

## سینتیک تولید و خروج قندهای احیاء کننده و تغییر رنگ خلال سیب زمینی طی آنزیم بری در آب داغ

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

۱. کارشناس ارشد مهندسی صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲. استادیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۵/۸ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۱۰/۲۸)

### چکیده

به منظور بررسی تأثیر دما و زمان فرایند آنزیم بری بر تولید و خروج همزمان قندهای احیاء کننده و سینتیک تغییرات رنگ طی آنزیم بری، خلال‌های سیب زمینی پس از بسته بندی در عایق پلی اتیلنی و یا بدون بسته پلی اتیلنی در آب مقطر با دماهای ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰°C به مدت ۱۲۰ دقیقه جهت آنزیم بری غوطه ور شدند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزایش دمای آنزیم بری، دیفوزیون قندهای احیاء کننده را سرعت بخشیده ولی تولید این قندها با افزایش دما کاهش می‌یابد و در دماهای ۸۰ و ۹۰°C متوقف می‌شود. افزایش دما و زمان آنزیم بری همچنین سبب کاهش معنی‌دار ( $P < 0.01$ ) شاخص‌های رنگ خلال گردید. نتایج بررسی مدل‌های سینتیکی نشان داد که مدل درجه اول با اثر محدود کنندگی محصول بیشترین انطباق را با داده‌های آزمایشگاهی تولید قندهای احیاء و شاخص قرمزی-سبزی داراست. درحالی که خروج قندهای احیاء کننده و تغییر شاخص‌های تیرگی-روشنی و زردی-آبی طی آنزیم بری از سینتیک درجه اول تبعیت می‌نمایند.

**واژه‌های کلیدی:** قند احیاء کننده، آنزیم بری، شاخص‌های رنگ، مدل‌سازی سینتیکی.

### مقدمه

سیب زمینی به عنوان یک ماده غذایی سالم، مقرون به صرفه و کم چرب شناخته شده است. اشکال اصلی مصرف سیب زمینی شامل: مصرف تازه (۳۱٪)، فرنچ فرایز (۳۰٪)، چیپس سیب زمینی (۱۲٪) و محصولات دهیدراته (۱۲٪) می‌باشند (Miranda & Aguilera, 2006). تیمار حرارتی سیب زمینی سبب ایجاد تغییرات شیمیایی، فیزیکی و ساختاری در آن می‌گردد که دامنه این تغییرات بستگی به دما و زمان فرایند حرارتی دارد. تیمارهای حرارتی سیب زمینی شامل آنزیم بری، پخت و سرخ کردن می‌باشند (Moyano et al., 2007).

آنزیم بری یک عملیات واحد است که به طور گسترده در صنعت فراوری سیب زمینی به منظور هواگیری از بافت، کاهش قندهای احیاء کننده جهت کنترل واکنش میلارد طی سرخ کردن و غیر فعال کردن آنزیم‌ها انجام می‌شود (Gonzalez-Martinez et al., 2004). آنزیم بری سیب زمینی قبل از سرخ کردن سبب بهبود رنگ و بافت محصول نهایی و در برخی موارد سبب کاهش جذب روغن به علت ژلاتیناسیون نشاسته سطحی می‌گردد (Califano & Calvelo, 1987). آنزیم بری در مراحل

تولید خلال سیب زمینی سرخ شده معمولاً با حرارت دادن در آب یا بخار در محدوده دمایی ۸۵-۶۰°C به مدت ۲۰-۴۰ دقیقه انجام می‌شود (Aguilar et al., 1997). رنگ نهایی خلال تابع غلظت قندهای احیاء کننده است که در نتیجه فرایند حرارتی، غلظت سطحی آن‌ها کاهش یافته و محصول با رنگ روشن‌تر و یکنواخت‌تر تولید می‌شود. به عبارتی، میزان دیفوزیون مواد محلول (آمینواسیدها و قندهای احیاء کننده) از بافت سیب زمینی به آب آنزیم بری هر قدر بیشتر باشد به همان اندازه شدت واکنش میلارد کمتر خواهد بود (Medeiros Vinci et al., 2010). با افزایش زمان یا دمای آنزیم بری می‌توان مقدار خروج مواد محلول را افزایش داد. برخی از محققین عنوان کرده‌اند که ضریب دیفوزیون ظاهری گلوکز با افزایش دمای آنزیم‌بری از ۵۵ به ۸۵°C افزایش می‌یابد (Carrote et al., 1984). بطور مشابه برخی دیگر گزارش کرده‌اند که غلظت گلوتامیک اسید و آسپارتیک اسید که آمینواسیدهای غالب در بافت سیب زمینی می‌باشند بعد از ۱۲ دقیقه آنزیم بری در دمای ۷۷°C به ترتیب ۳۶ و ۳۵ درصد کاهش می‌یابند (Pedreschi et al., 2004). بنابراین بهبود رنگ با کمک آنزیم بری طولانی و یا در دمای بالا امکان‌پذیر می‌باشد (Agblor & Scanlon, 2002). Sylvia et al. (1997) زمان طولانی آنزیم بری را توصیه نمی‌کند و معتقد است زمان طولانی منجر به تیرگی

توصیف سینتیک تغییرات مذکور بود.

