

مدل سازی سینتیکی تغییرات رنگ در خلال سیب زمینی طی فرآیند سرخ کردن

حسن صباغی^{a*}، امان محمد ضیائی فر^b، علیرضا صادقی ماهونک^c، مهدی کاشانی نژاد^c،
حبیب الله میرزایی^c

^a دانشجوی دکتری مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

^b استادیار گروه مهندسی مواد و طراحی صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

^c دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱۱/۱۱

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۱۱/۲۴

۶۵

چکیده

مقدمه: گسترش رنگ طی سرخ کردن یک پدیده سطحی وابسته به دما و زمان فرآیند است و از نظر سلامتی اهمیت دارد. هدف این پژوهش توصیف رفتار تغییرات رنگ خلال سیب زمینی حین فرآیند به صورت یک مدل ریاضی در دماهای مختلف است.

مواد و روش‌ها: خلال‌های سیب زمینی آنزیم بری شده در یک سرخ‌کن مجهز به ترمو کنترلر و حاوی روغن آفتابگردان در دماهای ۱۴۵، ۱۶۰ و ۱۷۵ درجه سانتیگراد به مدت ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ ثانیه سرخ شدند. دمای سطحی محصول، با قرار دادن ترموکوپل نوع T در یک میلی‌متری زیر سطح خلال، با فاصله زمانی ۲ ثانیه طی فرآیند توسط دیتالاگر ثبت شد. پارامترهای رنگی روشنایی (L)، قرمزی (a) و زردی (b) با دستگاه لایویناند بدست آمد و تغییرات آن‌ها در برابر زمان روی مدل سینتیکی با نرم‌افزار Matlab نسخه ۲۰۰۹ برازش گردید. در نهایت دمای بحرانی تغییرات رنگ محصول طی سرخ کردن، با انجام آنالیز آماری شدت تغییرات رنگ تعادلی (ΔE_{00}) به صورت طرح کاملاً تصادفی و انجام مقایسه میانگین با استفاده از آزمون دانکن، با سطح اطمینان ۹۵٪ در نرم افزار SPSS نسخه ۱۹، مشخص گردید.

یافته‌ها: نتایج این آزمایش نشان داد که بخش عمده تغییرات رنگ در مراحل ابتدایی فرآیند رخ می‌دهد. دماهای بالاتر موجب روشنایی (L) کمتر، قرمزی (a) بیشتر و زردی (b) بیشتر می‌شود. پارامتر زردی بیشتر، مطلوبیت رنگ خلال سیب زمینی را افزایش می‌دهد. دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد می‌تواند به عنوان دمای بحرانی برای معنی‌دار شدن شدت تغییرات رنگ ($P \leq 0.05$) معرفی گردد.

نتیجه گیری: سینتیک تغییرات رنگ پوسته خلال سیب زمینی از یک تابع نمایی افزایشی تبعیت می‌کند ($R^2 = 0.99$). فرآیند دمای بالا و زمان کوتاه می‌تواند جهت کنترل کیفیت رنگ و در نتیجه ایمنی محصول مناسب باشد.

واژه‌های کلیدی: خلال سیب زمینی، رنگ، سرخ کردن، مدل سینتیکی، Matlab

مقدمه

فرآیند سرخ کردن از فرآیندهای پیچیده به دلیل انتقال همزمان حرارت و جرم است (Datta, 2007) 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. به‌طور کلی خلال‌های سیب‌زمینی زرد روشن نسبت به قهوه‌ای تیره ترجیح داده می‌شوند (Mestdagh *et al.*, 2008). قندهای احیاء‌کننده تحت تاثیر حرارت با پروتئین و اسیدآمینوهای آزاد، طی واکنش مایلارد، ایجاد رنگدانه و طعم می‌کنند. ملانوئیدین ترکیب نیتروژن‌دار قهوه‌ای رنگ با وزن مولکولی بالا است که محصول نهایی واکنش مایلارد بوده و عامل ایجاد رنگ معمول قهوه ای طلایی^۱ در محصول می‌باشد. میزان بیشتر این رنگدانه موجب ایجاد محصول تیره با طعم تلخ می‌شود. اسید آمینه در سیب زمینی به میزان بیشتری نسبت به قندهای احیاء‌کننده وجود دارند (Ames, 1992). بنابراین شدت واکنش مایلارد بوسیله میزان قند احیاء‌کننده قابل کنترل است. رنگ ظاهری خلال سیب زمینی به میزان توزیع نواحی قهوه‌ای بوجود آمده طی سرخ کردن و همچنین روغن جذب شده در سطح که نواحی روغنی با ظاهر شفاف را بوجود می‌آورد، بستگی دارد (Bingol *et al.*, 2012). استاندارد مورد استفاده برای بررسی رنگ خلال‌های سیب زمینی سرخ شده در سراسر دنیا استاندارد رنگ USDA می‌باشد. اصطلاح فرای کالر^۲ در این استاندارد برای رنگ محصول سرخ‌شده استفاده می‌شود. براساس این استاندارد رنگ خلال‌های سیب زمینی هرچه روشن‌تر باشد، مطلوب‌تر است (USDA, 2005).

