

## سینتیک جذب روغن، خروج رطوبت و تغییرات بافت طی سرخ کردن خلال سیب زمینی

حامد بیکی<sup>۱\*</sup> و ناصر همدی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۹۱/۱۱/۲۱ تاریخ پذیرش: ۹۲/۵/۲۰

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم و صنایع غذایی دانشگاه صنعتی اصفهان

<sup>۲</sup> استادیار گروه علوم و صنایع غذایی دانشگاه صنعتی اصفهان

\* مسئول مکاتبه: Email: h.beyki@ag.iut.ac.ir

### چکیده

کیفیت خلال سیب زمینی سرخ شده عمدتاً به رنگ، طعم، بافت و میزان روغن باقیمانده آن مربوط می‌شود. یکی از مراحل مهم در تولید این محصول، مرحله سرخ کردن می‌باشد. به منظور بررسی سینتیک جذب روغن، خروج رطوبت و تغییرات بافت خلال سیب زمینی طی سرخ کردن، خلال‌هایی با ابعاد  $8 \times 0.8 \times 0.8$  سانتی‌متر تهیه و پس از ۱۰ دقیقه آنزیم‌بری با آب داغ در دمای  $70^{\circ}\text{C}$  و پیش خشک کردن با جریان هوای گرم با سرعت  $1 \text{ m/s}$  و دمای  $70^{\circ}\text{C}$  تا رسیدن به محتوای رطوبت ۷۵٪ براساس وزن مرطوب، در روغن داغ با دماهای ۱۶۰، ۱۷۵ و  $190^{\circ}\text{C}$  به مدت ۱۵ دقیقه سرخ شدند. نتایج آزمایشات نشان داد که افزایش دمای سرخ کردن بطور معنی‌داری ( $P < 0.01$ ) سبب افزایش جذب روغن و خروج رطوبت از خلال‌ها می‌گردد. افزایش دمای سرخ کردن همچنین موجب کاهش سفتی مغز خلال و تشدید سفت شدن پوسته می‌شود. برای توصیف میزان جذب روغن و خروج رطوبت از خلال سیب زمینی و تغییرات سفتی پوسته و مغز خلال طی سرخ کردن، مدل‌های سینتیکی متفاوتی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بررسی‌ها نشان داد که مدل سینتیکی درجه اول با اثر محدود کنندگی محصول، بیشترین انطباق را با داده‌های آزمایشگاهی مربوط به خروج رطوبت و روغن باقیمانده در خلال داراست.

واژه‌های کلیدی: جذب روغن، خروج رطوبت، بافت، آنزیم‌بری، پیش خشک کردن، سرخ کردن، مدل ریاضی

## مقدمه

سرخ کردن یک روش معمول پخت است که بافت و طعم منحصر به فردی در مواد غذایی ایجاد می‌نماید (میتلمن و همکاران ۱۹۸۴). فرایند سرخ کردن می‌تواند به صورت مداوم یا غیر مداوم و همچنین به صورت غوطه‌وری ماده غذایی در روغن داغ (سرخ کردن عمیق) یا قرار دادن سطح ماده غذایی در تماس با روغن داغ (سرخ کردن سطحی) انجام گیرد. سرخ کردن خلال سیب زمینی در دمای بالا موجب تولید محصولی با هسته (مغز) ترد و مرطوب، و حاوی سلول‌های آردی که توسط پوسته‌ای ترد و خشک، و روغنی با ساختمانی یکپارچه احاطه شده است، می‌گردد. میزان روغن باقیمانده در فراورده‌های سرخ شده، بعنوان یک عامل مؤثر بر کیفیت، دارای اهمیت زیادی است. با افزایش جذب روغن، هزینه‌های تولید بالا رفته و بافت محصول واکسی می‌شود (میشائیل و آگیلرا ۲۰۰۶). پس از ورود قطعه سیب زمینی به داخل روغن داغ ( $160-180^{\circ}\text{C}$ ) دمای لایه‌های سطحی به سرعت افزایش یافته و آب شروع به جوشیدن در دمای  $100^{\circ}\text{C}$  می‌نماید و به شکل حباب‌هایی از سطح محصول آزاد می‌گردد. درون ماده غذایی یک مرز متحرک تشکیل می‌شود که بخش‌های پوسته و هسته را از یکدیگر جدا می‌نماید (ساژی و همکاران ۱۹۹۸ و سینگ ۲۰۰۰). همگام با پیشرفت فرایند سرخ کردن، ضخامت پوسته افزایش یافته و از تعداد حباب‌های بخار کاسته می‌شود. گرانول‌های نشاسته‌ی سیب زمینی در دامنه‌ی دمایی  $70-60^{\circ}\text{C}$ ، ژلاتینه می‌شوند. در حدود همین دامنه دمایی لایه لاملای میانی موجود بین سلول‌ها تجزیه شده و سلول‌ها از هم جدا می‌شوند که سبب پیدایش بافت آردی در محصول می‌گردد. دماهای بالاتر از  $100^{\circ}\text{C}$  سبب دهیدراته شدن گرانول‌های نشاسته و سلول‌های موجود در پوسته می‌شوند که روغن می‌تواند از شکاف‌های موجود مابین آنها به درون خلال طی سرخ کردن نفوذ کند. نفوذ اصلی روغن به پوسته پس از پایان سرخ کردن و هنگام سرد کردن محصول اتفاق می‌افتد (آگیلرا

