

مدل‌سازی چروکیدگی طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق قطعات سیب‌زمینی پیش‌تیمارشده با اولتراسوند و آبگیری اسمزی

جلال دهقان‌نیا^{۱*} و لیدا عابدپور^۲

تاریخ دریافت: ۹۴/۹/۵ تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۰/۱۶

^۱دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

^۲دانش‌آموخته کارشناسی ارشد صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

*مسئول مکاتبه: Email: J_dehghannya@tabrizu.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، تاثیر پیش‌تیمارهای اولتراسوند و آبگیری اسمزی روی میزان چروکیدگی قطعات سیب‌زمینی سرخ‌شده مورد بررسی قرار گرفت. قطعات سیب‌زمینی پیش‌تیمار شده با امواج اولتراسوند در دو فرکانس ۲۸ و ۴۰ kHz و آبگیری اسمزی در دو غلظت ۲ و ۴٪ محلول نمک، به مدت ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ ثانیه در سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰°C سرخ شدند. همچنین، به منظور کنترل بهینه شرایط فرآیند و افزایش کیفیت نهایی محصول سرخ شده، تغییرات میزان چروکیدگی بر حسب زمان سرخ‌کردن، محتوای روغن، محتوای رطوبت بدون بعد و دانسیته ظاهری مدل‌سازی گردید. پیش‌تیمار اولتراسوند در فرکانس‌های ۲۸ و ۴۰ کیلوهرتز در دمای ۱۵۰°C باعث کاهش میزان چروکیدگی در مقایسه با نمونه شاهد گردید. استفاده از پیش‌تیمار آبگیری اسمزی و تلفیق آن با پیش‌تیمار اولتراسوند افزایش میزان چروکیدگی را در پی داشتند. علاوه بر این، مدل‌های پیشنهادشده داده‌های آزمایشی را بر حسب چهار پارامتر زمان سرخ‌کردن، محتوای روغن، محتوای رطوبت بدون بعد و دانسیته ظاهری با ضریب همبستگی بالا به خوبی برازش نمودند.

واژگان کلیدی: آبگیری اسمزی، اولتراسوند، سرخ‌کردن، چروکیدگی، مدل‌سازی

مقدمه

سرخ‌شده یک محصول غذایی آماده مصرف با محتوای رطوبت حدود ۴۰-۵۰٪ می‌باشد (گرین فیلد و همکاران، ۱۹۸۴) و شرایط زمان و دمای سرخ‌کردن به گونه‌ای انتخاب می‌شود که از پخته‌شدن قسمت مرکزی اطمینان حاصل شده و در عین حال رنگ رضایت‌بخش و بافت دلپسندی به دست آید (پراویسانی و کالولو، ۱۹۸۶). سرخ‌کردن عمیق فرآیندی پیچیده و مهم می‌باشد که به شکل وسیعی در صنعت مواد غذایی مورد استفاده قرار

سیب‌زمینی یکی از مهم‌ترین مواد غذایی سرخ‌کردنی می‌باشد که معمولاً به دو شکل چیپس (برش‌های گرد با ضخامت کم) یا سرخ‌کرده (خلال‌های با ضخامت زیاد) عرضه می‌شود. معمولاً باید زمان و دمای سرخ‌کردن چیپس‌ها طوری تنظیم گردد که محتوای رطوبت محصول به حدود ۱-۲٪ کاهش یابد (موتور ۱۹۸۹) تا محصول ماندگاری بالایی داشته باشد؛ در حالی که سیب‌زمینی

پدیده چروکیدگی طی مراحل اولیه سرخ‌کردن، به دلیل تنش‌های ریزساختاری ناشی از مهاجرت آب آزاد از ناحیه متخلخل به سطح ماده غذایی بروز می‌نماید. به دنبال چروکیدگی اولیه، شکل‌گیری پوسته باعث ایجاد مقاومت در برابر تغییر حجم بیشتر می‌شود و این امر ممکن است موجب کاهش سرعت وقوع چروکیدگی و حتی توقف آن باشد. در مراحل انتهایی فرآیند سرخ‌کردن و در محتوای رطوبت پایین، افزایشی در حجم محصول دیده می‌شود که از آن با عنوان پف‌کردن نام برده می‌شود. با شروع شکل‌گیری پوسته در مراحل انتهایی سرخ‌کردن، به دلیل سخت شدن سطحی و بسته شدن منافذ در سطح محصول، انتشار هوا و بخار آب از داخل ماده غذایی محدود می‌شود. تجمع فشار حاصل از انبساط گازی درون ماده ویسکوالاستیک، تنش‌های داخلی ایجاد می‌کند که منجر به انبساط محصول و تشکیل حباب‌های گاز در زیر پوسته شده و باعث پف‌کردن محصول می‌شود (یامسانگ سونگ و همکاران ۲۰۱۱).

چروکیدگی بر روی خواص فیزیکی مواد غذایی از جمله دانسیته و تخلخل تاثیر می‌گذارد که در انتقال جرم و حرارت ویژگی‌های مهمی محسوب می‌شوند. مشکلات انتقال جرم و حرارت در زمینه فرآوری‌های غذایی اغلب به چروکیدگی مواد غذایی ربط داده می‌شود. بنابراین، به منظور درک و مدل‌سازی مکانیسم‌های انتقال طی سرخ‌کردن (خروج آب، جذب روغن و انتقال حرارت)، تجزیه و تحلیل و کمی‌سازی تغییرات ساختاری ماده غذایی مثل چروکیدگی از اهمیت بسیاری برخوردار می‌باشد. چروکیدگی محصول بیشتر به شکل تغییر در حجم و به صورت تابعی از محتوای رطوبت ماده غذایی گزارش شده است. بین چروکیدگی و محتوای رطوبت در محدوده‌های رطوبت بالا، رابطه خطی (کیل پاتریک و همکاران ۱۹۵۵) و در محدوده‌های رطوبت پایین، رابطه غیرخطی وجود دارد (لوزانو و همکاران ۱۹۸۳ و رحمان و پوتلوری ۱۹۹۰).

می‌گیرد. این فرآیند، شامل غوطه‌ور ساختن ماده غذایی درون روغن داغ با دمای بالاتر از نقطه جوش آب (معمولاً 150°C – 200°C) می‌باشد (فارکاس و همکاران ۱۹۹۶). در فرآیند سرخ‌کردن انتقال جرم و حرارت به صورت تمام صورت می‌گیرد. انتقال جرم به شکل خروج رطوبت و جذب روغن بوده (میربل و سالوادور ۲۰۰۹) و انتقال حرارت با ترکیبی از روش‌های همرفت و جابجایی انجام می‌پذیرد. طی سرخ‌کردن، واکنش‌های شیمیایی و تغییرات فیزیکی مختلفی رخ می‌دهد. واکنش‌های شیمیایی به شکل تشکیل ژل نشاسته، دناتوراسیون پروتئین‌ها و ایجاد عطر و طعم روی می‌دهد. تغییرات فیزیکی نیز به شکل کاهش محتوای رطوبت، افزایش محتوای روغن، ایجاد و گسترش پوسته و چروکیدگی یا تورم محصول ظاهر می‌شود (فارکاس و همکاران ۱۹۹۶). کیفیت سیب‌زمینی سرخ‌شده به شکل عمده به ویژگی‌های ساختاری آن از جمله دانسیته و تخلخل بستگی دارد.

طی سرخ‌کردن مواد غذایی تغییر در حجم ماده سرخ‌شده به شکل دو پدیده چروکیدگی^۱ و پف‌کردن^۲ بروز می‌کند (کاواس و موریرا ۲۰۰۰). تغییرات حجم وابسته به عوامل مختلفی از جمله شکل (موریرا و همکاران ۲۰۰۰)، شرایط آزمایشی (مک مین و ماگی ۱۹۹۶) و روش سرخ‌کردن (کروکیدا و همکاران ۲۰۰۰) می‌باشد. پدیده چروکیدگی به واسطه از دست رفتن رطوبت و کاهش حفرات رخ می‌دهد. در محصولاتی مانند سیب‌زمینی، تشکیل ژل نشاسته و تورم خیلی سریع اتفاق می‌افتد؛ این امر باعث می‌شود تا سلول‌های سیب‌زمینی با محتوای نشاسته‌ای متراکم قادر باشند خروج آب را بدون ایجاد پارگی در دیواره سلولی و به شکل بروز پدیده چروکیدگی متحمل شوند. بنابراین، روغن به جای نفوذ به داخل سلول‌ها، وارد حفرات بین‌سلولی می‌شود که با خروج آب و در اثر از بین رفتن نیروهای چسبندگی ایجاد شده‌اند (آگوئیلرا و همکاران ۲۰۰۱).

