



مدل سازی سینتیک تغییرات رنگ و انتقال حرارت در طی فرآیند سرخ کردن کدوخورشتی

فخرالدین صالحی^۱

^۱ استادیار گروه مهندسی ماشین‌های صنایع غذایی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان. F.Salehi@Basu.ac.ir

چکیده

گسترش رنگ طی سرخ کردن یک پدیده سطحی وابسته به دما و زمان فرآیند است. هدف این پژوهش بررسی انتقال حرارت و توصیف رفتار تغییرات رنگ کدوخورشتی حین فرآیند سرخ کردن به صورت یک مدل ریاضی در دماهای مختلف است. برش‌های کدوخورشتی 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. پارامترهای 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. دمای روغن تأثیر منفی روی روشنایی برش کدوخورشتی سرخ‌شده نشان داد و با افزایش دمای فرآیند مقدار پارامترهای روشنایی و زردی کاهش یافت. نتایج این آزمایش نشان داد که بخش عمده تغییرات رنگ در مراحل ابتدایی فرآیند رخ می‌دهد. دماهای بالاتر باعث افزایش قرمزی رنگ سطح کدوخورشتی می‌شود. نمونه‌های سرخ‌شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس افت بیشتری از نظر اندازه سطح داشته و اندازه کوچک‌تری داشتند. در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس، دمای مرکز سریع‌تر به نقطه جوش آب رسید و در این دما تا خروج کامل آب متوقف شد. سینتیک تغییرات پارامترهای رنگ سطح و تغییرات کلی رنگ (ΔE) کدوخورشتی به ترتیب از تابع نمایی افزایشی و تابع توانی تبعیت نمود.

واژه‌های کلیدی: انتقال حرارت؛ کدوخورشتی؛ رنگ؛ سرخ کردن؛ سینتیک.

Kinetic Modeling of Color Changes and Heat Transfer During Frying Process of Zucchini

Fakhreddin Salehi¹

¹ Assistant Professor, Department of Food Industry Machines, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

ABSTRACT

Color development during frying process is a surface phenomenon that depends on the processing temperature and time. The aim of this research was explanation of heat transfer and color changes behavior of zucchini during frying process as a mathematical model at various temperatures. Zucchini slices with 1 cm thickness were fried at the temperature of 150, 175 and 200 °C and its central temperature was recorded using K type thermocouple with 1 mm thickness by 5 second intervals. Surface temperature of the product was measured using laser thermometer. Color parameters as lightness (L^*), redness (a^*), yellowness (b^*) and color change intensity (ΔE) were recorded during the frying time and kinetic model was fitted on their changes versus time and models coefficients were reported. The temperature of the oil had a negative effect on the brightness of the fried zucchini and with increasing process temperature, the brightness and yellowness parameters decreased. The results of this experiment showed that most of the color changes occur

۱- استادیار گروه مهندسی ماشین‌های صنایع غذایی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.



in the early stages of the process. Higher temperatures increase the redness of the zucchini surface. Fried samples at temperature of 200°C drop more in size and have a smaller size. At temperature of 200°C, the center temperature quickly reached the boiling point and stopped at this temperature until full water exhaustion. The kinetics of the surface color parameters changes and color change intensity (ΔE) of the zucchini followed the incremental exponential function and power function, respectively.

Keywords: Color, Zucchini, Frying, Heat transfer, Kinetic.

یازدهمین
مقدمه - ۱

کدوخورشتی^۱ (*Cucurbita pepo var. cylindrica*) به صورت خام و یا سرخ‌شده در تهیه انواع غذاها شامل انواع خورشت، آش، سوپ و ... به عنوان یک ترکیب و چاشنی مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش متداول برای استفاده کدوخورشتی سرخ کردن آن است. فرآیند سرخ کردن از فرآیندهای پیچیده به دلیل انتقال همزمان حرارت و جرم است و کوتاه بودن زمان پخت در این فرآیند موجب بروز خواص حسی منحصر به فرد در ماده غذایی، از جمله عطر، طعم و رنگ می‌شود. رنگ از مهم‌ترین شاخصه‌های کیفی مواد غذایی است که حتی قبل از مصرف ماده غذایی مورد توجه قرار می‌گیرد (Choe and Min, 2007).

