[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1394.5.18.7.2]

[DOI: 10.18869/acadpub.jcpp.5.18.75]

تأثیر افزودن بتاسیکلودکسترین و کلرید سدیم به روغن، روی سینتیک چروکیدگی، طی سرخ‌کردن قطعات سیب‌زمینی

جلال دهقان‌نیا[1*]، ژیلا رنجزاد[2] و بابک قنبرزاده[3]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۴/۱۵ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۴/۴)

چکیده

هدف این تحقیق، بررسی تأثیر شرایط فرآیند و افزودن بتاسیکلودکسترین و کلرید سدیم به روغن روی سینتیک چروکیدگی طی سرخ‌کردن قطعات سیب‌زمینی بود. بتاسیکلودکسترین در غلظت‌های ۰/۳ و ۰/۶ گرم در لیتر و کلرید سدیم با غلظت‌های ۱ و ۳ درصد به روغن سرخ‌کردنی افزوده شد. سپس قطعات سیب‌زمینی با ابعاد ۴×۱/۲×۱/۲ سانتی‌متر مکعب در دماهای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سلسیوس و زمان‌های ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ ثانیه سرخ شدند. نتایج نشان داد که با افزایش دمای فرآیند از ۱۵۰ تا ۱۹۰ درجه سلسیوس، میزان چروکیدگی قطعات سیب‌زمینی افزایش پیدا می‌کند. علاوه بر این، افزایش زمان سرخ‌کردن نیز منجر به افزایش میزان این پارامتر گردید. تیمارهای کلرید سدیم و بتاسیکلودکسترین در هر دو غلظت، به‌صورت مجزا و تلفیقی، میزان چروکیدگی را نسبت به نمونه شاهد به‌طور میانگین از ۰/۳۱۴ تا ۰/۲۷۸ (۱۱/۴۶٪) کاهش دادند. به‌دلیل فقدان مدل‌های تجربی مناسب در منابع جهت مدل‌سازی چروکیدگی طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق، تعدادی مدل تجربی برای مدل‌سازی این پارامتر پیشنهاد گردید. میانگین ضریب همبستگی بین نتایج آزمایش با یافته‌های حاصل از این مدل‌ها بالا بود. استفاده از ترکیبات مؤثر بر کشش سطحی هم‌چون بتاسیکلودکسترین و کلرید سدیم، به‌عنوان یک راه‌کار امیدبخش در بهبود ویژگی‌های کمی و کیفی محصولات سرخ‌شده از جمله کاهش میزان چروکیدگی نمونه‌ها، می‌تواند در تحقیقات مختلف مدنظر قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی، پارامترهای فرآیند، جذب روغن، چروکیدگی

۱ و ۳. به‌ترتیب دانشیار و استاد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۲. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، پردیس بین‌المللی ارس

*. مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: J_dehghannya@tabrizu.ac.ir

مقدمه

در میوه‌ها و سبزی‌هایی مانند سیب‌زمینی که محتوای رطوبت اولیه بالایی دارند، خروج آب حین حرارت دیدن، باعث کاهش فشار وارده از مایع داخل سلولی بر دیوارهٔ سلولی شده و این عدم تعادل فشار بین داخل و خارج مادهٔ غذایی، انقباضاتی ایجاد می‌کند که در نهایت منجر به فروپاشی و تغییر در شکل و یا چروکیدگی مادهٔ غذایی می‌شود که این تغییرات به‌همراه تغییرات ایجاد شده در رنگ، خصوصیات انتقالی و کیفیت محصول نهایی را تحت تأثیر قرار می‌دهند (۳، ۸، ۱۳، ۱۷، ۱۸، ۲۰، ۲۴، ۲۵ و ۲۶).

چروکیدگی به‌صورت کاهش در ابعاد و اندازه مادهٔ غذایی تعریف می‌شود (۱۲) ابتدا در قسمت سطحی اتفاق افتاده و سپس به نواحی درونی پیش‌روی می‌کند. این پدیده سطحی در فرآیند سرخ‌کردن، در مراحل اولیه رابطهٔ مستقیمی با مقدار رطوبت خارج شده از محصول دارد؛ یعنی هر چقدر رطوبت خارج شده از محصول بیشتر باشد به‌همان اندازه تغییرات حجمی نیز افزایش یافته و به میزان چروکیدگی نیز اضافه می‌گردد و تقریباً معادل مقدار رطوبت خارج شده می‌باشد و در مراحل نهایی به‌دلیل کاهش محتوای رطوبت از مقدار آن کاسته می‌شود. از طرف دیگر، تشکیل پوستهٔ سخت در مادهٔ غذایی در مراحل پایانی فرآیند سرخ‌کردن، مانعی در برابر خروج رطوبت بوده و این پدیده منجر به کاهش چروکیدگی در زمان‌های نهایی سرخ‌کردن می‌گردد (۹ و ۲۲). بنابراین، میزان خروج آب از مادهٔ غذایی طی فرآیند سرخ‌کردن، رابطه بسیار نزدیکی با بروز پدیده چروکیدگی دارد. هرناندز و همکاران در سال ۲۰۰۰ (۱۱) و الم‌حتسب و همکاران در سال ۲۰۰۴ (۱) در تحقیق‌های خود به این نتیجه رسیده‌اند که بین میزان چروکیدگی حجمی و محتوای رطوبت ارتباط تنگاتنگی وجود دارد.

با گذشت زمان در طول فرآیند سرخ‌کردن، به‌دلیل خروج رطوبت از داخل مادهٔ غذایی به‌صورت انتشار، فشار بخار در داخل فضاهای خالی افزایش و حجم این فضاها گسترش می‌یابد؛ با افزایش حجم فضاهای خالی، با توجه به رابطه شماره (۱)، از میزان دانسیته ظاهری نیز کاسته می‌شود. بنابراین، می‌توان گفت که در نتیجه خروج رطوبت به‌صورت بخار، کاهش دانسیته ظاهری منجر به افزایش میزان چروکیدگی محصول می‌گردد (۱۲).

$$\rho = \frac{M}{V} \qquad (۱)$$

در رابطه ۱، ρ دانسیته ظاهری محصول (g/cm^3)، M جرم محصول (g) و V حجم ظاهری محصول (cm^3) می‌باشد.

از طرف دیگر، به‌دلیل ارتباط بین حجم مادهٔ غذایی با ویژگی‌های مکانیکی و ریزساختاری آن، یکی از خصوصیات فیزیکی مهم در مادهٔ غذایی خام یا سرخ‌شده، حجم نمونهٔ غذایی می‌باشد. به‌طوری‌که شرایط فرآیند از جمله دما و زمان فرآیند سرخ‌کردن، میزان از دست دادن رطوبت، ضخامت اولیه مادهٔ غذایی و میزان جذب روغن، تأثیر قابل ملاحظه‌ای در میزان چروکیدگی محصول دارد (۵، ۷، ۱۰، ۱۹ و ۲۹). در این راستا، بایک و میتال (۴) بیان کرده‌اند که افزایش دمای سرخ‌کردن منجر به افزایش میزان چروکیدگی در زمان‌های مشابه سرخ‌کردن شده و حدود ۵۰ درصد میزان چروکیدگی در یک سوم اولیه از کل زمان فرآیند سرخ‌کردن رخ می‌دهد. ضیائی‌فر و همکاران (۲۸) نیز، اثر دما و زمان سرخ‌کردن بر میزان چروکیدگی قطعات سیب‌زمینی را بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که با افزایش دمای سرخ‌کردن در زمان‌های یکسان فرآیند، چروکیدگی در قطعات سیب‌زمینی افزایش پیدا می‌کند. هم‌چنین تقریباً نصف میزان چروکیدگی در مراحل اولیه سرخ‌کردن رخ می‌دهد و در نهایت، به‌علت تشکیل یک پوسته سخت و محکم، چروکیدگی متوقف می‌گردد. بنابراین، می‌توان با اتخاذ دمای مناسب و راه‌کارهایی برای کاهش از دست دادن آب در طی فرآیند، میزان چروکیدگی را به حداقل مقدار ممکن کاهش داد.

