین سرخ شدن تیره‌تر شده که این امر با افزایش ΔE در حین سرخ کردن مشخص شده است. باگذشت زمان فرآیند، شدت تغییرات رنگ با سرعت ثابت ادامه یافت.

داده‌های مربوط به تغییر رنگ پیاز در طی سرخ شدن با هر سه مدل سینتیکی ذکر شده در بخش مواد و روش‌ها برازش شدند. با توجه به روند تغییرات داده‌های مربوطه که به‌طور توانی تغییر می‌کردند، مشخص شد که مدل توانی برای توصیف روند تغییر داده‌ها مناسب است؛ لذا ضرایب این مدل برای دماهای مختلف محاسبه و در جدول ۲ گزارش شد. با استفاده از داده‌های ذکر شده در این جدول می‌توان سرعت تغییر رنگ پیاز در طی سرخ کردن را در زمان‌های مختلف پیش‌بینی نمود.

مقادیر ضرایب مدل سینتیکی تغییر شاخص‌های رنگی برش‌های پیاز در شرایط مختلف سرخ کردن در جدول ۱ گزارش شده است. با استفاده از این ضرایب و مدل مربوطه می‌توان تغییر شاخص‌های رنگی (L^* ، a^* و b^*) را در طی سرخ کردن پیاز در زمان‌های مختلف پیش‌بینی نمود. مطابق این جدول مقدار K_C شاخص روشنی برای دماهای ۱۴۰، ۱۶۰، ۱۸۰ و ۲۰۰ درجه سلسیوس به ترتیب برابر ۰/۰۳۷، ۰/۰۳۹، ۰/۰۴۰ و ۰/۰۹۹ محاسبه شد. اثر دمای سرخ‌کن بر سینتیک شدت تغییر رنگ سطح برش‌های پیاز در شکل ۵ به نمایش درآمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش دمای سرخ‌کن، شیب نمودار افزایش‌یافته و تغییر رنگ سطحی نمونه‌ها با سرعت بیشتری رخ می‌دهد. مقدار این تغییرات رنگ با افزایش دما ۱۴۰ به ۲۰۰ درجه سلسیوس شدت گرفت و

جدول ۱- مقادیر ضرایب مدل سینتیکی تغییر شاخص‌های رنگی در شرایط مختلف سرخ کردن

شاخص	دما (°C)	a	K_C	R	SE
L*	۱۴۰	۱۷۳/۲۵۸ ^c	۰/۰۳۹ ^b	۰/۹۷۳	۲/۸۵۷
	۱۶۰	۲۲۲/۳۸۱ ^b	۰/۰۳۷ ^b	۰/۹۶۲	۳/۵۳۲
	۱۸۰	۲۴۲/۶۶۱ ^a	۰/۰۴۰ ^b	۰/۹۸۷	۲/۴۹۳
	۲۰۰	۲۲۵/۵۲۳ ^b	۰/۰۹۹ ^a	۰/۹۹۵	۲/۰۹۳
a*	۱۴۰	-۱/۶۱۹ ^a	۰/۲۷۸ ^b	۰/۹۹۲	-۰/۲۰۴
	۱۶۰	-۱/۹۱۷ ^a	۰/۲۹۹ ^b	۰/۹۸۹	-۰/۲۷۵
	۱۸۰	-۵/۱۷۵ ^b	۰/۲۴۸ ^b	۰/۹۹۱	-۰/۴۷۱
	۲۰۰	-۲/۱۵۵ ^a	۱/۰۷۷ ^a	۰/۹۹۶	-۰/۶۵۲
b*	۱۴۰	-۱۸/۱۰۹ ^a	۰/۰۹۰ ^a	۰/۹۹۶	-۰/۲۸۹
	۱۶۰	-۴۴/۴۵۹ ^b	۰/۰۵۰ ^b	۰/۹۸۶	-۰/۶۳۴
	۱۸۰	-۹۶/۳۵۱ ^c	۰/۰۴۵ ^b	۰/۹۹۰	۱/۰۲۲
	۲۰۰	-۲۴۴/۷۷۰ ^d	۰/۰۵۴ ^b	۰/۹۷۱	۲/۸۵۰