به‌طور کلی برش‌های روشن و طلایی کدوخورشتی نسبت به رنگ تیره ترجیح داده می‌شوند. قندهای احیاکننده تحت تأثیر حرارت با پروتئین و اسیدآمینه‌های آزاد، طی واکنش مایلارد، ایجاد رنگ‌دانه و طعم می‌کنند. ملانویدین ترکیب نیتروژن دار قهوه‌ای‌رنگ با وزن مولکولی بالا است که محصول نهایی واکنش مایلارد بوده و عامل ایجاد رنگ معمول قهوه‌ای طلایی در محصول می‌باشد. میزان بیشتر این رنگ‌دانه موجب ایجاد محصول تیره با طعم تلخ می‌شود (Mestdagh et al., 2008).

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. آکریل آمید از ترکیبات حاصل از واکنش بین اسیدآمینه آسپارژین و قندهای احیاکننده طی واکنش مایلارد است و کنترل دما و زمان در حین سرخ کردن تأثیر معنی‌داری بر کاهش تشکیل آکریل 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 آکریل 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 آکریل 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 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 آکریل 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 اسید چرب آزاد) و حداقل تیره شدن رنگ را در اثر فرآیند نشان دهد. همچنین خارج کردن ذرات به‌طور مداوم و حفظ یکنواختی درجه حرارت روغن، سبب بهبود طعم، رنگ و ظاهر غذای سرخ‌شده می‌شود. 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 خصوصیات حسی محصول، تحریک قهوه‌ای شدن (واکنش مایلارد) و واکنش‌های 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 انجام شده در زمینه بررسی تیمارهای پیش از فرآیند برای کنترل رنگ خلال سیب زمینی زیاد شده است، اما بررسی سینتیک تغییرات رنگ کدوخورشتی مورد توجه قرار نگرفته است. Moyano و همکاران (۲۰۰۲) سینتیک تغییرات رنگ پوسته خلال‌های سیب‌زمینی را بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که در حین سرخ کردن تغییرات رنگ نسبت به زمان و رطوبت محصول در نمونه‌های حاوی شربت ذرت سدیم کلرید در مقایسه با -سدیم کلرید به‌تنهایی بیشتر بود که این امر به دلیل وجود قندهای احیاء کننده بیشتر در سطح بیان شد. تغییرات رنگ نمونه‌های حاوی سدیم کلرید به شاهد نزدیک است (Krokida et al., 2001). 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 سینتیک نمایشی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که دمای روغن و ضخامت ماده غذایی از پارامترهای 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 است. شدت تغییرات رنگی با افزایش دما و کاهش ضخامت زیاد می‌شود ولی رفتار تغییرات رنگی و نوع تابع همواره به صورت نمایی افزایشی است (Moyano et al., 2002). یکی از مهم‌ترین الزامات جهت کنترل یک خصوصیت کیفی، مانند رنگ، آشنایی با روند تغییرات آن طی فرآیند است. با توجه به بررسی منابع منتشرشده مشخص شد تاکنون پژوهشی در خصوص بررسی انتقال حرارت و مدل‌سازی سینتیک تغییرات رنگ در طی فرآیند سرخ کردن کدوخورشتی صورت نگرفته است. لذا هدف این تحقیق بررسی اثر دما و زمان فرآیند سرخ کردن بر سرعت انتقال حرارت و تغییرات رنگ کدوخورشتی و مدل‌سازی سینتیک آن می‌باشد. مدل به‌دست‌آمده از این پژوهش توصیف‌کننده رفتار تغییرات رنگ حین فرآیند سرخ کردن کدوخورشتی، می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- فرآیند سرخ کردن

برای انجام آزمایش‌ها کدوخورشتی با قطر متوسط ۴ سانتی متر از استان همدان تهیه گردید. برای انجام فرآیند سرخ کردن ابتدا کدوخورشتی‌ها به قطعاتی با ضخامت ۱ سانتی‌متر برش داده شدند. برش‌های کدوخورشتی بلافاصله پس از برش جهت سرخ کردن در سه سطح دمایی ۱۴۰، ۱۶۰، ۱۸۰ و ۲۰۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند. جهت سرخ کردن از روغن آفتابگردان (لادن، ایران) استفاده شد. به‌منظور فراهم‌سازی شرایط یکسان برای بررسی فرآیند سرخ کردن، مقطع برش عرضی برای هر برش کدوخورشتی یکسان در نظر گرفته شد.

۲-۲- بررسی تغییرات رنگ سطحی

جهت بررسی تغییرات رنگ سطح نمونه‌ها از روش پردازش تصویر استفاده شد. در این روش از یک اسکنر اچ‌پی مدل (Hp Scanjet 300)، 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 *a* b* L* تبدیل گردیدند (Salehi and Kashaninejad, 2014). 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 رنگی آبی تا زرد) می‌باشد (Salehi and Kashaninejad, 2014).