## 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 آفتاب گردان، سویا و تخم پنبه از کارخانه خریداری و در سردخانه دانشکده کشاورزی در دمای °C ۴ و رطوبت نسبی ۹۰٪ نگهداری شدند (سیب زمینی‌ها قبل از مصرف به مدت ۲ هفته در دمای °C ۲۰ قرار داده شدند). سیب زمینی‌ها پس از شستشو و پوست گیری توسط دستگاه خلال‌کن (Halldeh)، مدل RG-100، ساخت آمریکا) به صورت خلال‌هایی با ابعاد ۸×۸×۸ سانتی‌متر برش داده شدند.

### آماده سازی نمونه‌های خلال سیب زمینی آنزیم بری شده

خلال‌های سیب زمینی خام بلافاصله پس از برش به منظور حذف نشاسته سطحی به مدت ۱ دقیقه در آب مقطر شستشو شده سپس آنزیم بری خلال‌ها در آب مقطر داغ (با نسبت وزنی سیب زمینی به آب ۱ به ۲۰) با دماهای ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰ و °C ۹۰ صورت گرفت. جهت بررسی سینتیک تولید قندهای احیاء کننده طی آنزیم بری، خلال‌ها به صورت ۲ تایی در بسته‌های پلی اتیلنی (HDPE با ضخامت ۱۰ میکرون) بسته بندی شده و با غوطه وری در داخل حمام آب در دماهای ۶۰، ۷۰، ۸۰ و °C ۹۰ آنزیم بری شدند. نمونه‌های خلال سیب زمینی طی آنزیم بری در فواصل زمانی ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ و ۱۲۰ دقیقه جهت اندازه‌گیری قندهای احیاء کننده، محتوای رطوبت و رنگ از حمام آب خارج شدند.

### تعیین رطوبت

برای اندازه‌گیری رطوبت، ۵-۳ گرم نمونه کاملاً خرد و همگن شده به مدت ۲۴ ساعت در آون خلأ (Fine Tech)، مدل SSVO-502، ساخت کره جنوبی) تحت فشار ۱۰۰ میلی‌متر جیوه و دمای °C ۷۰ خشک گردید (AOAC, 1984).

### اندازه گیری قندهای احیاء کننده

اندازه‌گیری قندهای احیاء کننده به روش اسپکتروفتومتری با محلول ۳ و ۵-دی نیترو سالیسیلیک اسید در طول موج ۵۷۵ نانومتر انجام شد (Miller, 1959).

### رنگ

اندازه‌گیری رنگ نمونه‌ها با استفاده از دستگاه رنگ‌سنج RGB

محصول می شود و عطر و طعم مطبوع آن از دست می‌رود. سرطان زایی آکریل آمید در جوندگان به اثبات رسیده است و احتمال سرطان زایی آن در انسان نیز با توجه به افزایش شواهد علمی مبنی بر نقش مثبت آکریل آمید در تشکیل تومورهای سرطانی وجود دارد. فرآیند آنزیم بری سبب کاهش مقدار پیش سازهای آکریل آمید در سیب زمینی می‌گردد، بنابراین مطالعه شرایط فرآیند آنزیم بری به لحاظ تنظیم سطح قندهای احیاء کننده در محصول قبل از انجام فرآیند سرخ کردن و تولید محصول نهایی سالم تر بسیار حائز اهمیت است (Medeiros, Vinci et al., 2012). در مطالعات پیشین انجام شده در زمینه تغییرات میزان قندهای احیاء کننده طی آنزیم بری سیب زمینی، محققین شواهدی یافتند که در کنار انتقال جرم به داخل آب بلانچر، به دلیل هیدرولیز آنزیمی نشاسته امکان تولید قندهای احیاء کننده وجود دارد. بنابراین هنگام پیش‌بینی سرعت تغییر غلظت قندهای احیاء کننده در سطح، هر دو مکانیسم (تولید و دی‌فوزیون قند احیاء) باید در نظر گرفته شوند. Califano & Calvelo (1983) گزارش داده اند که طی آنزیم بری سیب زمینی در دمای پایین‌تر از °C ۷۵، در نتیجه هیدرولیز آنزیمی نشاسته، قندهای احیاء کننده می‌توانند تولید شوند. در تحقیق Califano & Calvelo (1983) میزان تولید قندهای احیاء کننده در شروع فرآیند آنزیم بری (کمتر از ۲ دقیقه از شروع آنزیم بری) ناچیز و کمتر از ۱٪ مقدار اولیه قندهای احیاء کننده گزارش شده و ضریب دی‌فوزیون مؤثر قندهای احیاء کننده با در نظر گرفتن اثر تولید آن‌ها در دمای °C ۶۰ محاسبه شده است. به علت تخریب کامل آنزیم انورتاز و ژلاتیناسیون نشاسته در دماهای بالاتر از °C ۷۵، این فرآیند به حداقل می‌رسد (Presscy, 1967). محققین دیگری نیز در مطالعات خود در مورد سیب زمینی شیرین به نتایج مشابه دست یافتند (Ikemiya & Deobald, 1966; Sistrunk, 1977). سبزیجات کاروتنوئیدی به علت اثرات سودمندشان از قبیل فعالیت پیش‌سازی ویتامین A و خواص آنتی‌اکسیدانی، همواره مورد توجه بوده‌اند. علاوه بر این کاروتنوئیدها عامل رنگ زرد تا قرمز سبزیجاتی مانند سیب زمینی و هویج بوده و معرف ارزش تغذیه‌ای بالای آنها هستند. بنابراین اندازه‌گیری رنگ می‌تواند یک معرف سریع جهت ارزیابی محتوای کاروتنوئید در سیب زمینی آنزیم بری شده باشد. تیمار حرارتی سبب ایزومریزاسیون کاروتنوئیدها، کاهش فعالیت بیولوژیک آن‌ها و تعدیل رنگ محصول می‌شود (Goncalves et al., 2010).

