

بررسی مکانیکی تخریب بافت خلال سیب‌زمینی طی فرآیند سرخ کردن

حسن صباغی^۱، امان محمد ضیائی فر^{۲*}، مهدی کاشانی نژاد^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۴/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۱/۰۵

چکیده

در این پژوهش تغییرات بافت خلال سیب‌زمینی طی مراحل مختلف سرخ کردن شامل حرارت‌دهی اولیه، جوشش سطحی و مرحله نرخ کاهش مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، فرآیند سرخ کردن در سه دمای ثابت ۱۴۵، ۱۶۰ و ۱۷۵ °C به مدت ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰، ۱۸۰، ۲۱۰ و ۲۴۰ ثانیه انجام گرفت. سپس با کمک ثبت سینتیک تغییرات دمای سطحی و مرکزی محصول توسط دستگاه ثبت داده در کامپیوتر، مراحل مختلف فرآیند از یکدیگر تفکیک شد. شدت حرارت‌دهی در هر مرحله با پارامتر ارزش پخت نیز تعیین گردید. همچنین رفتار تغییر بافت محصول توسط شاخص‌های مکانیکی به صورت مدول ظاهری الاستیسیته (مدول سکانت) و چقرمگی توصیف شد. سینتیک نرم‌شدگی در دماهای مختلف روغن با استفاده از برازش مدل تبدیل جزئی روی تغییرات مدول سکانت تخمین زده شد. نتایج نشان داد، بخش عمده تخریب بافت در حرارت‌دهی اولیه اتفاق می‌افتد و در انتهای مرحله جوشش سطحی تغییرات شاخص بافت رو به ثابت شدن رفت. با افزایش دمای روغن شیب رگرسیون تغییرات تابع تبدیل جزء کاهش یافت و محصول سخت‌تر بود، اما میزان تعادلی مدول سکانت مستقل از دمای فرآیند بود. بافت مطلوب از نظر مصرف‌کننده در دمای ۱۶۰ °C با ارزش پخت متوسط بدست آمد.

واژه‌های کلیدی: بافت، خلال سیب‌زمینی، سرخ کردن، ارزش پخت، مدول سکانت.

مقدمه

ترکیبات سازنده دیواره سلولی مانند پلی‌ساکاریدهای غیر نشاسته‌ای^۴ و لیگنین^۵ است. در واقع نرمی بافت به دلیل تخریب پلی‌ساکاریدهای دیواره سلولی می‌باشد. ژلاتینه شدن نشاسته در محدوده دمای ۶۸ °C بسیار سریع اتفاق می‌افتد، اما این امر اهمیت کمتری در بافت سیب زمینی دارد. زیرا مطابق شکل (۱) به دلیل ضخامت بالای دیواره سلولی، جدا شدن سلول‌ها حاصل از فشار تبخیر آب طی سرخ کردن بیشتر از متلاشی شدن سلولی^۶ است (Loon, 2005). در نتیجه احساس دهانی تردی^۷ در سیب‌زمینی سرخ شده به دلیل برش سالم سلول‌های سیب‌زمینی بوجود می‌آید (Pedreschi et al., 2001). در بررسی دستگاهی بافت محصولات تحت شرایط فرآوری، خصوصیات مکانیکی مانند حداکثر نیروی برشی (F_{max})، تنش برشی^۸ (τ_{max})، نیروی مورد نیاز به منظور رسیدن به حداکثر تنش برشی یا کار برشی (W) و درصد تغییرات شکل یا کرنش^۹ از پارامترهای مهم ذکر

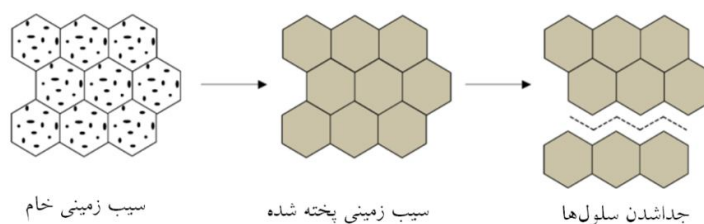
بافت به‌عنوان یکی از مهمترین ویژگی‌های کیفی خلال سیب‌زمینی سرخ‌شده در نظر گرفته می‌شود. تفاوت واضحی میان بافت داخلی و خارجی خلال سیب‌زمینی وجود دارد: بافت خارجی ترد (پوسته) و بافت داخلی نرم (هسته). لایه خارجی نباید سفت و تیره باشد. در حالی که بخش داخلی باید نرم و فاقد بافت آبکی یا چسبنده باشد و همچنین از لایه‌های دیگر نیز جدا نشده باشد. پوسته تشکیل شده طی سرخ کردن ضخامتی در حدود ۱ میلی‌متر دارد (Keller et al., 1986). تقریباً ۸۰ درصد حجم پوسته از فضای خالی پر شده از هوا و روغن تشکیل شده است. بافت داخلی شامل سلول‌های پخته شده و نسبتاً آگیری شده دارای بافتی مشابه سیب زمینی آب پز می‌باشد (Jaswal, 1991). بافت سیب‌زمینی سرخ شده تحت تاثیر ماده خشک، نشاسته و

4 Non-starch polysaccharides
5 Lignin
6 Cell rupture
7 Mealy mouthfeel
8 Shear stress
9 Strain

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی دکتری، دانشیار و استاد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
(Email: ziaifar@gmail.com)
* - نویسنده مسئول:

(Gieroba and Dreszer, 1993).

شده است (Figiel and Frontczak, 2001). این عوامل در تعیین میزان آسیب پذیری محصول هنگام حمل و نقل نیز اهمیت دارند



شکل ۱- شماتیک تاثیر تیمار حرارتی بر بافت سیب زمینی، (Loon, 2005).

دوفاز عدم جوشش (شامل حرارت دهی اولیه و نقطه پایان حباب) و فاز جوشش (شامل جوشش سطحی و مرحله نرخ کاهش) بیان شود. با نظر گرفتن تغییرات دمای سطحی و مرکزی محصول مراحل مختلف فرآیند قابل تفکیک خواهد بود (Seruga and Budzaki, 2005). برای بیان شدت تاثیر شرایط فرآیند در مراحل مختلف بر روی پختگی محصول از شاخص ارزش پخت^{۱۲} استفاده می‌گردد (Chiavaro *et al.*, 2006). ارزش پخت معادل مدت زمان پخت در ۱۰۰ °C برای محصول است که برای سبزیجات مختلف می‌تواند به کار رود (Awuah *et al.*, 2007). تخریب بافت سبزیجات طی عملیات حرارتی در قالب یک مدل ریاضی براساس تبدیل جزء^{۱۳} قابل بررسی است. تابع تبدیل جزء نشان دهنده میزان واکنش مورد نیاز در زمان مشخص جهت تکمیل یک پدیده است (Rizvi and Tong, 1997). تخریب بافت علاوه بر مدول الاستیسیته، با محاسبه میزان کار لازم برای ایجاد شکست و پارگی در بافت یا به اصطلاح چقرمگی^{۱۴} قابل بررسی است (Sahin and Sumnu, 2006). در علوم مواد، چقرمگی توانایی ماده برای جذب انرژی و تغییرات پلاستیکی بدون شکستن تعریف می‌شود (Larson, 2001).

Miranda و همکاران (۲۰۰۵) نرم شدن^{۱۵} خلال‌های سیب زمینی را طی دوره پس از سرخ کردن^{۱۶} بررسی کردند. آن‌ها انحراف از خط راست طی فرآیند را به‌عنوان شاخصی از نرم شدن به کمک یک نگهدارنده سیمی اندازه‌گیری کردند. نتایج حاصل از این آزمایش نشان داد که انحراف از خط راست با افزایش دوره سرخ کردن زیاد شد. همچنین نتایج با اندازه‌گیری مدول ظاهری الاستیسیته هماهنگی نشان داد و مدول ظاهری نیز در طی زمان کاهش یافت.