یکی از راه‌کارهای پیشنهادی، استفاده از ترکیباتی است که کشش سطحی بین مادهٔ غذایی و روغن را تحت تأثیر قرار دهند که از آن جمله می‌توان به سیکلودکسترین‌ها و الکترولیت‌های قوی اشاره نمود. سیکلودکسترین‌ها از دسته مولکول‌های

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.22518517.1394.5.18.7.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jcpp.5.18.75]

سیکلواولیگوساکارید می‌باشند که از تجزیـه نشاسـته بـه‌دسـت می‌آیند. ساختار خاص سیکلودکسترین‌هـا شـامل یـک بخـش داخلی آب‌گریز و بخش بیرونی آب‌دوست است که آنها را قادر می‌سازد تا عوامل فعال سطحی را در داخل حفره‌های خود بـه شکل کمپلکس‌های میزبـان – مهمـان (Host-guest inclusion) به دام انداخته (۱۶) و از طرف دیگر به‌دلیل ساختار آب‌دوستی بخش خارجی و جذب در سطح مادهٔ غذایی، موجـب افـزایش کشش سطحی و در نتیجه کاهش میزان انتقال جـرم (از دسـت دادن رطوبت و جذب روغن) می‌گردد. الکترولیت‌های قوی از جمله کلرید سدیم نیز، به‌دلیل ماهیت یونی خود، با جـذب در لایه سطحی و به‌دلیل افزایش کشش سطحی بین مادهٔ غـذایی و روغن، از دست دادن آب و جـذب روغـن در مـادهٔ غـذایی را کاهش می‌دهند (۱۵).

از آنجایی‌که، یکی از اهداف اصلی فرآیند سرخ‌کـردن عمیـق، کاهش محتوای رطوبت مادهٔ غذایی تا یک حد معین می‌باشد و از طرف دیگر، خروج رطوبت (به‌جز برای محتـوای رطوبـت بسـیار پایین) از مادهٔ غذایی طی فرآیند سرخ‌کـردن، از عوامـل اصـلی در بروز پدیده کـاهش حجـم و در نتیجـه، چروکیـدگی در محصـول نهایی سرخ‌شده می‌باشد، بنابراین، مدل‌سازی و پیش‌بینی تغییـرات حجمی یا ابعادی مادهٔ غذایی طی فرآیند سرخ‌کردن، حائز اهمیـت می‌باشـد (۶ و ۲۳). بنـابراین، هـدف ایـن مطالعـه، بررسـی تـأثیر افزودن بتاسیکلودکسترین و کلرید سـدیم بـه روغـن روی میـزان چروکیدگی قطعات سیب‌زمینی طی فرآینـد سـرخ‌کـردن عمیـق و مدل‌سازی چروکیدگی در طول این فرآیند بود.

مواد و روش‌ها

مواد

سیب‌زمینی (رقم آگریا محصول بومی اسـتان آذربایجـان‌شـرقی بـا درصـد رطوبـت اولیـه ۸۴/۸۲٪) و روغـن مـایع بـه‌عنـوان مواد خـام مـورد اسـتفاده قـرار گرفتنـد. سـیب‌زمینـی از بـازار محلـی خریـداری و قبـل از انجـام آزمایشـات در سـردخانه بالای صفر نگهداری شد. روغن مـورد اسـتفاده در ایـن مطالعـه، روغـن مـایع مخصـوص سـرخ‌کردنـی بهـار (مخلـوطی از روغن‌های آفتابگردان، سویا و پنبه‌دانه تهیه شده در شرکت صنعتی بهشـهر) بـود. از بتاسیکلودکسـترین بـا درجـه خلـوص ۹۷٪≤ (Cyclomaltoheptaose ساخت شرکت Sigma امریکـا) و کلرید سدیم بـا درجـه خلـوص ۹۹٪≤ (Sodium chloride ساخت شرکت Merck آلمان) نیز به‌عنوان افزودنـی بـه روغـن سرخ‌کردنی استفاده گردید.

تجهیزات

سرخ‌کن مورداستفاده در این تحقیق، سرخ‌کن Moulinex (مدل F430.R، با ظرفیت ۲/۲ لیتر روغن، ساخت فرانسه، مجهـز بـه سیستم تنظیم دما در محدوده ۱۵۰ تـا ۱۹۰ درجـه سلسـیوس، دارای محفظـه ضـد زنـگ و سـبد جـدا شـونده) بـود. آون کنوکسیونی (مدل BM120، ۱۲۰ لیتری، ساخت ایران، شـرکت فن‌آزما گستر، هوشمند و مجهز به فن سیرکولاسیون هـوا) نیـز جهت اندازه‌گیری مقدار رطوبت نمونه‌ها استفاده شد.

آماده‌سازی نمونه‌ها

پس از شستشو و پوست‌گیری سیب‌زمینی‌ها، برای تهیه نمونه‌ها بـه شـکل قطعـات مکعـب مسـتطیل بـا ابعـاد ۴× ۱/۲ × ۱/۲ سانتی‌متر (طول × عرض × ارتفاع)، از یک کاتر دستی طراحـی شده با همین ابعاد استفاده شد. نمونه‌های برش داده شده جهت جلوگیری از اتلاف رطوبت در درون یک پلیت قـرار گرفتـه و قبل از سرخ‌کردن، جهت حذف نشاسته سـطحی بـا آب مقطـر شستشو داده شدند. آب اضافی با کاغذ جاذب رطوبـت گرفتـه شده و قطعات سیب‌زمینی تا زمان سـرخ‌کـردن در پلیـت‌هـای دربسته جهت جلوگیری از افت رطوبـت نگهـداری شـدند. در مرحله بعد، نمونه‌ها برحسب نوع و میزان مواد افزودنـی مـورد اسـتفاده (بتاسیکلودکسـترین و کلریـد سـدیم) بـه روغـن سرخ‌کردنی، به چند دسته تقسیم شدند (جدول ۱).

۱: نمونه‌های شاهد که بلافاصله در دماها و زمان‌های مورد نظر سرخ شدند.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.22518517.1394.5.18.7.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jcpp.5.18.75]

۲ و ۳: نمونه‌هایی که در روغن حاوی بتاسیکلودکسترین به‌میزان ۰/۳ و ۰/۶ گرم در لیتر در دماها و زمان‌های مورد نظر سرخ شدند.

۴ و ۵: نمونه‌هایی که در روغن حاوی کلرید سدیم به‌میزان ۱ و ۳ درصد (وزنی – حجمی) در دماها و زمان‌های مورد نظر سرخ شدند.

۶، ۷، ۸ و ۹: نمونه‌هایی که با افزودن تلفیقی از بتاسیکلودکسترین و کلرید سدیم در مقادیر مورد نظر به روغن سرخ‌کردنی، سرخ شدند.

شرایط سرخ‌کردن

در هر آزمایش پس از آماده‌سازی نمونه‌ها (براساس جدول ۱)، جهت سرخ‌کردن آنها، ابتدا سرخ‌کن با ۱/۵ لیتر روغن پر شد و بعد از افزودن ترکیبات، تنظیم دما و زمان سرخ‌کردن مورد نظر، سرخ‌کن بر روی حالت اتوماتیک قرار داده شد؛ به‌طوری‌که پس از رسیدن دمای سرخ‌کن به دمای مورد نظر، نمونه‌های سیب‌زمینی به‌میزان ۱۲۰ – ۱۰۰ گرم در داخل سبد مشبک سرخ‌کن قرار داده شدند. سپس، سبد حاوی نمونه‌ها به‌طور اتوماتیک در روغن غوطه‌ور شد. پس از سرخ‌شدن نمونه‌ها در مدت زمان مورد نظر، آنها را از سرخ‌کن بیرون آورده و و بر روی کاغذ جاذب قرار داده شد تا روغن اضافی آنها گرفته شود و بلافاصله آنالیزهای مربوطه بر روی آنها انجام گرفت.

آزمایش‌ها

اندازه‌گیری محتوای رطوبت

محتوای رطوبت نمونه‌ها، از طریق خشک‌کردن آنها در آون کنوکسیونی در دمای ۱°C ± ۱۰۵، تا رسیدن به وزن ثابت انجام شد (۲) و نتایج بر حسب گرم رطوبت بر گرم ماده خشک بدون روغن گزارش گردید.

اندازه‌گیری میزان چروکیدگی

برای محاسبه چروکیدگی، ابتدا حجم ظاهری نمونه‌های خام و سرخ‌شده توسط پیکنومتر شیشه‌ای پُر شده با حلال تولوئن (تکنیک جابه‌جائی حلال) مطابق رابطه ۲ اندازه‌گیری شد (۲۸):

$$V = \frac{M + M_1 - M_2}{\rho} \quad (۱)$$

در رابطه ۲، V: حجم ظاهری اولیه یا سرخ‌شده (cm^3)، M: جرم نمونه (g)، M_1: جرم پیکنومتر خالی و حلال (g)، M_2: جرم پیکنومتر حاوی نمونه و حلال (g) و ρ: دانسیته تولوئن (g/cm^3) می‌باشد. سپس، از نسبت اختلاف حجم نمونه خام و نمونه سرخ‌شده به حجم نمونه خام، میزان چروکیدگی به‌صورت عدد بدون بعد محاسبه شد (۲۲ و ۲۸).

$$S_{(t)} = \frac{V_0 - V_t}{V_0} \quad (۳)$$

در رابطه ۳، $S_{(t)}$: میزان چروکیدگی (عدد بدون بعد)، V_0: حجم ظاهری نمونه خام (cm^3) و V_t: حجم ظاهری نمونه پس از سرخ‌شدن در زمان t (cm^3) می‌باشد.