شکل ۵- اثر دما بر شاخص تغییر رنگ (ΔE) طی سرخ کردن پیاز

جدول ۲- مقادیر ضرایب مدل سینتیکی تغییر رنگ (ΔE) در شرایط مختلف سرخ کردن

SE	R	b	a	دما (°C)
۱/۴۲۹	۰/۹۹۳	ab. / ۸۲۴	c. / ۳۳۷	۱۴۰
۱/۴۶۶	۰/۹۹۴	b. / ۷۵۲	ab. / ۵۷۹	۱۶۰
۱/۰۸۱	۰/۹۹۸	a. / ۸۶۷	bc. / ۴۰۰	۱۸۰
۱/۲۳۰	۰/۹۹۸	a. / ۹۱۰	a. / ۷۳۵	۲۰۰

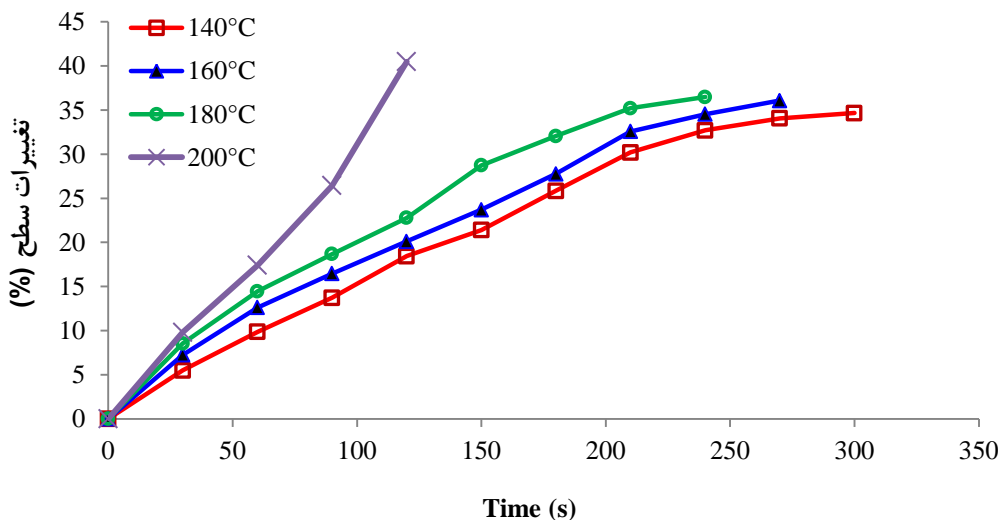
از دست داد و دمای مرکزی محصول برای این دمای روغن پس از این مرحله افزایش یافت.

بحث

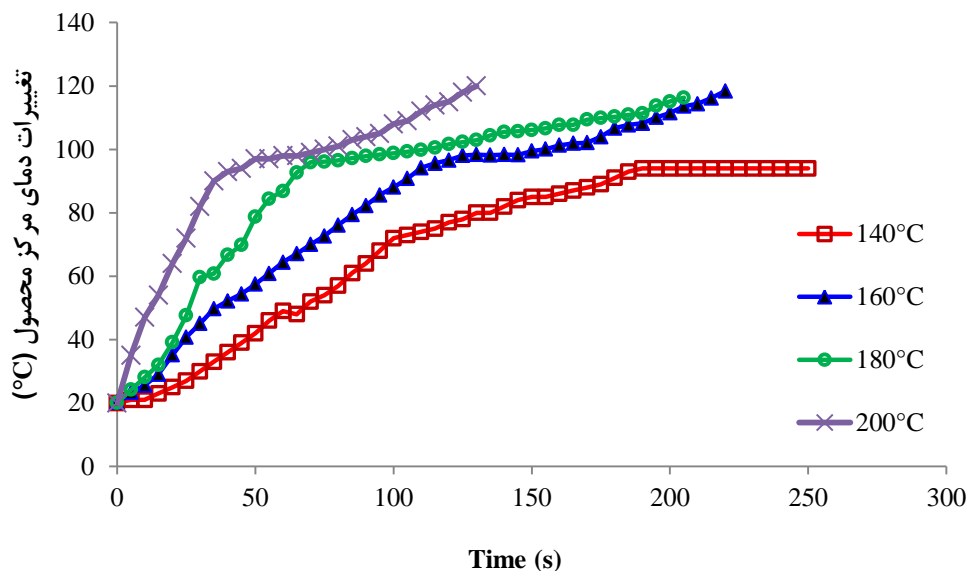
Baik و Mittal (۲۰۰۵) نشان دادند که تغییرات شاخص قرمزی در دماهای بالای سرخ کردن شدیدتر بوده و سپس به مقدار ثابت می‌رسد و از یک تابع نمایی تبعیت می‌کند. Pedreschi و همکاران (۲۰۰۵) نیز گزارش کردند که میزان این شاخص در نمونه‌های سیب‌زمینی آنزیم بری شده نسبت به نمونه‌های آنزیم بری نشده در حین سرخ کردن کمتر است. همچنین بیان کردند که شاخص روشنایی و شاخص زردی در طی سرخ کردن تغییر چندانی نکرده و رنگ سیب‌زمینی در طی سرخ کردن تابع شاخص قرمزی است که تغییرات آن بیشتر است. با مقایسه تغییرات دمای سطحی و تغییرات شاخص قرمزی با یکدیگر، علت افزایش شاخص قرمزی با افزایش دما قابل توجه خواهد بود. در واقع در دماهای کمتر افزایش دمای سطحی بعد از اتمام تبخیر سطحی کمتر بوده و در نتیجه واکنش قهوه‌ای شدن در نتیجه افزایش حرارت، کمتر اتفاق می‌افتد.