هدف از این مطالعه بررسی سینتیک تولید و خروج

قندهای احیاء کننده و تغییرات رنگ خلال سیب زمینی طی آنزیم بری در آب داغ و توسعه برخی مدل‌های ریاضی برای

(RMSE) به عنوان معیارهای مقایسه استفاده گردید (Pedreschi et al., 2007):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{v_{exp} - v_{cal}}{v_{exp}} \right)^2} \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$R^2 = \frac{\sum (v_{exp} - \bar{v}_{exp})(v_{cal} - \bar{v}_{cal})}{\sqrt{\sum (v_{exp} - \bar{v}_{exp})^2 \cdot \sum (v_{cal} - \bar{v}_{cal})^2}} \quad (\text{رابطه ۸})$$

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

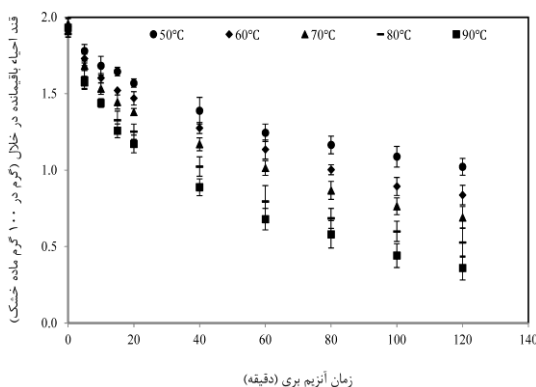
### طرح آماری مورد استفاده

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

#### خروج قندهای احیاءکننده طی آنزیم بری در دماهای مختلف

شکل ۱ تغییرات خروج قندهای احیاءکننده از خلال سیب زمینی طی آنزیم بری در دماهای مختلف را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش دما و زمان فرایند آنزیم بری، میزان قندهای احیاءکننده باقیمانده در خلال کاهش می‌یابد که این کاهش در دماهای بالاتر شدیدتر می‌باشد.



شکل ۱. تغییرات خروج قندهای احیاءکننده از خلال‌های سیب زمینی طی آنزیم بری در دماهای مختلف

با افزایش زمان آنزیم بری به طور معنی داری ( $P < 0.01$ ) کاهش قندهای احیاءکننده تحت تأثیر قرار گرفته و سرعت این کاهش در دقایق اولیه فرایند بیشتر است و به طور میانگین

(مدل RGB-1002، ساخت تایوان) صورت گرفت. داده‌های به دست آمده با استفاده از نرم افزار easyRGB به سامانه CIE به صورت شاخص‌های تیرگی-روشنی، قرمزی-سبزی و زردی-آبی تبدیل شدند. در این سامانه دامنه تغییرات شاخص تیرگی-روشنی از ۰ تا ۱۰۰ (هرچه اعداد به سمت ۱۰۰ پیش می‌روند، تمایل به روشن‌تر است و در جهت ۰ تمایل به تیرگی افزایش می‌یابد) و دامنه تغییرات دو شاخص دیگر از ۱۰۰- تا ۱۰۰+ (در جهت ۱۰۰+ تمایل به قرمزی و زردی بیشتر است و در جهت ۱۰۰- تمایل به سبزی و آبی افزایش می‌یابد) می‌باشد (Pedreschi et al., 2006).