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. آکريل آميد از ترکیبات حاصل از واکنش بین اسیدآمینو اسپارژین و قندهای احیاء‌کننده طی واکنش مایلارد است و کنترل دما و زمان در حین سرخ کردن تاثیر معنی‌داری بر کاهش تشکیل آکريل آميد دارد (Romani *et al.*, 2009). در

چندین مطالعه نیز میزان آکريل آميد در خلال سیب زمینی به رنگ ارتباط داده شده است (Pedreschi *et al.*, 2005). از طرفی دمای سطحی محصول در تشکیل رنگ و واکنش‌های شیمیایی وابسته به آن، اهمیت زیادی دارد. در واقع تشکیل آکريل آميد عمدتاً در سطح و نزدیک سطح محصول اتفاق می‌افتد. بنابراین، کنترل زمان و دمای سطحی خلال سیب زمینی و شستشوی سطح برش خورده آن می‌تواند تا حد زیادی تشکیل آکريل آميد را کاهش دهد (Gokmen & Palazoglu, 2008; Romani *et al.*, 2008). ارزیابی ظاهری از نظر گسترش مناطق چرب و قهوه‌ای در سطح محصول، می‌تواند به منظور 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 بوسیله اندازه گیری شدت رنگ بعد از سرخ کردن با استفاده از بازرسی چشمی براساس جدول‌های رنگ استاندارد و در بهترین حالت با کمک دستگاه‌های رنگ سنج و اسپکتوفتومتر انجام می‌شود (Rodriguez & Wrolstad, 1997). میزان تغییرات رنگ و متناسب با آن سطح آکريل آميد با افزایش زمان و دمای فرآیند زیاد می‌شود (Michalak *et al.*, 2011). به طور 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 بطور مداوم و حفظ یکنواختی درجه حرارت روغن، سبب بهبود طعم، رنگ و ظاهر غذای سرخ شده می‌شود. هر دو عامل میزان دمای سرخ‌کن (نباید بیش از ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد باشد) و افزایش دمای روغن در محدوده زمانی مشخص به حفظ کیفیت محصول کمک می‌کند. درجه حرارت تا حد ممکن باید در طول کار ثابت نگه داشته شود. هرگونه نوسان دمایی می‌تواند تاثیر منفی بر روی کیفیت رنگ محصول و کنترل آن داشته باشد (Farid & Chen, 1998). 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. غلظت سورفکتانت بیشتر، موجب

¹ Golden Brown

² Fry Color

می‌شود. این مدل توصیف کننده رفتار تغییرات رنگ حین فرآیند سرخ کردن خلال سیب زمینی، به عنوان محصول عمده این فرآیند، می‌باشد.

مواد و روش‌ها

– آماده سازی خلال‌های سیب زمینی

سیب‌زمینی وارپته آگریا^۲ پاییزه از بازار محلی تهیه گردید و در دمای حدود ۸ درجه سانتی‌گراد و دور از نور برای جلوگیری از جوانه زنی نگهداری شد. پس از شستشو پوست‌گیری شده و به روش دستی به صورت خلال‌هایی در ابعاد ۵×۵×۵ میلی‌متر مکعب درآمد. سپس خلال‌ها شستشو داده شد تا نشاسته آزاد آن خارج شود. قبل از سرخ کردن عملیات آنزیم بری در آب با دمای ۸۵ درجه سانتیگراد به مدت ۳/۵ دقیقه مطابق با روش (AOAC, 1995) انجام گرفت.

– عملیات سرخ کردن

فرآیند سرخ کردن خلال‌های سیب زمینی در یک سرخ‌کن (Deep fryer: Model BDZ-5A-1) حاوی دو لیتر روغن آفتابگردان (با ۰/۰۲ درصد اسید چرب آزاد بر حسب اسید اولئیک، عدد یدی برابر با ۱۲۹/۳۲ و رنگ لایویند ۱۰-۱) و مجهز شده به ترموکنترلر دارای ترموکوپل نوع K، در دمای ۱۴۵، ۱۶۰ و ۱۷۵ درجه سانتیگراد به مدت ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ ثانیه، انجام شد. به منظور ثبت تغییرات دمای خلال سیب زمینی در حین سرخ کردن نیز ترموکوپل نوع T به طور مجزا در فاصله حدود یک میلی‌متری زیر سطح محصول و مرکز قرار گرفت. تغییرات دمای محصول با فاصله زمانی ۲ ثانیه بوسیله دیتالاگر^۳ (Pico “RS-232” Model TC-08 technology) و نرم افزار پیکولاگ^۴ در کامپیوتر ثبت شد. این آزمایش در سه تکرار انجام گرفت. پس از اتمام فرآیند سرخ کردن نمونه حدود ۲ دقیقه روی کاغذ جاذب قرار گرفته تا روغن سطحی آن خارج شود. به منظور فراهم سازی شرایط یکسان برای بررسی فرآیند سرخ کردن، ترکیب شیمیایی و مقطع برش عرضی برای هر خلال سیب زمینی یکسان فرض شد.

تولید محصولات مملو از روغن^۱ با سطح خارجی بیش از حد حد پخته، تیره رنگ و خشک و سطح داخلی نپخته می‌گردد (Blumenthal, 2001). 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 & 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 سینتیکی تغییرات رنگ خلال سیب زمینی در سال‌های اخیر کمتر مورد توجه قرار گرفته است. Moyano و همکاران (۲۰۰۲) سینتیک تغییرات رنگ پوسته خلال‌های سیب زمینی 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 به تنهایی 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 Krokida و همکاران (۲۰۰۱) تاثیر دمای روغن، نوع روغن و ضخامت نمونه را روی تغییرات رنگ خلال سیب زمینی 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 تاثیر معنی‌داری بر سرعت تغییر رنگ محصول دارند، در حالیکه استفاده از روغن هیدروژنه به جای روغن غیرهیدروژنه تاثیری 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.

یکی از مهمترین الزامات جهت کنترل یک خصوصیت کیفی، مانند رنگ، آشنایی با روند تغییرات آن طی فرآیند است. بنابراین هدف این پژوهش در مرحله اول بررسی تاثیر دما و زمان فرآیند سرخ کردن روی تغییرات رنگ می‌باشد و در مرحله دوم مدل سینتیکی مناسب برای تغییرات بدست آمده، روی داده‌های تجربی رنگ برآزش

¹ Oil Soaked Product

² Agria

³ Data Logger

⁴ Picolog

یعنی C_i را داشته و با توجه به تغییرات نمایی بعد از زمان صفر می‌توان معادله (۳) را به عنوان مدل تجربی کلی و بیانی دیگر از معادله (۲) در نظر گرفت.

$$C = C_i + a.(1 - \exp(-K_C t)), C_\infty = C_i + a \quad (۳)$$

حرف a در معادله (۳) پارامتر مدل می‌باشد و در صورت محاسبه حد معادله (۳)، وقتی t به سمت بی نهایت میل کند، می‌توان با اضافه کردن مقدار a به C_i ، میزان C_∞ یا میزان تعادلی پارامتر رنگی را محاسبه نمود. با حل و برازش معادله (۳) روی میانگین داده‌های تجربی پارامترهای رنگی، با استفاده از نرم افزار متلب نسخه ۲۰۰۹ و جعبه ابزار برازش منحنی^۲، تغییرات پارامترهای رنگی نسبت به زمان، K_C و C_∞ قابل محاسبه خواهند بود.