اندازه‌گیری دانسیته ظاهری

بعد از اندازه‌گیری حجم ظاهری نمونه سرخ‌شده توسط پیکنومتر پُر شده از حلال تولوئن، از نسبت وزن به حجم نمونه سرخ‌شده، مقادیر دانسیته ظاهری به‌صورت گرم بر سانتی‌متر مکعب گزارش شد (۲۸).

اندازه‌گیری محتوای روغن

سنجش میزان روغن نمونه‌های سرخ‌شده به‌وسیله استخراج روغن نمونه‌ها در دستگاه سوکسله با حلال پترولیوم اتر صورت گرفت (۲) و در نهایت برحسب گرم روغن بر گرم ماده خشک بدون روغن گزارش شد.

مدل‌سازی ریاضی چروکیدگی

در این تحقیق، مدل‌سازی چروکیدگی قطعات سیب‌زمینی طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق به‌صورت تابعی از زمان، از دست دادن آب، جذب روغن و دانسیته ظاهری با استفاده از مدل‌های پیشنهادی صورت گرفت. ارزیابی مدل‌ها و تعیین بهترین مدل

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.22518517.1394.5.18.7.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jcpp.5.18.75]

جدول ۱. علائم اختصاری مورد استفاده برای تیمارهای مختلف

ردیف	تیمار	علامت اختصاری
۱	شاهد	Control
۲	روغن حاوی ۰/۳ گرم در لیتر بتاسیکلودکسترین	B0.3
۳	روغن حاوی ۰/۶ گرم در لیتر بتاسیکلودکسترین	B0.6
۴	روغن حاوی ۱٪ (وزنی – حجمی) کلرید سدیم	NC1
۵	روغن حاوی ۳٪ (وزنی – حجمی) کلرید سدیم	NC3
۶	روغن حاوی ۱٪ (وزنی – حجمی) کلرید سدیم و ۰/۳ گرم در لیتر بتاسیکلودکسترین	NC1-B0.3
۷	روغن حاوی ۱٪ (وزنی – حجمی) کلرید سدیم و ۰/۶ گرم در لیتر بتاسیکلودکسترین	NC1-B0.6
۸	روغن حاوی ۳٪ (وزنی – حجمی) کلرید سدیم و ۰/۳ گرم در لیتر بتاسیکلودکسترین	NC3-B0.3
۹	روغن حاوی ۳٪ (وزنی – حجمی) کلرید سدیم و ۰/۶ گرم در لیتر بتاسیکلودکسترین	NC3-B0.6

نیز بـا اسـتفاده از دو معیـار ضـریب همبسـتگی (R^2) و ریشـه میانگین مربعات خطا (RMSE) انجام شد؛ بـه‌ایـن‌صـورت کـه مدل‌های دارای R^2 بـالاتر و RMSE پـایین‌تـر بـه‌عنـوان مـدل پیشنهادی انتخاب گردیدند. پارامترهای مدل‌های به‌کاررفتـه، از طریق برازش داده‌های حاصل از آزمایش با آنها، بـا اسـتفاده از نرم‌افزار MATLAB (Version 7.12.0.635, R2011a) به‌دسـت آمدند. هم‌چنین، به‌منظور یافتن رابطه بـین ضـرایب مـدل‌هـا و متغیرهای مرتبط (غلظت بتاسیکلودکسترین، غلظت کلریـد سـدیم و دمای فرآیند سرخ‌کردن) تجزیه و تحلیل رگرسیونی چند متغیـره در نرم‌افزار Microsoft Excel 2007 انجام و معیار انتخاب بهتـرین رابطه، ضریب همبستگی (R^2) در نظر گرفته شد.

آنالیز آماری

در این مطالعه، ۹ تیمار نشـان داده شـده در جـدول ۱، در سـه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰°C و چهار زمان ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ ثانیه در دو تکرار (۲۱۶ = ۲ × ۴ × ۳ × ۹) سرخ شدند و تـأثیر افزودن هر کدام از ترکیبات (کلرید سدیم و بتاسیکلودکسترین) به روغن روی چروکیدگی قطعات سیب‌زمینی بررسـی گردیـد. برای مشاهده اثر متقابل فاکتورها (بتاسیکلودکسترین در ۲ سطح غلظت ۰/۳ و ۰/۶ گـرم در لیتـر و کلریـد سـدیم در ۲ سـطح غلظـت ۱ و ۳ درصـد)، آزمـایش فاکتوریـل در قالـب طـرح بلوک‌های کامل تصادفی، با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.1 انجـام شد. هم‌چنین، برای انجام مقایسه میانگین از آزمـون بـونفرونی (۲۱) در سطح احتمال ۵٪ ($P < 0.05$) استفاده شد.

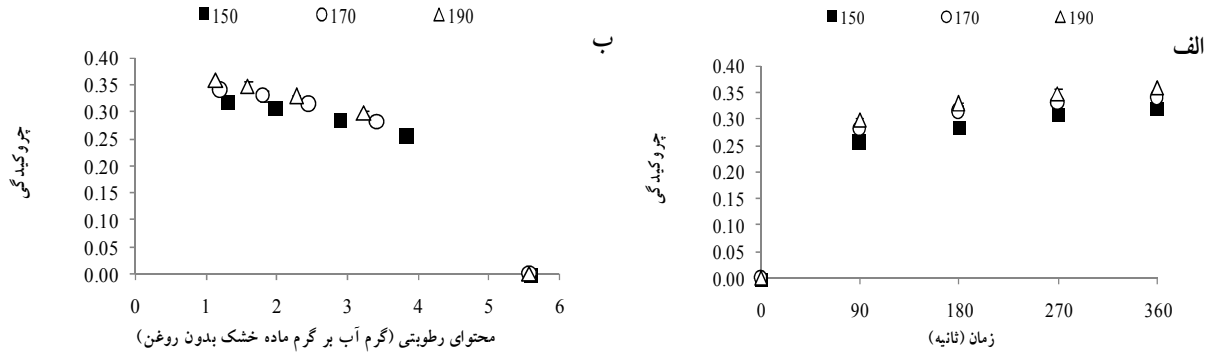
نتایج و بحث

تأثیر شرایط فرآیند سرخ‌کردن بر میزان چروکیدگی قطعـات سیب‌زمینی سرخ‌شده

با پیشرفت زمان سرخ‌کردن، در تمامی دماها، میزان چروکیدگی نمونه‌ها افزایش یافت (شکل ۱- الف). در لحظات اولیه فرآیند، به‌دلیل بالا بودن میزان انتقال جرم، پدیدهٔ چروکیدگی با سرعت بالایی رخ داده و رفتار نمایی از خود نشان داد. با گذشت زمان سرخ‌کردن و رسیدن به لحظات پایانی، به‌دلیل کاهش محتـوای رطوبت مادهٔ غذایی از یک طـرف و تشـکیل پوسـته سـفت از طرف دیگر، خروج رطوبت از مادهٔ غذایی بـا سـرعت کمتـری اتفاق افتاده و در نتیجه، آهنگ وقوع چروکیدگی کاهش یافته و بـه یک میزان تعادلی رسید. این یافته، بـا نتـایج حاصـل از مطالعـات تایو و بایک مطابقت دارد (۲۲). کاواس و موریرا (۲۰۰۱) نیـز در تحقیقی بر روی چیپس ذرت تورتیلا به این نتیجه رسیدند کـه چروکیدگی در طول سـرخ‌کـردن ارتبـاط تنگـاتنگی بـا میـزان تغییرات انتقال جرم دارد (۱۴).