Loon و همکاران (۲۰۰۷) اثر پیش خشک کردن (تا کاهش وزن

نسبت‌های مکانیکی مانند مدول الاستیسیته^۱ یا مدول یانگ^۲ و مدول‌های ظاهری^۳ الاستیسیته در بررسی بافت محصولات غذایی از دیدگاه مکانیک جامدات به کار می‌روند (Rojo and Vincent, 2009). به‌عنوان مثال مشخص شده است که ارتباط خطی میان تردی و مدول یانگ وجود دارد (Vickers and Christensen, 1980). مدول یانگ میزان سفتی مواد الاستیک ایزوتروپیک^۴ را نشان می‌دهد که در صورت وجود نسبت خطی بین تنش به کرنش در مواد جامد تعریف می‌شود (Thussu and Datta, 2012). در صورت عدم رابطه خطی بین تنش و کرنش، از مدول‌های ظاهری الاستیسیته استفاده می‌گردد. در منحنی تنش-کرنش این مدول‌ها شامل مدول تانژانت اولیه^۵ (شیب خط مماس در مبدا مختصات)، مدول سکانت^۶ (شیب خط قاطع از مبدا به هر نقطه دلخواه)، مدول تانژانت (شیب خط مماس در هر نقطه دلخواه از منحنی) و مدول چارد^۷ (شیب خط قاطع بین دو نقطه دلخواه از منحنی) می‌باشند (Sahin and Sumnu, 2006).

فرآیند سرخ کردن شامل چهار مرحله حرارت دهی اولیه^۸ (انتقال حرارت جابجایی طبیعی و عدم تبخیر)، جوشش سطحی^۹ (تشکیل پوسته و انتقال حرارت جابجایی اجباری)، مرحله نرخ کاهش^{۱۰} (افزایش ضخامت پوسته، طولانی‌ترین مرحله) و نقطه پایان حباب^{۱۱} می‌باشد (Farkas *et al.*, 1996). این چهار مرحله می‌تواند به‌صورت

- 1 Modulus of elasticity
- 2 Young's modulus
- 3 Apparent modulus
- 4 Isotropic
- 5 Initial tangent
- 6 Secant
- 7 Chard
- 8 Initial heating
- 9 Surface boiling
- 10 Falling rate period
- 11 Bubble end point

- 12 Cook value
- 13 Fractional conversion
- 14 Toughness
- 15 Limpness
- 16 Post-Frying

فرآیند خشک نشد و بافت کلی می‌تواند تحت تاثیر ناحیه هسته به دلیل داشتن حداکثر رطوبت، در نظر گرفته شود. (۳) از چروکیدگی محصول چشم‌پوشی شد. در نهایت پذیرش کلی بافت محصول با توجه به معیار ارزش پخت و شرایط دمایی فرآیند بررسی می‌گردد.

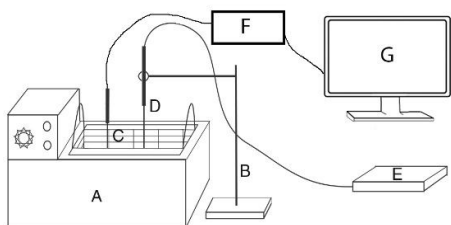
مواد و روش‌ها

آماده‌سازی خلال‌های سیب‌زمینی

سیب‌زمینی وارسته آگریا^۱ پاییزه از بازار محلی در استان گلستان تهیه گردید. بعد از شستشو و پوست‌گیری به روش دستی خلال‌هایی در ابعاد $5 \times 5 \times 5$ mm آماده شد. قبل از سرخ کردن عملیات آنزیم‌بری در آب با دمای 85°C به مدت $3/5$ دقیقه مطابق با روش AOAC (۲۰۰۰)، انجام شد. جهت ثبت وزن اولیه، خلال سیب زمینی قبل از شروع فرآیند سرخ کردن توزین شد.

عملیات سرخ کردن و ثبت دمای محصول

شکل (۲) تجهیزات مربوط به عملیات سرخ کردن را نشان می‌دهد. فرآیند سرخ کردن محصول در یک سرخ کن (Deep fryer: Model BDZ-5A-1) مجهز به سیستم کنترل‌کننده دما با ترموکوپل نوع K در دمای ثابت 145°C ، 160°C و 175°C در دو لیتر روغن آفتابگردان انجام گرفت. زمان فرآیند برای هر نمونه در هر دما به مدت 30 ، 60 ، 90 ، 120 ، 150 ، 180 و 240 ثانیه بود. مشابه Sahin و همکاران (۱۹۹۹) جهت ثبت تغییرات دمایی محصول طی زمان، ترموکوپل نوع T بطور مجزا در فاصله حدود یک میلی‌متری سطح محصول و همچنین مرکز آن قرار گرفت و تغییرات دما با فاصله زمانی ۲ ثانیه بوسیله دستگاه ثبت داده^۳ (Model TC-08 Pico technology "RS-232") و نرم افزار پیکولاگ^۴ حین فرآیند در رایانه ثبت شد. این آزمایش در سه تکرار انجام گرفت.



شکل ۲- تجهیزات عملیات سرخ کردن و ثبت دما؛ سرخ کن (A)، پایه نگهدارنده (B)، ترموکوپل نوع T (C)، ترموکوپل نوع K (D)، کنترل کننده دما (E)، دستگاه ثبت داده (F)، رایانه (G)

۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد) و سرخ کردن در دماهای مختلف روغن را روی تردی خلال سیب‌زمینی بررسی کردند. تنظیمات بافت‌سنج (زاویه برش 30° درجه و پروب 15 میلی‌متری و سرعت 40 mm/s) با دندان‌های جلویی انسان شبیه‌سازی شد و تعداد پیک‌ها در حین سوراخ شدن پوسته در نمودار نیرو-فاصله (آستانه نیروی $0/6$ نیوتن، ایجاد تفاوت بین نمونه‌های ترد و غیرترد) برای اندازه‌گیری تردی استفاده شد. نتایج نشان داد که سرخ کردن در دمای 180°C ، تردی بیشتری را نسبت به دمای 160°C و 170°C نشان می‌دهد. پیش خشک کردن تا کاهش وزن 20% نیز با تشکیل حباب سطحی^۱، تاثیر منفی روی تردی محصول داشت.

Romani و همکاران (۲۰۰۹) آزمون برش را برای اندازه‌گیری حداکثر نیروی برشی مورد نیاز در بافت‌سنجی خلال سیب‌زمینی انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش زمان سرخ کردن نیروی برشی مورد نیاز برای نمونه‌ها افزایش یافت و نمونه‌های بیش از حد سرخ شده، بیشترین میزان نیروی برشی را نشان دادند.

Thussu و Datta (۲۰۱۲) تغییرات بافتی خلال‌های سیب‌زمینی را به صورت تغییرات مدول یانگ در طی زمان بررسی کردند. نتایج نشان داد که بر خلاف تحقیقات پیشین، مدول یانگ با کاهش رطوبت نمونه‌ها طی فرآیند افزایش یافت. در زمان‌های اولیه سرخ کردن و همچنین در دماهای بالاتر، سرعت افزایش مدول یانگ بیشتر بود.

Chiavaro و همکاران (۲۰۰۶) خصوصیات کیفی مانند نیروی برشی، سختی پوسته و ارزش پخت سطحی و مرکزی را برای سیب‌زمینی پخته شده با روش‌های حرارت‌دهی ترکیبی بخار و هوای داغ با جایجایی اجباری بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد، در روش ترکیبی پخت با بخار و جایجایی اجباری در نمونه‌هایی که ارزش پخت سطحی و مرکزی بیشتری داشتند، بطور معنی‌داری پوسته سخت‌تری تشکیل شد.