مقادیر تغییر رنگ (ΔE) در مقایسه با نمونه تازه، با استفاده از معادله زیر محاسبه شد. مقادیر اختلاف نمایانگر تغییرات رنگ نسبت به نمونه تازه می‌باشد (Salehi and Kashaninejad, 2015).

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

درصد تغییر اندازه سطح برش‌های کدوخورشتی که معیاری از چروکیدگی و کاهش سطح محصول در طی سرخ کردن می‌باشد نیز با استفاده از معادله زیر محاسبه و گزارش شد.



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

A_0 : سطح نمونه در زمان صفر

A_t : سطح نمونه در زمان t

۲-۳- اندازه گیری تغییرات دما

جهت اندازه گیری دمای داخل سرخ کن و مرکز نمونه ها، از دماسنج دیجیتال ترماسی دو کاناله لوترون^۱ (تایوان) با دامنه دمایی ۵۰- تا ۱۲۳۰ درجه سلسیوس ($\pm 1/0^\circ C$) و ترموکوپل دمایی نوع K با ضخامت یک میلی متر استفاده گردید. جهت اندازه گیری تغییرات دمای سطحی از دمانگار لیزری^۲ (چین) با دامنه دمایی ۲۳- تا ۱۰۵۰ درجه سلسیوس ($\pm 1/0^\circ C$) استفاده شد.

۲-۴- مدل سازی سینتیک تغییر پارامترهای رنگی

به منظور بررسی سینتیک و پیش بینی روند تغییرات رنگ کدو خورشتی در طی سرخ کردن، از مدل Krokida و همکاران (۲۰۰۱) با کمی تغییرات استفاده و همبستگی این مدل سینتیک با داده های تجربی بررسی گردید (Krokida et al., 2001). از خصوصیات عمده این مدل می توان به سادگی و شکل درجه یک آن اشاره نمود که بیان ساده ای از تغییرات رنگ خواهد داشت. بر این اساس رفتار تغییرات رنگ طی سرخ کردن از یک مدل نمایی تبعیت می کند که با داده های تجربی به دست آمده سازگاری دارد. سینتیک تغییرات پارامترهای رنگی به صورت معادلات ۳ و ۴ بیان می شود (Krokida et al., 2001; Moyano et al., 2002; Sabbaghi et al., 2017):

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

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

در معادلات فوق C مقدار پارامتر رنگی (L ، a یا b) در زمان مشخص، C_e مقدار پارامتر در زمان بی نهایت یا مقدار تعادلی (بدون بعد) است. K_c ثابت سینتیک تغییرات هر یک از پارامترها (برحسب عکس ثانیه) و t زمان برحسب دقیقه می باشد. در لحظه صفر هر پارامتر مقدار اولیه خود یعنی C_i را داشته و با توجه به تغییرات نمایی بعد از زمان صفر می توان معادله ۵ را به عنوان 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 پارامتر مدل می باشد. با حل و برازش معادله ۵ روی میانگین داده های تجربی پارامترهای رنگی، تغییرات پارامترهای 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 داده های تجربی حاصل از آن با مدل های سینتیک زیر برازش شدند (معادلات ۶ و ۷). معادله ۶ به صورت سه پارامتری می باشد و حروف b_1 ، b_2 ، b_3 ثابت های معادله می باشند. در معادله ۷، حرف a پارامتر مدل و K_E ثابت سینتیک برحسب عکس ثانیه می باشد. معادله ۸ نیز یک مدل توانی می باشد که a و b ثابت های معادله و t زمان برحسب ثانیه می باشد.