در بررسی اثر دما بر میزان چروکیدگی نمونـه‌هـای شـاهد،

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.22518517.1394.5.18.7.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jcpp.5.18.75]



شکل ۱. میـزان چروکیدگی قطعات سیب‌زمینی سرخ‌شده نمونه شاهد طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق در سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰°C به‌صورت تابعی از زمان (الف) و محتوای رطوبت (ب)

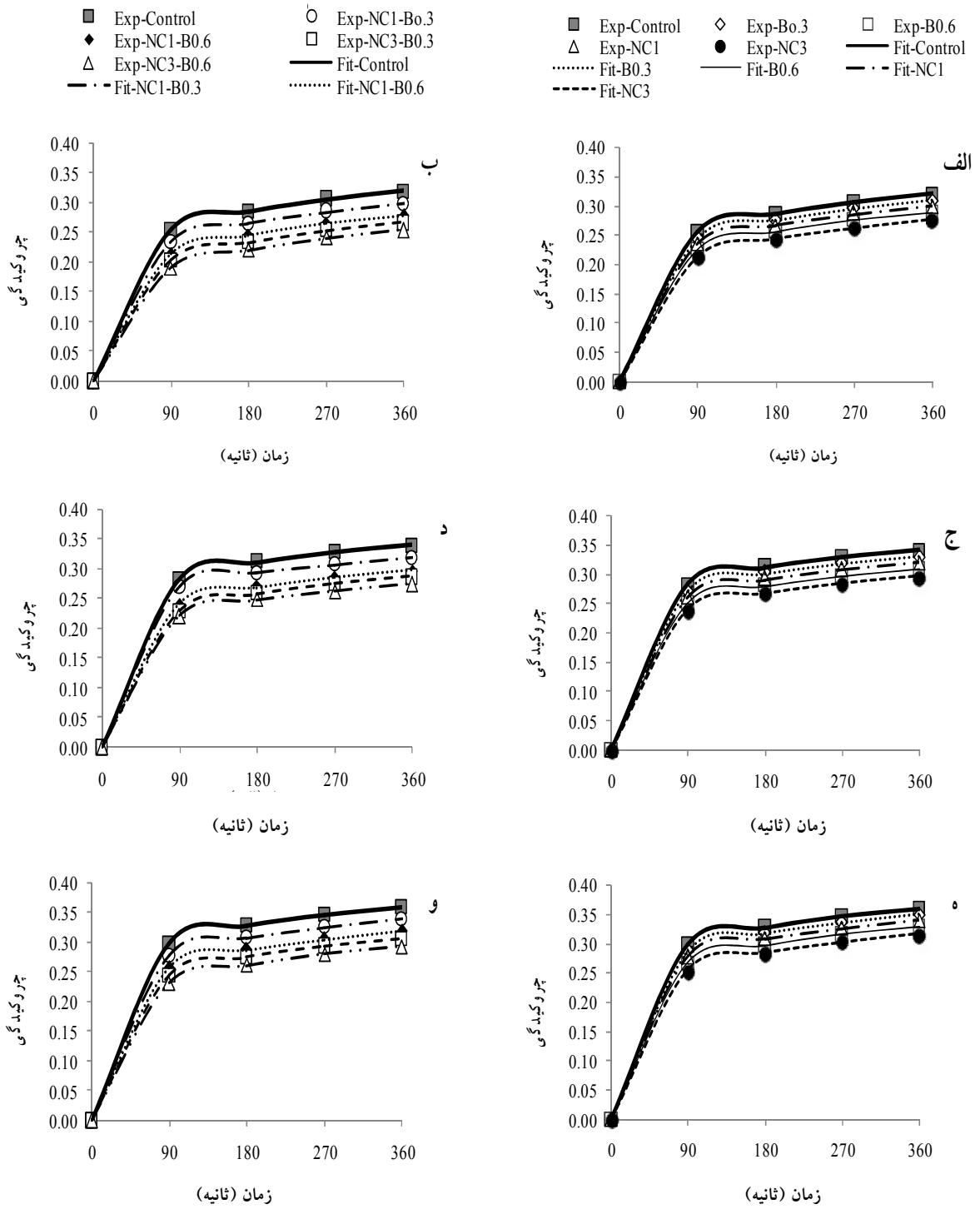
نتـایج نشـان داد کـه بـا افـزایش دمـا از ۱۵۰ بـه ۱۹۰ درجـه سلسیوس، در زمان‌های یکسان از فرآینـد سـرخ‌کـردن، میـزان چروکیدگی به‌طور معنی‌داری افـزایش مـی‌یابـد؛ چـرا کـه، در دماهای بالای فرآیند، به‌دلیل افزایش سـرعت انتقـال حـرارت، میزان از دست دادن رطوبت به‌صورت بخار، بیشـتر از دماهـای پایین بوده، در نتیجـه میـزان تغییـرات حجمـی و چروکیـدگی افزایش می‌یابد. این یافته با نتایج حاصل از تحقیقـات بایـک و میتـال (۴) و ضـیایی‌فـر و همکـاران (۲۸) مطابقـت دارد. همان‌طورکه قبلاً اشاره شد، میـزان از دسـت دادن رطوبـت بـا میـزان چروکیـدگی ارتبـاط مسـتقیم دارد و بـا گذشـت زمـان سرخ‌کردن، محتوای رطوبت نمونه‌ها کاهش و در نتیجـه میـزان چروکیدگی افزایش یافت (شکل ۱- ب). این نتیجه مطـابق بـا نتایج به‌دست آمـده توسـط یامسـانق سـونق و مـوریرا (۲۷) و ضیایی‌فر و همکاران (۲۸) می‌باشد.

تأثیر تیمارهای انجام شـده بـر میـزان چروکیـدگی قطعـات سیب‌زمینی سرخ‌شده

شکل ۲- الف، روند تغییرات چروکیدگی قطعات سـیب‌زمینـی سرخ‌شده در دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس و در زمـان‌هـای ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ ثانیه را برای نمونه‌های شـاهد و تیمـارهـای کلرید سدیم (۱ و ۳ درصـد) و بتاسیکلودکسـترین (۰/۳ و ۰/۶ گرم در لیتر) به‌صورت مجزا نشان می‌دهد. نتایج حاصله نشـان می‌دهد، با پیشرفت زمان سرخ‌کردن، در تمامی نمونه‌ها، خروج رطوبت از قطعات سیب‌زمینـی، باعـث کـاهش ضـخامت و در نتیجه افزایش چروکیدگی شد. هم‌چنین، هـر دو تیمـار، میـزان چروکیدگی نمونه‌ها را نسبت به نمونـه شـاهد کـاهش دادنـد. هم‌چنین، کاهش در میزان چروکیدگی قطعات سـیب‌زمینـی بـا افزایش غلظت کلرید سدیم و بتاسیکلودکسترین معنی‌دار بـود. نمونه تیمارشده با کلرید سدیم (با غلظت ۳ درصد) در مقایسه با نمونه‌های دیگر، در زمان‌های یکسان از فرآیند سـرخ‌کـردن، کمترین میزان چروکیدگی را داشت. کاهش میـزان چروکیـدگی نمونه‌های تیمار شده با بتاسیکلودکسترین نسبت به نمونه شاهد را می‌توان به کاهش میزان از دست دادن آب در اثر ایـن تیمـار در طول فرآیند نسبت داد که احتمالاً این امـر ناشـی از آن اسـت کـه ناحیه بیرونی آب‌دوست، ساختار دو بخشـی بتاسیکلودکسـترین به رطوبت مادهٔ غذایی متصل شده و از طریـق افـزایش کشـش سطحی آن موجب کاهش میزان خروج رطوبت از مادهٔ غـذایی مـی‌گـردد. در مـورد تـأثیر کلریـد سـدیم بـر کـاهش میـزان چروکیدگی نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد نیز چنـین مـی‌تـوان استدلال نمود که کلرید سدیم در تماس با مادهٔ غذایی به‌عنـوان الکترولیت قوی عمل کرده و با جـذب در لایـه سـطحی مـادهٔ غذایی، کشش سطحی را افزایش داده و ایـن مسـئله منجـر بـه کاهش خروج رطوبت و در نتیجه کاهش چروکیدگی می‌گردد.