بیشتر پژوهش‌ها در زمینه بافت سنجی بصورت مقایسه شرایط مختلف فرآیند از نظر دمایی و زمانی بدون تفکیک مراحل سرخ کردن بوده است. در این پژوهش برای نخستین بار تغییرات بافتی در مراحل مختلف سرخ کردن با بررسی همزمان شاخص ارزش پخت، مدول ظاهری الاستیسیته (مدول سکانت) و چقرمگی مطالعه می‌گردد. همچنین رفتار مدول الاستیسیته طی زمان سرخ کردن با رابطه تجربی مدل تبدیل جزء بررسی می‌گردد و ارتباط پارامترهای مدل با دمای فرآیند نیز بررسی می‌شود. فرضیات رابطه تجربی تبدیل جزء همانند آنچه Miranda و همکاران (۲۰۰۵) در پژوهش خود در نظر گرفتند، به این صورت بیان می‌گردد: (۱) خلال سیب‌زمینی می‌تواند به صورت یک لایه نسبتاً سخت (پوسته) که پوشاننده یک ماده پرکننده نرم (هسته) است، در نظر گرفته شود. (۲) محصول به‌طور کامل حین

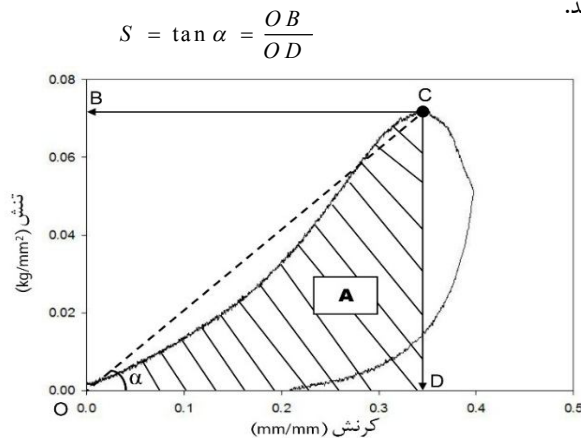
2 Agria
3 Data logger
4 Picolog

1 Blister

حرارت‌دهی در دمای مرجع 100°C را محاسبه نمود.

محاسبه شاخص‌های بافتی

شکل (۳) نحوه محاسبه شاخص‌های بافتی شامل مدول ظاهری الاستیسیته (مدول سکانت (S)) و چقرمگی را نشان می‌دهد. نقطه دلخواه در تعریف مدول سکانت روی منحنی تنش-کرنش حداکثر تنش انتخاب شد. بنابراین مطابق شکل با استفاده از معادله (۲) میزان مدول سکانت بر حسب kg/mm^2 برای هر نمونه محاسبه گردید. همچنین مشابه Czopek و همکاران (۲۰۰۸) چقرمگی بر حسب kg/mm^2 ، با محاسبه سطح زیر منحنی تنش-کرنش تا نقطه پارگی (حداکثر تنش) مطابق تعریف Sahin و Sumnu (۲۰۰۶)، برای دماها و زمان‌های مختلف فرآیند در نرم افزار اکسل نسخه ۲۰۱۳ محاسبه شد.



شکل ۳- نحوه محاسبه شاخص‌های بافتی از منحنی تنش-کرنش؛ A: سطح زیر منحنی تا تنش حداکثر معادل با چقرمگی، C: حداکثر تنش، B, D: طول و عرض نقطه C, O: مبداء مختصات، α : زاویه خط OC با محور افقی

برازش مدل سنتیکی تبدیل جزء

تابع تبدیل جزء به صورت ریاضی مطابق معادله (۳) بیان می‌گردد (Devahastin and Niamnuay, 2010). این تابع جهت مدل‌سازی تغییرات مدول ظاهری الاستیسیته طی فرآیند به کار گرفته شد.

$$f = \left(\frac{S_i - S_e}{S_i - S_e} \right) \quad (3)$$

در اینجا در معادله فوق، S نشان‌دهنده مدول سکانت و نمادهای e و t به ترتیب نشان‌دهنده مقدار این پارامتر در زمان اولیه، زمان مشخص و مقدار تعادلی در زمان بی‌نهایت می‌باشد. برای توصیف این تغییرات، یک مدل نمایی کاهش‌ی مطابق معادله (۴) مشابه آنچه Rizvi و Tong (۱۹۹۷) بیان کردند در نظر گرفته شد. از معادله (۴) به سادگی می‌توان معادله (۵) را نتیجه گرفت که با استفاده از جعبه

اندازه‌گیری رطوبت و روغن

به منظور اندازه‌گیری رطوبت و روغن مطابق روش AOAC (۲۰۰۰) عمل شد. خلال‌های سیب‌زمینی سرخ‌شده برای اندازه‌گیری رطوبت نهایی در آون (Binder FD53) با دمای 103°C به مدت ۱۶ ساعت قرار گرفت. نمونه خشک حاصل از اندازه‌گیری رطوبت، برای استخراج روغن به روش سوکسله با حلال پترولیوم اتر به مدت ۶ ساعت، استفاده شد. این کار با هدف محاسبه میزان رطوبت نهایی نمونه بر مبنای وزن خشک بدون روغن انجام گرفت.

ثبت پارامترهای بافتی با دستگاه بافت‌سنج

از نمونه‌های سرخ‌شده در دماهای مختلف آزمایش، نمونه آنزیم‌بری شده و شاهد (نمونه خام) برای انجام آزمون بافت‌سنجی با دستگاه آنالیز بافت (TA.XT2i, Stable Microsystems) استفاده شد. بافت‌سنجی مشابه Heredia و همکاران (۲۰۱۴) به صورت آزمون فشار^۱ به شکل نفوذی^۲ با پروبی با قطر ۲ میلی‌متر و سرعت ۲ m/s و نیروی رها ساز^۳ ۵ گرم و عمق نفوذ تا ۲/۵ میلی‌متری داخل خلال سیب‌زمینی انجام شد. مقادیر نیرو (N)، تنش (kg/mm^2) و کرنش (% یا mm/mm) در طی نفوذ پروب به خلال سیب‌زمینی توسط دستگاه ثبت گردید. نفوذ پروب در هر خلال سیب‌زمینی در مرکز و دو نقطه هم‌فاصله با استفاده از صفحه قرینه‌یابی دستگاه انجام شد و میانگین بدست آمده برای محاسبه شاخص‌های بافتی بکار گرفته شد.

محاسبه ارزش پخت

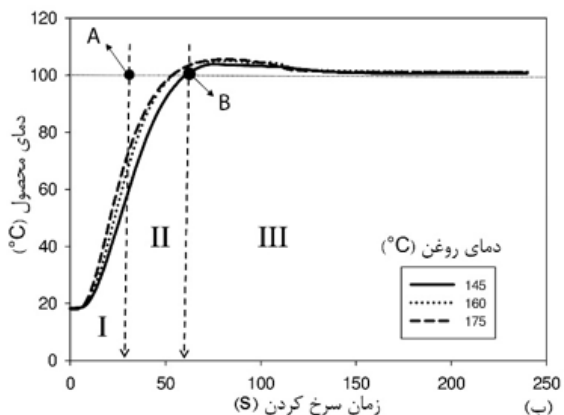
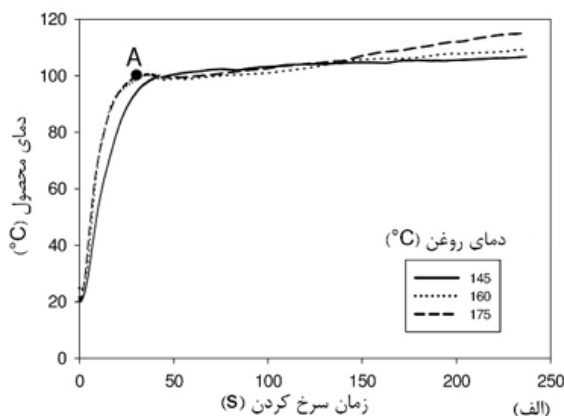
مطابق بیان Awuah و همکاران (۲۰۰۷)، ارزش پخت (C) با استفاده از معادله (۱) قابل محاسبه است:

$$C_{T_{ref}}^z = \int_0^t 10^{\frac{T - T_{ref}}{z}} dt \quad (1)$$

در این معادله، زمان فرآیند (t)، دمای سطحی یا مرکزی محصول (T) و دمای مرجع (T_{ref}) برابر با نقطه جوش آب می‌باشد. متغیر (z) نیز نشان‌دهنده تغییرات دمایی لازم برای ۱۰ برابر شدن نرخ واکنش-های شیمیایی است. این متغیر مطابق Chiavaro و همکاران (۲۰۰۶) برای محاسبه نرخ پخت براساس دمای مرکزی و سطحی نمونه‌های سیب زمینی سرخ شده به ترتیب برابر با ۱۷ و 33°C در نظر گرفته می‌شود. با فرض بازه زمانی دو ثانیه در ثبت دما، می‌توان به بررسی تغییرات ارزش پخت طی فرآیند پرداخت. همچنین از مجموع ارزش پخت بر حسب ثانیه، در هر دمای روغن می‌توان مدت زمان کل

- 1 Compression
- 2 Penetration
- 3 Trigger force

می‌ماند و پس از اتمام آب سطحی محصول و تشکیل پوسته، شروع به افزایش به سمت دمای روغن می‌کند که این نتایج با مشاهده Farkas و همکاران (۱۹۹۶) سازگار است. مطابق بیان Alvis و همکاران (۲۰۰۹) می‌توان نتیجه گرفت که برای تمامی دماهای روغن، مرحله حرارت‌دهی اولیه (I) که طی آن دمای سطحی محصول به نقطه جوش آب (نقطه A در شکل ۴-الف و ب)) می‌رسد، محدود به ۳۰ ثانیه ابتدایی آغاز فرآیند بود.



