

## بررسی انتقال حرارت و مدل‌سازی سینتیک تغییرات رنگ در طی فرآیند سرخ کردن بادمجان

فخرالدین صالحی\*

تاریخ دریافت: ۹۶۷/۲۰ تاریخ پذیرش: ۹۷/۲/۲۴

<sup>۱</sup> استادیار گروه مهندسی بیوسیستم دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا همدان

\*مسئول مکاتبه: Email: F.Salehi@Basu.ac.ir

### چکیده

**زمینه مطالعاتی:** محصولات غذایی سرخ‌شده به دلیل دارا بودن ویژگی‌های بافتی منحصربه‌فرد از محبوبیت بالایی در میان مصرف‌کنندگان برخوردارند. تغییر رنگ سطح محصولات کشاورزی طی سرخ کردن یک پدیده وابسته به دما و زمان فرآیند است و از نظر سلامتی اهمیت دارد. هدف: در این پژوهش سینتیک انتقال حرارت و تغییر رنگ برش‌های بادمجان حین فرآیند سرخ کردن به صورت یک مدل ریاضی در دماهای مختلف بررسی شده است. روش کار: برش‌های بادمجان با ضخامت ۱ سانتی‌متر در دماهای ۱۵۰، ۱۷۵ 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 (مادون قرمز) ثبت شد. پارامترهای رنگی شامل روشنایی ( $L^*$ )، قرمزی ( $a^*$ )، زردی ( $b^*$ ) و تغییرات رنگ ( $\Delta E$ ) در طی زمان سرخ کردن ثبت و تغییرات آن‌ها در برابر زمان روی مدل سینتیکی برازش و ضرایب مدل گزارش شد. نتایج: نتایج این آزمایش نشان داد که بخش عمده تغییرات رنگ در مراحل ابتدایی فرآیند رخ می‌دهد. نرخ تغییر رنگ طی سرخ کردن وابسته به دما و زمان فرآیند بود. دماهای بالاتر موجب روشنایی و زردی کمتر، اما قرمزی بیشتر می‌شود. در مجموع، فرآیند دمای بالا و زمان کوتاه می‌تواند نتیجه‌گیری نهایی: جهت کنترل کیفیت رنگ و در نتیجه ایمنی محصول مناسب می‌باشد. سینتیک تغییرات رنگ سطح بادمجان از یک تابع نمایی تبعیت نمود. نمونه‌های سرخ شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس افت بیشتری از نظر اندازه سطح داشته و اندازه کوچک‌تری داشتند.

### واژگان کلیدی: انتقال حرارت، بادمجان، رنگ، سرخ کردن، سینتیک

### مقدمه

مختلف، به صورت یک غذای سالم و یا کنسرو آن تهیه و مصرف می‌شود (دویماز ۲۰۱۱؛ آکپینار و بیسر ۲۰۰۵؛ ارتکین و یالدیز ۲۰۰۴). 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

بادمجان (*Solanum melongena. L*) به‌طور گسترده‌ای در سراسر نقاط گرمسیری و معتدل جهان رشد می‌کند و به‌عنوان یکی از سبزی‌های مهم بازار کشورهای آسیایی و مدیترانه‌ای مطرح است. ایران بعد از چین و هند، مقام سوم تولید بادمجان در جهان را دارد. سرخ کردن یکی از روش‌های فراوری این محصول می‌باشد و بادمجان سرخ شده بر اساس سلیقه مردم مناطق

آن می‌تواند تا حد زیادی تشکیل آکریل آمید را کاهش دهد (گوکمن و پالازقلو ۲۰۰۸).

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 (رودریگز-ساونا و ورولستاد ۱۹۹۷). میزان تغییرات رنگ و متناسب با آن سطح آکریل آمید با افزایش زمان و دمای فرآیند زیاد می‌شود (میچلاک و همکاران ۲۰۱۱). 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 سرخ شده 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 (فارکاس و هوبارد ۲۰۰۰). مویانو و همکاران (۲۰۰۲)

حتی قبل از مصرف ماده غذایی مورد توجه قرار می‌گیرد (چو و مین ۲۰۰۷؛ صالحی ۲۰۱۸).

اثر پیش تیمار پخت بر فرایند سرخ کردن بادمجان و بررسی سینتیک رفتار جذب روغن و تغییرات رطوبت در نمونه‌های بادمجان طی فرایند سرخ کردن عمیق و مرحله سرد کردن توسط خلیلیان و همکاران (۲۰۱۷) بررسی شده است. به‌منظور بررسی روابط سینتیکی، نمونه‌های بادمجان به مدت زمان‌های ۱، ۳، ۵، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۵، ۳۰، ۶۰، ۷۵، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ ثانیه سرخ شدند و بعد از هر مرحله میزان روغن و رطوبت آن‌ها اندازه‌گیری شده است.