و گلوریا ۲۰۰۰ و اندرسون و همکاران ۱۹۹۴ و یوفهی و اسپر ۱۹۹۶). بوچان و آگیلرا (۲۰۰۱) با استفاده از تکنیک اپی فلورسنس میکروسکپی گزارش دادند که در یک ورقه سیب زمینی سرخ شده روغن بطور عمده در قسمت پوسته قرار گرفته و هسته واقعا فاقد روغن است. چندین فاکتور بر میزان روغن باقیمانده در محصولات سرخ شده تأثیر دارند. اثر دمای سرخ کردن بر جذب روغن هنوز کاملاً مشخص نیست. برخی محققان بیان نموده‌اند که سرخ کردن در دمای بالا به علت کاهش مدت زمان لازم جهت سرخ کردن منجر به تشکیل پوسته‌ای با تخلخل پایین و ویژگی ممانعتی بالا در برابر روغن گشته و در نهایت جذب روغن را کاهش می‌دهد (بومن و اسپر ۱۹۹۵ و فن و آرسی ۱۹۸۶). در حالیکه کروکید (۲۰۰۰) گزارش کرده است که افزایش دمای روغن بطور معنی دار سبب افزایش جذب روغن در خلال سیب زمینی می‌گردد. برخی نیز عنوان کرده‌اند که اثر دما بر جذب روغن معنی‌دار نیست (پراویسانی و کالولو ۱۹۸۶ و گمبل و همکاران ۱۹۸۷). از جمله روش‌های بهبود کیفیت بافت و کاهش جذب روغن در محصولات سرخ شده می‌توان به آنزیم‌بری، پیش خشک کردن و پوشش دهی اشاره نمود. آنزیم‌بری موجب صاف شدن سطح به علت ژلاتینه شدن نشاسته و پر شدن منافذ درون سلولی ناشی از انبساط سلولی می‌شود. تیمار خشک کردن یا پیش خشک کردن سطحی در صنعت تولید خلال سیب زمینی سرخ شده جهت کاهش جذب روغن مورد استفاده قرار می‌گیرد (کروکید و همکاران ۲۰۰۱ و لامبرگ و هالستروم ۱۹۹۰). برای بررسی از دست رفتن آب و جذب روغن بعنوان تابعی از زمان سرخ کردن، کروکید و همکاران (۲۰۰۰) یک معادله سینتیک درجه اول ارائه نموده‌اند که ثابت سرعت واکنش در این معادله تابعی است از متغیرهای اصلی فرایند همانند: دمای روغن، ضخامت نمونه و نوع روغن. با توجه به موارد مذکور، سرخ کردن از جمله عملیات مؤثر بر کیفیت محصول نهایی از نظر میزان روغن

### اندازه گیری میزان رطوبت

برای اندازه گیری رطوبت، ۵-۳ گرم نمونه کاملاً خرد و همگن شده به مدت ۲۴ ساعت در آون خلأ تحت فشار ۱۰۰ میلی‌متر جیوه و دمای ۷۰ °C خشک گردید (AOAC).

### تعیین محتوای روغن جذب شده (باقیمانده)

اندازه گیری محتوای روغن خلال‌ها یا استفاده از روش سوکسله بر مبنای استخراج با حلال پترولیوم اتر به مدت ۱۰ ساعت انجام شد (AOCS).

### ارزیابی بافت

ارزیابی بافت خلال‌ها در دمای اتاق و با استفاده از آزمون نفوذسنجی با پروب ۲ میلی‌متری، سرعت نفوذ ۱۲۰ میلی‌متر بر دقیقه و لودسل ۵۰ کیلوگرم در دستگاه کشش و فشار (STM، مدل STM-20) انجام شد. پارامترهای مورد بررسی شامل استرس مغز و استرس پوسته بودند. استرس پوسته عبارتست از حداکثر استرس ایجاد شده در اثر نفوذ پروب در بافت و استرس مغز عبارتست از مقدار استرس، زمانی که پروب به مرکز خلال (در فاصله ۴ میلی‌متری از سطح خلال) می‌رسد (استرس = نیرو تقسیم بر سطح مقطع پروب).