شکل ۴- تغییرات دمای (الف) سطحی (ب) مرکزی محصول طی فرآیند و تفکیک مراحل مختلف سرخ کردن؛ A: آغاز جوشش سطحی، B: آغاز جوشش مرکزی، I: حرارت دهی اولیه، II: جوشش سطحی، III: مرحله نرخ کاهش

مرحله جوشش سطحی (II) نیز که با زمان رسیدن به شرایط تبخیر پایا قابل شناسایی است، می‌تواند در بازه زمانی ۳۰-۶۰ ثانیه تعریف گردد. سپس طولانی‌ترین مرحله سرخ کردن به نام مرحله نرخ کاهش (III) آغاز شد که طی آن دمای مرکزی محصول به نقطه جوش آب رسید (نقطه B در شکل ۴-ب)).

در این مرحله ضخامت پوسته به تدریج افزایش یافته و نرخ تبخیر در انتهای آن کاهش نشان داد که این مشاهده با Lioumbas و همکاران (۲۰۱۲) سازگار است. البته در ابتدای آغاز این مرحله، نقطه

ابزار برازش منحنی در نرم‌افزار متلب نسخه R2009a با سطح اطمینان ۹۵ درصد روی داده‌های مدول سکانت برازش شد.

$$\left(\frac{S_t - S_e}{S_i - S_e} \right) = \exp(-K_s t) \quad (۴)$$

$$S_t = S_e + a \cdot \exp(-K_s t),, a = S_i - S_e, K_s > 0 \quad (۵)$$

در معادلات فوق، K_s و a پارامترهای تابع هستند. برای بیان توصیف رفتار مدول ظاهر در دماهای مختلف، ثابت سینتیکی (K_s) و میزان تعادلی مدول سکانت (S_e) اهمیت دارد که در برازش محاسبه گردید. همچنین به منظور بدست آوردن ارتباط این دو عامل با دمای روغن نیز از معادله آرنیوس مطابق معادله (۷) استفاده شد.

$$A = A_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (۷)$$

در این معادله، A نشان‌دهنده پارامتر K_s یا S_e می‌باشد. E_a نشان‌دهنده انرژی فعال‌سازی و R ثابت جهانی گازها برابر با $۸/۳۰۹$ ژول بر مول بر کلوین می‌باشد. T دمای مطلق برحسب کلوین است (Troncoso and Pedreschi, 2009).

ارزیابی حسی پذیرش کلی بافت

به منظور بررسی پذیرش کلی بافت بر مبنای ارزش پخت کل محاسبه شده، محصول سرخ شده در زمان نهایی فرآیند (۲۴۰ ثانیه) انتخاب شد و مشابه Maity و همکاران (۲۰۱۲) در هر دما، به روش نمره‌دهی از صفر (عدم پذیرش) تا ۱۰ (پذیرش قطعی) توسط ۱۰ نفر (دانشجویان صنایع غذایی) مورد ارزیابی حسی قرار گرفت.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

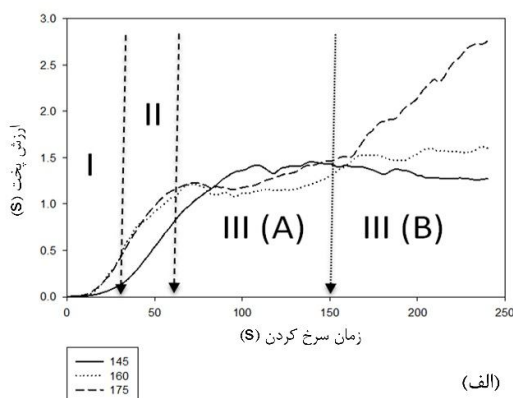
آنالیز آماری با نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۹، بصورت طرح کاملاً تصادفی^۱ (CRD) با سطح اطمینان ۹۵٪ به منظور بررسی تاثیر تیمار دمای روغن روی میزان تعادلی مدول الاستیسیته، ارزش پخت کل و نمرات آزمون حسی پذیرش بافت انجام شد و مقایسه میانگین بصورت آزمون دانکن صورت گرفت.

نتایج و بحث

تفکیک مراحل مختلف فرآیند سرخ کردن

شکل (۴) سینتیک دمایی ثبت شده برای دمای سطحی و مرکزی محصول طی فرآیند سرخ کردن را نشان می‌دهد. دمای محصول برای دماهای بالاتر روغن سریع‌تر افزایش یافته است. دمای سطحی محصول زودتر به نقطه جوش آب رسیده و برای زمان کوتاهی ثابت

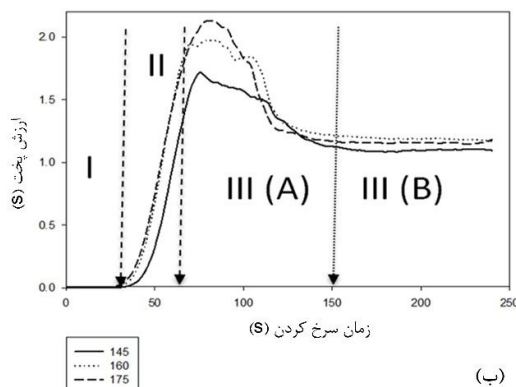
حین مرحله جوشش سطحی (II)، ارزش پخت سطحی در مقایسه با ارزش پخت مرکزی با سرعت آهسته تری تغییر می کند که این امر می تواند ناشی از میزان Z بالاتر در سطح و تاثیر کمتر دمای پوسته روی پختگی کامل محصول باشد. میزان حداکثری ارزش پخت براساس دمای مرکزی به دلیل افزایش فشار بخار در مرکز و در نتیجه تبخیر در دماهای بیشتر از 100°C ، بالاتر بدست آمد (ارزش پخت بالاتر از ۱ ثانیه). در حین مرحله نرخ کاهش بدلیل کاهش تدریجی نرخ تبخیر ارزش پخت براساس دمای مرکزی به تدریج روند کاهش نشان داد (بخش IIIA) و سپس در مقداری ثابت باقی ماند (بخش IIIB). Costa و همکاران (۱۹۹۹) گزارش کردند که نرخ خروج آب از محصول تا زمانی که رطوبت سطحی کاملاً خشک نشده باشد، افزایش می یابد و وجود حباب های هوا بدلیل تلاطم موجب افزایش انتقال حرارت به محصول و پخت سریع تر می گردد، سپس تا پایان فرآیند خروج رطوبت کاهش خواهد یافت و بدلیل کاهش آب سطحی محصول، دمای سطحی به سرعت به سمت دمای روغن افزایش می یابد. در اینجا نیز روند افزایشی سریع در ارزش پخت سطحی در پایان فرآیند مشاهده شد (بازه زمانی ۱۵۰-۲۴۰ ثانیه).



جوش اندکی بیش از 100°C باقی می ماند. Sahin و همکاران (۱۹۹۹) علت این امر را وجود اجزای محلول در آب بافتی و فشار داخلی محصول طی فرآیند گزارش کردند. آن ها بیان کردند که هرچه دمای فرآیند بیشتر باشد؛ به دلیل اتمام سریع تر رطوبت طول دوره دمای ثابت در نمودار سینتیک دمایی کاهش می یابد که در پژوهش حاضر این امر بخصوص برای نمودار سینتیک دمای سطحی به دلیل خشک شدن کامل آب سطحی محصول در بازه زمانی مورد آزمون، محسوس بود.

تغییرات ارزش پخت

تغییرات ارزش پخت براساس دمای سطحی و مرکزی طی فرآیند در شکل (۵) نشان داده شده است. دمای روغن بیشتر، تغییرات ارزش پخت سطحی و مرکزی بالاتری را به دلیل افزایش سریع دمای محصول نشان داد. طی مرحله حرارت دهی اولیه (I)، بدلیل افزایش دما بدون جوشش، تغییرات ارزش پخت در برابر دما بسیار ناچیز و قابل چشم پوشی است. Chiavaro و همکاران (۲۰۰۶) گزارش کردند که پوسته موجب نفوذ راحت تر حرارت به هسته می گردد، اما در مراحل ابتدایی فرآیند خروج شدید بخار ممکن است مانع تشکیل پوسته شود.