¹ Shrinkage

² Puffing

سیب‌زمینی شیرین سرخ‌شده در دمای 170°C مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که چروکیدگی نمونه‌های شاهد کمتر از نمونه‌های پیش‌تیمارشده بود. چروکیدگی نمونه‌ها با افزایش زمان سرخ‌کردن افزایش پیدا کرد تا به بیشترین میزان خود در ۱۲۰ ثانیه رسید و پس از آن کاهش یافته و یا متوقف گردید. همچنین، ضیایی‌فر و همکاران (۲۰۱۰) پدیده چروکیدگی در قطعات سیب‌زمینی سرخ‌شده را به شکل تابعی از زمان سرخ‌کردن و محتوای رطوبت مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که در مراحل اولیه سرخ‌کردن، چروکیدگی به سرعت رخ می‌دهد، سپس با ادامه فرآیند از سرعت آن کاسته می‌شود و با رسیدن به محتوای رطوبت ۳ گرم آب بر گرم ماده خشک متوقف می‌شود. دلیل متوقف شدن چروکیدگی به شکل‌گیری پوسته سفت مقاوم در برابر کاهش حجم بیشتر، ارتباط داده شد. همچنین، در این مطالعه مشاهده شد که سرخ‌کردن در دماهای بالاتر منجر به چروکیدگی بیشتر در زمان‌های یکسان می‌گردد. با وجود مطالعات اندک انجام شده در زمینه بررسی چروکیدگی طی فرآیند سرخ‌کردن، در ارتباط با مدل‌سازی این تغییرات، اطلاعاتی در منابع وجود ندارد. بدیهی است تجزیه و تحلیل و مدل‌سازی تغییرات ساختاری از جمله چروکیدگی می‌تواند ابزار مفیدی برای پیش‌بینی شاخص‌های کمی و کیفی ماده غذایی سرخ‌شده مانند میزان خروج آب، جذب روغن و دانسیته باشد. بنابراین، هدف این مطالعه بررسی تاثیر پیش‌تیمارهای اولتراسوند و آبیگری اسمزی بر میزان چروکیدگی و مدل‌سازی ریاضی آن طی سرخ‌کردن عمیق سیب‌زمینی بود.

مواد و روش‌ها

مواد

مواد خام مورد استفاده در این پژوهش سیب‌زمینی و روغن سرخ‌کردنی بود. سیب‌زمینی‌های خریداری شده از بازار محلی در سردخانه تاریک نگهداری شدند. روغن

طی دهه‌های اخیر برای حفظ سلامت مصرف‌کنندگان، تلاش شده است با به‌کارگیری روش‌هایی مانند استفاده از پیش‌تیمارهای مختلف، محتوای روغن در سیب‌زمینی-های سرخ‌شده کاهش داده شود. از جمله این پیش‌تیمارها می‌توان به آبیگری اسمزی اشاره کرد که برای تولید محصولات سرخ‌شده کم‌چرب بسیار مورد توجه می‌باشد. آبیگری اسمزی با هدف کاهش محتوای رطوبت اولیه ماده خام از طریق غوطه‌ور ساختن در محلول هیپرتونیک انجام می‌گیرد. طی این فرآیند با حذف بخش بزرگی از آب موجود و ورود ماده جامد به شبکه ماده غذایی، ویژگی‌های ساختاری ماده اولیه از جمله دانسیته ظاهری و تخلخل دستخوش تغییراتی می‌شوند. علاوه بر این پیش‌تیمار، استفاده از امواج اولتراسوند^۳ نیز در دهه‌های اخیر در فرآیندهای صنایع غذایی مورد توجه قرار گرفته است. پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه استفاده از پیش‌تیمار اولتراسوند در فرآیند خشک‌کردن، نتایجی مانند افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت، کاهش چروکیدگی و بهبود خصوصیات ظاهری و حسی محصول نهایی به همراه داشته است. دلیل این امر به شکل‌گیری کانال‌های میکروسکوپی در ماده غذایی در اثر انقباض و انبساط‌های متوالی ایجاد شده توسط امواج اولتراسوند نسبت داده می‌شود که باعث تسهیل خروج آب از ماده غذایی می‌گردد (فرناندز و همکاران ۲۰۰۹). با اینکه تاکنون مطالعه‌ای در زمینه تاثیر پیش‌تیمار اولتراسوند بر ویژگی‌های فیزیکی محصولات نهایی در فرآیند سرخ‌کردن انجام نشده است، ولی انتظار می‌رود به دلیل وجود شباهت‌هایی در زمینه خروج رطوبت در دو فرآیند خشک‌کردن و سرخ‌کردن، نتایج مشابهی نیز در زمینه تغییرات ساختاری به دست آید.

تایوو و بایک (۲۰۰۷)، اثرات پیش‌تیمارهای مختلف (آنزیم‌بری، انجماد، خشک کردن در هوا و آبیگری اسمزی) را بر روی چروکیدگی و ویژگی‌های ساختاری

³ Ultrasound

ماده خشک محاسبه گردید. سپس، محتوای رطوبت بدون بعد با استفاده از رابطه ۱ حساب شد:

$$M_t = \frac{m_t - m_e}{m_0 - m_e} \quad (1)$$

M_t : محتوای رطوبت بدون بعد

m_t : مقدار رطوبت در لحظه t ام (g water/g dry basis)

m_0 : رطوبت اولیه سیب زمینی (g water/g dry basis)

m_e : رطوبت تعادلی (g water/g dry basis)

اندازه‌گیری محتوای روغن

محتوای روغن نمونه‌ها با بکارگیری روش استخراج سوکسله (AOAC ۱۹۹۴) با استفاده از حلال پترولیوم اتر اندازه‌گیری شده و بر حسب گرم روغن بر گرم ماده خشک گزارش گردید.

اندازه‌گیری میزان چروکیدگی

میزان چروکیدگی نمونه‌های سرخ‌شده با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد (ضیایی‌فر و همکاران ۲۰۱۰):

$$S_{(t)} = \frac{V_0 - V_{(t)}}{V_0} \quad (2)$$

$S_{(t)}$: درصد چروکیدگی

V_0 : حجم ظاهری نمونه تازه (cm^3)

$V_{(t)}$: حجم ظاهری نمونه پس از سرخ‌شدن (cm^3)

حجم ظاهری نمونه‌ها با بکارگیری تکنیک جابجایی حلال با استفاده از حلال تولوئن به کمک یک پیکنومتر شیشه‌ای اندازه‌گیری و با استفاده از رابطه ۳ محاسبه گردید (ضیایی‌فر و همکاران ۲۰۱۰):

$$V = \frac{M + M_1 - M_2}{\rho} \quad (3)$$

V : حجم ظاهری نمونه

M : وزن نمونه

M_1 : وزن پیکنومتر خالی و حلال

M_2 : وزن پیکنومتر حاوی نمونه و حلال

ρ : دانسیته تولوئن

اندازه‌گیری دانسیته ظاهری

دانسیته ظاهری قطعات سیب‌زمینی سرخ‌شده نیز از طریق رابطه ۴ حساب شد (ضیایی‌فر و همکاران ۲۰۰۸):

سرخ‌کردنی مورد استفاده مخلوطی از روغن‌های آفتابگردان، سویا و پنبه‌دانه بود.

برای آماده‌سازی نمونه‌ها، ابتدا سیب‌زمینی‌ها شسته شده و پس از پوست‌گیری، با استفاده از یک کاتر دستی به قطعاتی به شکل مکعب مستطیل به ابعاد $4 \times 1/2 \times 1/2 \text{ cm}$ (ارتفاع \times عرض \times طول) برش داده شدند. قطعات برش داده شده به منظور حذف نشاسته سطحی با آب مقطر شستشو داده شدند و آب اضافی سطحی نیز توسط یک کاغذ خشک‌کن گرفته شد.

پیش‌تیمارها

نمونه‌ها بر حسب نوع پیش‌تیمار انجام شده، به گروه‌های مختلف بر اساس جدول ۱ تقسیم شدند.

شرایط سرخ کردن

در این پژوهش، از یک سرخ‌کن خانگی (Mulinex مدل F430.R، ساخت فرانسه، مجهز به سیستم تنظیم دما در محدوده ۱۵۰ تا ۱۹۰°C) استفاده شد. سرخ‌کردن در سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰°C و به مدت زمان‌های ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ ثانیه تا سرخ شدن کامل نمونه‌ها انجام گردید. برای این منظور، سرخ‌کن با ۲ لیتر روغن سرخ‌کردنی پر شده و بعد از رسیدن روغن به دمای مورد نظر ۷ قطعه سیب‌زمینی داخل سبد مشبک قرار گرفته و به شکل اتوماتیک تا زمان موردنظر سرخ شدند. روغن سطحی نمونه‌های سرخ‌شده بلافاصله پس از خروج از سرخ‌کن با کاغذ خشک‌کن گرفته شد. پس از هر ۲ ساعت سرخ‌کردن، روغن داخل دستگاه تعویض گردید. تمام آزمایشات ۲ بار تکرار شده و مقادیر گزارش‌شده میانگین داده‌های حاصل از آزمایشات می‌باشند.