### مدل‌سازی ریاضی

جهت توصیف جذب روغن (معادله [۱]) و خروج رطوبت (معادله [۲]) طی سرخ کردن از معادلات سینتیکی واکنش‌های تک مولکولی درجه اول با اثر محدود کنندگی محصول استفاده شد. درحالی‌که برای بیان سفت شدن پوسته خلال (معادله [۳]) و نرم شدن مغز خلال در فاز آهسته (معادله [۴]) از درجه صفر و برای تبعیت توصیف نرم شدن مغز خلال در فاز سریع (معادله [۵]) از معادلات سینتیکی واکنش‌های درجه اول استفاده گردید.

$$[oil] = [oil]_e \cdot (1 - \exp(-k_o t - B_o)) \quad [1]$$

$$MC = \frac{MC_e}{1 - \exp(-k_m t - B_m)} \quad [2]$$

$$S_{max} = k_h t + B_h, \quad 5 \leq t \leq 15 \text{ min} \quad [3]$$

$$CS^* = -k_s^* t + B_s^*, \quad 5 \leq t \leq 15 \text{ min} \quad [4]$$

$$CS = CS_0 \cdot \exp(-k_s t + B_s), \quad 0 \leq t \leq 5 \text{ min} \quad [5]$$

باقیمانده، بافت و ... می‌باشد. لذا در این تحقیق سعی شده است به بررسی سینتیک جذب روغن، خروج رطوبت و تغییرات بافت خلال سیب زمینی طی سرخ کردن در دماهای مختلف پرداخته و در نهایت برای توصیف سینتیک تغییرات پدیده‌های مذکور برخی مدل‌های ریاضی توسعه داده شود.

### مواد و روش‌ها

#### تهیه و نگهداری سیب زمینی

سیب زمینی با رقم آگریا (۲۳٪ ماده خشک) به میزان ۱۰۰ کیلوگرم از منطقه فریدن اصفهان و روغن گیاهی مخصوص سرخ کردنی بهار شامل مخلوطی از روغن آفتاب‌گردان، سویا و تخم پنبه از کارخانه خریداری و در سردخانه دانشکده کشاورزی در دمای ۴ °C و رطوبت نسبی ۹۰٪ نگهداری شدند (سیب زمینی‌ها قبل از مصرف به مدت ۲ هفته در دمای ۲۰ °C قرار داده شدند). سیب زمینی‌ها پس از شستشو و پوست گیری توسط دستگاه خلال کن (Haldeh، مدل RG-۱۰۰) به صورت خلال‌هایی با ابعاد ۸×۸×۰/۸ سانتی‌متر برش داده شدند.

#### آماده سازی نمونه‌های خلال سیب زمینی سرخ شده

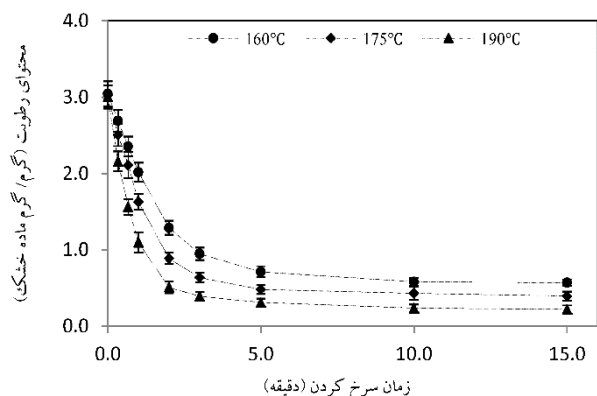
خلال‌های سیب زمینی خام بلافاصله پس از برش به منظور حذف نشاسته سطحی به مدت ۱ دقیقه با آب مقطر شستشو شده و سپس آنزیم‌بری خلال‌ها در آب مقطر داغ (با نسبت وزنی سیب زمینی به آب ۱ به ۲۰) با دمای ۷۰ °C به مدت ۱۰ دقیقه صورت گرفت. خلال‌های آنزیم‌بری شده در مرحله بعد وارد خشک کن قفسه‌ای شده و با جریان هوای گرم ۷۰±۰/۵ °C و سرعت ۱ m/s تا رسیدن به رطوبت ۷۵٪ (براساس وزن مرطوب) پیش خشک شدند. خلال‌های سیب زمینی آنزیم‌بری شده و پیش خشک شده، در نهایت در روغن داغ با نسبت سیب زمینی به روغن ۱ به ۵۰ (وزنی/وزنی) در دماهای ۱۶۰، ۱۷۵ و ۱۹۰ °C به مدت ۱۵ دقیقه سرخ شدند.

با استفاده از نرم‌افزار SAS و رسم نمودارها با نرم افزار Excel صورت گرفت. آزمون میانگین داده‌ها به روش حداقل تفاوت معنی دار (LSD) در سطح اطمینان ۹۹٪ انجام گرفت.

### نتایج و بحث

#### سینتیک تغییرات رطوبت طی سرخ کردن

شکل ۱ سینتیک تغییرات رطوبت خلال سیب زمینی طی سرخ کردن در دماهای مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مذکور، طی سرخ کردن رطوبت محصول کاهش می‌یابد که شیب یا سرعت کاهش رطوبت در ابتدای فرایند زیاد بوده و با گذشت زمان کاهش می‌یابد.