#### مدل‌سازی سینتیکی تغییرات قندهای احیاء و شاخص‌های رنگ خلال سیب زمینی طی آنزیم بری

برای توصیف تغییرات مقدار قند احیاء باقیمانده در خلال (رابطه ۱) و شاخص‌های تیرگی-روشنی (رابطه ۲) و زردی-آبی (رابطه ۳) از معادلات سینتیکی واکنش‌های تک مولکولی درجه اول و برای توصیف تغییرات قند احیاء تولید شده در خلال (رابطه ۴) و شاخص قرمزی-سبزی (رابطه ۵) از معادلات سینتیکی درجه اول با اثر محدود کنندگی محصول استفاده گردید (Villota & Hawkes, 1992):

$$C_{RS} = C_{0RS} \cdot \exp(-k_e t - B) \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$L^* = L_0^* \cdot \exp(-k_L^* t - B_L^*) \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$b^* = b_0^* \cdot \exp(-k_b^* t - B_b^*) \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$C_{RS}^* = C_{eRS}^* \cdot (1 - \exp(-k_g t - B_g)) \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$a^* = a_e^* \cdot (1 - \exp(-k_a^* t - B_a^*)) \quad (\text{رابطه ۵})$$

در روابط بالا پارامترهای  $k_e$ ،  $k_L^*$ ،  $k_b^*$  و  $k_a^*$  نشان دهنده ثابت سرعت فرایند مورد نظر و پارامترهای  $B$ ،  $B_L^*$ ،  $B_b^*$ ،  $B_g$  و  $B_a^*$  نشان دهنده فاکتور پری اکسپوننشیل مربوط به فرایند مورد نظر هستند و  $C_{RS}^*$  و  $C_{eRS}^*$  به ترتیب نشان دهنده مقدار قند احیاء تولید شده طی آنزیم بری و مقدار نهایی قند احیاء تولید شده می‌باشند. برای بیان وابستگی دمایی ثابت‌های سرعت از رابطه آرنیوس استفاده شد (Villota & Hawkes, 1992):

$$k = k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (\text{رابطه ۶})$$

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  $8.314 \text{ (J/mol.K)}$  و دمای مطلق سرخ کردن.

تایید مدل با استفاده از مقایسه داده‌های آزمایشگاهی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌های سینتیکی انجام شد. از فاکتورهای ضریب تبیین ( $R^2$ ) و ریشه میانگین مربعات خطا

مقدار قند تولید شده تا دقیقه پنج با دیگر زمان‌های آنزیم بری معنی دار می‌باشد ( $P < 0.01$ ). از دقیقه بیست به بعد تولید قندهای احیاء کننده متوقف شده و تفاوت بین زمان‌های آنزیم بری بیست و چهل دقیقه معنی دار نمی‌باشد ( $P < 0.01$ ). بر اساس نتایج، بیشترین میزان تولید قند احیاء مربوط به دمای  $50^{\circ}\text{C}$  می‌باشد ( $0.58/25\%$  از کل قند تولید شده) و اختلاف آن با دو دمای دیگر معنی دار است ( $P < 0.01$ ). میزان قند تولید شده در دمای  $70^{\circ}\text{C}$  در مقایسه با دو دمای دیگر ناچیز بوده و به طور معنی دار ( $P < 0.01$ ) پایین‌تر است. با افزایش زمان آنزیم بری، میزان تولید قندهای احیاء کننده افزایش می‌یابد که این افزایش برای دمای  $50^{\circ}\text{C}$  تا دقیقه بیست، برای دمای  $60^{\circ}\text{C}$  تا دقیقه ده و برای دمای  $70^{\circ}\text{C}$  فقط تا دقیقه پنج آنزیم بری معنی دار است. توقف تولید قندهای احیاء کننده در این سه دما به ترتیب پس از ۲۰ دقیقه، ۱۵ دقیقه و ۵ دقیقه از شروع آنزیم بری اتفاق می‌افتد. بخش عمده قند تولید شده مربوط به ۵ دقیقه اول فرایند است. درصد قند احیاء تولید شده در دماهای  $50^{\circ}\text{C}$ ،  $60^{\circ}\text{C}$  و  $70^{\circ}\text{C}$  به ترتیب  $0.3/54\%$ ،  $0.1/64\%$  و  $0.0/75\%$  برآورد گردید. Califano & Calvelo (1983) گزارش نموده اند که طی آنزیم بری سیب زمینی در دماهای پایین‌تر از  $75^{\circ}\text{C}$ ، در نتیجه هیدرولیز آنزیمی نشاسته، قندهای احیاء کننده می‌توانند تولید شوند. در مطالعه مذکور جهت شبیه‌سازی شرایط بدون دیفوزیون قندی، یک قطعه سیب زمینی کروی شکل در تماس با هوای داغ با دمای  $68/2^{\circ}\text{C}$  -  $59/6^{\circ}\text{C}$  قرار گرفت و گزارش شد که طی زمان‌های معمول آنزیم بری (کمتر از ۱۵ دقیقه) مقدار قندهای احیاء کننده حدود  $0.1\%$  افزایش یافت. همچنین در مطالعه مذکور، میزان تولید قندهای احیاء کننده در شروع فرایند آنزیم بری (کمتر از ۲ دقیقه از شروع آنزیم بری) ناچیز و کمتر از  $0.1\%$  مقدار اولیه قندهای احیاء کننده تخمین زده شده است.