اندازه‌گیری محتوای رطوبت

محتوای رطوبت سیب‌زمینی‌های سرخ‌شده با خشک‌کردن در یک آون کنوکسیونی (مدل BM120، ۱۲۰ لیتری، ساخت ایران، شرکت فن آزما گستر، هوشمند و مجهز به فن سیرکولاسیون هوا) تا رسیدن به وزن ثابت در دمای ۱۰۵°C اندازه‌گیری شده و بر حسب گرم آب بر گرم

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (4)$$

M: جرم محصول (g)
V: حجم ظاهری محصول (cm³)

ρ: دانسیته ظاهری محصول (g/cm³)

جدول ۱- علائم اختصاری مورد استفاده برای تیمارهای مختلف

علامت اختصاری	تیمار	ردیف
Control	شاهد	۱
U28	اولتراسوند با فرکانس ۲۸ کیلوهرتز	۲
U40	اولتراسوند با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز	۳
O2	آبیگری اسمزی با محلول نمک ۲٪	۴
O4	آبیگری اسمزی با محلول نمک ۴٪	۵
U28 - O2	اولتراسوند با فرکانس ۲۸ کیلوهرتز - آبیگری اسمزی با محلول نمک ۲٪	۶
U40 - O2	اولتراسوند با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز - آبیگری اسمزی با محلول نمک ۲٪	۷
U28 - O4	اولتراسوند با فرکانس ۲۸ کیلوهرتز - آبیگری اسمزی با محلول نمک ۴٪	۸
U40 - O4	اولتراسوند با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز - آبیگری اسمزی با محلول نمک ۴٪	۹

(۱) نمونه‌های شاهد

(۲) و (۳): نمونه‌های قرار گرفته در معرض اولتراسونیکاسیون با استفاده از دستگاه حمام اولتراسوند (مدل USD-4R، مجهز به سیستم تنظیم فرکانس و زمان اولتراسونیکاسیون) در فرکانس‌های ۲۸ و ۴۰ kHz و به مدت زمان ۱۵ دقیقه

(۴) و (۵): نمونه‌های آبیگری شده اسمزی با استفاده از محلول نمک در دو غلظت ۲ و ۴ درصد وزنی/وزنی در دمای ۴۰°C و نسبت ۱:۱۰ نمونه به محلول اسمزی به مدت ۳ ساعت

(۶)، (۷)، (۸) و (۹): نمونه‌های حاصل از تلفیق پیش‌تیمارهای اولتراسوند و آبیگری اسمزی که ابتدا در دستگاه حمام اولتراسوند در معرض فرکانس‌های ۲۸ و ۴۰ kHz و به مدت زمان ۱۵ دقیقه قرار گرفته و سپس با استفاده از محلول‌های نمک در دو غلظت ۲ و ۴ درصد وزنی/وزنی در دمای ۴۰°C به مدت زمان ۳ ساعت تحت آبیگری اسمزی واقع شدند.

مدل‌سازی ریاضی

در این مطالعه، میزان چروکیدگی نمونه‌های سیب‌زمینی طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق برحسب چهار پارامتر زمان، محتوای روغن، محتوای رطوبت بدون بعد و دانسیته ظاهری مدل‌سازی شد. مدل‌های پیشنهادی از طریق برازش داده‌های حاصل از آزمایش با استفاده از نرم‌افزار MATLAB (Version 7.12.0.635, R2011a) به دست آمد. ۶ مدل برای بررسی میزان چروکیدگی قطعات سیب‌زمینی با گذشت زمان (مدل‌های ۱-۶ جدول ۳) و ۳ مدل برای بررسی میزان چروکیدگی نمونه‌ها بر حسب محتوای روغن، محتوای رطوبت بدون بعد و دانسیته ظاهری پیشنهاد گردید (مدل‌های ۷-۹ جدول ۳). ارزیابی مدل‌ها با استفاده از دو معیار ضریب همبستگی (R²) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)

انجام شد. مدل‌هایی که دارای R² بالاتر و RMSE پایین‌تری بودند به عنوان مدل پیشنهادی انتخاب گردیدند.

آنالیز آماری

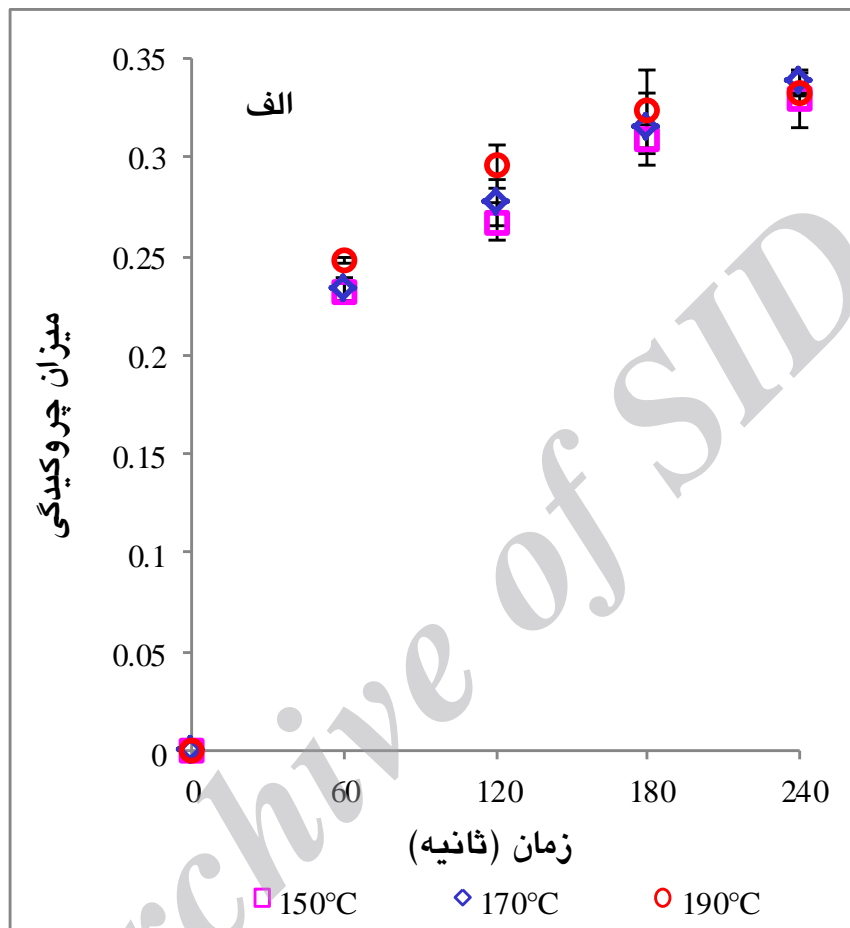
در این مطالعه ۹ تیمار نشان داده شده در جدول ۱، در سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰°C و چهار زمان ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ ثانیه در دو تکرار (۲×۳×۴×۹=۲۱۶) سرخ شدند. برای تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها از نرم‌افزار SAS 9.1 و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون بونفرونی^۴ (استیل و همکاران ۱۹۹۶) در سطح احتمال ۵٪ بر اساس آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی استفاده شد.

⁴ Bonferroni

نتایج و بحث

تأثیر شرایط فرایند و پیش‌تیمارها بر چروکیدگی

شکل ۱، میزان چروکیدگی نمونه‌های شاهد را با گذشت زمان طی سرخ‌شدن در سه دمای ۱۷۰، ۱۵۰ و ۱۹۰°C نشان می‌دهد. در تمامی دماها، میزان چروکیدگی با



شکل ۱- میزان (درصد) چروکیدگی قطعات سیب‌زمینی شاهد سرخ‌شده به صورت تابعی از زمان طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق در دماهای مختلف

رطوبت در دماهای بالاتر می‌باشد. تجزیه و تحلیل آماری نیز نشان داد که تأثیر دما بر روی کاهش یا افزایش حجم نمونه‌ها معنی‌دار نیست. نتایج مشابهی از مطالعات بایک و میتال (۲۰۰۵)، تایوو و بایک (۲۰۰۷) و ضیایی فر و همکاران (۲۰۱۰) به دست آمده است.

گذشت زمان افزایش یافت. در مراحل اولیه سرخ‌کردن، چروکیدگی به سرعت رخ می‌دهد، سپس کند شده و به حالت تعادلی نزدیک می‌شود. کند شدن آهنگ وقوع چروکیدگی را می‌توان به تشکیل یک پوسته سفت و مقاوم در برابر کاهش حجم بیشتر نسبت داد. همچنین، سرخ‌کردن در دماهای بالاتر (۱۷۰ و ۱۹۰°C) نسبت به دمای پایین (۱۵۰°C) منجر به چروکیدگی بیشتر در زمان‌های یکسان شد. دلیل این امر، افزایش آهنگ انتقال

جدول ۲- میزان چروکیدگی قطعات سیب‌زمینی سرخ‌شده به صورت تابعی از محتوای رطوبت طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق در