- بررسی سینتیکی تغییر رنگ

شدت تغییر رنگ خلال‌های سیب زمینی طی سرخ کردن، برای دماهای مختلف روغن، با استفاده از پارامتر ΔE مطابق معادله (۴) محاسبه شد.

$$\Delta E = \sqrt{(L_i - L_t)^2 + (a_i - a_t)^2 + (b_i - b_t)^2} \quad (۴)$$

در معادله (۴) اندیس i مربوط به پارامترهای رنگی شاهد در زمان صفر و t مربوط به پارامترهای رنگی نمونه سرخ شده در زمان t در دماهای مختلف مورد آزمون می‌باشد. میزان ΔE با گذشت زمان برای دماهای مختلف محاسبه شد و داده‌های تجربی حاصل از آن با مدل سینتیکی نمایی برازش شد. مدل سینتیکی بیان شده در مقالات مطابق تغییرات نمایی به صورت معادله (۵) می‌باشد. این مدل به صورت سه پارامتری (b_1 ، b_2 و b_3) می‌باشد. به منظور تسهیل مدل تجربی در این پژوهش سعی شده است مدل ارائه شده به صورت نمایی دو پارامتری برازش شود. از طرفی از نظر توابع ریاضی، شکل طبیعی معادله (۶) به صورت تابع نمایی افزایشی است در حالیکه معادله (۵) اینگونه نیست. بنابراین مدل سینتیکی مطابق معادله (۶) انتخاب شد.

$$\Delta E = b_1 + b_2 \exp\left(\frac{-t}{b_3}\right), \Delta E_\infty = b_1 \quad (۵)$$

$$\Delta E = a.(1 - \exp(-K_C t)), \Delta E_\infty = a \quad (۶)$$

- ثبت پارامترهای رنگی با دستگاه لایوباند

آزمون رنگ سنجی بوسیله دستگاه لایوباند (Lovibond CAM-system 500) برای نمونه‌های سرخ شده انجام شد. با قرار دادن هر نمونه در دستگاه پارامترهای رنگی روشنایی (L)، قرمزی (a) و زردی (b) بدست آمد (شکل ۱).



شکل ۱- نحوه قرار گیری نمونه در دستگاه لایوباند

- مدل سازی سینتیکی تغییر پارامترهای رنگی

سینتیک تغییرات رنگ مطابق با مدل Krokida و همکاران (۲۰۰۱) انجام شد و همبستگی این مدل سینتیکی با داده‌های تجربی بررسی گردید. از خصوصیات عمده این مدل می‌توان به سادگی و شکل درجه یک آن اشاره نمود که بیان ساده‌ای از تغییرات رنگ خواهد داشت. براین اساس رفتار تغییرات رنگ طی سرخ کردن از یک مدل نمایی تبعیت می‌کند که با داده‌های تجربی بدست آمده سازگاری دارد. سینتیک تغییرات پارامترهای رنگی در تحقیق Krokida و همکاران (۲۰۰۱) به صورت معادله (۱) و معادله (۲) بیان می‌شود:

$$\frac{dC}{dt} = -K_C (C - C_\infty) \quad (۱)$$

$$\left(\frac{C - C_\infty}{C_i - C_\infty}\right) = \exp(-K_C t) \quad (۲)$$

در معادلات فوق C مقدار پارامتر رنگی (L یا a یا b) در زمان مشخص، C_∞ مقدار پارامتر در زمان بی نهایت یا مقدار تعادلی^۱ (بدون بُعد) است، K_C ثابت سینتیکی تغییرات هر یک از پارامترها (بر حسب عکس ثانیه) و t زمان بر حسب ثانیه می‌باشد. در لحظه صفر هر پارامتر مقدار اولیه خود

^۱ Equilibrium value

^۲ Curve fitting toolbox

سطحی محصول زودتر به نقطه جوش آب رسیده و برای زمان کوتاهی ثابت می‌ماند و پس از اتمام آب سطحی محصول و تشکیل پوسته، شروع به افزایش به سمت دمای روغن می‌کند (نقطه A در شکل ۲، ب).

جدول ۱ اطلاعات برازش مدل سینتیکی روی میانگین پارامترهای رنگی در دماهای مختلف را به صورت کلی نشان می‌دهد. شکل ۳ نشان دهنده برازش مدل سینتیکی را روی داده‌های تجربی پارامتر روشنایی (L) است. همان طور که در شکل مشخص است، پارامتر روشنایی (L) خلال‌های سیب زمینی طی سرخ کردن در مراحل ابتدایی فرآیند سریعاً افزایش یافت و سپس ثابت باقی ماند. دمای روغن تأثیر منفی روی روشنایی خلال سیب زمینی سرخ شده نشان داد و با افزایش دمای فرآیند میزان پارامتر روشنایی در زمان یکسان کاهش یافت. مطابق جدول ۱ میزان تعادلی این پارامتر یا به عبارتی میزان این پارامتر در زمان بی‌نهایت برای دماهای ۱۴۵، ۱۶۰ و ۱۷۵ درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۰/۰۶، ۰/۴۸ و ۰/۷۸ بدست آمد.