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

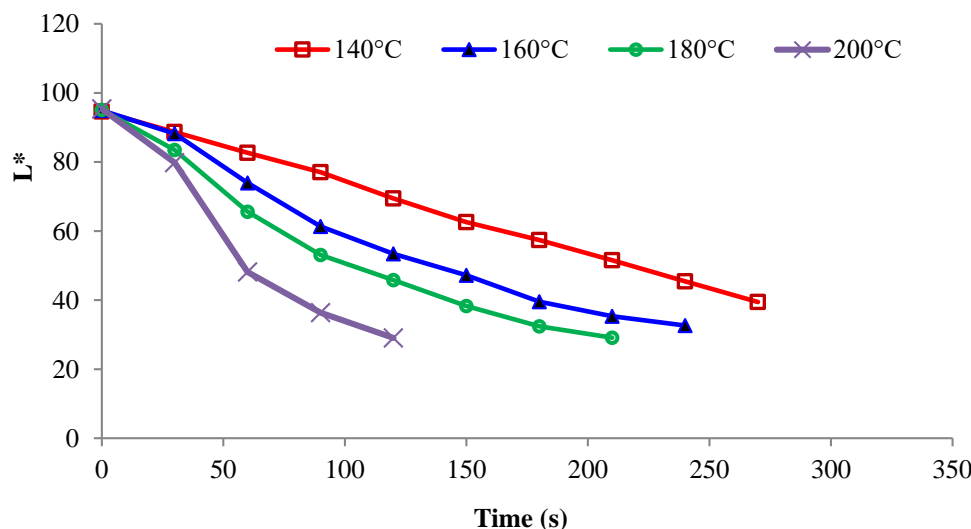
$$\Delta E = \Delta E_e (1 - \exp(-K_E t)) \quad (7)$$

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

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. 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.

۳- نتایج و بحث

با توجه به جذب روغن کمتر در دماهای بالا، کنترل رنگ به‌عنوان یکی از خصوصیت‌های کیفی در این شرایط اهمیت زیادی دارد. اثر دما بر تغییر پارامتر روشنایی (L^*) طی سرخ کردن کدوخورشتی در شکل ۱ گزارش شده است. دمای روغن تأثیر منفی روی روشنایی برش کدوخورشتی سرخ‌شده نشان داد و با افزایش دمای فرآیند میزان پارامتر روشنایی در زمان یکسان کاهش یافت. کاهش این پارامتر به‌عنوان یک عامل منفی در رنگ محصول در نظر گرفته می‌شود.

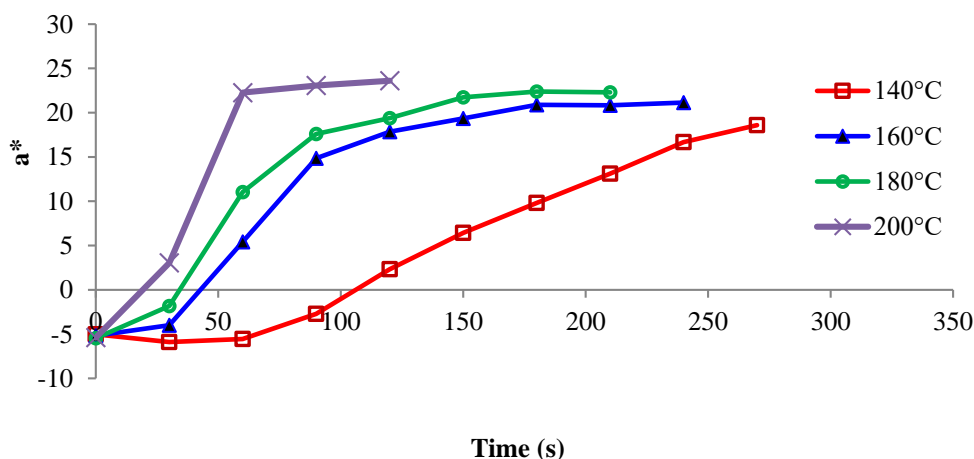


شکل (۱) اثر دما بر پارامتر روشنایی (L^*) طی سرخ کردن کدوخورشتی.

Figure 1. Effect of temperature on lightness parameter (L^*) during frying of zucchini.

شکل ۲ تغییرات پارامتر قرمزی (a^*) رنگ سطح کدوخورشتی را در برابر زمان در دماهای مختلف سرخ کردن نشان می‌دهد. مقدار این پارامتر با افزایش دمای روغن و زمان فرآیند افزایش یافت. بخش عمده تغییرات این پارامتر در زمان‌های ابتدایی فرآیند است و شیب نمودار در مراحل اولیه فرآیند بیشتر است. Baik و Mittal (۲۰۰۵) نشان دادند که تغییرات پارامتر قرمزی در دماهای بالای سرخ کردن شدیدتر بوده و سپس به مقدار ثابت می‌رسد و از یک تابع نمایی تبعیت می‌کند (Baik and Mittal, 2005). Pedreschi و همکاران (۲۰۰۵) نیز گزارش کردند که میزان این پارامتر در نمونه‌های سیب‌زمینی آنزیم‌بری شده نسبت به نمونه‌های آنزیم‌بری نشده در حین سرخ کردن کمتر است. همچنین بیان کردند که