به‌طور کلی برش‌های روشن بادمجان نسبت به رنگ تیره ترجیح داده می‌شوند. قندهای احیاکننده تحت تأثیر حرارت با پروتئین و اسیدآمین‌های آزاد، طی واکنش مایلارد، ایجاد رنگ‌دانه و طعم می‌کنند. ملانوئیدین 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 (مستداق و همکاران ۲۰۰۸).

رنگ محصول سرخ شده از نظر سلامت محصول اهمیت دارد. گسترش رنگ طی فرآیند یک پدیده سطحی است که وابسته به دما و زمان فرآیند می‌باشد (صالحی ۲۰۱۹). آکریل آمید از ترکیبات حاصل از واکنش بین اسیدآمین‌ها 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 (رومانی و همکاران ۲۰۰۹).

از طرفی دمای سطحی محصول در تشکیل رنگ و واکنش‌های شیمیایی وابسته به آن، اهمیت زیادی دارد. درواقع تشکیل آکریل آمید عمدتاً در سطح و نزدیک سطح محصول اتفاق می‌افتد. بنابراین، کنترل زمان و دمای سطحی محصول و شستشوی سطح برش خورده

## مواد و روش‌ها

### فرآیند سرخ کردن

برای انجام آزمایش‌ها بادمجان از استان همدان تهیه گردید. برای انجام فرآیند سرخ کردن ابتدا بادمجان‌ها با استفاده از کاتر به قطعاتی با ضخامت ۱ سانتی‌متر و به شکل استوانه برش داده شدند (برش‌های عرضی). برش‌های بادمجان بلافاصله پس از برش جهت سرخ کردن در سه سطح دمای ۱۵۰، ۱۷۵ و ۲۰۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند. جهت سرخ کردن عمیق از روغن آفتابگردان (لادن، ایران) استفاده شد. به منظور فراهم‌سازی شرایط یکسان برای بررسی فرآیند سرخ کردن، مقطع برش عرضی برای هر برش بادمجان یکسان در نظر گرفته شد. نمونه‌های سرخ شده از مخزن روغن خارج و پس از حذف روغن سطحی توسط پارچه نخی، بلافاصله جهت پردازش تصویر استفاده شدند. جهت جلوگیری از هرگونه خطا، روغن مخزن، بعد از انجام هر تکرار، به طور کامل تعویض می‌شد.

### بررسی تغییرات رنگ سطحی

جهت بررسی تغییرات رنگ سطح نمونه‌ها از روش پردازش تصویر و در دمای اتاق (۲۵ درجه سلسیوس) استفاده شد. در این روش از یک اسکنر اچ‌پی مدل (Hp Scanjet 300)، جهت تصویربرداری استفاده شد. جهت جلوگیری از ورود نور به اسکنر، بر روی آن یک جعبه که داخل آن به طور کامل تیره شده بود، قرار می‌گرفت. ابتدا تصاویر با فرمت jpg و در فضای رنگی RGB ذخیره شدند. تصاویر گرفته شده 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 (صالحی، ۲۰۱۷). 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

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. در پژوهشی دیگر کوروکیدا 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 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 (مویانو و همکاران ۲۰۰۲).

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 بادمجان صورت نگرفته است. لذا هدف این تحقیق بررسی اثر دما و زمان فرآیند سرخ کردن بر سرعت انتقال حرارت و تغییرات رنگ بادمجان و مدل‌سازی سینتیکی آن می‌باشد. مدل به‌دست‌آمده از این پژوهش توصیف‌کننده رفتار تغییرات رنگ حین فرآیند سرخ کردن بادمجان، می‌باشد.

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 به دست آمده سازگاری دارد. سینتیک تغییرات پارامترهای رنگی به صورت معادلات ۳ و ۴ بیان می‌شود (کروکیدا و همکاران ۲۰۰۱، مویانو و همکاران ۲۰۰۲):