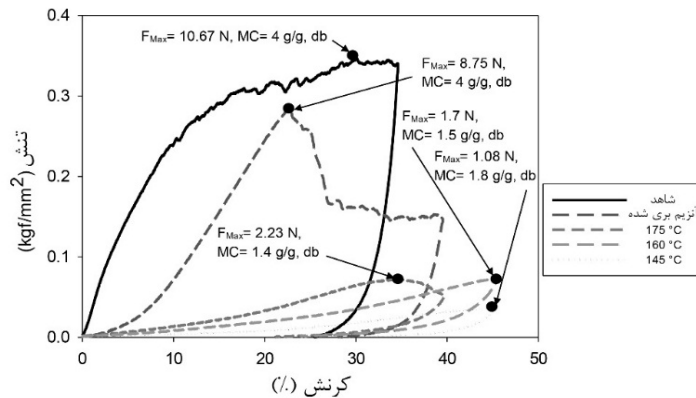


شکل ۵- تغییرات ارزش پخت براساس (الف) دمای سطحی (ب) دمای مرکزی در دماهای مختلف روغن و طی مراحل مختلف سرخ کردن؛ I: حرارت دهی اولیه، II: جوشش سطحی، IIIA و IIIB: مرحله نرخ کاهش

منحنی مربوط به سفتی^۱ نمونه است و حداکثر تنش یا نیروی مورد نیاز نشان دهنده سختی^۲ نمونه می باشد. بنابراین با توجه به نمودارها، کاهش سفتی و سختی خلال سیب زمینی در نتیجه سرخ کردن قابل استنتاج است. جهت توصیف تغییرات نمودار بنابر گزارش Vincent و همکاران (۱۹۹۸) می توان گفت برای نمونه های سرخ شده در شرایط شدیدتر، افت نیرو در نقطه شکست مشاهده می شود.

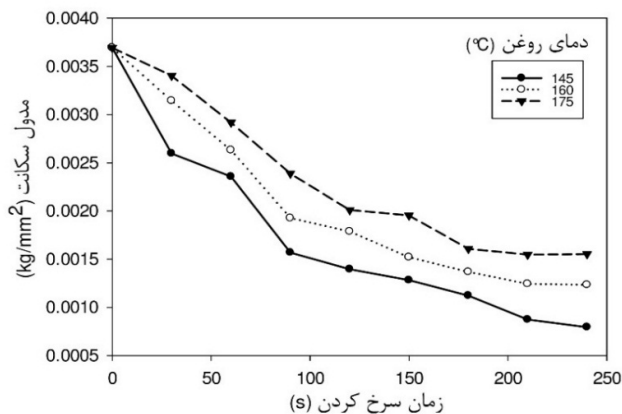
تفسیر منحنی تنش-کرنش

شکل (۶) نمونه ای از نمودارهای تنش-کرنش برای شرایط مختلف فرآیند در زمان ۲۴۰ ثانیه برای نمونه آزمایشی نشان می دهد. در تنش یکسان، در نمونه های سرخ شده در دماهای بالاتر کرنش کمتری ایجاد می شود. این رفتار نشان دهنده سفتی بیشتر نمونه های سرخ شده در دمای بالا در مقایسه با سایر نمونه ها می باشد. Miranda و همکاران (۲۰۰۵) بیان کردند که روند افزایشی در ابتدای



شکل ۶- تغییرات تنش در برابر کرنش برای نمونه‌های آزمایشی در ۲۴۰ ثانیه؛ F_{Max} : حداکثر نیروی وارد شده بر حسب نیوتن، MC : محتوی رطوبت نهایی نمونه بر حسب گرم بر گرم ماده خشک بدون روغن

نظر می‌رسد. رطوبت نهایی محصول در دمای ۱۴۵، ۱۶۰ و ۱۷۵°C به ترتیب ۱/۹۲، ۱/۷۲ و ۱/۴۷ گرم بر گرم ماده خشک فاقد روغن بوده است. در واقع در این پژوهش تا رسیدن رطوبت محصول به حدود ۲۵ درصد رطوبت اولیه بر مبنای وزن خشک، این روند کاهش مشاهده شده است. نتایج این مشاهده با نتیجه‌گیری Thusu و Datta (۲۰۱۲) موافقت ندارد. آن‌ها مشاهده کردند که مدول یانگ با افزایش زمان و دمای فرآیند زیاد می‌شود ولی برای آب‌پز کردن با افزایش زمان فرآیند کاهش مدول یانگ را گزارش کردند.



شکل ۷- تغییرات مدول سکانت برای بافت خلال سیب‌زمینی طی سرخ کردن

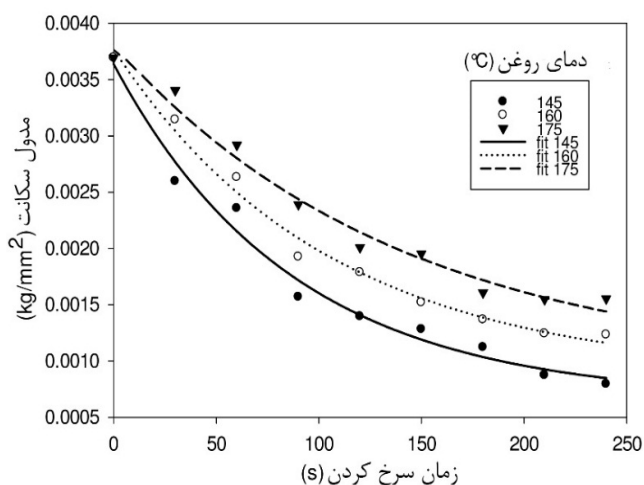
همانطور که از شکل (۸) مشخص است، تغییرات چقرمگی نیز در زمان‌های اولیه فرآیند شدیدتر است. مطابق گزارش Verlinden و همکاران (۱۹۹۵) ژلاتینه شدن نشاسته در محدوده دمای ۶۸°C بسیار سریع اتفاق می‌افتد. با توجه به دمای مرکزی ثبت شده محصول، محدوده دمایی برای ژلاتینه شدن در دماهای مختلف در

همچنین آن‌ها بیان کردند که به دلیل نفوذ تدریجی پروب به محصول و مقاومت بیشتر، شکل نمودار برای شاهد بصورت دندان‌دار می‌باشد. با مقایسه بین میزان نیروی حداکثر بدست آمده برای نمونه‌های مختلف مشخص شد که بیشترین نیرو مربوط به نمونه شاهد (۱۰/۶۷ نیوتن) و حداقل نیرو مربوط به نمونه سرخ‌شده در دمای ۱۴۵ (۱/۰۸ نیوتن) بود. Miranda و همکاران (۲۰۰۵) بیان کردند که عامل اصلی نرمی محصول، رطوبت باقی مانده در محصول است و در این مطالعه نیز نمونه سرخ شده در دمای بالاتر سطح رطوبت نهایی کمتر (۱/۴ گرم آب بر گرم ماده خشک) و سفتی بیشتری را نشان داد.