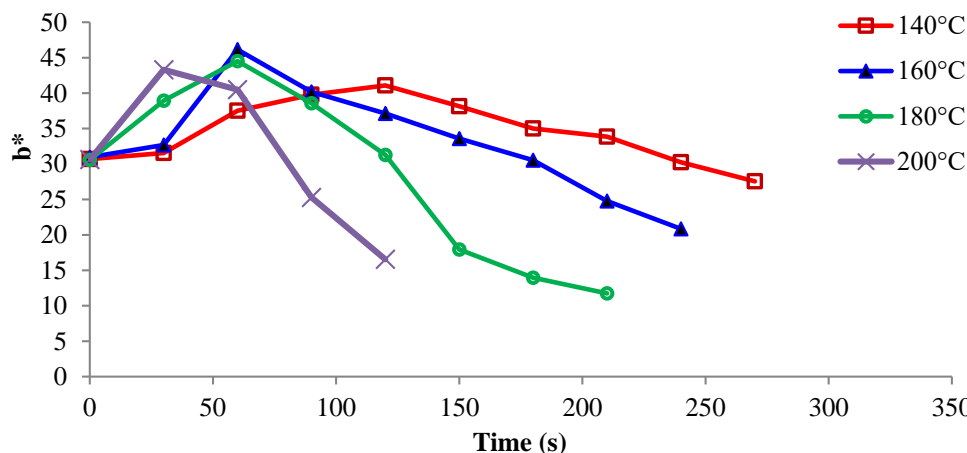
پارامتر روشنایی و پارامتر زردی در طی سرخ کردن تغییر چندانی نکرده و رنگ سیب‌زمینی در طی سرخ کردن تابع پارامتر قرمزی است که تغییرات آن بیشتر است. با مقایسه تغییرات دمای سطحی و تغییرات پارامتر قرمزی با یکدیگر، علت افزایش پارامتر قرمزی با افزایش دما قابل توجیه خواهد بود. در واقع در دماهای کمتر افزایش دمای سطحی بعد از اتمام تبخیر سطحی کمتر بوده و در نتیجه واکنش قهوه‌ای شدن در نتیجه افزایش حرارت، کمتر اتفاق می‌افتد (Pedreschi et al., 2005).



شکل (۲) اثر دما بر پارامتر قرمزی (a^*) طی سرخ کردن کدوخورشتی.

Figure 2. Effect of temperature on redness parameter (a^*) during frying of zucchini.

اثر دما بر تغییر پارامتر زردی (b^*) طی سرخ کردن کدوخورشتی در شکل ۳ گزارش شده است. مقدار این پارامتر در طی زمان سرخ شدن در دماهای مختلف، ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت. در مراحل انتهایی فرآیند سرخ کردن، نمونه‌های سرخ‌شده در دمای ۱۴۰ درجه سلسیوس نسبت به نمونه‌های سرخ‌شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس زردتر بوده و پارامتر b^* این نمونه‌ها بیشتر بود. با افزایش دمای روغن سرخ‌کن مقدار پارامتر زردی به طور محسوسی کاهش یافت. لذا با افزایش بیش از حد دمای سرخ‌کن، کیفیت ظاهری نمونه‌های سرخ‌شده افت پیدا می‌کند. 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 پارامتر 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 پارامتر قرمزی در دماهای بالا، پارامتر زردی تغییرات مطلوبی را در دماهای بالا نشان می‌دهد (Bingol et al., 2012). بنابراین با توجه به روند مشابه تغییر پارامترهای رنگی در زمان‌های ابتدایی سرخ کردن، می‌توان با ایجاد فرآیند با دمای بالا و زمان کم خصوصیات 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 قابل کنترل 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 کوتاه کردن زمان فرآیند می‌توان سلامت محصول را از نظر رنگ، محصولات جانبی نامطلوب ناشی از فرآیندهای طولانی و همچنین جذب روغن بهبود بخشید.



شکل (۳) اثر دما بر پارامتر زردی (b^*) طی سرخ کردن کدوخورشتی.

Figure 3. Effect of temperature on yellowness parameter (b^*) during frying of zucchini.

مقادیر ضرایب مدل سینتیکی تغییر پارامترهای رنگی برش‌های کدوخورشتی در شرایط مختلف سرخ کردن در جدول ۱ گزارش شده است. با استفاده از این ضرایب و مدل مربوطه می‌توان تغییر پارامترهای رنگی (L^* , a^* و b^*) را در طی سرخ کردن کدوخورشتی در زمان‌های مختلف را پیش‌بینی نمود.