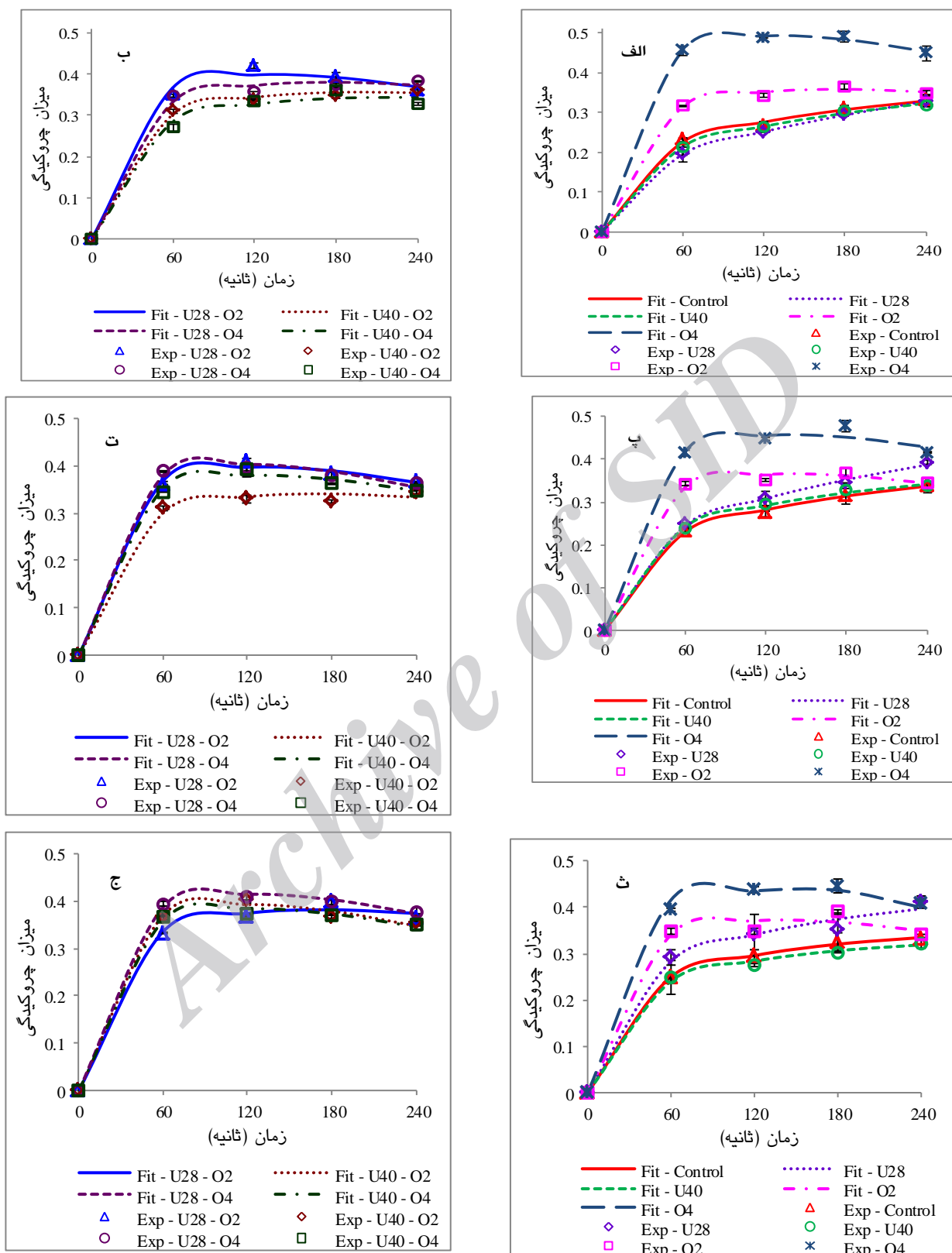
دمای 150°C در پیش‌تیمارهای مختلف طبق جدول ۱

تیمار	زمان (ثانیه)	محتوای رطوبت (گرم آب بر گرم ماده خشک)	درصد چروکیدگی
Control	۰	$4/90.77 \pm 0.9778$	۰
	۶۰	$3/85.53 \pm 0.7100$	0.2311 ± 0.0053
	۱۲۰	$3/34.12 \pm 0.5741$	0.2670 ± 0.0095
	۱۸۰	$3/12.64 \pm 0.7418$	0.3096 ± 0.0074
	۲۴۰	$2/91.61 \pm 0.11396$	0.3302 ± 0.0145
U28	۰	$5/10.42 \pm 0.8727$	۰
	۶۰	$4/01.08 \pm 0.20370$	0.1948 ± 0.0165
	۱۲۰	$3/40.13 \pm 0.8520$	0.2517 ± 0.0024
	۱۸۰	$3/13.68 \pm 0.14517$	0.2948 ± 0.0037
	۲۴۰	$2/82.23 \pm 0.12009$	0.3272 ± 0.0132
U40	۰	$5/22.64 \pm 0.7889$	۰
	۶۰	$4/03.68 \pm 0.4917$	0.2118 ± 0.0202
	۱۲۰	$3/48.46 \pm 0.7161$	0.2640 ± 0.0140
	۱۸۰	$3/04.05 \pm 0.9387$	0.3055 ± 0.0030
	۲۴۰	$2/74.51 \pm 0.8223$	0.3185 ± 0.0021
O2	۰	$4/10.92 \pm 0.9839$	۰
	۶۰	$3/01.62 \pm 0.3675$	0.3175 ± 0.0020
	۱۲۰	$2/51.42 \pm 0.9591$	0.3431 ± 0.0051
	۱۸۰	$2/38.59 \pm 0.6285$	0.3652 ± 0.0073
	۲۴۰	$2/09.40 \pm 0.5994$	0.3497 ± 0.0060
O4	۰	$3/40.68 \pm 0.9315$	۰
	۶۰	$2/33.91 \pm 0.10095$	0.4562 ± 0.0122
	۱۲۰	$1/92.22 \pm 0.5711$	0.4880 ± 0.0010
	۱۸۰	$1/73.79 \pm 0.4382$	0.4917 ± 0.0132
	۲۴۰	$1/54.98 \pm 0.11236$	0.4492 ± 0.0195
U28 – O2	۰	$3/67.09 \pm 0.8491$	۰
	۶۰	$2/74.84 \pm 0.12542$	0.3502 ± 0.0082
	۱۲۰	$2/42.27 \pm 0.7666$	0.4209 ± 0.0071
	۱۸۰	$2/17.82 \pm 0.12471$	0.3963 ± 0.0084
	۲۴۰	$1/95.58 \pm 0.5011$	0.3607 ± 0.0064
U40 – O2	۰	$3/86.38 \pm 0.6516$	۰
	۶۰	$2/91.85 \pm 0.11415$	0.3109 ± 0.0046
	۱۲۰	$2/74.75 \pm 0.80368$	0.3395 ± 0.0029
	۱۸۰	$2/51.72 \pm 0.6882$	0.3471 ± 0.0052
	۲۴۰	$2/27.86 \pm 0.6017$	0.3626 ± 0.0022
U28 – O4	۰	$2/77.27 \pm 0.9781$	۰
	۶۰	$2/41.67 \pm 0.5935$	0.3485 ± 0.0040
	۱۲۰	$2/27.64 \pm 0.9247$	0.3576 ± 0.0006
	۱۸۰	$2/10.14 \pm 0.7854$	0.3732 ± 0.0047
	۲۴۰	$1/99.39 \pm 0.7816$	0.3832 ± 0.0008
U40 – O4	۰	$3/16.87 \pm 0.10904$	۰
	۶۰	$2/64.24 \pm 0.7639$	0.2704 ± 0.0075
	۱۲۰	$2/35.23 \pm 0.4789$	0.3365 ± 0.0013
	۱۸۰	$2/09.54 \pm 0.8712$	0.3612 ± 0.0071
	۲۴۰	$1/95.13 \pm 0.3482$	0.3829 ± 0.0039

جدول ۲، میزان چروکیدگی نمونه‌های شاهد و پیش‌ تیمار شده طبق جدول ۱ را بر حسب محتوای رطوبت آنها، به ترتیب در زمان‌های مختلف سرخ‌کردن (۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ ثانیه) از شروع فرآیند در دمای 150°C نشان می‌دهد. میزان چروکیدگی نمونه‌های شاهد و پیش‌ تیمار شده با امواج اولتراسوند در هر دو فرکانس ۲۸ و ۴۰ kHz با کاهش محتوای رطوبت افزایش یافت. در مورد نمونه‌های پیش‌ تیمار شده با آبگیری اسمزی، میزان چروکیدگی در مراحل اولیه سرخ‌کردن با کاهش محتوای رطوبت افزایش یافت ولی در محتوای رطوبت کمتر از ۲/۵ گرم آب بر گرم ماده خشک بدون روغن، حجم نمونه‌ها در اثر پدیده پف‌کردن افزایش پیدا کرد. دلیل این امر، تجمع فشار بخار در زیر پوسته تشکیل شده می‌باشد که با ایجاد حباب‌هایی باعث افزایش حجم ماده غذایی می‌شود. یامسانگ سونگ و موریرا (۲۰۰۲)، تایوو و بایک (۲۰۰۷) و یامسانگ سونگ و همکاران (۲۰۱۱) در مطالعات خود به نتایج مشابهی دست یافتند. در این نمونه‌ها آهنگ تغییرات چروکیدگی در برابر محتوای رطوبت، رفتار غیر خطی از خود نشان دادند. نمونه‌های پیش‌ تیمار شده با اولتراسوند و آبگیری اسمزی به صورت تلفیقی نیز رفتاری مشابه نمونه‌های پیش‌ تیمار شده با آبگیری اسمزی از خود نشان دادند.