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

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

در معادلات فوق  $C$  مقدار پارامتر رنگی ( $L$  یا  $a$  یا  $b$ ) در زمان مشخص،  $C_e$  مقدار پارامتر در زمان بی‌نهایت یا مقدار تعادلی (بدون بعد) است.  $K_c$  ثابت سینتیکی تغییرات هر یک از پارامترها (برحسب عکس ثانیه) و  $t$  زمان برحسب دقیقه می‌باشد. در لحظه صفر هر پارامتر مقدار اولیه خود یعنی  $C_i$  را داشته و با توجه به تغییرات نمایی بعد از زمان صفر می‌توان 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 می‌باشد. با حل و برآزش معادله ۵ روی میانگین داده‌های تجربی پارامترهای رنگی، تغییرات پارامترهای رنگی نسبت به زمان،  $K_c$  و  $a$  قابل محاسبه خواهند بود (صبافی و همکاران ۲۰۱۷). مقادیر  $\Delta E$  نیز برای دماهای مختلف در طی زمان سرخ کردن محاسبه شد و داده‌های تجربی حاصل از آن با مدل‌های سینتیکی زیر برآزش شدند (معادلات ۶ و ۷). معادله ۶ به صورت سه پارامتری می‌باشد و حروف  $b_1$ ،  $b_2$ ،  $b_3$  ثابت‌های معادله می‌باشند. در معادله ۷، حرف  $a$  پارامتر مدل و  $K_E$  ثابت سینتیکی برحسب عکس ثانیه می‌باشد. معادله ۸ نیز یک مدل خطی می‌باشد که  $a$  و  $b$  ثابت‌های معادله و  $t$  زمان برحسب ثانیه می‌باشد.

آبی تا زرد) می‌باشد. مقادیر تغییر رنگ ( $\Delta E$ ) در مقایسه با نمونه تازه، با استفاده از معادله زیر محاسبه شد. مقادیر اختلاف نمایانگر تغییرات رنگ نسبت به نمونه تازه می‌باشد (صالحی ۲۰۱۷). نرخ تغییرات رنگ نسبت به نمونه تازه سنجش گردید.

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

سطح نمونه‌ها با استفاده از روش پردازش تصویر و نرم‌افزار Image J اندازه‌گیری شد. درصد تغییر اندازه سطح برش‌های بادمجان 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  $t$

#### اندازه‌گیری تغییرات دما

جهت اندازه‌گیری دمای داخل سرخ‌کن و مرکز نمونه‌ها، از دماسنج دیجیتالی تماسی دو کاناله لوترون<sup>۱</sup> (تایوان) با دامنه دمایی ۵۰- تا ۱۲۳۰ درجه سلسیوس ( $\pm 0.1^\circ$ ) و ترموکوپل دمایی نوع  $K$  با ضخامت یک میلی‌متر استفاده گردید. جهت اندازه‌گیری تغییرات دمای سطحی از دمانگار لیزری مستج<sup>۲</sup> (چین) با دامنه دمایی ۳۲- تا ۱۰۵۰ درجه سلسیوس ( $\pm 0.1^\circ$ ) استفاده شد.

#### مدل‌سازی سینتیک تغییر پارامترهای رنگی

در مورد مواد غذایی، مدل‌های غیرخطی به دلیل متغیر بودن و رفتار غیرخطی مواد طبیعی بسیار مناسب‌ترند (صالحی ۱۳۹۸). به منظور بررسی سینتیک و پیش‌بینی روند تغییرات رنگ بادمجان در طی سرخ کردن، از مدل کروکیدا و همکاران (۲۰۰۱) با کمی تغییرات استفاده و همبستگی این مدل سینتیکی با داده‌های تجربی استفاده گردید. از خصوصیات عمده این مدل می‌توان به سادگی

<sup>1</sup> - Lutron, TM-916

<sup>2</sup> - Mastech, MS6540B

### نتایج و بحث

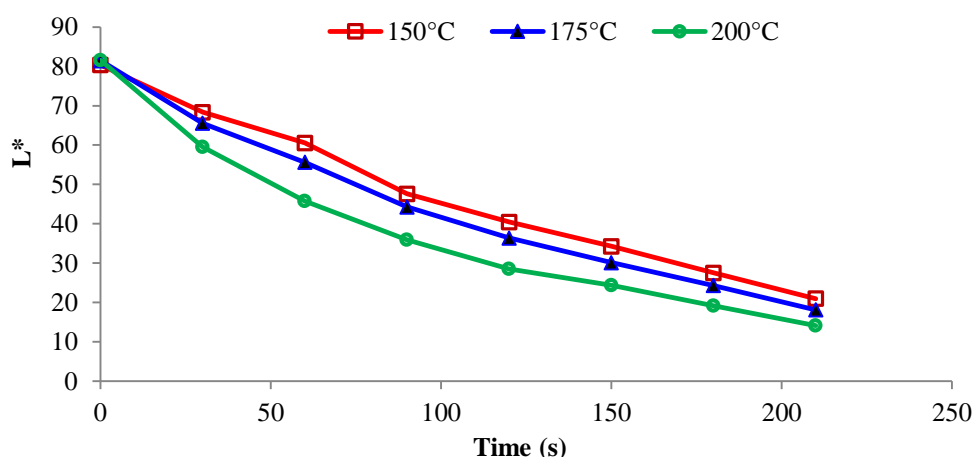
با توجه به جذب روغن کمتر در دماهای بالا، کنترل رنگ به عنوان یکی از خصوصیت‌های کیفی در این شرایط اهمیت زیادی دارد. اثر دما بر تغییر پارامتر روشنایی ( $L^*$ ) طی سرخ کردن بادمجان در شکل ۱ گزارش شده است. دمای روغن تأثیر منفی روی روشنایی برش بادمجان سرخ شده نشان داد و با افزایش دمای فرآیند میزان پارامتر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

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

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

$$\Delta E = a + bt \quad (8)$$

در این مطالعه به منظور مدل کردن داده‌های تجربی سرخ کردن و به دست آوردن ثابت‌های مدل‌ها، از نرم افزار 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 Excel (۲۰۰۷) استفاده شد.