اثر دمای سرخ‌کن بر تغییر اندازه سطح برش‌های پیاز در شکل ۶ به نمایش درآمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش دمای سرخ‌کن، شیب نمودار افزایش‌یافته و تغییر سطح نمونه‌ها با سرعت بیشتری رخ می‌دهد. نمونه‌های سرخ‌شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس افت بیشتری از نظر اندازه سطح داشته و اندازه کوچک‌تری داشتند. با افزایش دمای سرخ‌کن از ۱۴۰ به ۲۰۰ درجه سلسیوس مقدار تغییرات سطح از ۳۴/۶۷ درصد به ۴۰/۴۸ درصد افزایش یافت.

اثر دمای روغن بر تغییر دمای مرکز برش‌های پیاز در طی سرخ کردن در شکل ۷ گزارش شده است. در این پژوهش تغییرات دمای مرکز تا زمان ۲۵۰ ثانیه و هر ۵ ثانیه ثبت شد (مدت‌زمان لازم برای سرخ‌شده برش پیاز). با رسیدن دمای مرکزی محصول به حدود نقطه‌جوش آب، در ابتدا به دلیل فشار بخار ناشی از تبخیر و حبس حباب‌های بخار در محصول، به دلیل تشکیل پوسته، نقطه‌جوش آب طبق قوانین ترمودینامیکی افزایش می‌یابد. در این مطالعه، در مدت ۷۵ ثانیه و دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس روغن، محصول آب خود را در مرکز به‌طور کامل



شکل ۶- اثر دما بر تغییر سطح برش‌های پیاز در طی سرخ کردن



شکل ۷- اثر دمای روغن بر تغییر دمای مرکز برش‌های پیاز در طی سرخ کردن

کاهش می‌یابد. در اینجا با افزایش زمان فرآیند دمای سطحی محصول برای دماهای بالاتر سرخ کردن، زودتر به سمت دمای روغن افزایش می‌یابد و مسلماً تغییرات رنگی در این محدوده می‌تواند سریع‌تر رخ داده و نقش اساسی در کاهش کیفیت رنگی محصول خواهد داشت. در واقع شروع پدیده افزایش دمای سطحی به سمت دمای روغن، نشان‌دهنده افزایش شدت تغییرات رنگ نامطلوب به دلیل کاهش آب سطحی است. با محاسبه شاخص‌های رنگی مشخص شد که بخش عمده تغییرات شاخص‌های رنگی در زمان‌های ابتدایی می‌باشد.

با افزایش دما سرعت انتقال حرارت به مرکز پیاز افزایش یافته و دمای مرکز سریع‌تر افزایش یافته است. در طی سرخ کردن، همزمان پدیده انتقال حرارت و انتقال جرم رخ می‌دهد که با افزایش دمای سرخ‌کن، سرعت خروج رطوبت از نمونه‌ها افزایش یافته که این موضوع منجر به افزایش سریع دمای مرکز نمونه‌ها می‌شود. دمای مرکز محصول ابتدا نزدیک به نقطه جوش آب رسیده و برای زمان کوتاهی ثابت می‌ماند و پس از اتمام آب محصول و تشکیل پوسته، شروع به افزایش به سمت دمای روغن می‌کند. در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس، دمای مرکز سریع‌تر به نقطه جوش آب نزدیک شده و بعد از کمی توقف در این دما با خروج کامل آب، مجدد دمای مرکز افزایش یافت. Farkas و همکاران (۱۹۹۶) بیان کردند که در سرخ کردن انتقال حرارت با وجود دو مرحله حرارتی صورت می‌گیرد.