شکل ۴ تغییرات پارامتر قرمزی (a) رنگ محصول را در برابر زمان در دماهای مختلف سرخ کردن نشان می‌دهد. این پارامتر با افزایش دمای روغن و زمان فرآیند به طور معنی داری افزایش می‌یابد. افزایش این پارامتر به عنوان یک عامل منفی در رنگ محصول در نظر گرفته می‌شود. ثابت سینتیکی افزایش قرمزی مطابق جدول ۱ برای دماهای ۱۴۵، ۱۶۰ و ۱۷۵ °C به ترتیب ۰/۰۰۷۳، ۰/۰۰۵۵ و ۰/۰۰۶۹ و میزان تعادلی این پارامتر نیز به ترتیب ۰/۴۷۷، ۰/۷۵ و ۰/۵۸ محاسبه شد.

در معادلات فوق حروف a، b پارامترهای مدل و K_E ثابت سینتیکی بر حسب عکس ثانیه می‌باشند. با انتخاب معادله (۶) به عنوان مدل برازش شده، تغییرات پارامترهای این تابع به صورت ΔE_∞ و K_E نیز با دما مطابق معادله آرنیوس بررسی شد. در معادلات (۷) و (۸)، E_a انرژی فعال سازی بر حسب ژول بر مول است و R ثابت جهانی گازهای ایده‌آل برابر با ۸۳۱۴ ژول بر کیلوگرم مول در درجه سانتی‌گراد می‌باشد. T دمای فرآیند بر حسب کلون می‌باشد

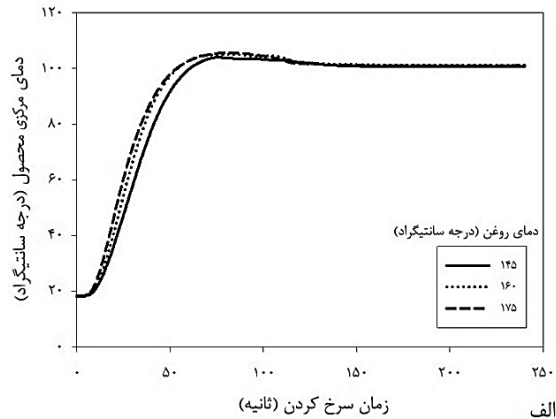
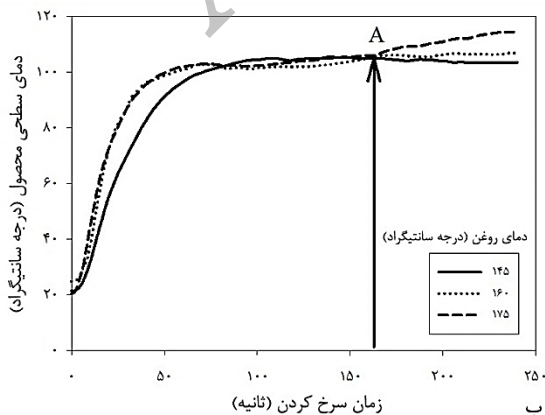
$$\Delta E_\infty = A_E \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (۷)$$

$$K_E = A_{K_e} \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (۸)$$

در نهایت برای مقایسه شدت تغییرات رنگ در دماهای مختلف، آنالیز آماری مقادیر تعادلی آن (ΔE_∞)، با در نظر گرفتن دمای سرخ کردن به عنوان تیمار به صورت طرح کاملاً تصادفی انجام گرفت و مقایسه میانگین با استفاده از آزمون دانکن، با ۹۵ درصد اطمینان با کمک نرم افزار SPSS نسخه ۱۹، صورت پذیرفت.

یافته‌ها

شکل ۲ تغییرات دمای مرکزی و سطحی محصول را بر حسب درجه سانتی‌گراد طی زمان سرخ کردن در سه دمای مختلف روغن نشان می‌دهد. با کاهش نرخ تبخیر آب و اتمام فاز جوشش، نقطه جوش آب بدلیل کاهش فشار کم می‌شود اما به دلیل وجود اجزای محلول اندکی بیش از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد باقی می‌ماند (شکل ۲، الف).

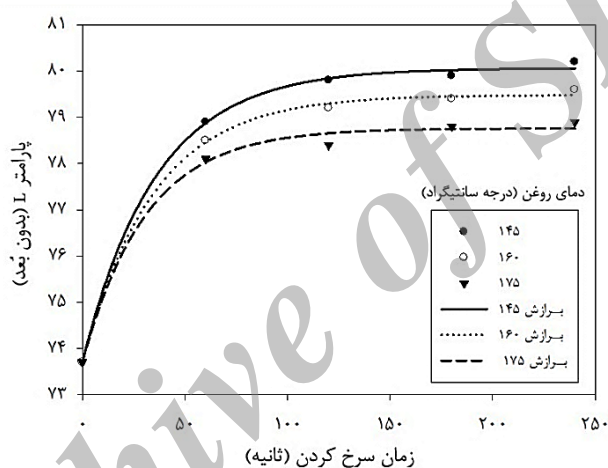


شکل ۲- تغییرات دمای مرکزی (الف) و دمای سطحی (ب) محصول در طی سرخ کردن در سه دمای مختلف روغن

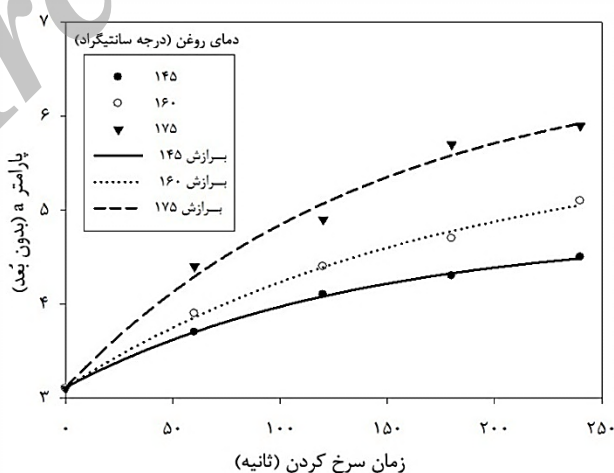
مدل سازی سینتیکی تغییرات رنگ در خلال سیب زمینی طی فرآیند سرخ کردن