شکل ۲- ب، روند تغییرات چروکیدگی در قطعات سیب‌زمینـی

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.22518517.1394.5.18.7.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jcpp.5.18.75]



شکل ۲. تغییرات چروکیدگی حاصل از آزمایش (Exp) و برازش‌شده (Fit) با مدل ۳ جدول ۲، طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق قطعات سیب‌زمینی با گذشت زمان، در دماهای ۱۵۰°C (الف، ب)، ۱۷۰°C (ج، د) و ۱۹۰°C (ه، و) در تیمارهای مختلف براساس جدول ۱

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.22518517.1394.5.18.7.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jcpp.5.18.75]

سرخ‌شده در دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس و در زمان‌های ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ ثانیه را برای تمام تیمارهای تلفیقی کلرید سدیم (۱ و ۳ درصد) و بتاسیکلودکسترین (۰/۳ و ۰/۶ گرم در لیتر) نشان می‌دهد. براساس نتایج به‌دست آمده، میزان چروکیدگی در نمونه‌های تیمار شده به‌صورت تلفیقی، نسبت به نمونه‌های شاهد، کاهش پیدا کرد؛ به‌طوری‌که تیمارهای تلفیقی شامل کلریدسدیم با غلظت ۳ درصد و بتاسیکلودکسترین با سطح غلظت ۰/۶ گرم در لیتر، دارای کمترین میزان چروکیدگی بودند؛ بعد از آن تیمارهای NC3-B0.3، NC1-B0.6 و NC1-B0.3 (مطابق جدول ۱) به‌ترتیب چروکیدگی کمتری را نشان دادند. کاهش در میزان چروکیدگی در همه تیمارهای تلفیقی در تمام زمان‌های فرآیند سرخ‌کردن، نسبت به نمونه شاهد از لحاظ آماری معنی‌دار بود.

شکل ۲- (ج، د، ه، و)، به‌ترتیب، روند تغییرات چروکیدگی نمونه‌های تیمار شده در شرایط مختلف (به‌صورت مجزا و تلفیقی) و سپس سرخ‌شده در دماهای ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سلسیوس را با گذشت زمان نشان می‌دهد. مطابق شکل، روند داده‌های آزمایشی به‌دست آمده برای تیمار شاهد و تیمارهای کلرید سدیم و بتاسیکلودکسترین به‌صورت مجزا و تلفیقی، مشابه روند داده‌های آزمایشی به‌دست آمده در دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس بود. هم‌چنین، کاهش میزان چروکیدگی در نمونه‌های تیمار شده در این دماها نیز نسبت به نمونه‌های شاهد از لحاظ آماری معنی‌دار بود. مطابق نتایج به‌دست آمده، در تمامی دماها، نمونه‌های تیمار تلفیقی NC3-B0.6 کمترین میزان چروکیدگی را به خود اختصاص دادند. هم‌چنین، در زمان‌های یکسان از فرآیند، میزان چروکیدگی ایجاد شده در نمونه‌های سرخ‌شده در دماهای ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سلسیوس، بالاتر از دمای ۱۵۰°C بود.

مدل‌سازی چروکیدگی

مدل‌های ۶-۱ جدول ۲، مدل‌های تجربی پیشنهادی را نشان می‌دهد که در آنها چروکیدگی به‌صورت تابعی از زمان مدل‌سازی شده است. علاوه بر این، سه مدل ۷، ۸ و ۹ نیز به‌منظور مدل‌سازی میزان چروکیدگی به‌ترتیب به‌صورت تابعی از محتوای رطوبتی بدون بعد (M_t)، جذب روغن (O) و دانسیته ظاهری (ρ) پیشنهاد شده است. به‌دلیل عدم وجود مدل‌های تجربی مشابه در تحقیقات قبلی، تمامی مدل‌های به‌کار رفته، مدل‌های پیشنهادی در تحقیق حاضر می‌باشند. جدول ۳، پارامترهای آماری حاصل از برازش داده‌های آزمایشی با مدل‌های جدول ۲ را نشان می‌دهد. تمامی مدل‌های پیشنهادی با داشتن پارامترهای آماری مناسب (R^2 بالا و RMSE پایین)، داده‌های آزمایشی را به‌خوبی برازش نمودند.

علاوه بر این، شکل ۲، منحنی‌های برازش داده‌های آزمایشی میزان چروکیدگی نمونه‌های مختلف ذکر شده در جدول ۱ را با مدل شماره ۳ جدول ۲، در سه دمای سرخ‌کردن ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سلسیوس و پنج زمان ۰، ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ ثانیه نشان می‌دهد. همان‌گونه که در جدول ۳ ملاحظه می‌شود، مدل شماره ۳ به‌خوبی داده‌های آزمایشی را برازش کرده است. هم‌چنین، در جدول ۴، ضرایب مدل‌های جدول ۲ با استفاده از تجزیه و تحلیل رگرسیون چند متغیره، به‌صورت تابعی از شرایط فرآیند سرخ‌کردن (غلظت کلرید سدیم، غلظت بتاسیکلودکسترین و دمای سرخ‌کردن) مدل‌سازی شدند. با استفاده از این مدل‌ها می‌توان میزان چروکیدگی محصول را در شرایط مختلف فرآیند، تعیین نموده و براساس آن مناسب‌ترین شرایط فرآیند را برای به‌دست آوردن محصولی با خصوصیات فیزیکی و کیفیت مطلوب انتخاب نمود.

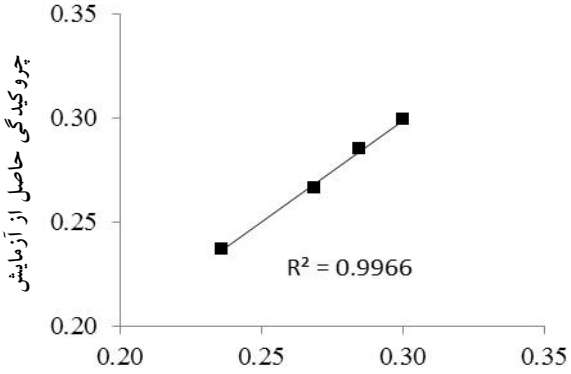
معتبرسازی مدل پیشنهادی

برازش مقادیر چروکیدگی پیش‌بینی شده توسط مدل پیشنهادی ۳ (جدول ۲) با مقادیر چروکیدگی حاصل از آزمایش با غلظت بتاسیکلودکسترین ۰/۴۵ گرم در لیتر و غلظت کلریدسدیم ۲ درصد نشان از انطباق خوب (R^2 = ۰/۹۹۶۶) بین میزان چروکیدگی این مدل و تیمار آزمایشی داشت (شکل ۳). بنابراین، مدل توسعه‌یافته پیشنهادی می‌تواند برای پیش‌بینی سینتیک چروکیدگی قطعات سیب‌زمینی سرخ‌شده تحت شرایط مورد آزمایش، مناسب در نظر گرفته شود.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.22518517.1394.5.18.7.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jcpp.5.18.75]

جدول ۲. مدل‌های پیشنهـادی برای مدل‌سازی میزان چروکیـدگی (S_t) به‌صورت تابعی از زمـان (t)، محتوای رطوبت بدون بعد (M_t)، جذب روغن (O) و دانسیته ظاهری (ρ) حین فرآیند سرخ‌کردن عمیق

شماره مدل	مدل	مرجع
۱	$S_t = (abt)/(1+bt)$	مدل پیشنهادی تحقیق حاضر
۲	$S_t = a(1-\exp(-bt))$	مدل پیشنهادی تحقیق حاضر
۳	$S_t = at^b$	مدل پیشنهادی تحقیق حاضر
۴	$S_t = a\exp(-bt)+c$	مدل پیشنهادی تحقیق حاضر
۵	$S_t = (1+t)/(at+b)$	مدل پیشنهادی تحقیق حاضر
۶	$S_t = at/(1+bt)$	مدل پیشنهادی تحقیق حاضر
۷	$S_t = aM_t^2 + bM_t + c$	مدل پیشنهادی تحقیق حاضر
۸	$S_t = aO^b$	مدل پیشنهادی تحقیق حاضر
۹	$S_t = a\rho^2 + b\rho + c$	مدل پیشنهادی تحقیق حاضر