شکل ۱- تغییرات رطوبت خلاهای سیب زمینی طی سرخ کردن در دماهای مختلف

جدول ۱ مقایسه میانگین داده‌های مربوط به خروج رطوبت طی سرخ کردن را نشان می‌دهد. اثر دما و زمان بر کاهش رطوبت، در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار می‌باشد. جدول ۱ نشان می‌دهد که تفاوت بین محتوای رطوبت محصول در زمان صفر و ۳ دقیقه معنی‌دار می‌باشد اما از دقیقه سوم به بعد سرعت کاهش رطوبت نزول کرده و تفاوت زمان‌های ۳ و ۵ دقیقه معنی‌دار نیست، همچنین اختلاف معنی‌داری بین محتوای رطوبت محصول در زمان‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه وجود ندارد. کاهش رطوبت نیز با افزایش دمای سرخ کردن افزایش یافته و تفاوت

در معادلات بالا پارامترهای  $[oil]$ ،  $MC$ ،  $S_{max}$ ،  $CS^*$  و  $CS$  به ترتیب نشان دهنده مقادیر محتوای روغن، محتوای رطوبت، استرس پوسته، استرس مغز در فاز آهسته و استرس مغز در فاز سریع طی سرخ کردن هستند.  $[oil]_e$ ،  $MC_e$  و  $CS_0$  به ترتیب نشان دهنده محتوای روغن و رطوبت در انتهای سرخ کردن و مقدار استرس پوسته در زمان  $t=0$  هستند. پارامترهای  $k$  و  $B$  نیز نشان دهنده ثابت سرعت و فاکتور  $pre$  exponential مربوط به هر فرایند می‌باشند.

وابستگی دمایی ثابت‌های سرعت استخراج شده با استفاده از رابطه آرنیوس توصیف گردید:

$$k = k_0 \cdot \exp(-E_a/RT) \quad [6]$$

که  $k$ ،  $k_0$ ،  $E_a$  و  $R$  به ترتیب عبارتند از: ثابت سرعت در دمای مورد نظر، فاکتور پری اکسپوننشیل، انرژی فعال سازی، ثابت جهانی گازها  $(8.314 J/mol.K)$  و دمای مطلق سرخ کردن. تأیید مدل با استفاده از مقایسه داده‌های آزمایشگاهی و مقادیر پیش بینی شده توسط مدل‌های سینتیک انجام شد. از فاکتورهای ضریب تبیین ( $R^2$ ) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) بعنوان معیارهای مقایسه استفاده گردید:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{v_{exp} - v_{cal}}{v_{exp}} \right)^2} \quad [7]$$

$$R^2 = \frac{\sum (v_{exp} - \bar{v}_{exp})(v_{cal} - \bar{v}_{cal})}{\sqrt{\sum (v_{exp} - \bar{v}_{exp})^2 \cdot \sum (v_{cal} - \bar{v}_{cal})^2}} \quad [8]$$

که در معادلات بالا  $N$ ،  $v_{exp}$  و  $v_{cal}$  به ترتیب عبارتند از: تعداد مقادیر، مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل. ضریب تبیین بالا و ریشه میانگین مربعات خطای پایین نشان دهنده‌ی مناسب بودن مدل پیشنهادی می‌باشد.

#### طرح آماری مورد استفاده

آزمایشات به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام گرفت. تجزیه و تحلیل داده‌ها

بین محتوای رطوبت محصول در دماهای ۱۶۰، ۱۷۵ و ۱۹۰°C معنی دار می باشد.

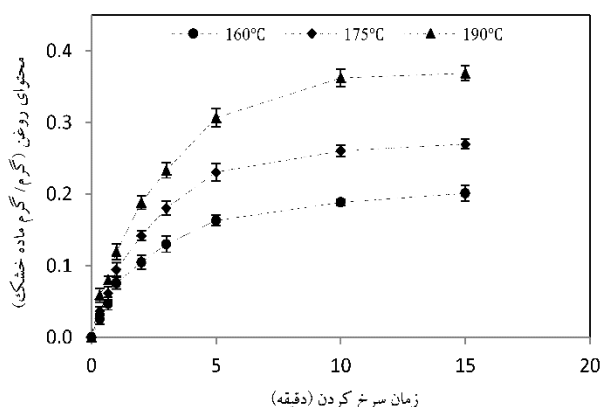
جدول ۱- مقایسه میانگین داده های مربوط به خروج رطوبت طی سرخ کردن خلال سیب زمینی در دماهای متفاوت

مقدار رطوبت (گرم در گرم ماده خشک)	زمان (دقیقه)
۳/۰۲۶ <sup>a</sup>	۰
۲/۴۵۲ <sup>b</sup>	۰/۳۳
۲/۰۰۸۸ <sup>c</sup>	۰/۶۷
۱/۵۸۰۷ <sup>d</sup>	۱
۰/۸۹۵۷ <sup>e</sup>	۲
۰/۱۶۶۰ <sup>f</sup>	۳
۰/۵۰۱۸ <sup>fg</sup>	۵
۰/۴۱۶۴ <sup>g</sup>	۱۰
۰/۳۹۵۳ <sup>g</sup>	۱۵

مقدار رطوبت (گرم در گرم ماده خشک)	دما (درجه سانتی گراد)
۱/۵۷۸۶ <sup>a</sup>	۱۶۰
۱/۳۴۵۸ <sup>b</sup>	۱۷۵
۱/۰۵۴۷ <sup>c</sup>	۱۹۰

حروف غیر مشترک در هر ستون نشان دهنده تفاوت معنی دار در سطح احتمال ۱٪ می باشد.