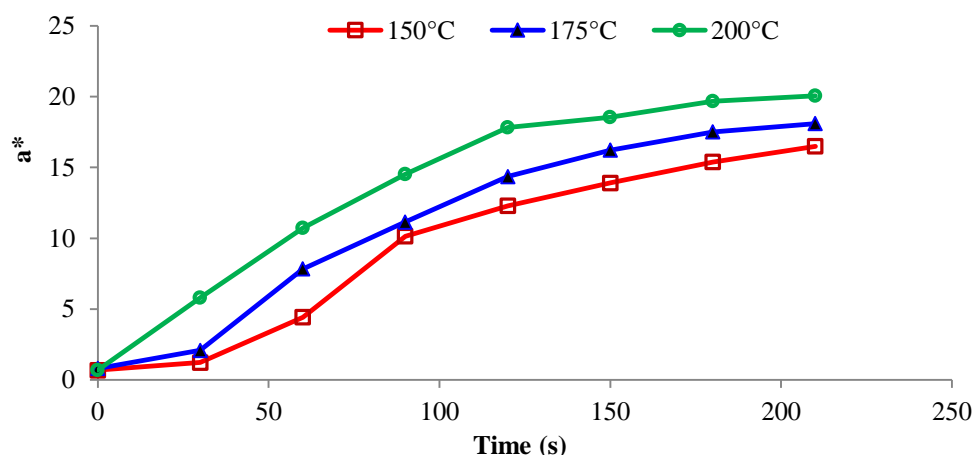
شکل ۱- اثر دما بر پارامتر روشنایی ( $L^*$ ) طی سرخ کردن بادمجان.

Figure 1- Effect of temperature on lightness parameter ( $L^*$ ) during frying of eggplant

برای 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 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.

شکل ۲ تغییرات پارامتر قرمزی ( $a^*$ ) رنگ سطح بادمجان 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. بایک و میتال (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. پدرسچی و همکاران (۲۰۰۵) نیز گزارش کردند که میزان این پارامتر در نمونه‌های سیب‌زمینی آنزیم بری شده نسبت به نمونه‌های آنزیم



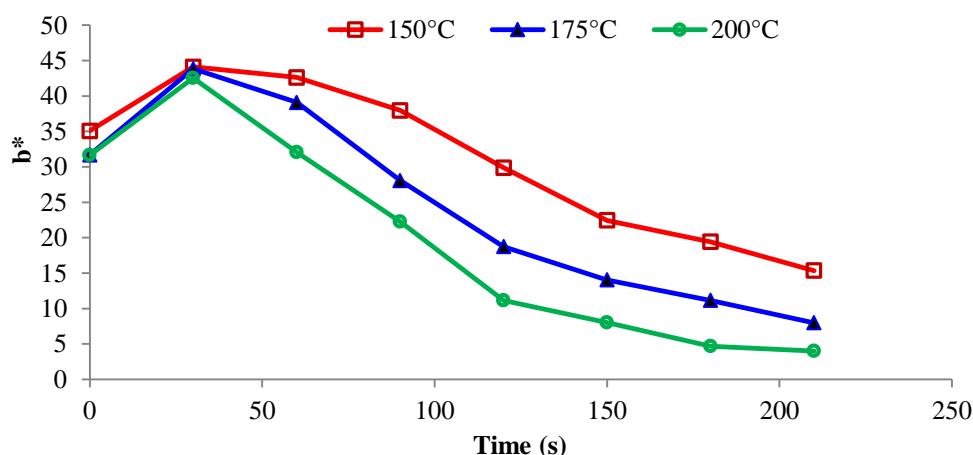
شکل ۲- اثر دما بر پارامتر قرمزی ( $a^*$ ) طی سرخ کردن بادمجان

Figure 2- Effect of temperature on redness parameter ( $a^*$ ) during frying of eggplant

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. 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 (آهرومریت و نما ۲۰۱۰).

اثر دما بر تغییر پارامتر زردی ( $b^*$ ) طی سرخ کردن بادمجان در شکل ۳ گزارش شده است. مقادیر این پارامتر طی فرآیند سرخ کردن، در مراحل ابتدایی به دلیل جذب سطحی روغن سریعاً افزایش و سپس کاهش یافت.