مطابق این جدول مقدار K_C پارامتر روشنایی برای دماهای ۱۴۰، ۱۶۰، ۱۸۰ و ۲۰۰ درجه سلسیوس به ترتیب برابر ۰/۰۴۹، ۰/۰۹۲، ۰/۰۹۰ و ۰/۱۸۵ محاسبه شد.

جدول (۱) مقادیر ضرایب مدل سینتیکی پارامترهای رنگی طی سرخ کردن کدوخورشتی.

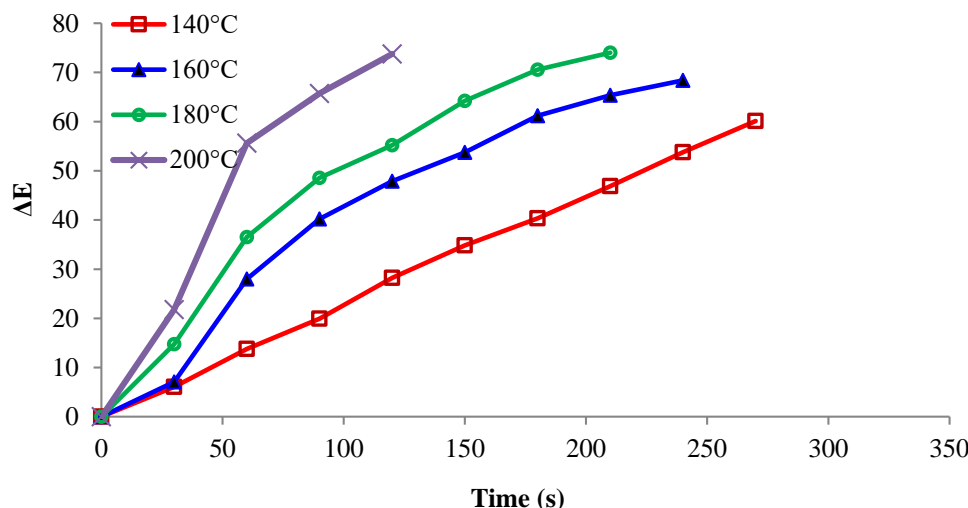
Table 1. The values of the kinetic model coefficients of color parameters during frying of zucchini.

Parameters	Temperature (°C)	a	K_C	R	SE
L*	140	229.025	0.049	0.998	1.139
	160	162.889	0.092	0.957	7.033
	180	208.327	0.090	0.942	8.709
	200	168.013	0.185	0.956	9.638
a*	140	-9.374	0.292	0.975	2.202
	160	-112.726	0.065	0.870	5.669
	180	-150.302	0.060	0.858	6.178
	200	-190.978	0.009	0.895	6.965
b*	140	0.055	1.175	0.921	3.754
	160	0.257	1.067	0.895	4.950
	180	2.299	0.750	0.872	6.564
	200	0.353	2.072	0.841	6.854

اثر دمای سرخ‌کن بر سینتیک شدت تغییر رنگ سطح برش‌های کدوخورشتی در شکل ۴ 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 گرفته است. برش‌های کدوخورشتی در حین سرخ شدن تیره‌تر شده که این امر با افزایش ΔE در حین سرخ کردن مشخص شده است. با گذشت زمان فرآیند، شدت تغییرات رنگ با سرعت ثابت ادامه یافت.

Sahin و همکاران (۱۹۹۹) گزارش کردند هرچه دمای فرآیند بیشتر باشد طول دوره دمای ثابت در پروفایل دمایی 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 پارامترهای رنگی مشخص شد که بخش عمده تغییرات پارامترهای رنگی در زمان‌های ابتدایی می‌باشد (Sahin et al., 1999). داده‌های مربوط به تغییر رنگ کدوخورشتی در طی سرخ شدن با هر سه مدل سینتیکی ذکر شده در بخش مواد و روش‌ها برآزش 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 کدوخورشتی در طی سرخ کردن را در زمان‌های مختلف پیش‌بینی نمود.



شکل (۴) اثر دما بر پارامتر تغییر رنگ (ΔE) طی سرخ کردن کدوخورشتی.