شکل ۲- تغییرات جذب روغن خلال سیب زمینی طی سرخ کردن در دماهای مختلف

اثر دما و زمان بر محتوای روغن خلال در سطح احتمال ۱٪ معنی دار است. طی سرخ کردن محتوای روغن محصول بطور معنی داری تا دقیقه دهم افزایش می یابد ولی از دقیقه دهم به بعد افزایش جذب روغن معنی دار نیست. از سوی دیگر افزایش دمای سرخ کردن نیز جذب روغن را بطور معنی دار افزایش داده است.

محتوای نهایی روغن محصول بستگی به میزان رطوبت باقی مانده در محصول دارد. سرخ کردن در دماهای

ثابت های سینتیکی مربوط به خروج رطوبت طی سرخ کردن محاسبه و در ردیف شماره ۱ جدول ۲ ارائه شده اند. مطابق با جدول مذکور، افزایش دما سبب افزایش ثابت سرعت فرایند خروج رطوبت شده است

**سینتیک جذب روغن طی سرخ کردن در دماهای مختلف**

میزان جذب روغن توسط محصول طی سرخ کردن افزایش می یابد. جذب روغن در ابتدای فرایند با سرعت بالایی انجام گرفته ولی با گذشت زمان کاهش می یابد (شکل ۲).

شکل ۲ همچنین نشان می دهد که سرعت جذب روغن با افزایش دمای سرخ کردن افزایش می یابد. طی سرخ کردن روغن جایگزین آب تبخیر شده از محصول گردد و با گذشت زمان نرخ خروج رطوبت از محصول کاهش می یابد بنابراین سرعت جذب روغن نیز رفته رفته کاهش می یابد.

ابتدا با یک شیب تند (تا دقیقه پنجم برای دماهای ۱۶۰ و ۱۷۵°C و تا دقیقه سوم برای دمای ۱۹۰°C) و سپس با یک شیب کند کاهش می‌یابد که سرعت نرم شدگی با افزایش دما افزایش می‌یابد. نتیجه اتفاقات مذکور، پیدایش بافتی نرم و آردی در ناحیه مغز خواهد بود.

از سوی دیگر طی فرایند سرخ کردن، پوسته تشکیل شده به تدریج گسترش می‌یابد. ابتدا روند نرم شدن پوسته (شکل گیری پوسته و کاهش حداکثر استرس) با شیب زیادی تا دقیقه پنجم فرایند اتفاق می‌افتد (شکل ۴). سپس در نتیجه دهیدراته شدن پوسته (توسعه پوسته)، بافت پوسته با یک شیب ملایم نسبت به مرحله قبل، شروع به سفت شدن می‌نماید.

بالا تر موجب کاهش محتوای رطوبت محصول و جایگزینی روغن با رطوبت تبخیر شده از محصول گشته و در نهایت سبب افزایش میزان روغن باقیمانده در محصول می‌گردد (گمبل و همکاران ۱۹۸۷ و کروکید و همکاران ۲۰۰۰ و ترونکوسو و پدرسچی ۲۰۰۹).

مطابق با جدول ۲ ثابت سرعت جذب روغن ( $k_o$ ) با افزایش دما افزایش می‌یابد. از طرف دیگر ثابت‌های بدست آمده برای جذب روغن نسبت به ثابت‌های مربوط به کاهش رطوبت، دارای مقادیر بزرگتری هستند، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که طی فرایند سرخ کردن، جذب روغن سریعتر از خروج رطوبت از محصول صورت می‌گیرد.

مقدار انرژی فعال سازی این فرایند ( $2010949 \text{ (kJ/mol)}$ ) در مقایسه با مقدار محاسبه شده برای کاهش رطوبت ( $278186 \text{ (kJ/mol)}$ )، مقدار کوچکتری می‌باشد. لذا می‌توان نتیجه گیری نمود که خروج رطوبت از محصول طی سرخ کردن نسبت به جذب روغن به درون آن کندتر صورت می‌گیرد. البته خروج رطوبت، طی سرخ کردن و در اثر انتقال حرارت از روغن داغ به خلال‌های سیب زمینی اتفاق می‌افتد که این امر با افزایش دمای سرخ کن منجر به افزایش تخلخل محصول می‌گردد اما جذب روغن صرفاً یک پدیده سطحی است که در پایان سرخ کردن و هنگام خروج محصول از سرخ کن رخ می‌دهد. در واقع خلأ ایجاد شده در اثر کندانس شدن بخار هنگام خروج از سرخ کن و مکش موئینی عامل اصلی جذب روغن به درون خلال‌های سیب زمینی هستند. بنابراین خروج رطوبت و جذب روغن طی سرخ کردن خلال‌های سیب زمینی، دو پدیده غیر همزمان و در ارتباط با یکدیگر هستند.