شکل ۲، تغییرات میزان چروکیدگی در نمونه‌های شاهد و پیش‌ تیمار شده را در زمان‌های سرخ‌کردن ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ ثانیه و در دماهای ۱۵۰، ۱۷۰ و 190°C نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۲-الف مشاهده می‌شود، پیش‌ تیمار اولتراسوند در هر دو سطح فرکانس ۲۸ و ۴۰ kHz در مقایسه با نمونه‌های شاهد باعث کاهش میزان چروکیدگی شد. با این حال، اختلاف معنی‌داری بین میزان چروکیدگی نمونه‌های شاهد و پیش‌ تیمار شده با امواج اولتراسوند و همچنین بین دو سطح فرکانس ۲۸ و ۴۰ kHz مشاهده نشد. بر خلاف

پیش‌ تیمار اولتراسوند، نمونه‌های پیش‌ تیمار شده با آبگیری اسمزی میزان چروکیدگی بیشتری از خود نشان دادند. تجزیه آماری نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین میزان چروکیدگی نمونه‌های شاهد و پیش‌ تیمار شده با آبگیری اسمزی و همچنین بین دو سطح غلظت ۲ و ۴٪ وجود دارد. این افزایش در میزان چروکیدگی را می‌توان به کاهش حجم نمونه‌ها طی آبگیری اسمزی پیش از سرخ‌کردن نسبت داد که در اثر خروج بخش زیادی از محتوای رطوبت آنها رخ می‌دهد. با بررسی شکل ۲-ب نیز دیده می‌شود که تمامی پیش‌ تیمارهای تلفیقی باعث افزایش میزان چروکیدگی نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌های شاهد گردیدند. از نقطه نظر آماری، اختلاف بین این نمونه‌ها با نمونه‌های شاهد معنی‌دار بود ولی اختلاف معنی‌داری بین چهار پیش‌ تیمار با یکدیگر مشاهده نگردید. در این نمونه‌ها نیز به دلیل استفاده از پیش‌ تیمار آبگیری اسمزی که باعث چروکیدگی قابل توجهی در نمونه‌ها پیش از فرآیند سرخ‌کردن می‌شود، میزان چروکیدگی افزایش یافت.



شکل ۲- تغییرات میزان چروکیدگی حاصل از آزمایش (Exp) و برازش‌شده (Fit) با مدل ۱ جدول ۳، طی سرخ‌کردن عمیق قطعات سیب‌زمینی با گذشت زمان، در دماهای ۱۵۰ (الف و ب)، ۱۷۰ (پ و ت) و ۱۹۰°C (ث و ج) در پیش‌تیمارهای مختلف طبق جدول ۱

مدل‌سازی چروکیدگی

تغییرات میزان چروکیدگی در قطعات سیب‌زمینی سرخ شده در دماهای مختلف به صورت تابعی از زمان سرخ کردن (t)، محتوای روغن (O)، محتوای رطوبت بدون بعد (M_t) و دانسیته ظاهری (ρ) با استفاده از روابط پیشنهادی که در جدول ۳ آورده شده است، مدل‌سازی گردید. ضرایب و مقادیر R² و RMSE مربوط به مدل‌ها در جدول ۴ آورده شده است. تمامی مدل‌های پیشنهادی با داشتن R² بالا و RMSE پایین به خوبی توانستند داده‌های آزمایشی را برازش نمایند. شکل ۲، برازش داده‌های حاصل از آزمایش را با مدل پیشنهادی شماره ۱ در شرایط مختلف دما و زمان در نمونه‌های شاهد و پیش‌تیمارهای مختلف نشان می‌دهد. این مدل به دلیل داشتن R² بالاتر و RMSE پایین‌تر نسبت به بقیه مدل‌ها به منظور برازش داده‌های تجربی مورد استفاده قرار گرفت. همچنین، شکل ۳ (الف، ب و پ) منحنی‌های حاصل از برازش داده‌های آزمایشی میزان چروکیدگی را بر حسب محتوای روغن، محتوای رطوبت بدون بعد و میزان دانسیته ظاهری به ترتیب با مدل‌های پیشنهادی ۷، ۸ و ۹ جدول ۳ در نمونه‌های شاهد و دماهای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰°C، به ترتیب در زمان‌های مختلف سرخ‌کردن (۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ ثانیه) از شروع فرآیند نشان می‌دهد.

با استفاده از این مدل‌ها به راحتی می‌توان میزان چروکیدگی را با داشتن مقادیر مختلف محتوای روغن، محتوای رطوبت بدون بعد و دانسیته ظاهری به دست آورد. همچنین، با استفاده از چنین مدل‌هایی می‌توان زمان مناسب برای دستیابی به یک نمونه سرخ‌شده با میزان چروکیدگی معین و مناسب را محاسبه نموده و نمونه غذایی را تنها تا زمان مورد نظر سرخ کرد. از طرف دیگر، با بدست آوردن چنین مدل‌هایی، لزوم انجام آزمایشات پرهزینه در شرایط مختلف ذکر شده در فرآیند سرخ‌کردن کاهش پیدا می‌کند.

جدول ۳- مدل‌های مورد استفاده برای بررسی تغییرات

میزان چروکیدگی قطعات سیب‌زمینی بر حسب زمان (t)، محتوای روغن (O)، محتوای رطوبت بدون بعد (M_t) و

دانسیته ظاهری (ρ)

ردیف	مدل ریاضی	مرجع
[۱]	$S_{(t)} = at + bt^{1/3}$	پژوهش حاضر
[۲]	$S_{(t)} = at^2 + bt^{1/4}$	پژوهش حاضر
[۳]	$S_{(t)} = at/(t + b)$	پژوهش حاضر
[۴]	$S_{(t)} = a \exp(t - b/t + 1)$	پژوهش حاضر
[۵]	$S_{(t)} = t \exp(at - b)$	پژوهش حاضر
[۶]	$S_{(t)} = at^2 + bt + c$	پژوهش حاضر
[۷]	$S(t) = aO/(b + O)$	پژوهش حاضر
[۸]	$S(t) = aM_t^2 + M_t + b$	پژوهش حاضر
[۹]	$S(t) = a \exp[-(\rho - b/c)^2]$	پژوهش حاضر

با وجود اینکه از لحاظ آماری تاثیر آبیگری اسمزی در غلظت ۴٪ نمک بر میزان چروکیدگی معنی‌دار بود، آبیگری اسمزی در غلظت ۲٪ نمک به استثنای زمان ۶۰ ثانیه تاثیر معنی‌داری از خود نشان نداد. همچنین در دمای ۱۷۰°C نیز اختلاف معنی‌داری بین دو غلظت ۲ و ۴٪ نمک وجود داشت. با توجه به شکل ۲-ت دیده می‌شود که پیش‌تیمارهای تلفیقی باعث افزایش میزان چروکیدگی نسبت به نمونه‌های شاهد شده‌اند که این افزایش تنها در زمان‌های ابتدایی فرآیند سرخ کردن معنی‌دار بود.

همچنین، از لحاظ آماری چهار پیش‌تیمار تلفیقی اختلاف معنی‌داری در مقایسه با یکدیگر از خود نشان ندادند.

با بررسی شکل‌های ۳-ث و ج دیده می‌شود که تغییرات میزان چروکیدگی نمونه‌های شاهد و پیش‌تیمار شده با اولتراسوند، آبیگری اسمزی و تلفیقی از این دو پیش‌تیمار در دمای ۱۹۰°C از روندی مشابه با دمای ۱۷۰°C برخوردار می‌باشد. کمترین میزان چروکیدگی در این دما، مربوط به نمونه‌های پیش‌تیمار شده با امواج اولتراسوند در فرکانس ۴۰ kHz و شاهد بود.

جدول ۴- پارامترهای آماری حاصل از مدل‌های ۱-۹ جدول ۳ برای دماها و تیمارهای مختلف طبق جدول ۱

دمای (°C)													مدل ۱
۱۹۰				۱۷۰				۱۵۰					
RMSE	R ²	b	a	RMSE	R ²	b	a	RMSE	R ²	b	a	پیش‌تیمار	
۰/۰۰۳۰	۰/۹۹	۰/۰۷۰	-۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۳۵	۰/۹۹	۰/۰۶۲	-۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۶۲	۰/۹۹	۰/۰۶۱	-۰/۰۰۰۲	Control	
۰/۰۱۵۷	۰/۹۹	۰/۰۷۸	-۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۵۸	۰/۹۹	۰/۰۶۳	-۱/۱× ^۰ -۱۰	۰/۰۰۱۱	۰/۹۹	۰/۰۴۸	-۰/۰۰۰۱	U28	
۰/۰۰۶۶	۰/۹۹	۰/۰۶۸	-۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۵۱	۰/۹۹	۰/۰۶۶	-۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۵۳	۰/۹۹	۰/۰۵۷	-۰/۰۰۰۱	U40	
۰/۰۱۹۲	۰/۹۹	۰/۱۰۷	-۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۹۴	۰/۹۹	۰/۱۰۵	-۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۶۴	۰/۹۹	۰/۰۹۶	-۰/۰۰۱۰	O2	
۰/۰۰۸۲	۰/۹۹	۰/۱۲۵	-۰/۰۰۱۵	۰/۰۱۷۴	۰/۹۹	۰/۱۳۲	-۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۵۹	۰/۹۹	۰/۱۴۵	-۰/۰۰۱۹	O4	
۰/۰۱۳۲	۰/۹۹	۰/۱۰۳	-۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۹۴	۰/۹۹	۰/۱۱۸	-۰/۰۰۱۵	۰/۰۱۷۷	۰/۹۹	۰/۱۱۷	-۰/۰۰۱۵	U28 – O2	
۰/۰۱۰۰	۰/۹۹	۰/۱۲۰	-۰/۰۰۱۷	۰/۰۱۳۵	۰/۹۹	۰/۰۹۲	-۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۸۳	۰/۹۹	۰/۰۹۱	-۰/۰۰۰۹	U40 – O2	
۰/۰۰۵۸	۰/۹۹	۰/۱۲۵	-۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۹۵	۰/۹۹	۰/۱۲۴	-۰/۰۰۱۷	۰/۰۱۴۱	۰/۹۹	۰/۱۰۲	-۰/۰۰۱۱	U28 – O4	
۰/۰۰۸۲	۰/۹۹	۰/۱۱۵	-۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۹۶	۰/۹۹	۰/۱۱۳	-۰/۰۰۱۵	۰/۰۱۷۹	۰/۹۹	۰/۰۸۵	-۰/۰۰۰۷	U40 – O4	