تغییرات شاخص‌های بافتی طی سرخ کردن

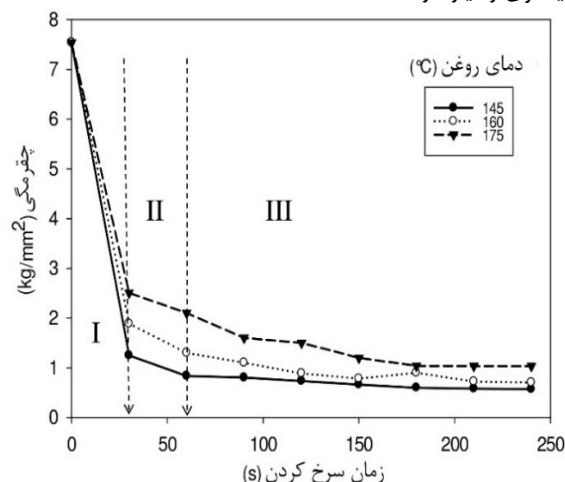
شکل (۷) تغییرات مدول سکانت را در حین سرخ کردن نشان می‌دهد. مدول سکانت برای دماهای بالاتر روغن بیشتر است که این امر نشان‌دهنده سختی بیشتر محصول می‌باشد. بخش بیشتر تغییرات بافتی بر اساس مدول ظاهری الاستیسیته در زمان‌های ابتدایی فرآیند اتفاق افتاد. بنابراین تغییرات عمده بافت در دو مرحله ابتدایی فرآیند سرخ کردن مشاهده شد. Miranda و همکاران (۲۰۰۵) بیان کردند که بطور کلی تنش برشی در دقایق اولیه سرخ کردن بیشترین کاهش را نشان داده و پس از آن به کمترین مقدار خود رسیده یا با نرخ آهسته-آهسته می‌یابد. Romani و همکاران (۲۰۰۸) در ۵ دقیقه ابتدایی سرخ کردن روند کاهش حداکثر نیروی برشی مورد نیاز برای محصول را مشاهده کردند و بیان کردند که از دقیقه ۵ تا ۹ این روند به دلیل اتمام رطوبت افزایشی شد. بنابراین گزارش محتوی رطوبت نهایی محصول پس از فرآیند برای بررسی تغییرات مدول ظاهری مهم به

این امر نشان دهنده استقلال سفتی نهایی بافت محصول از دمای فرآیند است. Rizvi و Tong (۱۹۹۷) بیان کردند که در صورتی که تخریب بافت در شرایط کنترل شده انجام گیرد و زمان فرآیند به اندازه کافی طولانی باشد، می توان گفت که در نهایت میزان تعادلی شاخص بافت بدست آمده مستقل از دمای فرآیند خواهد بود. ثابت سینتیکی تغییرات مدول سکانت نیز با افزایش دمای فرآیند کاهش معنی داری یافت که نشان دهنده سختی بیشتر محصول در دماهای بالا است و دمای ۱۶۰°C مرز دمایی معنی دار شدن ثابت سینتیکی تعیین شد. Bouchon و همکاران (۲۰۰۱) گزارش کردند که بخش اصلی نرم‌شدگی بافت در مراحل ابتدایی فرآیند و به دلیل ژلاتینه شدن نشاسته و دناتوراسیون پروتئینی رخ می دهد. Rizvi و Tong (۱۹۹۷) گزارش کردند حداکثر نیرو به عنوان شاخص بافتی با گذشت زمان به تدریج کاهش یافته و به آهستگی به میزان تعادلی می رسد و با افزایش دما نیز نرم‌شدگی با شیب رگرسیونی کمتری اتفاق می افتد



شکل ۹- برازش مدل سینتیکی معادل با تابع تبدیل جزء روی داده‌های مدول سکانت

۳۰ ثانیه ابتدایی شروع فرآیند می باشد. در واقع مرحله جوشش سطحی مرحله بحرانی از نظر شدت تغییرات بافت بوده و تغییر شاخص بافت در انتهای این مرحله رو به ثابت شدن می رود. همچنین Kita و همکاران (۲۰۰۷) دریافتند که دمای سرخ کردن زیر ۱۷۰°C بطور قابل توجهی سختی برش‌های سیب زمینی را کاهش می دهد. چقرمگی برای نمونه‌های سرخ شده در دمای بالاتر بیشتر بود که در این ارتباط Czopek و همکاران (۲۰۰۸) نیز گزارش کردند که نمونه‌های حاوی ماده خشک بیشتر کار برشی و حداکثر نیروی برشی بیشتری را نیاز دارند.



شکل ۸- تاثیر مراحل مختلف سرخ کردن روی شاخص چقرمگی بافت خلال سیب زمینی؛ I: حرارت دهی اولیه، II: جوشش سطحی، III: مرحله نرخ کاهشی

برازش مدل تبدیل جزئی روی مدول ظاهری الاستیسیته

شکل (۹) برازش مدل سینتیکی با استفاده از روش تابع تبدیل جزء روی میانگین داده‌های مدول سکانت در دماهای مختلف را نشان می دهد. اطلاعات برازش و مقایسه آماری آن‌ها در جدول (۱) نشان داده شده است. میزان تعادلی مدول سکانت با افزایش دمای روغن افزایش یافت ولی اختلاف معنی دار میان مقادیر S_e با افزایش دما مشاهده نشد.

جدول ۱- اطلاعات برازش مدل سینتیکی معادل با نسبت تبدیل جزء برای تغییرات مدول سکانت طی زمان

Rsqr	SSE ($\times 10^{-8}$)	پارامترهای تابع			دمای روغن °C
		K_s (1/s)	a	S_e (kg/mm ²)	
۰/۹۸۳۹ + ۰/۰۰۳۶	۱/۱۷۴۹ + ۰/۱۵۲۶	۰/۰۱۱۵ + ۰/۰۰۱۹ ^a	۰/۰۰۳۰ + ۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۷ + ۰/۰۰۰۱۳ ^a	۱۴۵
۰/۹۸۹۴ + ۰/۰۰۱۰	۶/۷۶۲۰ + ۰/۲۴۹۳	۰/۰۰۹۶ + ۰/۰۰۱۶ ^{ab}	۰/۰۰۲۹ + ۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۰۸ + ۰/۰۰۰۱۸ ^a	۱۶۰
۰/۹۸۱۶ + ۰/۰۰۹۵	۹/۸۲۳۳ + ۰/۱۲۳۴	۰/۰۰۷۱ + ۰/۰۰۲۱ ^b	۰/۰۰۲۸ + ۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۹ + ۰/۰۰۰۱۵ ^a	۱۷۵

* حروف در ستون S_e و K_s مقایسه بین دماهای فرآیند می باشند و حرف مشترک عدم اختلاف را نشان می دهد ($p < 0.05$).

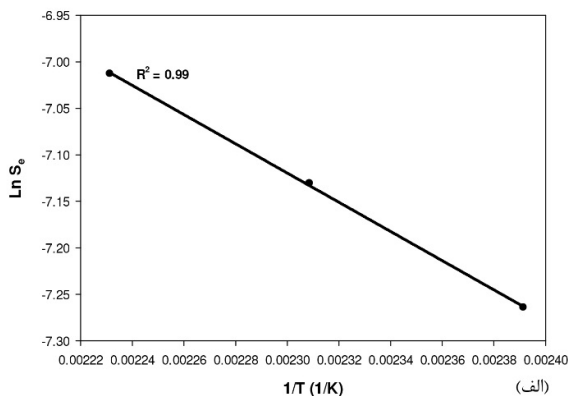
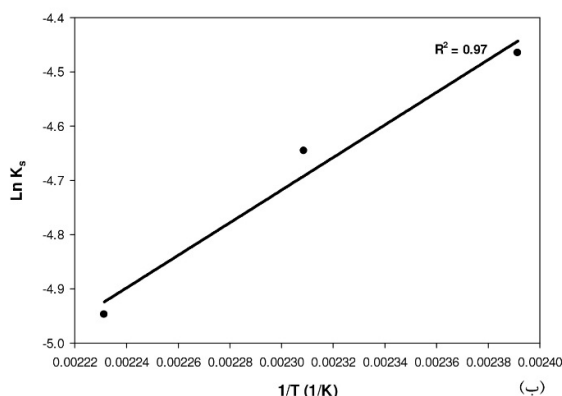
شده است. مقدار ثابت A و انرژی فعال سازی به ترتیب برای S_e برابر 2.99×10^{-2} kg/mm² و $13047/12$ J/mol و برای پارامتر K_s به ترتیب $1/92 \times 10^{-6}$ 1/s و $24949/74$ J/mol برآورد شد. بنابراین

وابستگی بافت به دمای فرآیند

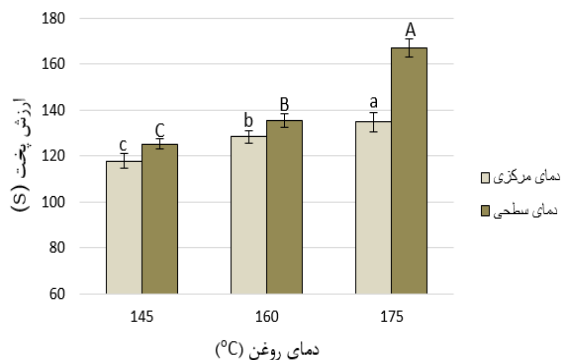
به منظور بدست آوردن ارتباط مدول سکانت با دمای روغن از رابطه آرنیوس برای S_e و K_s استفاده شد که در شکل (۱۰) نشان داده

می‌باشد.