**سینتیک تغییرات بافت طی سرخ کردن در دماهای مختلف**

شکل ۳ سینتیک نرم شدن بافت مغز خلال سیب زمینی طی سرخ کردن در دماهای مختلف را نشان می‌دهد. بر اساس شکل مذکور، طی سرخ کردن سفتی بافت مغز

جدول ۲- پارامترهای سینتیک خواص کیفی طی سرخ کردن خلال سیب زمینی در دماهای مختلف

%RMSE	قابلیت انطباق مدل با داده‌های آزمایشی	فکتور			ثابت سرعت (بر ثانیه)			شماره ردیف	فاکتور مورد نظر (متغیر وابسته) طی سرخ کردن	نوع و درجه مدل سینتیک	
		$B_0$	$k_0$	انرژی فعال‌سازی (کیلوژول/مول)	$E_{AB}$	$E_{AK}$	دما ( $^{\circ}C$ )				
۱۲/۴۲۹۲-۳۳/۵۶۱۱	۰/۹۴۸۵-۰/۹۸۹۱	$۲/۱۱۸۴ \times 10^{-8}$	۴۱۵/۲۹۹۵	۵۸/۰۰۰۰	۳۷/۸۱۸۶	۰/۳۰۰۰	۰/۲۴۲۰	۰/۱۸۲۰	درجه اول با اثر محدود کندی محصول	رطوبت	۱
۹/۰۷۸۵-۳۶/۹۴۹۸	۰/۹۹۹۳-۰/۹۹۹۱	$۳/۳۷۸۴ \times 10^{-8}$	۷۳/۵۲۵۵	۵۳/۸۷۴۷	۲۰/۰۹۴۹	۰/۳۹۶۰	۰/۳۳۹۰	۰/۲۷۶۰	درجه اول با اثر محدود کندی محصول	روغن باقیمانده	۲
۲/۰۰۷۵-۳۵/۹۹۷۹	۰/۹۹۲۷-۰/۹۹۷۳	۳۴۰/۱/۵۹۶۰	$۱/۰۱۴۵ \times 10^{-6}$	۴۱/۷۸۶۲	۵۷/۹۶۵۲	۰/۳۹۸۰	۰/۱۷۶۰	۰/۱۰۵۰	درجه اول	استرس مغز (فاز سریع)	۳
۳/۱۸۵۳-۱۲/۷۹۹۳	۰/۹۷۸۵-۰/۹۹۶۹	۰/۰۰۰۵	۰/۰۹۴۲	۲۲/۹۶۳۳	۱۳/۸۶۰۱	۰/۰۰۶۸	۰/۰۰۶۳	۰/۰۰۵۴	درجه صفر	استرس مغز (فاز آهسته)	۴
۱/۰۵۵۵-۳/۱۲۲۴۶	۰/۹۹۸۳-۰/۹۹۹۹	۰/۰۰۰۷	$۸/۸۷۲۴ \times 10^{-3}$	۲۱/۲۰۹۰	۵۱/۳۷۲۲	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۹۳	۰/۰۰۵۶	درجه صفر	استرس پوسته	۵

جدول ۳- مقایسه میانگین مربوط به داده‌های جذب روغن طی سرخ کردن خلال سیب زمینی در دماهای مختلف

زمان (دقیقه)	محتوای روغن خلال (گرم در گرم ماده خشک)
۰	۰
۰/۳۳	۰/۰۴۰۴ <sup>g</sup>
۰/۶۷	۰/۰۶۲۹ <sup>f</sup>
۱	۰/۰۹۶۸ <sup>e</sup>
۲	۰/۱۴۵۰ <sup>d</sup>
۳	۰/۱۸۱۳ <sup>c</sup>
۵	۰/۲۳۳۶ <sup>b</sup>
۱۰	۰/۲۷۰۵ <sup>a</sup>
۱۵	۰/۲۸۰۰ <sup>a</sup>

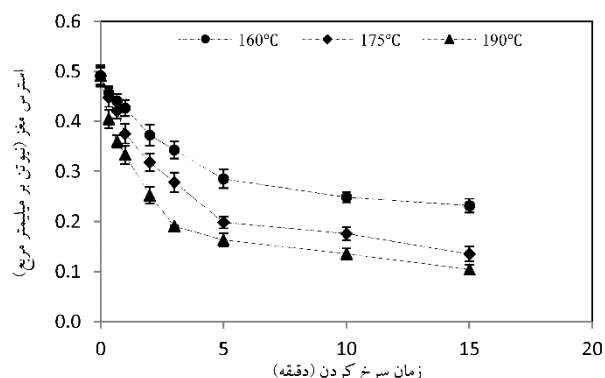
دما (درجه سانتی‌گراد)	محتوای روغن خلال (گرم در گرم ماده خشک)
۱۶۰	۰/۱۰۴۰ <sup>c</sup>
۱۷۵	۰/۱۴۱۸ <sup>b</sup>
۱۹۰	۰/۱۹۱۰ <sup>a</sup>

حروف غیر مشترک در هر ستون بیان‌گر تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ می‌باشد