بینگول 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



شکل ۳- اثر دما بر پارامتر زردی ( $b^*$ ) طی سرخ کردن بادمجان

Figure 3- Effect of temperature on yellowness parameter ( $b^*$ ) during frying of eggplant

روغن جذب شده به زمان‌های طولانی‌تر فرآیند و محتوی رطوبت کم محصول مربوط می‌شود که این امر

درواقع هرچه دمای روغن افزایش یابد تغییرات جذب روغن منظم‌تر و در نتیجه قابل‌کنترل است. حداکثر

می‌تواند به دلیل ایجاد خلل فرج در محصول باشد (دوران و همکاران ۲۰۰۷). 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.

مقادیر ضرایب مدل سینتیکی تغییر پارامترهای رنگی برش‌های بادمجان 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 بادمجان در زمان‌های مختلف را پیش‌بینی نمود.

جدول ۱- مقادیر ضرایب مدل سینتیکی تغییر پارامترهای رنگی طی سرخ کردن بادمجان.

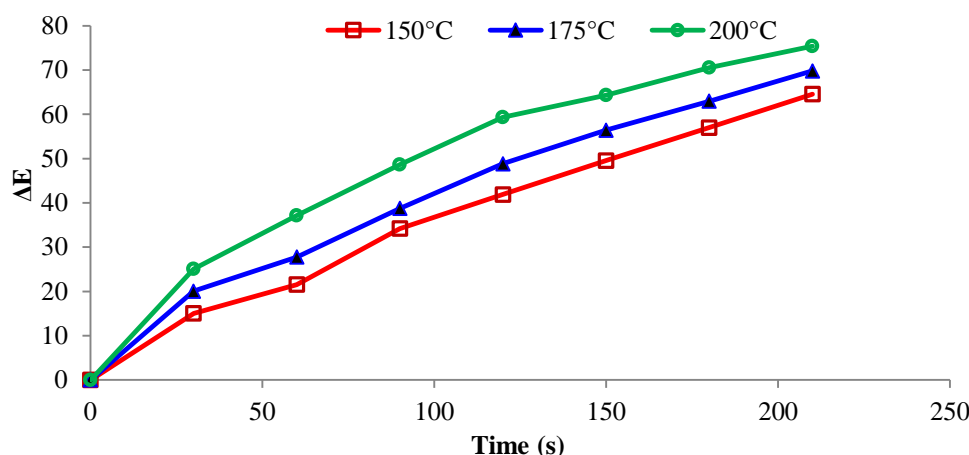
Table 1. The values of the colour parameters kinetic model coefficients during frying of eggplant.

Parameters	Temperature (°C)	a	K <sub>c</sub>	R	SE
L*	150	233.31	0.069	0.978	4.655
	175	174.55	0.098	0.947	7.482
	200	277.08	0.072	0.878	11.756
a*	150	-127.30	0.036	0.970	1.664
	175	-43.13	0.111	0.948	2.329
	200	-81.84	0.073	0.882	3.628
b*	150	0.715	0.986	0.848	6.205
	175	3.56	0.610	0.849	7.594
	200	21.64	0.256	0.891	7.190

اثر دمای سرخ‌کن بر سینتیک شدت تغییر رنگ سطح برش‌های بادمجان در شکل ۴ به نمایش درآمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش دمای سرخ‌کن، شیب نمودار افزایش یافته و تغییر رنگ سطحی نمونه‌ها با سرعت بیشتری رخ می‌دهد. مقدار این تغییرات رنگ با افزایش دما ۱۵۰ به ۲۰۰ درجه سلسیوس شدت گرفته است. برش‌های بادمجان در حین سرخ شدن تیره‌تر شده که این امر با افزایش  $\Delta E$  در حین سرخ کردن مشخص شده است. با گذشت زمان فرآیند، شدت تغییرات رنگ با سرعت ثابت ادامه یافت.

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. داده‌های مربوط به تغییر رنگ بادمجان 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 خطی تغییر می‌کردند، مشخص شد که مدل خطی 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 بادمجان در طی سرخ کردن را در زمان‌های مختلف پیش‌بینی نمود.