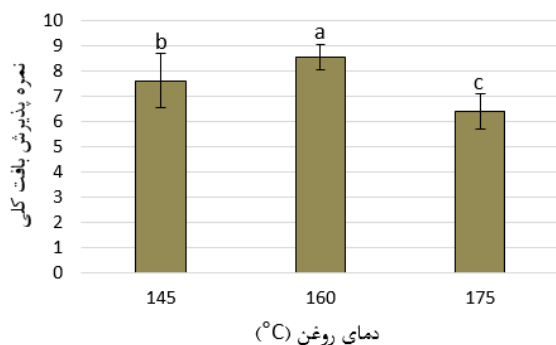
گزارش Moyano و Pedreschi (۲۰۰۶) انرژی فعال‌سازی منفی نشان‌دهنده ارتباط معکوس ثابت سینتیکی مدل نمایی با دمای روغن



شکل ۱۰- اثر دمای روغن طبق معادله آرنیوس بر (الف) میزان تعادلی مدول سکانت (ب) و ثابت سینتیکی تغییر آن



شکل ۱۱- مقایسه میانگین ارزش پخت کل براساس دمای سطحی و مرکزی محصول سرخ‌شده در دماهای مختلف



شکل ۱۲- مقایسه نمرات آزمون پذیرش بافت کلی محصول سرخ شده در دماهای مختلف به مدت ۲۴۰ ثانیه

Maity و همکاران (۲۰۱۲) بیان کردند که سرخ کردن در دمای بالا بدلیل خروج شدید رطوبت موجب ایجاد حباب در پوسته شده که نامطلوب است و بهترین نتایج ارزیابی حسی پذیرش بافت را برای

به‌منظور تاثیر شرایط دمایی بر پخت محصول و شدت تخریب بافت می‌توان معیار ارزش پخت کل (زمان معادل حرارت‌دهی محصول در دمای ۱۰۰ °C) یا زمان پخت را برای دماهای مختلف روغن بررسی نمود. نتایج آزمون آماری برای ارزش پخت کل براساس دمای مرکزی و سطحی به ترتیب در جدول (۲) و جدول (۳) نشان داده شده است. شکل (۱۱) نیز نتایج مقایسه میانگین ارزش پخت کل را در قالب نمودار میله‌ای نشان می‌دهد. با توجه به شکل، دماهای روغن مورد بررسی از نظر هر دو نوع ارزش پخت محاسبه شده اختلاف معنی دار نشان دادند. حرارت دهی سطحی در دمای ۱۷۵ °C بسیار شدیدتر از دو دمای دیگر آزمایش مشاهده شد. بنابراین به منظور جلوگیری از بیش پخت^۱ باید ارزش پخت مناسب جهت دستیابی به بافت مطلوب تعیین گردد.

جدول (۴) نتایج تجزیه واریانس نمرات ارزیابی حسی را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است اختلاف بین دماهای روغن از نظر پذیرش بافت محصول نهایی معنی دار شده است. این مقایسه در شکل (۱۲) نمایش داده شده است. دمای ۱۶۰ °C مطلوب‌ترین بافت را نشان داد. Pedreschi و همکاران (۲۰۰۱) بیان کردند که ماده خشک کم یا پختگی بیش از حد طی سرخ کردن، موجب ایجاد حفرات و فضای خالی در بافت داخلی محصول می‌شود که از نظر مصرف‌کننده نامطلوب است و در پژوهش حاضر نیز دمای ۵۱۷ کمترین پذیرش بافت را به خود اختصاص داد.

1 Over cooking

جدول ۲- تجزیه واریانس برای مقایسه ارزش پخت در دماهای مختلف براساس دمای مرکزی محصول ($P \leq 0.05$)

معنی داری (sig.)	F	میانگین مربعات (MS)	درجه آزادی (df)	مجموع مربعات (SS)	تیمار (دمای روغن)
۰/۰۰۱	۲۶/۹۰۱	۲۲۰/۷۵۹	۲	۴۴۱/۵۱۹	خطا
		۸/۲۰۶	۶	۴۹/۲۳۹	کل
			۸	۴۹۰/۷۵۷	

جدول ۳- تجزیه واریانس برای مقایسه ارزش پخت در دماهای مختلف براساس دمای سطحی محصول ($P \leq 0.05$)

معنی داری (sig.)	F	میانگین مربعات (MS)	درجه آزادی (df)	مجموع مربعات (SS)	تیمار (دمای روغن)
۰/۰۰۰	۱۴۰/۸۳۱	۱۴۱۳/۸۳۴	۲	۲۸۲۷/۶۴۹	خطا
		۱۰/۰۳۹	۶	۶۰/۲۳۵	کل
			۸	۲۸۸۷/۸۳۳	

جدول ۴- تجزیه واریانس برای مقایسه نمرات پذیرش بافت کلی محصول سرخ شده در دماهای مختلف ($P \leq 0.05$)

معنی داری (sig.)	F	میانگین مربعات (MS)	درجه آزادی (df)	مجموع مربعات (SS)	تیمار (دمای روغن)
۰/۰۰۰	۱۸/۴۱۰	۱۱/۶۰۸	۲	۲۳/۲۱۷	خطا
		۰/۶۳۱	۲۷	۱۷/۰۲۵	کل
			۲۹	۴۰/۲۴۲	

دمای فرآیند خواهد بود. به هر حال باید گفت تغییرات شدیدی در ارزش پخت سطحی در دمای °C ۱۷۵ مشاهده می شود که این امر موجب تشکیل حباب در زیر پوسته و در نتیجه عدم پذیرش نسبی مصرف کننده می گردد. دمای °C ۱۶۰ می تواند نرم شدگی مطلوب بافت را با توجه به ارزش پخت سطحی و مرکزی متعادل ایجاد نماید.

نتیجه گیری

بخش عمده تغییرات بافتی در مراحل ابتدایی فرآیند سرخ کردن اتفاق می افتد و در انتهای جوشش سطحی تغییرات شاخص بافت رو به ثابت شدن می رود. با افزایش دمای روغن شیب رگرسیونی تغییرات تابع تبدیل جزء کاهش یافته و محصول سخت تر خواهد بود ولی با این وجود میزان تعادلی شاخص بافتی در زمان بی نهایت مستقل از

منابع

- Alvis, A., Vélez, C., Rada-Mendoza, M., Villamiel, M., and Villada H.S., 2009, Heat transfer coefficient during deep-fat frying. *Food Control*, 20, 321-325.
- AOAC, 2000, Official methods of analysis. 17th ed., Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC, *Unites States*.
- Awuah, G. Ramaswamy, H., and Economides, A., 2007, Thermal processing and quality: principles and overview. *Chemical Engineering and Processing*, 46, 584-602.
- Bouchon, P., Hollins, P., Pearson, M., Pyle, D. L., and Tobin, M. J., 2001, Oil distribution in fried potatoes monitored by infrared microspectroscopy. *Journal of Food Science*, 66, 918-923.
- Chiavaro, E. Barbanti, D. Vittadini, E. and Massini, R., 2006, The effect of different cooking methods on the instrumental quality of potatoes (cv. Agata). *Journal of Food Engineering*, 77, 169-178.
- Costa, R.M., Oliveira, F.A.R., Delaney, O., and Gekas, V., 1999, Analysis of the heat transfer coefficient during potato frying. *Journal of Food Engineering*, 39, 293-299.
- Czopek, A.T, Figiel, A., and Barrachina, A.A.C., 2008, Effects of potato strip size and pre-drying method on French fries quality. *European Food Research and Technology*, 227, 757-766.
- Devahastin, S., and Niamnuy, C., 2010, Modelling quality changes of fruits and vegetables during drying: a review. *International Journal of Food Science and Technology*, 45, 1755-1767.
- Farkas, B.E., Sing R.P., and Rumsey T.R., 1996, Modelling heat and mass transfer in immersion frying. I, Model development. *Journal of Food Engineering*, 29, 211-226.