مقدار انرژی فعال سازی فرایند تولید قندهای احیاء کننده در محدوده دمایی  $50^{\circ}\text{C}$  -  $70^{\circ}\text{C}$ ،  $40/70.53$  ( $\text{kJ/mol}$ ) برآورد گردید (جدول ۱).

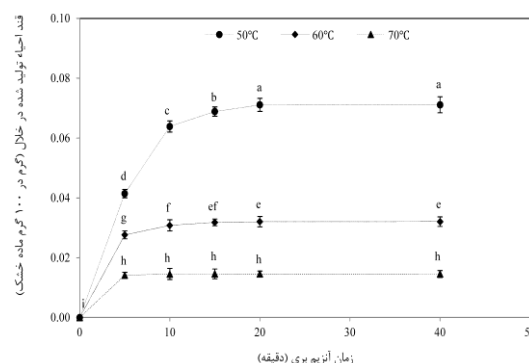
### تغییرات رنگ خلال سیب زمینی طی آنزیم بری در دماهای مختلف

شکل ۳ تغییرات شاخص تیرگی-روشنی خلال سیب زمینی طی آنزیم بری در دماهای مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مذکور با افزایش دما و زمان آنزیم بری، روشنی خلال‌ها کاهش می‌یابد.

$13/21\%$  از محتوای قندی اولیه خلال‌ها، طی ۵ دقیقه ابتدایی فرایند آنزیم بری از سطح خلال‌ها وارد آب آنزیم بری شده است. همچنین درصد کاهش قند احیاء در ۵ دقیقه ابتدایی فرایند آنزیم بری با افزایش دما از  $50^{\circ}\text{C}$  -  $90^{\circ}\text{C}$ ، از میزان  $0.7/42\%$  در دمای  $50^{\circ}\text{C}$  به میزان  $0.18/51\%$  در دمای  $90^{\circ}\text{C}$  افزایش یافته است. مشابه با نتایج به دست آمده در این مطالعه، Pedreschi *et al.* (2007) گزارش کرده‌اند که با افزایش دمای آنزیم بری، سرعت استخراج قندهای احیاء کننده از بافت ورقه‌های سیب زمینی افزایش می‌یابد و با ادامه فرایند به علت ژلاتیناسیون نشاسته سطحی، سرعت خروج قندهای احیاء کننده کاهش می‌یابد و قسمت عمده خروج قندها طی ۴۰ ثانیه اول آنزیم بری اتفاق می‌افتد. ثابت‌های سینتیکی خروج قندهای احیاء کننده در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

### تولید قندهای احیاء کننده طی آنزیم بری در دماهای مختلف

تغییرات تولید قندهای احیاء کننده طی آنزیم بری در دماهای مختلف در شکل ۲ نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، تولید قندهای احیاء کننده با افزایش زمان آنزیم بری افزایش یافته و سپس متوقف می‌شود. با افزایش دمای آنزیم بری، مدت زمان تولید و میزان تولید قندهای احیاء کننده کاهش می‌یابد ولی سرعت یا شیب تولید قند احیاء با افزایش دما افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است آزمایش ارزیابی تولید قند طی آنزیم بری در دماهای  $80^{\circ}\text{C}$  و  $90^{\circ}\text{C}$  نیز انجام گردید ولی در این محدوده دمایی هیچ گونه تولید قندی مشاهده نشد.

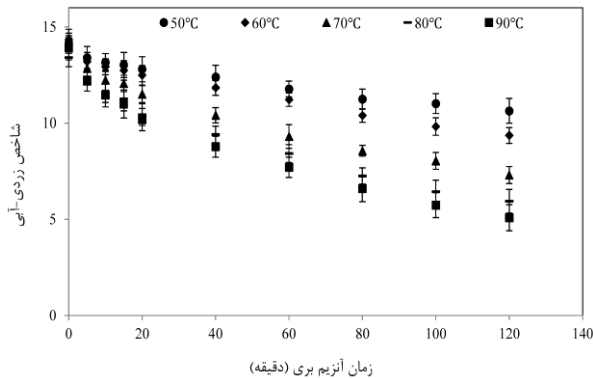


شکل ۲. تغییرات تولید قندهای احیاء کننده طی آنزیم بری در دماهای مختلف.