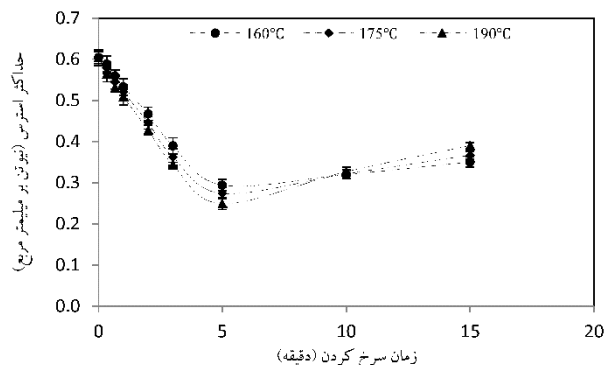
با توجه به شکل ۴، شیب افزایش سفتی با افزایش دما افزایش می‌یابد که منجر به تشکیل پوسته‌ای سخت‌تر در دماهای بالاتر می‌گردد.

مطابق با نتایج جدول ۲ (ثابت سرعت در ردیف‌های ۵-۳)، افزایش دمای سرخ کردن هر سه فرایند مذکور را سرعت بخشیده است. ثابت سرعت فرایند سفت شدن بافت ( $k_h$ ) مانند مرحله نرم شدن ( $k_s$ ) با افزایش دما افزایش می‌یابد، اما تأثیر دما بر  $k_s$  بیشتر بوده است به طوری که افزایش دما از  $160^\circ\text{C}$  تا  $190^\circ\text{C}$  به ترتیب سبب افزایش پارامترهای  $k_h$  و  $k_s$  به میزان  $183/81\%$  و  $151/79\%$  شده است.

ثابت‌های سرعت بدست آمده در این تحقیق (ردیف ۳ در جدول ۲) برای فاز سریع نرم‌شدن نسبت به مقادیر گزارش شده توسط پدرسچی (۲۰۰۱) برای خلال‌های سیب‌زمینی (بدون آنزیم‌بری و بدون پیش خشک کردن) (به ترتیب  $0/408$ ،  $0/522$  و  $0/416$  برای دماهای  $160$ ،  $175$  و  $190^\circ\text{C}$ )، کوچکتر هستند که علت این اختلاف را می‌توان با آنزیم‌بری و پیش خشک کردن خلال‌ها قبل از سرخ کردن مرتبط دانست که سبب شکل‌گیری پوسته اولیه طی خشک کردن و همچنین نرم شدن ابتدایی بافت



شکل ۳- تغییرات نرم شدن مغز خلال سیب‌زمینی طی سرخ کردن در دماهای مختلف



شکل ۴- تغییرات سفتی پوسته خلال سیب‌زمینی طی سرخ کردن در دماهای مختلف



مقادیر پیش بینی شده بوده و در نهایت مناسب بودن مدل‌های سینتیکی پیشنهادی را تایید می‌نماید.

### نتیجه گیری

در این تحقیق، سینتیک جذب روغن، خروج رطوبت و تغییرات بافت خلال سیب زمینی طی سرخ کردن مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج بررسی‌ها نشان داد که (۱) افزایش دمای سرخ کردن بطور معنی‌داری موجب کاهش محتوای رطوبت و افزایش جذب روغن طی سرخ کردن می‌شود، (۲) سفتی مغز خلال، ابتدا (تا دقیقه پنج سرخ کردن) با سرعت زیاد (فاز سریع) و سپس با سرعت پایین (فاز آهسته) طی سرخ کردن کاهش می‌یابد، (۳) سفتی پوسته از ابتدای سرخ کردن تا دقیقه پنج کاهش یافته و سپس به علت دهیدراته شدن، روند افزایشی نشان می‌دهد، (۴) برای توصیف میزان جذب روغن و خروج رطوبت از خلال سیب زمینی، نرم شدن مغز خلال در فاز سریع، سفت شدن پوسته خلال و نرم شدن مغز در فاز آهسته طی سرخ کردن می‌توان به ترتیب از مدل‌های سینتیکی درجه اول با اثر محدود کنندگی محصول، درجه اول، درجه صفر و درجه صفر استفاده نمود.

طی آنزیم‌بری و پیش خشک کردن شده و نهایتاً موجب کاهش شیب نرم‌شدن بافت طی سرخ کردن گردیده‌اند. ثابت‌های سرعت فاز آهسته نیز مانند فاز سریع، کوچک تر از مقادیر گزارش شده در مطالعه پدرسچی و همکاران (۲۰۰۱) می‌باشند.

مویانو و همکاران (۲۰۰۷) مقدار انرژی فعال سازی (در محدوده دمایی ۱۶۰ تا ۱۸۰°C) را برای فازهای سریع و کند نرم شدن به ترتیب ۶۴/۱ و ۱۱/۷ ( $kJ/mol$ ) ذکر کرده‌اند که با مقادیر بدست آمده در این تحقیق (ردیف-های ۳ و ۴ جدول ۲) مطابقت دارد. انرژی فعال سازی فرایند افزایش سفتی پوسته، نسبت به انرژی محاسبه شده برای فاز سریع فرایند نرم شدن بافت (جدول ۲) مقدار کمتری داراست که نشان می‌دهد فرایند سرخ کردن موجب می‌شود پس از یک روند نرم شدن اولیه با سرعت زیادی ناحیه پوسته توسعه یابد.