سahین 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



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

Figure 4- Effect of temperature on color change parameter (ΔE) during frying of eggplant

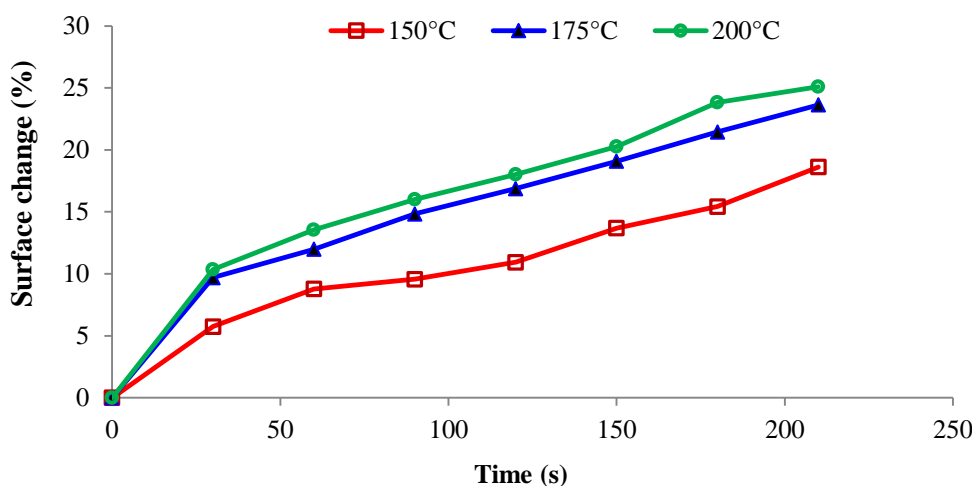
جدول ۲- مقادیر ضرایب مدل سینتیکی تغییر رنگ (ΔE) طی سرخ کردن بادمجان

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

Temperature (°C)	a	b	R	SE
150	4.080	0.298	0.996	2.628
175	7.274	0.317	0.986	4.233
200	12.237	0.336	0.963	7.366

بیشتری رخ می‌دهد. نمونه‌های سرخ شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس افت بیشتری از نظر اندازه سطح داشته و اندازه کوچکتری داشتند.

اثر دمای سرخ‌کن بر تغییر اندازه سطح برش‌های بادمجان در شکل ۵ به نمایش درآمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش دمای سرخ‌کن، شیب نمودار افزایش‌یافته و تغییر سطح نمونه‌ها با سرعت



شکل ۵- اثر دما بر تغییر سطح برش‌های بادمجان در طی سرخ کردن

Figure 5- Effect of temperature on surface change during frying of eggplant slices

ثابته شد (مدت‌زمان لازم برای سرخ شده برش بادمجان). با رسیدن دمای مرکزی محصول به حدود نقطه‌جوش آب، در ابتدا به دلیل فشار بخار ناشی از

اثر دمای روغن بر تغییر دمای مرکز برش‌های بادمجان در طی سرخ کردن در شکل ۶ گزارش شده است. در این پژوهش تغییرات دمای مرکز تا زمان ۲۱۰ ثانیه و هر ۵



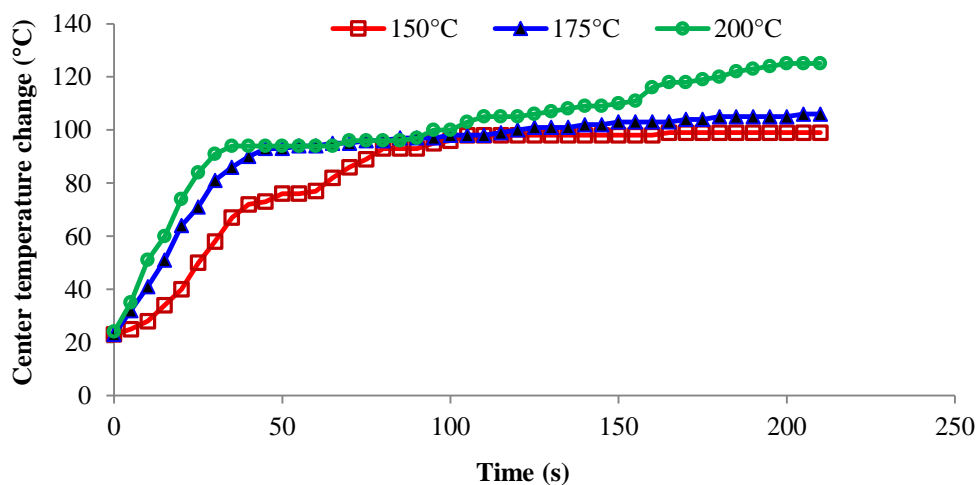
فارکاس و همکاران (۱۹۹۶) بیان کردند که در سرخ کردن انتقال حرارت با وجود دو مرحله حرارتی صورت می‌گیرد. اولین مرحله حرارتی به صورت حرارت محسوس است که موجب افزایش دمای محصول از دمای اولیه به نقطه جوش آب می‌شود. این مرحله حرارتی با پیشرفت فرآیند سرخ کردن و رسیدن دمای مرکزی محصول به نقطه جوش محدود می‌گردد. 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.

نتایج حاصل از بررسی روابط سینتیکی انتقال جرم نمونه‌های بادمجان طی فرآیند سرخ کردن عمیق توسط خلیلیان 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 کاهش 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.