Bingol و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند که با افزایش ضخامت پوسته، که روغن بخش عمده تشکیل‌دهنده آن می‌باشد، غلظت ترکیبات ماده خشک افزایش یافته و این امر موجب افزایش شاخص زردی و البته قرمزی محصول می‌گردد. این افزایش زردی می‌تواند ناشی از جذب سطحی کاروتنوئیدهای موجود در بستر روغن نیز باشد. با وجود نامطلوب بودن افزایش شاخص قرمزی در دماهای بالا، شاخص زردی تغییرات مطلوبی را در دماهای بالا نشان می‌دهد. بنابراین با توجه به روند مشابه تغییر شاخص‌های رنگی در زمان‌های ابتدایی سرخ کردن، می‌توان با ایجاد فرآیند با دمای بالا و زمان کم ویژگی‌های کیفی رنگ محصول را حفظ کرد. از طرفی مشخص شده است که جذب روغن در دماهای بالا کاهش می‌یابد (Ahromrit and Nema, 2010). در واقع هرچه دمای روغن افزایش یابد تغییرات جذب روغن منظم‌تر و در نتیجه قابل‌کنترل است. حداکثر روغن جذب شده به زمان‌های طولانی‌تر فرآیند و محتوی رطوبت کم محصول مربوط می‌شود که این امر می‌تواند به دلیل ایجاد خلل فرج در محصول باشد (Durán et al., 2007). بنابراین با کاهش زمان فرآیند می‌توان سلامت محصول را از نظر رنگ، محصولات جانبی نامطلوب ناشی از فرآیندهای طولانی و همچنین جذب روغن بهبود بخشید.

Sahin و همکاران (۱۹۹۹) گزارش کردند هرچه دمای فرآیند بیشتر باشد طول دوره دمای ثابت در پروفایل دمایی

sweet potato and taro. *Journal of Food Science and Technology*, 47(6), 632-637.

Baik, O. D. & Mittal, G. S., (2005). Heat and moisture transfer and shrinkage simulation of deep-fat tofu frying. *Food Research International*, 38(2), 183-191.

Bingol, G., Zhang, A., Pan, Z. & McHugh, T. H. (2012). Producing lower-calorie deep fat fried French fries using infrared dry-blanching as pretreatment. *Food Chemistry*, 132(2), 686-692.

Choe, E. & Min, D. (2007). Chemistry of deep-fat frying oils. *Journal of Food Science*, 72(5).

Durán, M., Pedreschi, F., Moyano, P. & Troncoso, E. (2007). Oil partition in pre-treated potato slices during frying and cooling. *Journal of Food Engineering*, 81(1), 257-265.

Farkas, B. & Hubbard, L. (2000). Analysis of convective heat transfer during immersion frying. *Drying Technology*, 18(6), 1269-1285.

Farkas, B., Singh, R. & Rumsey, T. (1996). Modeling heat and mass transfer in immersion frying. II, model solution and verification. *Journal of Food Engineering*, 29(2), 227-248.

Ganjeh, M., Jafari, M., Ghanbari, F., Dezyani, M., Ezzati, R. & Soleimani, M., (2013). Modeling the drying kinetics of onion in a fluidized bed drier equipped with a moisture controller using regression, fuzzy logic and artificial neural networks methods. *Iranian Journal of Nutrition Sciences & Food Technology*, 7(5), 399-407.

Gökmen, V. & Palazoğlu, T. K. (2008). Acrylamide formation in foods during thermal processing with a focus on frying. *Food and Bioprocess Technology*, 1(1), 35-42.

Khalilian, S., Ziaifar, A., Asghari, A., Kashaninejad, M. & Mohebbi, M. (2017). Effect of cooking pretreatment on frying process of eggplant and evaluation of kinetic of oil absorption and moisture changes of eggplant during deep fat frying and cooling period. *Journal of Food Science and Technology*, 14, 147-154.

Krokida, M., Oreopoulou, V., Maroulis, Z. & Marinos-Kouris, D. (2001). Colour changes during deep fat frying. *Journal of Food Engineering*, 48(3), 219-225.

Michalak, J., Gujska, E. & Klepacka, J. (2011). The effect of domestic preparation of some potato products on acrylamide content. *Plant Foods for Human Nutrition*, 66(4), 307-312.