دمای (°C)													مدل ۲
۱۹۰				۱۷۰				۱۵۰					
RMSE	R ²	b	a× ^۰ -۱۰	RMSE	R ²	b	a× ^۰ -۱۰	RMSE	R ²	b	a× ^۰ -۱۰	پیش‌تیمار	
۰/۰۰۳۷	۰/۹۹	۰/۰۹۱	-۰/۳۹۲	۰/۰۰۲۲	۰/۹۹	۰/۰۸۳	-۰/۱۸۲	۰/۰۰۴۹	۰/۹۹	۰/۰۸۲	-۱/۵۸	Control	
۰/۰۱۴۲	۰/۹۹	۰/۱۰۲	-۰/۰۱۱	۰/۰۰۵۱	۰/۹۹	۰/۱۰۸	۰/۷۳۱	۰/۰۰۵۹	۰/۹۹	۰/۰۷۱	-۱/۸۹۰	U28	
۰/۰۰۵۸	۰/۹۹	۰/۰۸۷	-۰/۳۶۴	۰/۰۰۷۰	۰/۹۹	۰/۰۸۸	-۰/۰۸۷	۰/۰۰۷۷	۰/۹۹	۰/۰۷۸	-۱/۲۸۳	U40	
۰/۰۱۹۳	۰/۹۹	۰/۱۲۳	-۲/۴۳	۰/۰۱۲۱	۰/۹۹	۰/۱۲۱	-۲/۳۴	۰/۰۰۶۹	۰/۹۹	۰/۱۱۴	-۱/۷۱	O2	
۰/۰۰۳۳	۰/۹۸	۰/۱۴۵	-۲/۸۲	۰/۰۱۳۶	۰/۹۹	۰/۱۵۳	-۳/۰۹	۰/۰۰۷۰	۰/۹۹	۰/۱۶۶	-۳/۵۴	O4	
۰/۰۱۱۰	۰/۹۹	۰/۱۲۲	-۱/۹۳	۰/۰۱۰۰	۰/۹۹	۰/۱۳۴	-۲/۸۹	۰/۰۱۲۹	۰/۹۹	۰/۱۳۵	-۲/۹۱	U28 – O2	
۰/۰۱۴۳	۰/۹۹	۰/۱۳۴	-۳/۱۹	۰/۰۱۶۵	۰/۹۹	۰/۱۰۸	-۱/۵۸	۰/۰۱۰۳	۰/۹۹	۰/۱۱۰	-۱/۳۱	U40 – O2	
۰/۰۱۳۲	۰/۹۹	۰/۱۴۰	-۳/۱۴	۰/۰۱۷۵	۰/۹۹	۰/۱۳۷	-۳/۲۶	۰/۰۱۷۰	۰/۹۹	۰/۱۲۰	-۱/۷۰	U28 – O4	
۰/۰۱۴۴	۰/۹۹	۰/۱۳۰	-۲/۹۰	۰/۰۱۰۳	۰/۹۹	۰/۱۲۸	-۲/۷۸	۰/۰۱۶۲	۰/۹۹	۰/۱۰۵	-۱/۲۷	U40 – O4	

دمای (°C)													مدل ۳
۱۹۰				۱۷۰				۱۵۰					
RMSE	R ²	b	a	RMSE	R ²	b	a	RMSE	R ²	b	a	پیش‌تیمار	
۰/۰۰۲۷	۰/۹۹	۳۱/۶۷	۰/۳۷۷	۰/۰۰۸۲	۰/۹۹	۴۳/۲۸	۰/۳۹۱	۰/۰۱۰۴	۰/۹۹	۴۱/۷۵	۰/۳۸۰	Control	
۰/۰۱۸۲	۰/۹۹	۳۳/۶۵	-۱/۴۴۴	۰/۰۱۲۳	۰/۹۹	۵۷/۴۸	-۱/۴۶۹	۰/۰۰۷۱	۰/۹۹	۷۴/۰۱	-۱/۴۲۰	U28	
۰/۰۰۸۱	۰/۹۹	۲۷/۰۸	۰/۳۵۱	۰/۰۰۲۸	۰/۹۹	۴۰/۳۱	۰/۳۹۶	۰/۰۰۵۱	۰/۹۹	۵۰/۹۸	-۱/۳۸۶	U40	
۰/۰۲۱۳	۰/۹۹	۳/۰۹۷	۰/۳۶۷	۰/۰۱۰۳	۰/۹۹	۲/۸۵۳	۰/۳۶۰	۰/۰۰۸۵	۰/۹۹	۱۰/۵۴	۰/۳۷۴	O2	
۰/۰۲۰۱	۰/۹۹	۶/۱۹۷	-۱/۴۴۴	۰/۰۲۷۳	۰/۹۹	۵/۱۶۶	-۱/۴۵۸	۰/۰۲۱۰	۰/۹۹	۲/۰۱۴	-۱/۴۷۹	O4	
۰/۰۱۷۸	۰/۹۹	۱۱/۹۴	-۱/۴۰۴	۰/۰۲۱۱	۰/۹۹	۲/۷۵۸	-۱/۳۸۹	۰/۰۳۰۱	۰/۹۸	۵/۹۶۳	-۱/۴۰۱	U28 – O2	
۰/۰۲۱۰	۰/۹۹	-۱/۵۳۷	۰/۳۶۸	۰/۰۰۷۶	۰/۹۹	۷/۴۰۶	۰/۳۴۹	۰/۰۰۳۹	۰/۹۹	۱۳/۰۹	-۱/۳۷۷	U40 – O2	
۰/۰۱۲۵	۰/۹۹	-۱/۱۷۸	۰/۳۹۱	۰/۰۱۱۲	۰/۹۹	-۳/۸۵۴	۰/۳۶۹	۰/۰۰۶۴	۰/۹۹	۷/۷۹۲	-۱/۳۹۰	U28 – O4	
۰/۰۱۰۱	۰/۹۹	-۱/۸۰۸	۰/۳۶۰	۰/۰۲۰۶	۰/۹۹	۲/۴۴۸	۰/۳۷۱	۰/۰۱۹۵	۰/۹۹	۲۲/۸۴	-۱/۳۸۵	U40 – O4	

دمای (°C)												مدل ۴
۱۹۰				۱۷۰				۱۵۰				پیش‌تیمار
RMSE	R ²	b	a	RMSE	R ²	b	a	RMSE	R ²	b	a	
-/۰.۰۳۴	-/۹۹	۲۳/۴۰	-/۱۳۵	-/۰.۱۰۳	-/۹۹	۲۹/۱۶	-/۱۳۷	-/۰.۱۲۲	-/۹۹	۲۸/۲۶	-/۱۳۳	Control
-/۰.۱۹۳	-/۹۹	۲۳/۹۸	-/۱۵۸	-/۰.۱۵۴	-/۹۹	۳۵/۴۲	-/۱۶۰	-/۰.۱۱۰	-/۹۹	۴۱/۹۳	-/۱۳۹	U28
-/۰.۰۹۱	-/۹۹	۲۰/۲۴	-/۱۳۶	-/۰.۰۳۵	-/۹۹	۲۸/۲۴	-/۱۴۰	-/۰.۰۷۰	-/۹۹	۳۳/۲۱	-/۱۳۴	U40
-/۰.۲۱۶	-/۹۹	۳/۴۶۲	-/۱۳۶	-/۰.۱۱۱	-/۹۹	۳/۳۹۱	-/۱۳۴	-/۰.۰۸۴	-/۹۹	۸/۷۳۲	-/۱۳۷	O2
-/۰.۲۰۰	-/۹۹	۵/۱۰۶	-/۱۶۳	-/۰.۲۷۳	-/۹۹	۴/۳۴۴	-/۱۶۹	-/۰.۲۲۲	-/۹۹	۳/۳۱۹	-/۱۸۰	O4
-/۰.۱۷۷	-/۹۹	۹/۹۷۴	-/۱۴۸	-/۰.۲۱۶	-/۹۹	۳/۳۶۰	-/۱۴۵	-/۰.۲۰۱	-/۹۸	۵/۰۰۱	-/۱۴۸	U28 – O2
-/۰.۲۴۳	-/۹۸	۲/۸۴	-/۱۴۲	-/۰.۰۷۶	-/۹۹	۶/۰۰۴	-/۱۲۸	-/۰.۰۴۱	-/۹۹	۱۰/۷۲	-/۱۳۸	U40 – O2
-/۰.۱۷۵	-/۹۹	۲/۹۲۳	-/۱۵۰	-/۰.۲۰۸	-/۹۹	۲/۶۳۳	-/۱۴۵	-/۰.۰۶۵	-/۹۹	۶/۲۹۶	-/۱۴۳	U28 – O4
-/۰.۱۶۱	-/۹۹	۲/۸۳۱	-/۱۳۹	-/۰.۲۱۱	-/۹۹	۳/۳۳۳	-/۱۳۸	-/۰.۱۸۸	-/۹۹	۱۸/۴۱	-/۱۴۰	U40 – O4