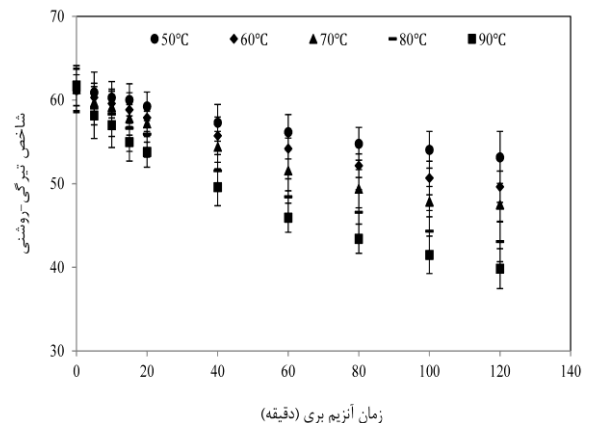
اثر دما و زمان بر تولید قندهای احیاء کننده در سطح احتمال  $0.1\%$  معنی دار می‌باشد. همچنین، بخش عمده تولید قندهای احیاء کننده طی ۵ دقیقه ابتدایی فرایند آنزیم بری اتفاق می‌افتد ( $70/68\%$  از کل قند احیاء تولید شده) و اختلاف

جدول ۱. پارامترهای سینتیکی خواص کیفی طی آنزیم بری خلال سیب زمینی در دماهای مختلف.

شماره ردیف	فاکتور مورد نظر (متغیر وابسته) طی آنزیم بری	نوع و درجه مدل سینتیکی	ثابت سرعت (بر ثانیه) دما (°C)					انرژی فعال سازی (KJ/mol)		فاکتور Pre exponential		قابلیت انطباق مدل با داده‌های آزمایشی	
			۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	$E_{ak}$	$E_{aB}$	$k_0$	$B_0$	$R^2$	%RMSE
۱	قند احیاء باقیمانده	درجه اول	۰.۰۰۵۱	۰.۰۰۶۶	۰.۰۰۸۱	۰.۰۱۰۲	۰.۰۱۳۲	۲۲:۷۸۰۴	۱۹:۴۲۹۸	۲۴:۳۶۱۴	۱۱۴:۰۹۱۴	۰.۹۷۵ - ۰.۹۸۰	۷۳:۳۷۹ - ۳:۹۲۹
۲	قند احیاء تولید شده	درجه اول با اثر محدودکنندگی محصول	۰.۰۲۳۵۰	۰.۳۲۰۰	۰.۵۷۰۰	-	-	۴۰:۷۰۵۲	۲۰:۶۲۵۲	$۸:۴۷ \times 10^{-3}$	$۷:۱۵ \times 10^{-2}$	۰.۹۹۹ - ۰.۹۹۶	۰.۱۱۰ - ۰.۲۴
۵	شاخص تیرگی-روشنی	درجه اول	۰.۰۱۲۲	۰.۰۱۷۶	۰.۰۲۲۲	۰.۰۲۹۴	۰.۰۳۵۲	۲۵:۸۰۶۷	۵۲:۴۲۶۴	۱۸:۸۲۱۵	$۱:۷۸ \times 10^4$	۰.۹۹۹ - ۰.۹۸۳	۱۳:۳۴۱ - ۰:۷۸۴
۶	شاخص قرمزی-سزی	درجه اول با اثر محدودکنندگی محصول	۰.۰۲۱۰	۰.۰۲۳۰	۰.۰۲۶۰	۰.۰۲۷۰	۰.۰۳۰۰	۸:۵۳۰۲	۱۰:۹۴۹۵	۰:۵۰۴۶	۰:۰۴۶۵	۰.۹۹۳ - ۰.۹۷۹	۱:۱۱۵ - ۰:۵۵۲
۷	شاخص زردی-آبی	درجه اول	۰.۰۰۲۰	۰.۰۰۳۰	۰.۰۰۵۰	۰.۰۰۶۰	۰.۰۰۷۰	۳۱:۴۱۸۶	۱۸:۶۶۵۰	۲۵:۷۷۵۲	۴۴:۳۴۵۰	۰.۹۸۸ - ۰.۹۷۹	۵:۸۵۹ - ۱:۶۶۷

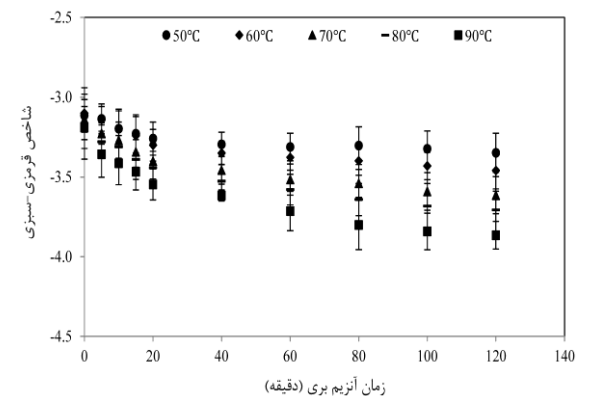


شکل ۵. تغییرات شاخص زردی-آبی خلال سیب زمینی طی آنزیم بری در دماهای مختلف.