جدول ۱- اطلاعات برازش مدل سینتیکی روی میانگین پارامترهای رنگی در دماهای مختلف، $C=C_1 + a \cdot (1 - \exp(-K_c t))$

R^2	SSE	میزان تعادلی پارامتر رنگی	K_c (عکس ثانیه)	a	پارامتر رنگی	دمای روغن (درجه سانتی گراد)
۰/۹۹۸۷	۰/۰۳۸	۸۰/۰۶	۰/۰۲۸	۶/۳۶	L	۱۴۵
۰/۹۹۸۸	۰/۰۰۱۵	۴/۷۷	۰/۰۰۷۳	۱/۶۶	a	
۰/۹۹۹۱	۰/۱۹۵۶	۱۵/۵۵	۰/۰۳۵۵	۵/۳۵	b	
۰/۹۹۸۸	۰/۰۲۹۶	۷۹/۴۸	۰/۰۲۹	۵/۷۸	L	۱۶۰
۰/۹۹۵۸	۰/۰۱	۵/۷۵	۰/۰۰۵۵	۲/۶۴	a	
۰/۹۹۵۱	۰/۱۴۳۷	۱۶/۳۶	۰/۰۴۱۳	۶/۱۶	b	
۰/۹۹۵۲	۰/۰۹۳	۷۸/۷۵	۰/۰۳۲	۵/۰۵	L	۱۷۵
۰/۹۸۹۲	۰/۰۵۴۸	۶/۵۸	۰/۰۰۶۹	۳/۴۷	a	
۰/۹۹۹۹	۰/۰۰۵۴	۱۷/۳۳	۰/۰۳۶۱	۷/۱۳	b	



شکل ۲- مدل سینتیکی برازش شده روی داده‌های پارامتر روشنایی محصول در دماهای مختلف فرآیند



شکل ۳- مدل سینتیکی برازش شده روی داده‌های پارامتر قرمزی محصول در دماهای مختلف فرآیند

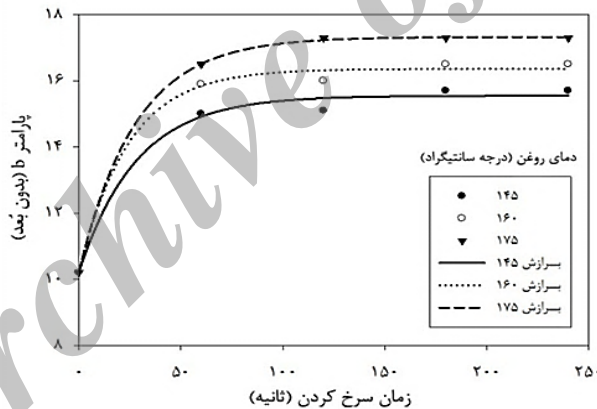
مدل سینتیکی برازش شده روی داده‌های تجربی پارامتر b در شکل ۵ نشان داده شده است. میزان تعادلی این پارامتر برای دماهای ۱۴۵، ۱۶۰ و ۱۷۵ درجه سانتی‌گراد مطابق جدول ۱ به ترتیب ۱۵/۵۵، ۱۶/۳۶ و ۱۷/۳۳ محاسبه شد. در واقع همان طور که مشخص است، میزان این پارامتر نیز با افزایش زمان و دمای فرآیند زیاد می‌شود.

شکل ۶ سینتیک شدت تغییر رنگ خلال‌های سیب زمینی را طی سرخ کردن در دماهای مختلف با استفاده از پارامترهای (L, a, b) نشان می‌دهد. خلال‌های سیب زمینی در حین سرخ کردن 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 می‌یابد.

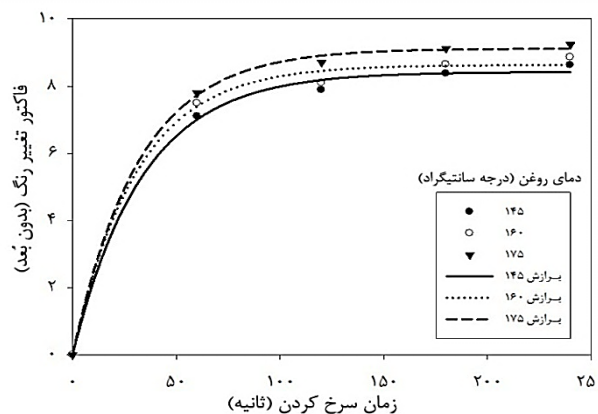
جدول ۲ اطلاعات مربوط به مدل سینتیکی برازش شده روی داده‌های تجربی سینتیک تغییر رنگ (ΔE) در دماهای مختلف سرخ کردن را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۲ با افزایش دما میزان تعادلی تغییر رنگ (ΔE_{∞}) و ثابت

میانگین دانکن انجام شده در ارتباط با ΔE_{∞} در جدول ۲ مشخص شده است. با در نظر گرفتن معادله آرنیوس، براساس شکل ۷ می‌توان ارتباط دو پارامتر میزان تعادلی تغییر رنگ (ΔE_{∞}) و ثابت K_E مدل سینتیکی (K_E) را با دما محاسبه نمود. با محاسبه ثابت A و E_a در معادله آرنیوس برای میزان تعادلی تغییر رنگ (ΔE_{∞}) به ترتیب $۳۰/۱۵۳$ و $۴۴۵۴/۸۹۱$ کیلوژول بر مول و برای K_E به ترتیب $۰/۱۵۴$ و $۵۷۷۹/۹۹۲$ کیلوژول بر مول بدست آمد. از مجموع مقادیر بدست آمده از مدل تجربی و معادله آرنیوس می‌توان برای تخمین شدت تغییرات رنگ به عنوان تابعی از دما و زمان فرآیند در ضخامت مورد مطالعه استفاده کرد.