- Figiel A., Frontczak J., 2001, The shearing resistance of maize kernels. *Inżynieria Rolnicza*, 2, 9-55.
- Gieroba, J., and Dreszer, K., 1993, An analysis of the reasons for mechanical grain damage in working sets of agricultural machines. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 399, 69-76.
- Heredia, A., Castelló, M. L., Argüelles, A., and Andrés, A., 2014, Evolution of mechanical and optical properties of French fries obtained by hot air-frying. *LWT - Food Science and Technology*, 57, 755-760.
- Jaswal, A.S., 1991, Texture of French fries potato: Quantitative determinations of non-starch polysaccharides. *American Journal of Potato Research*, 68, 835-841.
- Keller, C., Escher, F., and Solms, J.A., 1986, Method for localizing fat distribution in deep fat fried potato products. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 19, 346-348.
- Kita, A., Lisińska, G., and Golubowska, G., 2007, The effects of oils and frying temperatures on the texture and fat content of potato crisps. *Food Chemistry*, 102, 1-5.
- Larson, B., 2001, Toughness. NDT Education Resource Center, Iowa State University.
- Lioumbas, J. S. Kostoglou, M. and Karapantsios, T. D., 2012, On the capacity of a crust-core model to describe potato deep-fat frying. *Food Research International*, 46, 185-193.
- Loon, W.A.M., 2005, Process innovation and quality aspects of French fries. PhD Thesis. The Netherlands: Wageningen University.
- Loon, W.A.M., Visser, J.E., Linssen, J.P.H., Somsen, D.J., Klok, H.J., and Voragen, A.G.J., 2007, Effect of pre-drying and par-frying conditions on the crispness of French fries. *European Food Research and Technology*, 225, 929-935.
- Maity, T., Raju, P. S., and Bawa, A. S., 2012, Effect of Freezing on Textural Kinetics in Snacks During Frying. *Food and Bioprocess Technology*, 5, 155-165.
- Miranda, M.L., Aguilera, J.M., and Beriestain, C.I., 2005, Limpness of fried potato slabs during post-frying period. *Journal of food process engineering*, 28, 265-281.
- Moyano, P.C., and Pedreschi, F., 2006, Kinetics of oil uptake during frying of potato slices: Effect of pre-treatments. *LWT - Food Science and Technology*, 39, 285-291.
- Pedreschi, F., Aguilera, J.M., and Pyle, L., 2001, Textural characterization and kinetics of potato strips during frying. *Journal Food Science*, 66, 314-318.
- Rizvi, A. F., and Tong, C., 1997, A critical review – fractional conversion for determining texture degradation kinetics of vegetables. *Journal of Food Science*, 62, 1-7.
- Rojo, F.J., and Vincent, J.F., 2009, Objective and subjective measurement of the crispness of crisps from four potato varieties. *Engineering Failure Analysis*, 16, 2698-2704.
- Romani, S., Bacchiocca, M., Rocculi, P., and 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., and 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. and Sumnu, S. G., 2006, Physical Properties of Foods. Springer publication, 71-75.
- Sahin, S., Sastry, S.K., and Bayindirli, L., 1999, Heat Transfer During Frying of Potato Slices. *LWT - Food Science and Technology*, 32, 19-24.
- Šeruga, B., and Budžaki, S., 2005, Determination of thermal conductivity and convective heat transfer coefficient during deep fat frying of “Kroštula” dough. *European Food Research and Technology*, 221, 351-356.
- Thussu, S., and Datta, A.K., 2012, Texture prediction during deep frying: A mechanistic approach. *Journal of Food Engineering*, 108, 111-121.
- Troncoso, E., and Pedreschi, F., 2009, Modeling water loss and oil uptake during vacuum frying of pre-treated potato slices. *LWT-Food Science and Technology*, 42, 1164-1173.
- Verlinden, B.E., Nicolai, B.M., and Baerdemaeker, J.D., 1995, The starch gelatinization in potatoes during cooking in relation to the modelling of texture kinetics. *Journal of Food Engineering*, 24, 165-179.
- Vickers, Z.M., and Christensen, C.M., 1980, Relationships between sensory crispness and other sensory and instrumental parameters. *Journal of Texture Studies*, 11, 291-307.
- Vincent, J. F. V., 1998, The quantification of crispness. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 78, 162-168.

Mechanical study for texture degradation of potato strip during frying process

H. Sabbaghi¹, A. M. Ziaifar^{*2}, M.Kashaninejad³

Received: 2015.07.12

Accepted: 2016.01.25

Introduction: Texture is one of the most important attribute in foods and is always issues for the manufacturing of fried products, because texture plays a crucial role in consumer acceptance and the perceived quality of foods. Prediction of changes in texture during frying can be helpful in process control. Structurally, this quality parameter in fried potato strip made from the formation of a composite structure with two layers as: dry and oily outer layer (crust), and a moist or soft interior layer (core). So, the explanation of texture development during frying is difficult because of the innate heterogeneity of the fried potato tissue. Moreover, both thermal degradation and texture development are functions of variables such as processing time, oil temperature and vaporized moisture of product. Textural changes during frying described as the result of various physical, chemical, and structural changes involved in the frying process. One solution to reduce the complexity of real bio systems in engineering is using various empirical correlations. Application of these relations for prediction of textural changes during frying can help us for understand the proper conditions to achieve desired texture. The purpose of the present investigation was to study the influence of the frying temperatures on texture of potato strips. In fact, textural changes during various stages of frying potatoes including initial heating, surface boiling and falling rate period were investigated. Texture evaluation is done by mechanical measurements, because the stimulus in texture perception is mainly mechanical. Also, textural studies are not clearly performed up to now with focus on cook value as a main factor in potato frying. According to the definition of cook value, this parameter indicates total time of baking in 100 °C. Fractional conversion applied as a technique for analyzing texture degradation kinetics and softening of vegetables upon prolonged heating. A few assumptions were made during study: i) Potato shrinkage is neglected ii) Product is not completely dried iii) The stages of frying were considered separable only based on surface and center temperature iv) Texture of potato strips affected by cook values of each frying stages.

Materials and methods: The potato strips with specified size fried at a constant temperature of 145, 160 and 175 °C for 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 and 240 seconds. Then, various stages of the process were separated using surface and center temperature profiles of product that were recorded by data logger and T-type thermocouple in computer. Heating extremity of each stage was determined using cook value parameter. Mechanical properties such as apparent modulus of elasticity (Secant modulus) and toughness were used to show which occurred during frying. The secant modulus (S) variations described using fractional conversion model. The degree of cooking for each sample was expressed in term of cook value and its relationship with the overall acceptance of product was examined. Finally, the suitable temperature was determined by sensory evaluation to achieve the desired texture to determine the proper cook value and to prevent over cooking of product.

Results and Discussion: The stages of frying by immersion for experimental conditions can be divided as: I. Initial heating (The first 30 seconds for all oil temperature) II. Surface boiling (30-60 s). III. Falling rate (up to end, longest period). IV. Bubble end point (not considered). Generally, higher oil temperature showed larger center and surface cook values because of the fast temperature increase inside product. During initial heating period (I) because of temperature increase without boiling, the changes in cook values versus time are negligible. Surface cook value increased slowly compared with core during surface boiling. Maximum cook value for core temperature was higher, because of the vapor pressure at the center of the product and thus water evaporation at temperatures above 100 °C (cook value above 1 second). During falling rate period due to gradual reduction of evaporation rates, and thus the vapor pressure drop within product, boiling temperature reduced to 100 ° C. The

2 , 2 and 3- Ph. D. Candidate, Associate Professor and Professor of Food Processing Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources

(*Corresponding author: ziaifar@gmail.com)

major part of texture destruction occurred during initial heating period and the changes of textural characteristic were going to be constant at the end of surface boiling. The slope of the regression line for fractional conversion model decreased as temperature increased and therefore product was harder, but equivalent value of secant modulus was independent of process temperature. The consumer texture desired was found for temperature of 160 °C with medium cook value. The kinetics of potato softening followed an exponential decay equation with good correlation on empirical data. The temperature dependence of the degradation rate was reliably modeled by the Arrhenius equation. Activation energy (E_a) for model parameters S_e and K_s was 13047.12 and -24949.74 J/mol, respectively. Negative E_a for kinetic constant (K_s) indicated an inverse relationship with oil temperature. In addition, elevated oil temperatures caused less softening of French fries because of higher cook value and thus higher evaporation rate.

Keywords: Texture, Potato strip, Frying, Cook value, Secant modulus, Fractional conversion.