شکل ۳. برازش داده‌های چروکیدگی حاصل از آزمایش با داده‌های حاصل از مدل پیشنهـادی

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که میـزان چروکیـدگی در تمامی نمونه‌های مورد آزمون، با افزایش دمـای سـرخ‌کـردن از ۱۵۰ تا ۱۹۰ درجه سلسیوس افزایش یافـت و ایـن افـزایش از لحـاظ آمـاری معنـی‌دار بـود. اسـتفاده از هـر دو تیمـار بتاسیکلودکسـترین و کلریـد سـدیم، چروکیـدگی قطعـات سیب‌زمینی سرخ‌شده را نسبت به نمونه شاهد از لحـاظ آمـاری به‌طور معنی‌داری کاهش داد. هم‌چنین، افـزایش غلظـت تیمـار بتاسیکلودکسترین از ۰/۳ به ۰/۶ گرم در لیتر و کلرید سـدیم از ۱ به ۳ درصد، میزان چروکیدگی نمونه‌ها را به‌طـور معنـی‌داری کاهش داد. از طرف دیگر، تلفیق دو تیمار مذکور نیز در مقایسه با هر کدام از تیمارها به‌تنهایی، میـزان چروکیـدگی را بـه‌طـور معنی‌داری کاهش داد. با این حال، در مورد اثر عوامل مـؤثر بـر کشش سطحی هم‌چون بتاسیکلودکسترین و کلرید سـدیم روی کاهش پدیدهٔ چروکیدگی طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق، نیـاز بـه تحقیقات بیشتری وجود دارد. از سوی دیگـر، در ایـن مطالعـه مدل‌های مختلفـی بـا اسـتفاده از تجزیـه و تحلیـل رگرسـیون چند متغیره با R^2 بالا و RMSE پایین به‌دست آمدند که تمـامی مدل‌های پیشنهادی، داده‌های حاصل از آزمایش را بـرای همـه تیمارهـای مـورد آزمـون بـه‌خـوبی بـرازش کردنـد؛ بنـابراین، این مدل‌ها می‌توانند مدل‌های کاربردی و مفید جهـت اسـتفاده تحت شرایط دمایی - زمانی مختلف طـی فرآینـد سـرخ‌کـردن عمیق باشند. اهمیت ارائه مدل‌های تجربـی، ایـن اسـت کـه بـا داشتن چنـین مـدل‌هـایی، لـزوم انجـام آزمایشـات در شـرایط مختلف ذکر شده در فرآینـد سـرخ‌کـردن بسـیار کـاهش پیـدا می‌کند.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.22518517.1394.5.18.7.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jcpp.5.18.75]

جدول ۳. داده‌های آماری حاصل برای مدل‌های جدول ۲ در دماها و تیمارهای مختلف

مدل ۱

دما (°C)	۱۵۰		۱۷۰		۱۹۰	
تیمار	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE
Control	۰/۹۹	۰/۰۰۳۹	۰/۹۹	۰/۰۰۱۹	۰/۹۹	۰/۰۰۳۶
B0.3	۰/۹۹	۰/۰۰۳۹	۰/۹۹	۰/۰۰۱۹	۰/۹۹	۰/۰۰۳۶
B0.6	۰/۹۹	۰/۰۰۳۵	۰/۹۹	۰/۰۰۱۸	۰/۹۹	۰/۰۰۳۵
NC1	۰/۹۹	۰/۰۰۳۸	۰/۹۹	۰/۰۰۱۸	۰/۹۹	۰/۰۰۳۵
NC3	۰/۹۹	۰/۰۰۳۴	۰/۹۹	۰/۰۰۲۱	۰/۹۹	۰/۰۰۳۴
NC1-B0.3	۰/۹۹	۰/۰۰۳۸	۰/۹۹	۰/۰۰۳۷	۰/۹۹	۰/۰۰۳۵
NC1-B0.6	۰/۹۹	۰/۰۰۳۴	۰/۹۹	۰/۰۰۱۸	۰/۹۹	۰/۰۰۳۴
NC3-B0.3	۰/۹۹	۰/۰۰۳۳	۰/۹۹	۰/۰۰۲۳	۰/۹۹	۰/۰۰۳۴
NC3-B0.6	۰/۹۹	۰/۰۰۳۲	۰/۹۹	۰/۰۰۱۸	۰/۹۹	۰/۰۰۳۳

مدل ۲

دما (°C)	۱۵۰		۱۷۰		۱۹۰	
تیمار	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE
Control	۰/۹۹	۰/۰۰۹۴	۰/۹۹	۰/۰۰۷۳	۰/۹۹	۰/۰۰۹۳
B0.3	۰/۹۹	۰/۰۰۹۳	۰/۹۹	۰/۰۰۷۲	۰/۹۹	۰/۰۰۹۲
B0.6	۰/۹۹	۰/۰۰۸۶	۰/۹۹	۰/۰۰۷۰	۰/۹۹	۰/۰۰۹۰
NC1	۰/۹۹	۰/۰۰۹۱	۰/۹۹	۰/۰۰۷۱	۰/۹۹	۰/۰۰۹۱
NC3	۰/۹۹	۰/۰۰۸۴	۰/۹۹	۰/۰۰۷۱	۰/۹۹	۰/۰۰۸۸
NC1-B0.3	۰/۹۹	۰/۰۰۹۱	۰/۹۹	۰/۰۰۸۴	۰/۹۹	۰/۰۰۹۱
NC1-B0.6	۰/۹۹	۰/۰۰۸۴	۰/۹۹	۰/۰۰۶۸	۰/۹۹	۰/۰۰۸۸
NC3-B0.3	۰/۹۹	۰/۰۰۸۲	۰/۹۹	۰/۰۰۷۳	۰/۹۹	۰/۰۰۸۷
NC3-B0.6	۰/۹۹	۰/۰۰۷۹	۰/۹۹	۰/۰۰۶۴	۰/۹۹	۰/۰۰۸۵

مدل ۳

دما (°C)	۱۵۰		۱۷۰		۱۹۰	
تیمار	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE
Control	۰/۹۹	۰/۰۰۱۲	۰/۹۹	۰/۰۰۲۲	۱	۰/۰۰۰۷
B0.3	۰/۹۹	۰/۰۰۱۳	۰/۹۹	۰/۰۰۲۲	۱	۰/۰۰۰۸
B0.6	۰/۹۹	۰/۰۰۱۲	۰/۹۹	۰/۰۰۲۲	۱	۰/۰۰۰۸
NC1	۰/۹۹	۰/۰۰۱۳	۰/۹۹	۰/۰۰۲۳	۱	۰/۰۰۰۸
NC3	۰/۹۹	۰/۰۰۱۳	۰/۹۹	۰/۰۰۱۷	۱	۰/۰۰۰۹
NC1-B0.3	۰/۹۹	۰/۰۰۱۳	۱	۰/۰۰۰۳	۱	۰/۰۰۰۸
NC1-B0.6	۰/۹۹	۰/۰۰۱۲	۰/۹۹	۰/۰۰۲۲	۱	۰/۰۰۰۸
NC3-B0.3	۰/۹۹	۰/۰۰۱۳	۰/۹۹	۰/۰۰۱۶	۱	۰/۰۰۰۹
NC3-B0.6	۰/۹۹	۰/۰۰۱۴	۰/۹۹	۰/۰۰۲۱	۱	۰/۰۰۰۹

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.22518517.1394.5.18.7.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jcpp.5.18.75]

ادامه جدول ۳

مدل ۴

دما (°C)	۱۵۰		۱۷۰		۱۹۰	
تیمار	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE
Control	۰/۹۹	۰/۰۱۱۶	۰/۹۹	۰/۰۰۹۰	۰/۹۹	۰/۰۱۱۴
B0.3	۰/۹۹	۰/۰۰۱۱۴	۰/۹۹	۰/۰۰۸۸	۰/۹۹	۰/۰۱۱۳
B0.6	۰/۹۹	۰/۰۱۰۶	۰/۹۹	۰/۰۰۸۶	۰/۹۹	۰/۰۱۱۰
NC1	۰/۹۹	۰/۰۱۱۲	۰/۹۹	۰/۰۰۸۷	۰/۹۹	۰/۰۱۱۲
NC3	۰/۹۹	۰/۰۱۰۳	۰/۹۹	۰/۰۰۸۷	۰/۹۹	۰/۰۱۰۸
NC1-B0.3	۰/۹۹	۰/۰۱۱۱	۰/۹۹	۰/۰۱۰۳	۰/۹۹	۰/۰۰۱۱۱
NC1-B0.6	۰/۹۹	۰/۰۱۰۴	۰/۹۹	۰/۰۰۸۴	۰/۹۹	۰/۰۱۰۸
NC3-B0.3	۰/۹۹	۰/۰۱۰۰	۰/۹۹	۰/۰۰۸۹	۰/۹۹	۰/۰۱۰۶
NC3-B0.6	۰/۹۹	۰/۰۰۹۶	۰/۹۹	۰/۰۰۷۸	۰/۹۹	۰/۰۱۰۴