شکل ۶ سینتیک شدت تغییر رنگ خلال‌های سیب زمینی را طی سرخ کردن در دماهای مختلف با استفاده از پارامترهای (L, a, b) نشان می‌دهد. خلال‌های سیب زمینی در حین سرخ کردن 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 می‌یابد.



شکل ۵- مدل سینتیکی برازش شده روی داده‌های پارامتر زردی محصول در دماهای مختلف فرآیند



شکل ۶- منحنی برازش شده روی داده‌های فاکتور تغییر رنگ (ΔE) طی سرخ کردن در دماهای مختلف

مدل سازی سینتیکی تغییرات رنگ در خلال سیب زمینی طی فرآیند سرخ کردن

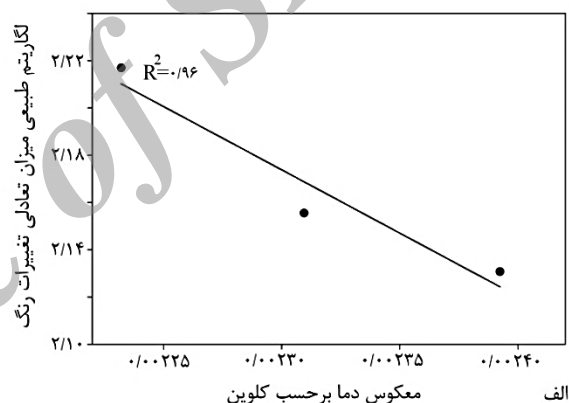
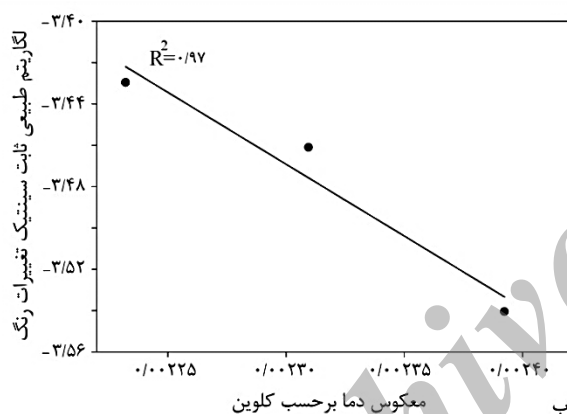
جدول ۲- اطلاعات برازش مدل سینتیکی و مقایسه تغییر رنگ با زمان در دماهای مختلف با انحراف معیار،
 $\Delta E = \Delta E_{\infty} (1 - \exp(-KE.t))$

R^2	SSE	K_E (عکس ثانیه)	ΔE_{∞}	دمای روغن (درجه سانتی‌گراد)
۰/۹۹۷±۰/۰۱۵	۰/۱۴۲±۰/۰۵۶	۰/۰۲۹±۰/۰۰۳	۸/۴۲۱±۰/۳۳۲ ^a	۱۴۵
۰/۹۹۶±۰/۰۰۷	۰/۱۹۲±۰/۱۰۳	۰/۰۳۱۴±۰/۰۰۰۱	۸/۶۳۳±۰/۲۰۶ ^a	۱۶۰
۰/۹۹۹±۰/۰۰۹	۰/۰۶۱±۰/۰۲۳	۰/۰۳۲۴±۰/۰۰۰۲	۹/۱۸۰±۰/۱۶۳ ^b	۱۷۵

* حروف (a و b) مقایسه بین دماها می‌باشند و حروف مشترک عدم اختلاف را نشان می‌دهند.

جدول ۳- تجزیه واریانس برای مقایسه دماهای مختلف سرخ کردن از نظر ΔE_{∞} با ($P \leq 0.05$)

معنی داری (sig.)	F	میانگین مربعات (MS)	درجه آزادی (df)	مجموع مربعات (SS)	تیمار (دمای سرخ کردن)
۰/۰۲۲	۷/۷۰۲	۰/۴۶۰	۲	۰/۹۲۰	تیمار (دمای سرخ کردن)
		۰/۰۶۰	۶	۰/۳۵۸	خطا
			۸	۱/۲۷۹	کل



شکل ۷- تاثیر دمای سرخ کردن مطابق معادله آرنیوس روی میزان تعادلی تغییر رنگ (الف) و ثابت سینتیکی آن (ب)

دمای بالاتر سرخ کردن سریع‌تر به سمت دمای روغن افزایش نشان می‌دهد که به دلیل خشک شدن سطحی زودتر می‌باشد. تغییرات دمایی مشاهده شده برای دمای سطحی و مرکزی محصول در مدت سرخ کردن با مشاهدات بسیاری از محققین توافق دارد. Farkas و همکاران (۱۹۹۶) بیان کردند که در سرخ کردن انتقال حرارت با وجود دو سینک حرارتی^۱ (سوخ حرارتی) صورت می‌گیرد. اولین سینک حرارتی به صورت حرارت محسوس است که موجب افزایش دمای محصول از دمای اولیه به نقطه جوش آب می‌شود. این سینک حرارتی با پیشرفت فرآیند سرخ کردن و رسیدن دمای مرکزی محصول به

بحث

- تغییرات دمای محصول حین سرخ کردن

با رسیدن دمای مرکزی محصول به حدود نقطه جوش آب در ابتدا به دلیل فشار بخار ناشی از تبخیر و حبس حباب‌های بخار در محصول، به دلیل تشکیل پوسته، نقطه جوش آب طبق قوانین ترمودینامیکی افزایش می‌یابد. در این مطالعه، در مدت ۲۴۰ ثانیه برای دماهای مختلف روغن، محصول آب خود را در مرکز به طور کامل از دست نداده است و دمای مرکزی محصول برای هر سه دمای روغن پس از رسیدن به نقطه جوش آب تا پایان به صورت یکنواخت ثابت مانده است. دمای سطحی محصول، در

¹ Thermal Sink

مقادیر تعادلی در زمان بی‌نهایت مشخص است که با افزایش دما روشنایی محصول کاهش می‌یابد. در ۶۰ ثانیه ابتدایی فرآیند با وجود آب سطحی تغییرات روشنایی تقریباً برای سه دمای مورد آزمایش یکسان است ولی با گذشت زمان و از دست رفتن آب سطحی و افزایش دمای سطحی به تدریج تیرگی در دماهای بالا بیشتر خواهد بود. بنابراین با کوتاه کردن زمان فرآیند می‌توان در دماهای بالا نیز روشنایی محصول را حفظ کرد.