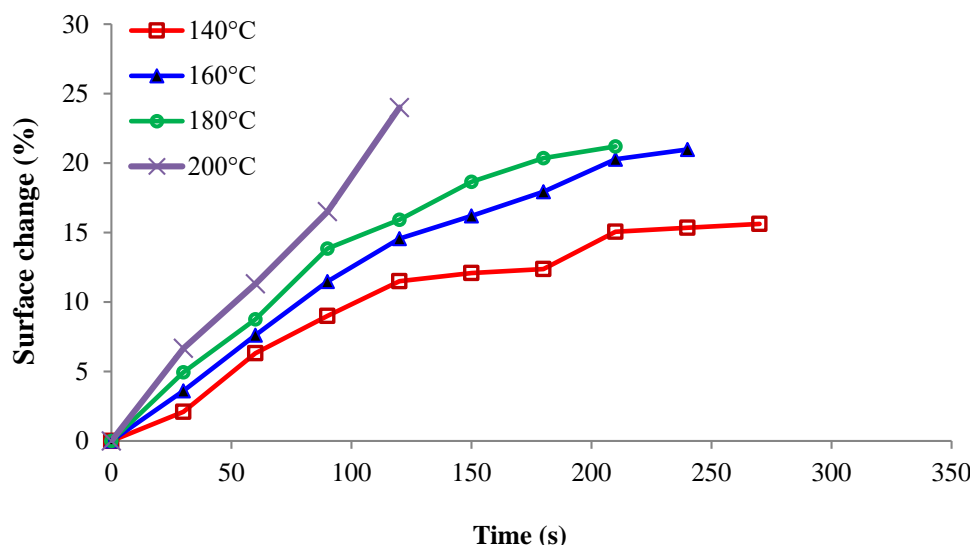
Figure 4. Effect of temperature on color change (ΔE) during frying of zucchini.

جدول (۲) مقادیر ضرایب مدل سینتیکی تغییر رنگ (ΔE) طی سرخ کردن کدوخورشتی.

Table 2. The values of the kinetic model coefficients of color change (ΔE) during frying of zucchini.

Temperature (°C)	a	b	R	SE
140	0.252	0.978	0.999	0.636
160	1.517	0.705	0.985	4.549
180	2.423	0.648	0.991	3.846
200	2.670	0.703	0.982	6.821

اثر دمای سرخ‌کن بر تغییر اندازه سطح برش‌های کدوخورشتی در شکل ۵ 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.



شکل (۵) اثر دما بر تغییر سطح طی سرخ کردن کدوخورشتی.

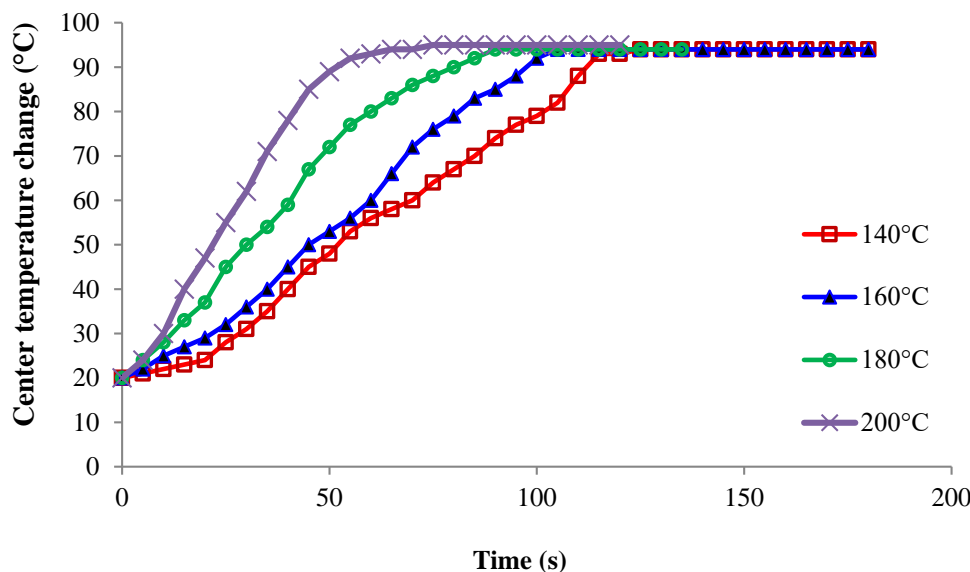
Figure 5. Effect of temperature on surface change during frying of zucchini.

اثر دمای روغن بر تغییر دمای مرکز برش‌های کدوخورشتی در طی سرخ کردن در شکل ۶ گزارش شده است. در این پژوهش تغییرات دمای مرکز تا زمان ۱۸۰ ثانیه و هر ۵ ثانیه ثبت شد (مدت‌زمان لازم برای سرخ‌شده برش کدوخورشتی). 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 ۶۰ ثانیه و دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس روغن، دمای مرکز محصول به ۹۳ درجه سلسیوس رسید؛ در حالی که این زمان برای دمای ۱۴۰ درجه سلسیوس برابر ۱۱۵ ثانیه بود.