دمای (°C)												مدل ۵
۱۹۰				۱۷۰				۱۵۰				پیش‌تیمار
RMSE	R ²	b	a	RMSE	R ²	b	a	RMSE	R ²	b	a	
-/۰.۲۱۴	-/۹۸	۵/۲۵۱	-/۰.۰۵۷	-/۰.۲۳۴	-/۹۸	۵/۳۱۳	-/۰.۰۵۵	-/۰.۲۴۹	-/۹۷	۵/۳۷۴	-/۰.۰۵۲	Control
-/۰.۲۹۹	-/۹۵	۵/۱۴۹	-/۰.۰۵۴	-/۰.۲۸۱	-/۹۷	۵/۳۴۳	-/۰.۰۴۷	-/۰.۱۷۹	-/۹۹	۵/۵۹۰	-/۰.۰۴۳	U28
-/۰.۲۹۲	-/۹۶	۵/۲۹۱	-/۰.۰۵۸	-/۰.۱۸۵	-/۹۹	۵/۳۰۴	-/۰.۰۵۴	-/۰.۱۷۶	-/۹۹	۵/۴۵۱	-/۰.۰۵۰	U40
-/۰.۳۷۳	-/۹۶	۴/۸۲۴	-/۰.۰۷۴	-/۰.۳۴۴	-/۹۶	۴/۸۳۸	-/۰.۰۷۴	-/۰.۲۹۹	-/۹۷	۴/۹۴۱	-/۰.۰۶۹	O2
-/۰.۲۷۶	-/۹۸	۴/۶۶۴	-/۰.۰۷۳	-/۰.۳۱۸	-/۹۸	۴/۶۱۴	-/۰.۰۷۴	-/۰.۳۶۱	-/۹۸	۴/۵۱۱	-/۰.۰۷۶	O4
-/۰.۲۶۶	-/۹۸	۴/۸۷۳	-/۰.۰۶۹	-/۰.۲۵۶	-/۹۸	۴/۷۱۸	-/۰.۰۷۷	-/۰.۱۴۰	-/۹۹	۴/۷۲۷	-/۰.۰۷۵	U28 – O2
-/۰.۲۹۷	-/۹۸	۴/۶۸۸	-/۰.۰۸۰	-/۰.۳۸۳	-/۹۵	۴/۹۷۸	-/۰.۰۶۹	-/۰.۳۵۰	-/۹۶	۴/۹۹۴	-/۰.۰۶۶	U40 – O2
-/۰.۳۶۵	-/۹۷	۴/۶۵۶	-/۰.۰۷۸	-/۰.۳۸۶	-/۹۶	۴/۶۵۸	-/۰.۰۸۰	-/۰.۴۳۲	-/۹۵	۴/۸۸۱	-/۰.۰۶۹	U28 – O4
-/۰.۳۶۳	-/۹۶	۴/۷۳۴	-/۰.۰۷۸	-/۰.۲۴۷	-/۹۸	۴/۶۶۱	-/۰.۰۷۷	-/۰.۱۱۴	-/۹۹	۵/۰۶۴	-/۰.۰۶۴	U40 – O4

دمای (°C)															مدل ۶
۱۹۰					۱۷۰					۱۵۰					پیش‌تیمار
RMSE	R ²	c	b	a × 10 ^{-۱}	RMSE	R ²	c	b	a × 10 ^{-۱}	RMSE	R ²	c	b	a × 10 ^{-۱}	
-/۰.۴۲۸	-/۹۵	-/۰.۲	-/۰.۰۴	-۹/۹۰	-/۰.۴۲۷	-/۹۵	-/۰.۲	-/۰.۰۳	-۸/۴۴	-/۰.۴۳۶	-/۹۵	-/۰.۲	-/۰.۰۳	-۸/۲۳	Control
-/۰.۶۵۴	-/۹۲	-/۰.۲	-/۰.۰۴	-۱۰/۰	-/۰.۴۵۸	-/۹۶	-/۰.۲	-/۰.۰۳	-۸/۴۳	-/۰.۳۰۰	-/۹۷	-/۰.۱	-/۰.۰۳	-۶/۷۱	U28
-/۰.۵۱۰	-/۹۲	-/۰.۲	-/۰.۰۳	-۹/۰.۴	-/۰.۳۷۶	-/۹۶	-/۰.۲	-/۰.۰۳	-۹/۴۹	-/۰.۳۲۵	-/۹۷	-/۰.۱	-/۰.۰۳	-۸/۱۰	U40
-/۰.۷۲۷	-/۹۰	-/۰.۲	-/۰.۰۵	-۱۴/۹	-/۰.۷۳۲	-/۸۹	-/۰.۲	-/۰.۰۵	-۱۴/۴	-/۰.۶۳۱	-/۹۲	-/۰.۲	-/۰.۰۴	-۱۳/۳	O2
-/۰.۷۳۶	-/۹۲	-/۰.۲	-/۰.۰۶	-۱۷/۹	-/۰.۷۶۰	-/۹۳	-/۰.۲	-/۰.۰۶	-۱۹/۰	-/۰.۹۱۵	-/۹۱	-/۰.۲	-/۰.۰۶	-۲۰/۳	O4
-/۰.۵۹۳	-/۹۴	-/۰.۲	-/۰.۰۵	-۱۴/۷	-/۰.۷۳۶	-/۹۱	-/۰.۲	-/۰.۰۵	-۱۶/۵	-/۰.۶۰۶	-/۹۴	-/۰.۲	-/۰.۰۵	-۱۷/۲	U28 – O2
-/۰.۸۱۰	-/۸۸	-/۰.۲	-/۰.۰۵	-۱۶/۵	-/۰.۷۳۶	-/۸۷	-/۰.۲	-/۰.۰۴	-۱۲/۰	-/۰.۶۷۸	-/۹۰	-/۰.۲	-/۰.۰۴	-۱۲/۱	U40 – O2
-/۰.۸۷۰	-/۸۸	-/۰.۲	-/۰.۰۵	-۱۷/۰	-/۰.۹۰۳	-/۸۶	-/۰.۲	-/۰.۰۵	-۱۶/۶	-/۰.۸۰۶	-/۸۸	-/۰.۲	-/۰.۰۴	-۱۳/۳	U28 – O4
-/۰.۸۲۴	-/۸۷	-/۰.۲	-/۰.۰۵	-۱۵/۶	-/۰.۷۱۰	-/۹۱	-/۰.۲	-/۰.۰۵	-۱۵/۸	-/۰.۳۶۲	-/۹۷	-/۰.۲	-/۰.۰۴	-۱۲/۸	U40 – O4