– پارامتر قرمزی (a)

بخش عمده تغییرات این پارامتر در زمان‌های ابتدایی فرآیند است. Baik و Mittal (۲۰۰۳) نشان دادند که تغییرات پارامتر a 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 پارامتر در نمونه‌های سیب زمینی آنزیم بری شده نسبت به نمونه‌های آنزیم بری نشده در حین سرخ کردن کمتر است. همچنین بیان کردند که پارامتر روشنایی (L) و پارامتر زردی (b) در طی سرخ کردن تغییر چندانی نکرده و رنگ سیب زمینی در طی سرخ کردن تابع پارامتر قرمزی (a) است که تغییرات آن بیشتر است. با مقایسه تغییرات دمای سطحی و تغییرات پارامتر a 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.

– پارامتر زردی (b)

رنگ مناسب خلال سیب زمینی برای مصرف کننده به صورت قهوه‌ای – طلایی^۲ است. به طور کلی میزان بیشتر پارامتر b به معنی زردی بیشتر محصول، بهبود رنگ و در نتیجه افزایش سطح پذیرش آن می‌باشد. همچنان که فرآیند سرخ کردن ادامه می‌یابد، ضخامت پوسته تشکیل شده در سطح محصول افزایش می‌یابد (Ziaifar, et al., 2010). بنابراین Bingol و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند که با افزایش ضخامت پوسته، که روغن بخش عمده تشکیل دهنده آن می‌باشد، غلظت ترکیبات ماده خشک

نقطه جوش محدود می‌گردد. دومین سینک حرارتی مربوط به حدواسط پوسته/هسته می‌باشد که آب در این نقطه تبدیل به بخار می‌شود و در سرتاسر سرخ کردن حفظ می‌شود. 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، نشان دهنده افزایش شدت تغییرات رنگ نامطلوب به دلیل کاهش آب سطحی است. با محاسبه پارامترهای رنگی که در ادامه بیان می‌شوند نیز مشخص شد که بخش عمده تغییرات پارامترهای رنگی در زمان‌های ابتدایی می‌باشد در حالیکه تغییرات نامطلوب مانند افزایش پارامتر a (قرمزی) از حدود ۱۵۰ ثانیه پس از فرآیند (نقطه A در شکل ۲، ب) که آب سطحی تبخیر شده است، با شدت زیادی ادامه می‌یابد. آگاهی از این محدوده زمانی برای کنترل رنگ محصول اهمیت زیادی دارد.

– پارامتر روشنایی (L)

برازش انجام شده روی داده‌های این پارامتر رنگی، منحنی مشابه آنچه Krokida و همکاران (۲۰۰۱) گزارش کردند را نشان داد. با این تفاوت که آن‌ها برای میزان تعادلی پارامتر روشنایی مقدار ۷۴ تا ۷۸ را گزارش کردند در حالیکه در این برازش این میزان ۷۸ تا ۸۰ برای دماهای مختلف بدست آمد. بر خلاف اینکه در این پژوهش همواره پارامتر رنگی نمونه‌های سرخ شده از شاهد بیشتر بود، Bingol و همکاران (۲۰۱۲) مشاهده کردند که پارامترهای رنگی در یک دقیقه ابتدایی فرآیند برای نمونه‌های آنزیم بری شده و آنزیم بری نشده کاهش داشته و سپس نرخ افزایشی پیدا می‌کند. علت این کاهش اولیه برای پارامترهای رنگی کاهش توسعه خطوط ریز^۱ در محصول یا ایجاد خلل و فرج و خروج هوای بین سلولی و تغییر در خصوصیات بازتاب نور (برای پارامتر L و a) و نشأت کارتنوئید به داخل روغن (برای پارامتر b) گزارش شد. از

¹ Micro Ridges

² Golden Brown

برای هر سه دمای روغن، کاربرد فرآیند دمای بالا و زمان کوتاه برای کیفیت رنگی و سلامت محصول مناسب تشخیص داده می‌شود.

نتیجه گیری

سینتیک تغییرات رنگ پوسته خلال سیب زمینی در ضخامت خلال مطالعه شده از یک مدل نمایی افزایشی تبعیت می‌کند. علاوه بر پارامترهای رنگی، شدت تغییرات رنگ (ΔE) نیز با استفاده از مدل تجربی قابل توصیف است. دماهای بالا موجب روشنایی (L) کمتر، قرمزی (a) بیشتر و زردی (b) بیشتر می‌گردد. با توجه به جذب روغن کمتر در دماهای بالا، کنترل رنگ به عنوان یکی از خصوصیت‌های کیفی در این شرایط اهمیت زیادی دارد. شدت تغییرات پارامترهای رنگی و تغییرات کلی رنگ در زمان‌های ابتدایی فرآیند سرخ کردن در دماهای مختلف روغن به هم نزدیک می‌باشند. بنابراین به منظور داشتن محصولی با کیفیت رنگ مناسب، فرآیند دمای بالا و زمان کم پیشنهاد می‌شود. زیرا با گذشت زمان دمای سطحی در دماهای بالا زودتر به سمت دمای روغن افزایش می‌یابد در حالی که دمای مرکزی تغییر چندانی نمی‌کند، این امر به معنی تداوم تقریباً یکسان فرآیند تبخیر یا جوشش هسته‌ای در دماهای مختلف است. مدل نمایی برازش شده بخوبی تغییرات پارامترهای رنگی را با توجه به R^2 و SSE بدست آمده برای برازش، توصیف می‌کند. در این پژوهش علاوه بر بیان سینتیکی تغییرات پارامترهای رنگی، ارتباط شدت تغییرات رنگ با دما نیز بررسی گردید و به صورت معادله آرنیوس بیان شد که می‌توان از آن به عنوان معادله تجربی در محاسبه و پیش بینی پارامترهای رنگی استفاده کرد. در نهایت باید گفت که نتایج بدست آمده در این پژوهش با توجه به ضخامت مورد مطالعه قابل تعمیم خواهد بود و با توجه به محدود بودن این مطالعه به یک ضخامت خاص، لازم است در پژوهش‌های آینده رفتار تغییر رنگ برای ضخامت‌های دیگر، روغن‌های مختلف، پیش تیمار خشک کردن و روش‌های مختلف سرخ کردن مانند سرخ کردن تحت خلاء نیز بررسی گردد.