نتایج مقایسه مابین داده‌های اندازه گیری شده و مقادیر پیش بینی شده توسط مدل‌های سینتیکی پیشنهادی در جدول (۲) ارائه شده است. ضرایب تبیین بالا و مقادیر پایین ریشه میانگین مربعات خطا، نشان دهنده‌ی همبستگی مناسب مابین داده‌های اندازه گیری شده و

### منابع مورد استفاده

- Aguilera J M and Gloria-Hernandez H, 2000. Oil absorption during frying of frozen parfried potatoes. *Journal of Food Science* 63: 476–479.
- Andersson A, Gekas V, Lind I, Oliveira F and Oste R, 1994. Effect of preheating on potato texture. *Journal of Food Science and Nutrition* 34: 229–251.
- AOAC, 1984. Association Official Analytical Chemists. The official methods of analysis. Method 28.074. Arlington, VA: AOAC.
- AOCS, 1993. Official methods and recommended practices of the American Oil Chemists Society (4th ed). Washington DC: The American Oil Chemists Society.
- Baumann B and Escher F, 1995. Mass and heat transfer during deep-fat frying of potato slices. I, Rate of drying and oil uptake. *Lebensmittel-Wissenschaft and Technology* 28: 395–403.
- Bouchon P and Aguilera J M, 2001. Microstructural analysis of frying potatoes. *International Journal of Food Science and Technology* 36: 669–676.
- Fan L L and Arce J A, 1986. Preparation of fried food products with oil containing emulsifiers. US Patent 4 608 264. Data issued 26 August.
- Gamble M H, Rice P and Seldman J D, 1987. Relationship between oil uptake and moisture loss during frying of potato slices from c.v. Record U.K. tubers. *Journal of Food Science and Technology*. 22: 233–241.

- Krokida M K, Oreopolou V, Maroulis Z B and Marinos-Kouris D, 2001. Effect of pre-drying on quality of french fries. *Journal of Food Engineering* 49: 347–354.
- Krokida M K, Oreopoulou V and Maroulis Z B, 2000. Water loss and oil uptake as a function of frying time. *Journal of Food Engineering* 44: 39-46.
- Lamberg I and Hallstrom Olsson H, 1990. Fat uptake in a potato drying/frying process. *Lebensmittel-Wissenschaft and Technology* 23: 295–300.
- Misael M L and Aguilera J M, 2006. Structure and Texture Properties of Fried Potato Products. *Food Review* 22: 173-201.
- Mittelman N, Mizrahi S and Berk Z, 1984. Heat and mass transfer in frying. In *Engineering and Food. Voll. Engineering Sciences in the Food Industry*; B McKenna, Ed.; Elsevier: London 109–116.
- Moyano P C, Troncoso E and Pedreschi F, 2007. Texture Kinetics during Thermal Processing of Potato Products. *Journal of Food science* 72: 102-107.
- Pedreschi F, Aguilera J M and Pyle L, 2001. Textural characterization and kinetics of potato strips during frying. *Journal of Food Science* 66: 304–308.
- Pravisani C I and Calvelo A, 1986. Minimum cooking time for potato strip frying. *Journal of Food Science* 51: 614–617.
- Saguy I S, Ufheil G and Livings S, 1998. Aspects Physiques du Procédé Oil uptake in deep-fat frying. *Oleagineux Corps Gras Lipides* 5: 30–35.
- Singh R P, 2000. Moving boundaries in food engineering. *Food Technology* 54: 44–53.
- Ufheil G and Escher F, 1996. Dynamics of oil uptake during deep-fat frying of potato slices. *Lebensmittel-Wissenschaft and Technology* 29: 640–644.

## Kinetic of oil uptake, water loss and texture changes during frying of potato strips

H Beyki<sup>1\*</sup> and N Hamdami<sup>2</sup>

Received: February 21, 2013 Accepted: July 20, 2013

<sup>1</sup>MSc Student, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

<sup>2</sup>Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

\*Corresponding author: E-mail: h.beyki@ag.iut.ac.ir

### Abstract

The quality of fried potato strips usually depends on color, flavor, texture and oil content. Frying is one of the most important stages in processing of this product. In order to investigate the kinetic of oil uptake, water loss and textural changes during frying, the potato strips with a cross-section of 0.8×0.8×8 cm were fried in hot oil at temperatures of 160, 175, 190 °C for 15 minutes after being blanched for 10 minutes at 70°C and then pre-dried at 70°C with air velocity of 1 m/s until mean moisture content of 75% (wet basis). The results showed that increasing the temperature of frying increased the oil uptake and water loss from strips significantly ( $P<0.01$ ). Increasing the frying temperature also decreased the core firmness and intensified the crust hardening. The different kinetic models were studied to describe the oil uptake, water loss and firmness changes of crust and core regions. The results showed that the first order kinetic with production rate limiting effect had the most conformity with experimental data of oil uptake and water loss.

**Keywords:** Oil uptake, Water loss, Texture, Blanching, Pre-drying, Frying, Mathematical model