اولین مرحله حرارتی به صورت حرارت محسوس است که موجب افزایش دمای محصول از دمای اولیه به نقطه جوش آب می شود. این مرحله حرارتی با پیشرفت فرآیند سرخ کردن و رسیدن دمای مرکزی محصول به نقطه جوش محدود می گردد. دومین مرحله حرارتی مربوط به حد واسط پوسته/هسته می باشد که آب در این نقطه تبدیل به بخار می شود و در سرتاسر سرخ کردن حفظ می شود. نتایج حاصل از بررسی روابط سینتیکی انتقال جرم نمونه های بادمجان طی فرآیند سرخ کردن عمیق توسط Khalilian و همکاران (۲۰۱۷) نشان داد که محتوی روغن نمونه های بادمجان طی فرآیند سرخ کردن عمیق در دمای ۱۸۰ درجه سلسیوس، در اوایل فرآیند سرخ کردن به حداکثر مقدار خود رسیده و بعد از آن در ادامه، روند کاهش می باشد. محتوی رطوبت نمونه های بادمجان نیز در اوایل فرآیند سرخ کردن به سرعت کم شده و پس از آن، سرعت کاهش محتوی رطوبت نمونه ها، نیز کاهش می یابد.

نتیجه گیری

دماهای بالا موجب روشنایی (L^*) کمتر، قرمزی (a^*) بیشتر و زردی (b^*) بیشتر گردید. شدت تغییرات شاخص های رنگی برای دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس از سایر دماها شدیدتر و شیب نمودارهای این دما بیشتر بود. دمای مرکز برش های پیاز در دماهای بالا سریع تر افزایش یافته و زودتر به سمت دمای روغن افزایش می یابد. مدل نمای برآزش شده به خوبی تغییرات شاخص های رنگی را با توجه به ضریب تبیین (R) و خطای استاندارد (SE) به دست آمده برای برآزش، توصیف می کند. همچنین معادله توانی به خوبی شاخص تغییر رنگ (ΔE) را مدل نمود و ضرایب آن نیز جهت پیش بینی شاخص های رنگی در سایر شرایط سرخ کردن گزارش شد.

منابع

Abbasi, S., Mousavi, S. & Mohebbi, M., (2011). Mathematical modeling of onion drying process using hot air dryer. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 6(3), 229-234.

Ahromrit, A. & Nema, P. K., (2010). Heat and mass transfer in deep-frying of pumpkin,

- 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(3), 249-255.
- Pedreschi, F., Moyano, P., Kaack, K. & Granby, K. (2005). Color changes and acrylamide formation in fried potato slices. *Food Research International*, 38(1), 1-9.
- Rodriguez-Saona, L. E. & Wrolstad, R. E. (1997). Influence of potato composition on chip color quality. *American Journal of Potato Research*, 74(2), 87-106.
- Romani, S., Bacchiocca, M., Rocculi, P. & Dalla Rosa, M. (2009). Influence of frying conditions on acrylamide content and other quality characteristics of French fries. *Journal of Food Composition and Analysis* 22(6), 582-588.
- Sabbaghi, H., Ziiaifar, A., Sadeghi, M.A., Kashaninejad, M. & Mirzaei, H. (2017). Kinetic modeling of color changes in french fries during frying process. *Journal of Food Technology and Nutrition*, 14(1), 65-76.
- Sahin, S., Sastry, S. & Bayindirli, L. (1999). Heat transfer during frying of potato slices. *LWT-Food Science and Technology*, 32(1), 19-24.
- Salehi, F. (2017). Rheological and physical properties and quality of the new formulation of apple cake with wild sage seed gum (*Salvia macrosiphon*). *Journal of Food Measurement and Characterization*, 11(4), 2006-2012.
- Salehi, F. (2018). Color changes kinetics during deep fat frying of carrot slice. *Heat and Mass Transfer*, 54(11), 3421-3426.
- Salehi, F. (2019). Color changes kinetics during deep fat frying of kohlrabi (*Brassica oleracea var. gongylodes*) slice. *International Journal of Food Properties*, 22(1), 511-519.
- Salehi, F. & Amin Ekhlas, S. (2018). The effects of wild sage seed gum (*Salvia macrosiphon*) on the rheological properties of batter and quality of sponge cakes. *Journal of Food Biosciences and Technology*, 8(2), 41-48.