سیب زمینی افزایش یافته و این امر موجب افزایش پارامتر زردی و البته قرمزی محصول می‌گردد. این افزایش زردی می‌تواند ناشی از جذب سطحی کارتنوئیدهای 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 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 & 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 (Duran *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.

۷۴

- سینتیک شدت تغییر رنگ کلی محصول (ΔE)

تغییرات رنگ در همه دماها در ابتدای فرآیند شدیدتر است. دماهای بالاتر روغن موجب افزایش میزان تیرگی محصول شده که در نتیجه قهوه‌ای شدن غیر آنزیمی اتفاق می‌افتد. این مشاهده با نتیجه Pedreschi و همکاران (۲۰۰۶) سازگار است. با این تفاوت که آن‌ها اختلاف بین دماهای مختلف را بیشتر نشان دادند.

تغییرات نمایی نشان داده شده برای سینتیک شدت تغییر رنگ کلی نیز با گزارش بسیاری از محققین موافقت دارد (Krokida *et al.*, 2001; Moyano *et al.*, 2002). با توجه به حداکثر بودن دمای ۱۷۵ درجه سانتیگراد، می‌توان گفت که دمای ۱۶۵ درجه سانتیگراد به عنوان دمای بحرانی برای معنی دار شدن شدت تغییرات رنگ است و در شرایط یکسان، دماهای بالاتر از این میزان موجب تغییرات چشم‌گیر در رنگ محصول می‌گردند. همچنین با توجه به تغییرات شدید در ابتدای فرآیند برای تغییرات رنگ

Thermal Processing with a Focus on Frying. *Food and Bioprocess Technology*, 1, 35-42.

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

Mestdagh, F., Wilde, T. D., Castelein, P., Orsolya, N., Peteghem C. V. & Meulenaer, B. D. (2008). Impact of the reducing sugars on the relationship between acrylamide and maillard browning in French fries. *European Food Research and Technology*, 227, 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, 307-312.

Moyano, P. C., Rioseco, V. K. & Gonzalez, P. A. (2002). Kinetics of crust color changes during deep-fat frying of impregnated French fries. *Journal of Food Engineering*, 54, 249-255.

Pedreschi, F., Leon, J., Mery, D. & Moyano, P. (2006). Development of a computer vision system to measure the color of potato chips. *Food Research International*, 39, 1092-1098.

Pedreschi, F., Moyano, P., Kaack, K. & Granby, K. (2005). Color changes and acrylamide formation in fried potato slices. *Food Research International*, 38, 1-9.

Rodriguez, L. E. & Wrolstad, L. E. (1997). Influence of potato composition on chip color quality. *American Potato Journal*, 74, 87-106.

Romani, S., Bacchiocca, M., Rocculi, P. & Rosa, M. D. (2008). Effect of frying time on acrylamide content and quality aspects of French fries. *European Food Research and Technology*, 226, 556-560.

Romani, S., Bacchiocca, M., Rocculi, P. & Rosa, M. D. (2009). Influence of frying conditions on acrylamide content and other quality characteristics of French fries. *Journal of Food Composition and Analysis*, 22, 582-588.

Sahin, S., Sastry, S. K. & Bayindirli, L. (1999a). Heat Transfer During Frying of Potato Slices. *Lebensmittel-Wissenschaft and Technologie*, 32, 19-24.

Sahin, S., Sastry, S. K. & Bayindirli, L. (1999b). The determination of convective heat transfer coefficient during frying. *Journal of Food Engineering*, 39, 307-311.

USDA. (2005). USDA national nutrient database for standard reference. <http://www.ars.usda.gov>.

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, 632-637.

Ames, J. M. (1992). The Maillard reaction, In: *Biochemistry of food proteins*, Edited by Hudson, B. J. F., Elsevier, London, UK.

AOAC. (1995). *Official methods of analysis*, 16th ed., Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC, Unites States.

Baik, O. D. & Mittal, G. S. (2005). Heat and moisture transfer and shrinkage simulation of deep-fat tofu frying. *Food Research International*, 38, 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, 686-692.

Blumenthal, M. M. (2001). A New Look at Frying Science. *Cereals Foods World*, 46, 352-354.

Datta, A. K. (2007). Porous Media Approaches to Studying Simultaneous Heat and Mass Transfer in Food Processes, I: Problem Formulations. *Journal of Food Engineering*, 80, 80-95.

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

Farid, M. M. & Chen X. D. (1998). The analysis of heat and mass transfer during frying of food using a moving boundary solution procedure. *Journal of Heat and mass transfer*, 34, 69-77.

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

Farkas, B. E., Sing R. P. & Rumsey T. R. (1996a). Modeling heat and mass transfer in immersion frying. I, Model development. *Journal of Food Engineering*, 29, 211-226.

Farkas, B. E., Sing R. P. & Rumsey T. R. (1996b). Modeling heat and mass transfer in immersion frying. II, Model development. *Journal of Food Engineering*, 29, 227-248.

Gokmen, V. & Palazoglu, T. K. (2008). Acrylamide Formation in Foods during

Ziaifar, A. M., Courtois, F. & Trystram, G. (2010). Porosity development and its effect on

oil uptake during frying process. Journal of Food Process Engineering, 33, 191-212.

Archive of SID