شکل ۳. تغییرات شاخص تیرگی-روشنی خلال سیب زمینی طی آنزیم بری در دماهای مختلف.

رنگ خلال در مرحله آنزیم بری بیشتر تابع میزان ماده خشک و نشاسته ژلاتینه شده آن می‌باشد. در دماهای پایین (۵۰ و ۶۰ °C) به علت اینکه هنوز ژلاتیناسیون نشاسته آغاز نشده است، کاهش شاخص تیرگی-روشنی اندک می‌باشد اما در دماهای بالاتر به علت شروع و گسترش ژلاتیناسیون نشاسته، کاهش شاخص مذکور تشدید شده و در دمای ۹۰ °C بیشترین کاهش مشاهده می‌گردد. Pedreschi *et al* (2009) آنزیم بری در دمای پایین را عامل رنگ روشن تر ورقه‌های سیب زمینی معرفی نموده است. Sylvia *et al* (1997) معتقد است زمان طولانی آنزیم بری موجب تیرگی رنگ محصول می‌شود.



شکل ۴. تغییرات شاخص قرمزی-سبزی خلال سیب زمینی طی آنزیم بری در دماهای مختلف.

### نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق، سینتیک تولید و خروج قندهای احیاء کننده و تغییرات رنگ خلال سیب زمینی طی آنزیم بری در آب داغ مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج بررسی‌ها نشان داد که افزایش دمای آنزیم بری سبب تسریع خروج قندهای احیاء کننده و تولید آن‌ها در خلال سیب زمینی شده و با افزایش دما تولید قندهای احیاء کننده به تدریج متوقف می‌شود. با گذشت زمان آنزیم بری مقدار قند احیاء باقیمانده در خلال در اثر دیفوزیون به داخل آب آنزیم بری کاهش می‌یابد. طی آنزیم بری، شاخص‌های رنگ خلال با افزایش دما و زمان آنزیم بری کاهش می‌یابند. شاخص‌های زردی-آبی و قرمزی-سبزی به ترتیب بیشترین و کمترین حساسیت را در برابر آنزیم بری نشان می‌دهند. نتایج بررسی مدل‌های سینتیکی نشان داد که مدل درجه اول با اثر محدود کنندگی محصول بیشترین انطباق را با داده‌های آزمایشگاهی تولید قندهای احیاء و شاخص قرمزی-سبزی داراست. درحالی‌که خروج قندهای احیاء کننده و تغییر شاخص‌های تیرگی-روشنی و زردی-آبی از سینتیک درجه اول تبعیت می‌نمایند. با توجه به نتایج به دست آمده، این تحقیق می‌تواند جهت بهینه‌سازی فرآیند آنزیم بری به منظور تولید محصولی با سطح مناسب قندهای احیاء کننده و تغییر رنگ کمتر محصول قبل از مرحله سرخ کردن مورد استفاده قرار گیرد.

طی آنزیم بری مقادیر شاخص‌های قرمزی-سبزی و زردی-آبی نیز کاهش می‌یابد (شکل‌های ۴ و ۵). سرعت کاهش دو شاخص مذکور با افزایش دما، افزایش می‌یابد. Goncalves *et al* (2010) مقدار انرژی فعال سازی تغییرات شاخص‌های تیرگی-روشنی، قرمزی-سبزی و زردی-آبی هویج را با به کارگیری سینتیک درجه اول طی آنزیم بری به ترتیب  $187/03$ ،  $186/39$  و  $231/16$  (kJ/mol) گزارش نموده‌اند، که بیشتر از مقادیر به دست آمده در این تحقیق (ردیف‌های ۷-۵ جدول ۱) می‌باشد. علت این اختلاف می‌تواند به حساسیت حرارتی پایین‌تر رنگ دانه‌های سیب زمینی نسبت به هویج مربوط باشد.

در مطالعه Goncalves *et al* (2010) مقدار انرژی فعال سازی برای شاخص‌های رنگ سایر سبزیجات کاروتنوئیدی  $11/4 - 36/8$  (kJ/mol) عنوان شده است که مقادیر بدست آمده در این تحقیق در محدوده مذکور قرار دارد. با توجه به نتایج به دست آمده، در بین شاخص‌های رنگ بیشترین مقدار انرژی فعال سازی مربوط به شاخص زردی-آبی ( $31/4186$  (kJ/mol)) و کمترین انرژی فعال سازی مربوط به شاخص قرمزی-سبزی ( $8/5302$  (kJ/mol)) می‌باشد، بنابراین می‌توان این گونه نتیجه‌گیری کرد که حساس ترین شاخص رنگ سیب زمینی به تیمار آنزیم بری، شاخص زردی-آبی بوده و کمترین حساسیت مربوط به شاخص قرمزی-آبی است. مقایسه داده‌های آزمایشی مربوط به شاخص‌های رنگ با مقادیر پیش بینی شده توسط مدل (ردیف‌های ۷-۵ جدول ۱) نشان می‌دهد که همبستگی خوبی مابین آن‌ها وجود دارد.