با افزایش دما سرعت انتقال حرارت به مرکز کدوخورشتی 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 نقطه‌جوش 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 نقطه‌جوش آب نزدیک شده و تا خروج کامل آب در این دما متوقف شد.

Farkas و همکاران (۱۹۹۶) بیان کردند که در سرخ کردن انتقال حرارت با وجود دو مرحله حرارتی صورت می‌گیرد. اولین مرحله حرارتی به صورت حرارت محسوس است که موجب افزایش دمای محصول از دمای اولیه به نقطه‌جوش آب می‌شود. این مرحله حرارتی با پیشرفت فرآیند سرخ کردن و رسیدن دمای مرکزی محصول به نقطه‌جوش محدود می‌گردد. دومین مرحله حرارتی مربوط به حد واسط پوسته/هسته می‌باشد که آب در این نقطه تبدیل به بخار می‌شود و در سرتاسر سرخ کردن حفظ می‌شود (Farkas et al., 1996).

نتایج حاصل از بررسی روابط سینتیکی انتقال جرم نمونه‌های بادمجان طی فرآیند سرخ کردن عمیق توسط Khalilian و همکاران (۲۰۱۷) نشان داد که محتوی روغن نمونه‌های 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 کاهشی می‌باشد. محتوی رطوبت نمونه‌های بادمجان نیز در اوایل فرآیند سرخ کردن به سرعت کم شده و پس از آن، سرعت کاهش محتوی رطوبت نمونه‌ها، نیز کاهش می‌یابد (Khalilian et al., 2017).



شکل (۶) اثر دمای روغن بر تغییر دمای مرکز کدوخورشتی طی سرخ کردن.
Figure 6. Effect of oil temperature on center temperature change of zucchini during frying.

۴- نتیجه‌گیری

سینتیک تغییرات رنگ سطح برش‌های کدوخورشتی هنگام سرخ کردن در دماهای مختلف در این مطالعه بررسی و نتایج تجربی بدست آمده با مدل ریاضی برازش شد. علاوه بر پارامترهای رنگی، شدت تغییرات رنگ (ΔE) نیز با استفاده از مدل‌های مختلف برازش و مدل مناسب انتخاب و ضرایب آن گزارش شد. دماهای بالا موجب روشنایی (L^*) کمتر، قرمزی (a^*) بیشتر و زردی (b^*) کمتر گردید. شدت تغییرات پارامترهای رنگی برای دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس از سایر دماها شدیدتر و شیب نمودارهای این دما بیشتر بود. نمونه‌های سرخ‌شده در دمای ۱۴۰ درجه سلسیوس نسبت به نمونه‌های سرخ‌شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس زردتر بوده و پارامتر b^* این نمونه‌ها بیشتر بود. دمای مرکز برش‌های کدوخورشتی در دماهای بالا سریع‌تر افزایش یافته و زودتر به سمت دمای روغن افزایش می‌یابد. مدل نمایی برازش شده به‌خوبی تغییرات پارامترهای رنگی را با توجه به ضریب تبیین (R) و خطای استاندارد (SE) به‌دست‌آمده برای برازش، توصیف می‌کند. همچنین معادله توانی به‌خوبی پارامتر تغییر رنگ (ΔE) را مدل نمود و ضرایب آن نیز جهت پیش‌بینی پارامترهای رنگی در سایر شرایط سرخ کردن گزارش شد.

منابع

- Ahromrit, A., Nema, P.K., (2010). Heat and mass transfer in deep-frying of pumpkin, 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.
- Gökmen, V., Palazoglu, 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.
- Mestdagh, F., De Wilde, T., Castelein, P., Németh, O., Van Peteghem, C., De Meulenaer, B., (2008). Impact of the reducing sugars on the relationship between acrylamide and Maillard browning in French fries. *European Food Research and Technology* 227(1), 69-76.
- 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.
- 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., Ziaifar, 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., Kashaninejad, M., (2014). Effect of different drying methods on rheological and textural properties of balangu seed gum. *Drying Technology* 32(6), 720-727.
- Salehi, F., Kashaninejad, M., (2015). Effect of drying methods on rheological and textural properties, and color changes of wild sage seed gum. *Journal of Food Science and Technology* 52(11), 7361-7368.