تبخیر و حبس حباب‌های بخار در محصول، به دلیل تشکیل پوسته، نقطه جوش آب طبق قوانین ترمودینامیکی افزایش می‌یابد. در این مطالعه، در مدت ۲۱۰ ثانیه برای دماهای ۱۵۰ و ۱۷۵ درجه سلسیوس روغن، محصول آب خود را در مرکز به طور کامل از دست نداده است و دمای مرکزی محصول برای این دو دمای روغن پس از رسیدن به نقطه جوش آب تا پایان به صورت یکنواخت ثابت مانده است.

با افزایش دما سرعت انتقال حرارت به مرکز بادمجان 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 تا خروج کامل آب مجدد دمای آن افزایش یافته است.



شکل ۶- اثر دمای روغن بر تغییر دمای مرکز برش‌های بادمجان در طی سرخ کردن

Figure 6- Effect of oil temperature on center temperature change during frying of eggplant slices

## نتیجه‌گیری

سینتیک تغییرات رنگ پوسته برش‌های بادمجان هنگام سرخ کردن در دماهای مختلف در این مطالعه بررسی شد و نتایج نشان داد که این تغییرات از یک مدل نمایی افزایشی تبعیت می‌کند. علاوه بر پارامترهای رنگی، شدت تغییرات رنگ ( $\Delta E$ ) نیز با استفاده از مدل خطی توصیف و ضرایب مدل گزارش شد. دماهای بالا موجب روشنایی ( $L^*$ ) کمتر، قرمزی ( $a^*$ ) بیشتر و زردی ( $b^*$ ) کمتر گردید. شدت تغییر پارامتر رنگی  $L^*$  در زمان انتهایی فرآیند سرخ کردن در دماهای مختلف روغن به هم نزدیک می‌باشند، لذا به‌منظور داشتن محصولی با

کیفیت رنگ مناسب، فرآیند با دمای بالا و زمان کم پیشنهاد می‌شود. دمای مرکز برش‌های بادمجان در دماهای بالا سریع‌تر افزایش یافته و زودتر به سمت دمای روغن افزایش می‌یابد. مدل نمایی برآزش شده به‌خوبی تغییرات پارامترهای رنگی را با توجه به ضریب تبیین ( $R$ ) و خطای استاندارد ( $SE$ ) به‌دست‌آمده برای برآزش، توصیف می‌کند. همچنین معادله خطی به‌خوبی پارامتر تغییر رنگ ( $\Delta E$ ) را مدل نمود و ضرایب آن نیز جهت پیش‌بینی پارامترهای رنگی در سایر شرایط سرخ کردن گزارش شد.

## منابع مورد استفاده

- صالحی ف، ۱۳۹۸. مدل‌سازی افت وزن زردآلو طی خشک‌کردن با خشک‌کن فرورسرخ به روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک- شبکه عصبی مصنوعی، نشریه پژوهش‌های صنایع غذایی، ۲۹(۱)، ۶۹-۵۵.
- Ahromrit A, Nema PK, 2010. Heat and mass transfer in deep-frying of pumpkin, sweet potato and taro. *Journal of food science and technology* 47(6): 632-637.
- Akpinar EK, Bicer Y, 2005. Modelling of the drying of eggplants in thin-layers. *International Journal of Food Science & Technology* 40(3): 273-281.
- Baik OD, Mittal GS, 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 TH, 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).
- Doymaz I, 2011. Drying of eggplant slices in thin layers at different air temperatures. *Journal of Food Processing and Preservation* 35(2): 280-289.
- 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.
- Ertekin C, Yaldiz O, 2004. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering* 63(3), 349-359.
- 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, Palazoğlu, TK, 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, Marinou-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 PC, Ríoseco VK, González PA, 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 LE, Wrolstad RE, 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, Ziaiiifar A, Sadeghi MA, 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.

## Study of heat transfer and kinetic modeling of color changes during frying process of eggplant

F Salehi<sup>1\*</sup>

Received: November 11, 2017

Accepted: May 14, 2018

<sup>1</sup>Assistant Professor, Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