مدل ۵

دما (°C)	۱۵۰		۱۷۰		۱۹۰	
تیمار	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE
Control	۰/۹۹	۰/۰۰۶۸	۰/۹۹	۰/۰۰۷۵	۰/۹۹	۰/۰۰۸۵
B0.3	۰/۹۹	۰/۰۰۶۵	۰/۹۹	۰/۰۰۷۰	۰/۹۹	۰/۰۰۸۱
B0.6	۰/۹۹	۰/۰۰۵۷	۰/۹۹	۰/۰۰۶۲	۰/۹۹	۰/۰۰۷۲
NC1	۰/۹۹	۰/۰۰۶۲	۰/۹۹	۰/۰۰۶۶	۰/۹۹	۰/۰۰۷۷
NC3	۰/۹۹	۰/۰۰۵۴	۰/۹۹	۰/۰۰۶۰	۰/۹۹	۰/۰۰۶۸
NC1-B0.3	۰/۹۹	۰/۰۰۶۱	۰/۹۹	۰/۰۰۸۵	۰/۹۹	۰/۰۰۷۶
NC1-B0.6	۰/۹۹	۰/۰۰۵۴	۰/۹۹	۰/۰۰۵۸	۰/۹۹	۰/۰۰۶۸
NC3-B0.3	۰/۹۹	۰/۰۰۵۰	۰/۹۹	۰/۰۰۵۷	۰/۹۹	۰/۰۰۶۴
NC3-B0.6	۰/۹۹	۰/۰۰۴۷	۰/۹۹	۰/۰۰۵۳	۰/۹۹	۰/۰۰۵۹

مدل ۶

دما (°C)	۱۵۰		۱۷۰		۱۹۰	
تیمار	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE
Control	۰/۹۹	۰/۰۰۳۹	۰/۹۹	۰/۰۰۱۹	۰/۹۹	۰/۰۰۳۶
B0.3	۰/۹۹	۰/۰۰۳۹	۰/۹۹	۰/۰۰۱۹	۰/۹۹	۰/۰۰۳۶
B0.6	۰/۹۹	۰/۰۰۳۵	۰/۹۹	۰/۰۰۱۸	۰/۹۹	۰/۰۰۳۵
NC1	۰/۹۹	۰/۰۰۳۸	۰/۹۹	۰/۰۰۱۸	۰/۹۹	۰/۰۰۳۵
NC3	۰/۹۹	۰/۰۰۳۴	۰/۹۹	۰/۰۰۲۲	۰/۹۹	۰/۰۰۳۴
NC1-B0.3	۰/۹۹	۰/۰۰۳۸	۰/۹۹	۰/۰۰۳۷	۰/۹۹	۰/۰۰۳۵
NC1-B0.6	۰/۹۹	۰/۰۰۳۴	۰/۹۹	۰/۰۰۱۸	۰/۹۹	۰/۰۰۳۴
NC3-B0.3	۰/۹۹	۰/۰۰۳۳	۰/۹۹	۰/۰۰۲۳	۰/۹۹	۰/۰۰۳۴
NC3-B0.6	۰/۹۹	۰/۰۰۳۲	۰/۹۹	۰/۰۰۱۸	۰/۹۹	۰/۰۰۳۳

ادامه جدول ۳

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.22518517.1394.5.18.7.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jcpp.5.18.75]

مدل ۷

دما (°C)	۱۵۰		۱۷۰		۱۹۰	
تیمار	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE
Control	۰/۹۸	۰/۰۲۰۷	۰/۹۹	۰/۰۱۳۰	۰/۹۹	۰/۰۱۲۸
B0.3	۰/۹۸	۰/۰۲۱۶	۰/۹۹	۰/۰۱۳۴	۰/۹۹	۰/۰۱۲۹
B0.6	۰/۹۷	۰/۰۲۵۵	۰/۹۹	۰/۰۱۶۲	۰/۹۹	۰/۰۱۵۲
NC1	۰/۹۸	۰/۰۲۴۷	۰/۹۹	۰/۰۱۳۹	۰/۹۹	۰/۰۱۵۶
NC3	۰/۹۶	۰/۰۲۹۵	۰/۹۸	۰/۰۱۷۷	۰/۹۹	۰/۰۱۵۷
NC1-B0.3	۰/۹۴	۰/۰۳۹۷	۰/۹۷	۰/۰۲۷۵	۰/۹۸	۰/۰۲۰۳
NC1-B0.6	۰/۹۳	۰/۰۴۲۰	۰/۹۸	۰/۰۲۳۶	۰/۹۸	۰/۰۲۱۲
NC3-B0.3	۰/۹۱	۰/۰۴۶۹	۰/۹۶	۰/۰۳۰۴	۰/۹۷	۰/۰۲۶۲
NC3-B0.6	۰/۹۵	۰/۰۵۲۹	۰/۹۴	۰/۰۳۸۴	۰/۹۷	۰/۰۲۴۴

مدل ۸

دما (°C)	۱۵۰		۱۷۰		۱۹۰	
تیمار	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE
Control	۱	۰/۰۰۱۰	۰/۹۹	۰/۰۰۴۱	۰/۹۹	۰/۰۰۲۴
B0.3	۰/۹۹	۰/۰۰۲۴	۰/۹۹	۰/۰۰۲۶	۰/۹۹	۰/۰۰۲۲
B0.6	۰/۹۹	۰/۰۰۴۹	۰/۹۹	۰/۰۰۳۷	۰/۹۹	۰/۰۰۲۵
NC1	۰/۹۹	۰/۰۰۳۷	۰/۹۹	۰/۰۰۲۳	۰/۹۹	۰/۰۰۳۴
NC3	۰/۹۹	۰/۰۰۵۷	۰/۹۹	۰/۰۰۴۹	۰/۹۹	۰/۰۰۴۸
NC1-B0.3	۰/۹۹	۰/۰۰۵۴	۰/۹۹	۰/۰۰۲۹	۰/۹۹	۰/۰۰۳۶
NC1-B0.6	۰/۹۹	۰/۰۰۳۶	۰/۹۹	۰/۰۰۴۰	۰/۹۹	۰/۰۰۱۳
NC3-B0.3	۰/۹۹	۰/۰۰۵۶	۰/۹۹	۰/۰۰۴۱	۰/۹۹	۰/۰۰۴۶
NC3-B0.6	۰/۹۹	۰/۰۰۵۱	۰/۹۹	۰/۰۰۵۰	۰/۹۹	۰/۰۰۷۱

مدل ۹

دما (°C)	۱۵۰		۱۷۰		۱۹۰	
تیمار	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE
Control	۰/۹۷	۰/۰۳۱۳	۰/۹۸	۰/۰۲۴۸	۰/۹۸	۰/۰۲۸۶
B0.3	۰/۹۶	۰/۰۳۵۹	۰/۹۷	۰/۰۲۸۶	۰/۹۷	۰/۰۳۲۵
B0.6	۰/۹۴	۰/۰۴۲۳	۰/۹۶	۰/۰۳۳۲	۰/۹۶	۰/۰۳۵۸
NC1	۰/۹۶	۰/۰۳۵	۰/۹۷	۰/۰۲۸۷	۰/۹۷	۰/۰۳۲۳
NC3	۰/۹۱	۰/۰۴۶۷	۰/۹۵	۰/۰۳۸۷	۰/۹۵	۰/۰۴۰۳
NC1-B0.3	۰/۹۲	۰/۰۴۷۵	۰/۹۵	۰/۰۴۲۹	۰/۹۶	۰/۰۴۰۳
NC1-B0.6	۰/۸۹	۰/۰۵۳۸	۰/۹۴	۰/۰۴۲۰	۰/۹۴	۰/۰۴۳۵
NC3-B0.3	۰/۸۷	۰/۰۵۴۰	۰/۸۹	۰/۰۵۳۹	۰/۹۲	۰/۰۴۹۰
NC3-B0.6	۰/۹۱	۰/۰۴۴۷	۰/۹۲	۰/۰۴۵۶	۰/۹۲	۰/۰۴۹۹

تعریف علائم اختصاری تیمارهای مختلف، در جدول ۱ آمده است.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.22518517.1394.5.18.7.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jcpp.5.18.75]

جدول ۴. مدل‌های نهایی حاصل از انجام تجزیه و تحلیل رگرسیون چند متغیره بر روی ضرایب مدل‌ها