### REFERENCES

- Agblor, A., and Scanlon, M. (2002). Effect of storage period, cultivar and two growing locations on the processing quality of French fried potatoes. *American Journal of Potato Research*, 79, 167-172.
- Aguilar, C., Anzaldúa, A., Talamas, R., and Gastelom, G. (1997). Low-temperature blanch improves textural quality of French fries. *Journal of Food Science*, 62(3), 568-571.
- AOAC Association Official Analytical Chemists. (1984). *The official methods of analysis*. Method 28.074. Arlington, VA: AOAC.
- Califano, A. N., and Calvelo, A. (1983). Heat and mass transfer during the warm water blanching of potatoes. *Journal of Food Science*, 48, 220-225.
- Califano, A. N., and Calvelo, A. (1987). Adjustment of surface concentration of reducing sugars before frying of potato strips. *Journal of Food Processing and Preservation*, 12, 1-9.
- Garrote, R.L., Bertone, R.A., and Silva, E.R. (1984). Effect of soaking-blanching conditions on glucose losses in potato slices. *Journal of Canadian Institute of Food Science and Technology*, 17, 111-113.
- Garrote, R. L., Bertone, R. A., and Silva, E. R. (1984). Effect of soaking-blanching conditions on glucose losses in potato slices. *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal*, 17, 111 - 113.
- Goncalves, E. M., Pinheiro, J., Abreu, M., Brandao, T. R. S., and Silva, C. L. M. (2010). Carrot (*Daucus carota* L.) peroxidase inactivation, phenolic content and physical changes kinetics due to blanching. *Journal of Food Engineering*, 97, 574-581.
- Gonzalez-Martinez, G., Ahrné, L., Gekas, V., and Sjöholm, I. (2004). Analysis of temperature distribution in potato tissue and its effect on the absolute residual pectin methylesterase activity. *Journal of Food Engineering*, 65, 433-441.
- Ikemiya, M., and Deobald, H. J. (1966). New characteristic alphaamylase in sweet potatoes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 14(3), 237.
- Kaymak, F., and Suzan Kincal, N. (1994). Apparent diffusivities of reducing sugars in potato strips

- blanched in water. I. *Journal of Food Science and technology*, 29, 63-70.
- Medeiros Vinci, R., Mestdagh, F., and Meulenaer, B.D. (2012). Acrylamide formation in fried potato products – Present and future, a critical review on mitigation strategies. *Journal of Food Chemistry*, 133, 1138-1154.
- Medeiros Vinci, R., Mestdagh, F., Van Poucke, C., Kerkaert, B., De Muer, N., and Denon, Q. (2011). Implementation of acrylamide mitigation strategies on industrial production of French fries: Challenges and pitfalls. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59, 898–906.
- Miller, G. (1959). Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing Sugar. *Analytical Chemistry*, 31, 426–428.
- Miranda, M., and Aguilera, J.M. (2006). Structure and texture properties of fried potato Products. *Food Reviews International*, 22, 173–201.
- Moyano, P., Troncoso, E., and Pedreschi, F. (2007). Modeling texture kinetics during thermal processing of potato products. *Journal of Food Science*, 72, 102–107.
- Pedreschi, F., Travisany, X., Troncoso, C. R. E., and Pedreschi, R. (2009). Kinetics of extraction of reducing sugar during blanching of potato slices. *Journal of Food Engineering*, 91, 443–447.
- Pedreschi, F., Leon, J., Mery, D., Moyano, P. (2006). Implementation of a computer vision system to measure the color of potato chips. *Food Research International* 39, 1092–1098.
- Pedreschi, F., Kaack, K., and Granby, K. (2004). Reduction of acrylamide formation in potato slices during frying. *Lebensmittel Wissenschaft und-Technologie/Food Science and Technology (lwt)*. 37 (6), 679–685.
- Presscy, R. (1967). Invertase inhibitor from potatoes. Purification, characterization and reactivity with plant invertases. *Plant Physiology*, 42, 1780.
- Saravacos, G. D., and Maroulis, Z. B. (2001). *Transport Properties of Foods*. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Sistrunk, W. A. (1977). Relationship of storage, handling and cooking method to color, hard core tissue and carbohydrate composition in sweet potatoes. *Journal of American Society and Horticultural Science*, 102(4), 381.
- Sylvia, K. E., Watter, W. M., and Giesbercht, F. G. (1997). Alkali-processed sweet potato French fries. *Journal of Food Quality*, 20, 17-30.
- Villota, R., and Hawkes, J. G. (1992). *Reaction kinetics in food systems*. In: Handbook of food Engineering, D. R. Heldman, D. B. Lund, eds. Marcel Dekker, New York.