\*Corresponding author, Email: F.Salehi@Basu.ac.ir

**Introduction:** Frying is a complex unit operation that is widely used in the food industry. During the process, food is immersed in an oil bath at a temperature above the boiling point of water. This results in counter flow of water vapour and oil at the surface of the product (Moyano et al., 2002; Salehi, 2018). The colour of the fried eggplant slice is one of the most significant quality factors of acceptance for fried products. Heat and mass transfer phenomena take place during frying cause physicochemical changes, which affect the colour and surface of the fried products (Choe and Min, 2007; Bingol, 2012). Process variables such as oil temperature and oil type are expected to affect the colour of the fried products. Although, the investigation on colour properties of fried products has started many years ago, it has continued with increasing interest in recent years (Bingol et al., 2012, Salehi, 2019). Color changes measured may be used to predict both chemical and quality changes in a food. The color parameters have previously proved valuable in describing visual color deterioration and providing useful information for quality control in fruits and fruit products (Krokida et al., 2001, Salehi, 2017). Krokida et al. (2001) studied the effect of oil temperature, oil type and sample thickness on colour changes during deep fat frying of french fries. They reported that oil temperature and thickness of potato strips have a significant effect on the colour parameters, which are not affected by the use of hydrogenated oil in the frying medium. Color changes of redness may be associated to Maillard reactions (Krokida et al., 2001; Pedreschi et al., 2005). The aim of this research is to study the effect of changes in frying temperature on the colour parameters, surface changes and heat transfer during fat frying of eggplant slice and to specifically investigate changes in these quality attributes at each frying time, and determine kinetic parameters for these changes.

**Material and methods:** Eggplants (*Solanum melongena*. L) were purchased from a local supermarket. Slices of eggplant with 1 cm thickness were prepared with the aid of a steel cutter and were immediately placed into the fryer. Refined sunflower oil (Ladan oil, Iran) was used as the frying media. Frying temperatures of eggplant slices were set at 150, 175 and 200°C. All experiments were performed in triplicate and the present results are the average of the obtained individual values. In order to investigate the effect of frying temperature on color changes of fried eggplant, a computer vision system was used. Sample illumination was achieved with HP Scanner (Hp Scanjet 300) (Salehi, 2017). L\* (lightness-darkness that ranges from 0 to 100), a\*(redness-greenness that ranges from -120 to 120) and b\* (yellowness-blueness that ranges from -120 to 120) were measured in this study (Salehi, 2017). In this study, the image analysis of dried gums was performed using Image J software version 1.42e, USA. The estimation of the model parameters for each one of the colour parameters was carried out using a non-linear regression analysis method, separately for each colour parameter during frying of eggplant. In addition, power and quadratic models were chosen to describe the colour changes intensity ( $\Delta E$ ) within the frying process. The experimental data were modeled by using non-linear regression in Curve Expert 1.34 software. A thin thermocouple (Type K) was inserted in the center of the eggplant samples, assuring the position by measure of the sample dimensions. The temperatures at the geometric center of the sample and bulk oil were measured, with sampling time (t) frequency of 5 s by means of the thermocouples (Lutron, TM-916, Taiwan).

**Results and discussion:** Color is one of the most important appearance attributes of food materials, since it influences consumer acceptability. Besides of consumer acceptability, color is also used for process controlling. Figure 1-3 shows changes in  $L^*$ ,  $a^*$  and  $b^*$  values of eggplant slices for increasing frying times and temperature during frying.  $L^*$  is a critical parameter in the frying industry as it is usually the first quality attribute evaluated by consumers when determining product acceptance. Low  $L^*$  values indicate a dark colour and are mainly associated with non-enzymatic browning reactions. The results of the experimental lightness data are shown in figure 1. As shown in figure 1,  $L^*$  value of fried eggplant decreased during frying. Oil temperature has a negative effect on the lightness of fried eggplants. The change in  $L^*$  value was less at lower frying temperature. In figure 4 colour change ( $\Delta E$ ) is presented as functions of frying time. The colour change intensity gets more intense at higher temperatures ( $200^\circ\text{C}$ ). The mathematical models were fitted to the color change ( $\Delta E$ ) data. The results of fitting the proposed model to the experimental data are reported in table 2. The high coefficient of determination and small standard error of estimate of fitting showed that the color change ( $\Delta E$ ) during frying of eggplant could be modeled by this model. Surface change % is a common phenomenon during frying. Rapid water loss resulted in significant shrinkage in chips during frying. In figure 5 surface change is presented as functions of frying time and oil temperature. As shown in this figure, the surface change % was increased with the progression of frying time and temperature. As soon as the eggplant slices were introduced in the hot frying medium, the slices shrunk. High surface change was seen in eggplant slices fried at  $200^\circ\text{C}$  which may be due to fast removal of moisture. Similar behavior was also reported in change in shrinkage during vacuum frying of banana chips.

**Conclusion:** The results showed that most of the color changes occur in the early stages of the process. Color changes during frying process were depends on the processing temperature and time. The higher temperatures cause less lightness and yellowness, but redness increases. In sum, the high temperature and short time process can be suitable for controlling color quality and thus product safety. The kinetics of the surface color changes of the eggplant followed an incremental exponential function. Fried samples at a temperature of  $200^\circ\text{C}$  were more dropped in surface and had smaller size.

**Keywords:** Color, Eggplant, Frying, Heat transfer, Kinetic