R^2	$S_t = (abt)/(1+bt)$
۰/۹۹۶۴	a = – ۰/۰۱۱۴۷NC – ۰/۰۳۱۲۹B + ۰/۰۰۲۰۸۶T
۰/۹۹۰۴	b =– ۰/۰۰۱۶۵NC – ۰/۰۰۵۰۶B + ۰/۰۰۰۲۰۹T
R^2	$S_t = a(1-\exp(-bt))$
۰/۹۹۷۲	a = – ۰/۰۱۱۸۲NC –۰/۰۳۳۲۹B + ۰/۰۰۱۹۰۶T
۰/۹۹۵۲	b =– ۰/۰۰۰۴۳NC – ۰/۰۰۱۱۳B + ۰/۰۰۰۱۱۴T
R^2	$S_t = at^b$
۰/۹۹۴۹	a =– ۰/۰۱۰۱۴NC –۰/۰۳۱۸۷B + ۰/۰۰۰۸۵۸T
۰/۹۶۷۳	b = ۰/۰۰۹۱۷۱NC + ۰/۰۳۴۰۵۵B + ۰/۰۰۰۷۹۱T
R^2	$S_t = a\exp(-bt)+c$
۰/۹۹۷۲	a = ۰/۰۱۱۸۴۸NC + ۰/۰۳۳۳۹B – ۰/۰۰۱۹ T
۰/۹۹۵۲	b = – ۰/۰۰۱۱۳NC – ۰/۰۰۱۱۳B + ۰/۰۰۰۱۱۴T
۰/۹۹۷۲	c = – ۰/۰۱۱۸۲NC –۰/۰۳۳۲۷B + ۰/۰۰۱۹۰۶T
R^2	$S_t = (1+t)/(at+b)$
۰/۹۸۲۷	a = ۰/۱۵۴۳۰۹NC + ۰/۵۶۱۴۷۷B + ۰/۰۱۵۲۴۵T
۰/۹۹۵۲	b = – ۰/۰۰۰۴۳NC – ۰/۰۰۱۱۳B – ۰/۰۳۸۰۴T
R^2	$S_t = at/(1+bt)$
۰/۹۸۰۶	a = ۰/۱۸۰۸۶۵NC + ۱/۱۰۶۳۹۱B + ۰/۰۲۹۳۰۱T
۰/۹۵۰۷	b = ۱۱/۳۶۹۷۳NC + ۳۹/۸۰۳۹۷B + ۰/۴۶۰۲۹۸T
R^2	$S_t = aM_t^2 + bM_t + c$
۰/۹۳۱۵	a = – ۰/۱۳۸۰۶NC – ۰/۳۷۲۱۱B – ۰/۰۰۳۵۷T
۰/۹۳۶۴	b = ۰/۲۱۲۵۴۳NC + ۰/۸۷۰۹۲۵B + ۰/۰۰۱۶۸۹T
۰/۹۰۰۵	c = – ۰/۰۷۹۰۱NC –۰/۳۰۲۴۲B + ۰/۰۰۱۸۳۳T
R^2	$S_t = aO^b$
۰/۹۸۵۱	a = – ۰/۰۱۶۵۳NC – ۰/۰۸۶۱۵B + ۰/۰۰۴۳۴۸T
۰/۹۷۴۵	b = ۰/۰۰۳۵۲۸NC – ۰/۰۱۳۸۹B + ۰/۰۰۲۳۸۱T
R^2	$S_t = a\rho^2 + b\rho + c$
۰/۹۶۰۵	a = – ۰/۴۲۲۳۱NC – ۱/۵۸۰۱۱B – ۰/۰۱۰۵۴T
۰/۹۵۸۶	b = ۰/۲۶۱۰۰۶NC + ۰/۹۷۱۸۸۵B + ۰/۰۱۷۵۸۵T
۰/۹۱۹۸	c = – ۰/۱۸۳۶۷NC – ۰/۶۶۴۳۶B + ۰/۰۰۳۷۹T

NC، B و T به‌ترتیب نشان‌دهنده غلظت کلرید سدیم، غلظت بتاسیکلودکسترین و دمای سرخ‌کردن می‌باشد.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.22518517.1394.5.18.7.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jcpp.5.18.75]

منابع مورد استفاده

1. Al-Muhtaseb, A. H., W. A. M. McMinn and T. R. A. Magee. 2004. Shrinkage, density and porosity variations during the convective drying of potato starch gel. *In:* Proceeding of the 14th International Drying Symposium (IDS). Sao Paulo, Brazil. Volume C, pp. 1604-1611.
2. AOAC. 1995. Official Methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC.
3. Baik, O. D. and G. S. Mittal. 2003. Kinetics of tofu color changes during deep fat frying. *Lwt - Food Science and Technology* 36: 43-48.
4. Baik, O. D. and G. S. Mittal. 2005. Heat and moisture transfer and shrinkage simulation of deep fat tofu frying. *Food Research International* 38: 183-191.
5. Bouchon, P. 2009. Understanding oil absorption during deep-fat frying. *Advances in Food and Nutrition Research* 57: 209-234.
6. Bravo, J., N. Sanjuan, J. Ruales and A. Mulet. 2009. Modeling the Dehydration of Apple Slices by Deep Fat Frying. *Drying Technology* 27: 782-786.
7. Duran, M., F. Pedreschi, P. Moyano and E. Troncoso. 2007. Oil partition in pre-treated potato slices during frying and cooling. *Journal of Food Engineering* 81: 257-265.
8. Farinu, A. and O. D. Baik. 2008. Convective mass transfer coefficients in finite element simulations of deep fat frying of sweet potato. *Journal of Food Engineering* 89: 187-194.
9. Garayo, J. and R. Moreira. 2002. Vacuum frying of potato chips. *Journal of Food Engineering* 55: 181-191.
10. Greenfield, H., J. Makinson and R. B. H. Wills. 1984. Lipids in French fries: a ratail and laboratory study. *International Journal of Food Science & Technology* 19: 239-245.
11. Hernandez, J. A., G. Pavon and M. A. Garcia. 2000. Analytical solution of mass transfer equation considering shrinkage for modeling food drying kinetics. *Journal of Food Engineering* 45: 1-10.
12. Krokida, M. K., V. Oreopoulou and Z. B. Maroulis. 2000. Water loss and oil uptake as a function of frying time. *Journal of Food Engineering* 44: 39-46.
13. Krokida, M. K., V. Oreopoulou, Z. B. Maroulis and D. Marinos-Kouris. 2001. Deep fat frying of potato strips-Quality Issues. *Drying Technology* 19: 879-935.
14. Kawas, M. L. and R. G. Moreira. 2001. Characterization of product quality attributes of tortilla chips during the frying process. *Journal of Food Engineering* 47: 97-107.
15. Marcus, Y. 2010. Surface Tension of Aqueous Electrolytes and Ions. *Journal of Chemical & Engineering Data* 55: 3641–3644
16. Martin Del Valle, E. M. 2004. Cyclodextrins and their uses: a review. *Process Biochemistry* 39: 1033-1046.
17. Mayor, L. and A. M. Sereno. 2004. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering* 61: 373-386.
18. Miranda, M. L. and J. M. Aguilera. 2006. Structure and texture properties of fried potato products. *Food Reviews International* 22: 73-201.
19. Mir-Bel, J., R. Oria and M. L. Salvador. 2009. Influence of the vacuum break conditions on oil uptake during potato post-frying cooling. *Journal of Food Engineering* 95: 416-422.
20. Mottur, G. P. 1989. A scientific look at potato chips – the original savory snack. *Cereal Foods World* 34: 620-626.
21. Steel, R. G. D., J. H. Torrie and D. A. Dickey. 1996. Principles and Procedures of Statistics: A Biometrical Approach. McGraw-Hill, New York.
22. Taiwoa, K. A. and O. D. Baik. 2007. Effects of pre-treatments on the shrinkage and textural properties of fried sweet potatoes. *Lwt - Food Science and Technology* 40: 661–668.
23. Trystram, G. 2012. Modelling of food and food processes. *Journal of Food Engineering* 110: 269-277.
24. Varela, G., A. E. Bender and I. D. Morton. 1988. Frying of Food Principles, Changes, New Approaches. VCH, New York.
25. Wang, N. and J. G. Brennan. 1995. Changes in structure, density and porosity of potato during dehydration. *Journal of Food Engineering* 24: 61-76.
26. Yadollahinia, A. and M. Jahangiri. 2009. Shrinkage of potato slices during drying. *Journal of Food Engineering* 94: 52-58.
27. Yamsaengsung, R. and R. G. Moreira. 2002. Modeling the transport phenomena and structural changes during deep fat frying: Part I: Model development. *Journal of Food Engineering* 53: 1-10.
28. Ziaiifar, A. M. F. Courtois and G. Trystram. 2010. Porosity development and its effect on oil uptake during frying process. *Journal of Food Process Engineering* 33: 191-212.
29. Ziaiifar, A. M., N. Achir, F. Courtois, I. Trezzani and G. Trystram. 2008. Review of mechanisms, conditions, and factors involved in the oil uptake phenomenon during the deep-fat frying process. *International Journal of Food Science & Technology* 43: 1410-1423.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.22518517.1394.5.18.7.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jcpp.5.18.75]