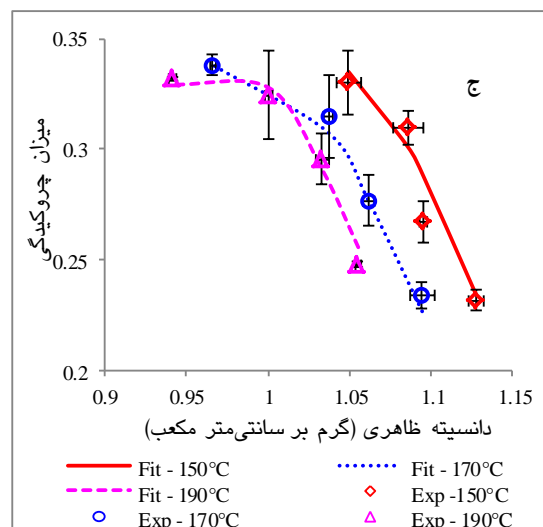
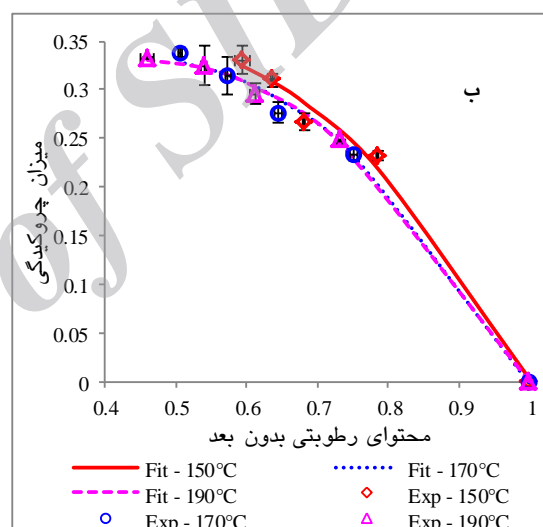
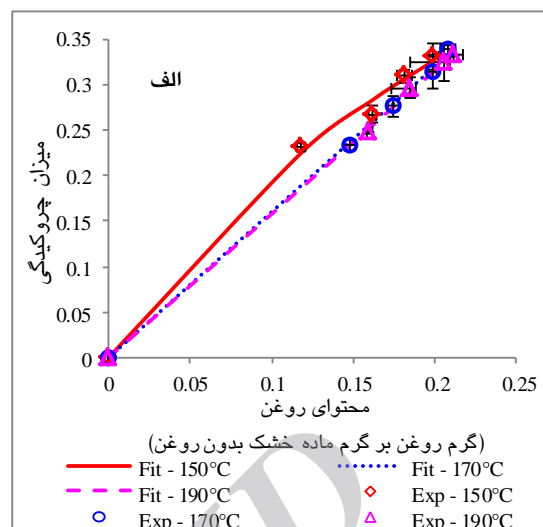
دمای (°C)													مدل ۷
۱۹۰				۱۷۰				۱۵۰					
RMSE	R ²	b	a	RMSE	R ²	b	a	RMSE	R ²	b	a	پیش‌تیمار	
۰/۰۰۳۴	۰/۹۹	۱۵۶/۰	۲۴۶/۲	۰/۰۰۴۱	۰/۹۹	۳۴/۲۷	۵۵/۰۹	۰/۰۱۰۶	۰/۹۹	۰/۳۷۷	۰/۹۴۲	Control	
۰/۰۱۸۶	۰/۹۹	۰/۰۸۷	۰/۵۲۷	۰/۰۱۷۳	۰/۹۹	۰/۱۴۳	۰/۶۳۴	۰/۰۰۶۵	۰/۹۹	۰/۲۱۷	۰/۷۵۶	U28	
۰/۰۱۱۸	۰/۹۹	۱۶۲/۱	۲۰۲/۳	۰/۰۰۵۶	۰/۹۹	۲/۲۹۳	۳/۷۴۲	۰/۰۰۱۶	۰/۹۹	۰/۲۸۷	۰/۷۵۰	U40	
۰/۰۲۱۳	۰/۹۹	۰/۰۲۲	۰/۴۱۴	۰/۰۱۰۹	۰/۹۹	۰/۰۱۰	۰/۳۷۹	۰/۰۱۰۹	۰/۹۹	۰/۰۴۰	۰/۴۶۵	O2	
۰/۰۱۹۸	۰/۹۹	۰/۰۵۹	۰/۶۱۰	۰/۰۲۷۲	۰/۹۹	۰/۰۲۰	۰/۵۱۲	۰/۰۲۱۲	۰/۹۹	۰/۰۰۳	۰/۴۸۷	O4	
۰/۰۲۱۱	۰/۹۹	۰/۳۱۸	۰/۴۷۳	۰/۰۲۰۸	۰/۹۹	۰/۰۰۵	۰/۴۰۳	۰/۰۳۱۶	۰/۹۷	۰/۰۰۵	۰/۴۰۶	U28 – O2	
۰/۰۲۰۸	۰/۹۹	۰/۰۰۵	۰/۳۵۵	۰/۰۰۶۹	۰/۹۹	۰/۰۱۸	۰/۳۸۵	۰/۰۰۳۰	۰/۹۹	۰/۰۲۴	۰/۴۲۷	U40 – O2	
۰/۰۱۲۴	۰/۹۹	۰/۰۰۳	۰/۳۸۳	۰/۰۱۱۶	۰/۹۹	۰/۰۰۵	۰/۳۶۰	۰/۰۰۷۷	۰/۹۹	۰/۰۰۶	۰/۳۹۸	U28 – O4	
۰/۰۱۰۰	۰/۹۹	۰/۰۰۴	۰/۳۵۰	۰/۰۲۱۰	۰/۹۹	۰/۰۰۲	۰/۳۷۱	۰/۰۱۹۹	۰/۹۹	۰/۰۳۱	۰/۴۵۵	U40 – O4	

دمای (°C)													مدل ۸
۱۹۰				۱۷۰				۱۵۰					
RMSE	R ²	b	a	RMSE	R ²	b	a	RMSE	R ²	b	a	پیش‌تیمار	
۰/۰۰۴۷	۰/۹۹	۰/۱۰۴	۰/۱۰۴	۰/۰۰۹۶	۰/۹۹	۰/۱۰۶	۰/۱۰۸	۰/۰۱۴۱	۰/۹۹	۰/۱۲۷	۰/۱۲۴	Control	
۰/۰۲۷۴	۰/۹۸	۰/۱۵۷	۰/۱۶۴	۰/۰۱۸۰	۰/۹۹	۰/۱۶۲	۰/۱۶۴	۰/۰۱۵۹	۰/۹۹	۰/۰۹۳	۰/۱۰۰	U28	
۰/۰۱۹۹	۰/۹۸	۰/۰۷۶	۰/۰۷۹	۰/۰۱۴۴	۰/۹۹	۰/۰۱۰	۰/۰۹۸	۰/۰۵۳۹	۰/۹۹	۰/۰۹۱	۰/۰۹۲	U40	
۰/۰۳۲۰	۰/۹۷	۰/۱۵۶	۰/۱۴۴	۰/۰۳۱۶	۰/۹۷	۰/۱۵۳	۰/۱۳۸	۰/۰۲۸۵	۰/۹۷	۰/۱۶۶	۰/۱۵۱	O2	
۰/۰۱۰۸	۰/۹۹	۰/۲۳۶	۰/۲۳۳	۰/۰۳۲۵	۰/۹۸	۰/۲۵۸	۰/۲۴۶	۰/۰۵۱۰	۰/۹۶	۰/۳۱۹	۰/۲۹۶	O4	
۰/۰۱۶۴	۰/۹۹	۰/۱۷۱	۰/۱۶۶	۰/۰۴۰۰	۰/۹۶	۰/۱۹۱	۰/۱۷۱	۰/۰۵۶۲	۰/۹۲	۰/۲۳۳	۰/۲۰۶	U28 – O2	
۰/۰۵۴۲	۰/۹۲	۰/۱۹۸	۰/۱۷۱	۰/۰۳۲۳	۰/۹۶	۰/۱۴۸	۰/۱۳۱	۰/۰۲۵۶	۰/۹۸	۰/۲۱۶	۰/۲۰۳	U40 – O2	
۰/۰۷۱۲	۰/۸۸	۰/۳۲۹	۰/۲۸۸	۰/۰۸۸۱	۰/۸۰	۰/۳۰۵	۰/۲۴۴	۰/۰۷۳۲	۰/۸۵	۰/۴۲۲	۰/۳۶۶	U28 – O4	
۰/۰۵۶۱	۰/۹۱	۰/۱۷۱	۰/۱۳۵	۰/۰۶۵۱	۰/۸۸	۰/۱۹۱	۰/۱۴۷	۰/۰۴۷۵	۰/۹۲	۰/۲۱۰	۰/۱۷۷	U40 – O4	

دمای (°C)															مدل ۹
۱۹۰					۱۷۰					۱۵۰					
RMSE	R ²	c	b	a	RMSE	R ²	c	b	a	RMSE	R ²	c	b	a	
۰/۰۰۸۶	۰/۹۸	۰/۱۶	۰/۹۷	۰/۳۴	۰/۰۰۵۹	۰/۹۹	۰/۱۸	۰/۹۸	۰/۳۴	۰/۰۲۰۰	۰/۹۳	۰/۱۶	۱/۰۳	۰/۳۴	Control
۰/۰۴۲۹	۰/۷۴	۱/۸۸	۰/۸۶	۲۷/۳	۰/۰۰۷۸	۰/۹۹	۰/۰۷	۱/۰۷	۰/۴۶	۰/۰۱۷۸	۰/۹۷	۰/۰۵	۱/۰۵	۰/۴۱	U28
۰/۰۱۵۷	۰/۹۲	۰/۵۱	۰/۸۱	۰/۳۴	۰/۰۱۳۵	۰/۹۷	۰/۱۰	۱/۰۳	۰/۳۴	۰/۰۳۲۹	۰/۸۴	۰/۰۹	۱/۰۳	۰/۳۲	U40
۰/۰۳۰۰	۰/۳۹	۰/۴۲	۰/۹۵	۰/۳۷	۰/۰۱۳۶	۰/۵۵	۰/۴۲	۰/۹۷	۰/۳۶	۰/۰۱۳۵	۰/۸۴	۰/۲۲	۱/۰۲	۰/۳۶	O2
۰/۰۰۵۷	۰/۹۸	۰/۳۱	۰/۹۲	۰/۴۶	۰/۰۰۱۰	۰/۹۹	۰/۳۶	۱/۰۱	۰/۴۸	۰/۰۰۸۱	۰/۹۵	۰/۳۷	۱/۰۷	۰/۵۰	O4
۰/۰۱۶۶	۰/۸۸	۰/۲۶	۰/۹۷	۰/۳۹	۰/۰۲۷۶	۰/۴۷	۰/۳۸	۱/۰۵	۰/۴۰	۰/۰۴۵۸	۰/۳۴	۰/۲۳	۱/۰۷	۰/۴۰	U28 – O2
۰/۰۲۵۶	۰/۵۱	۰/۷۲	۱/۰۹	۰/۳۸	۰/۰۱۳۷	۰/۷۰	۲/۴۵	۰/۵۶	۰/۴۹	۰/۰۰۷۲	۰/۹۶	۰/۳۶	۰/۹۳	۰/۳۷	U40 – O2
۰/۰۰۵۹	۰/۹۳	۰/۵۵	۱/۰۵	۰/۴۱	۰/۰۰۵۷	۰/۹۵	۰/۴۲	۱/۰۸	۰/۴۰	۰/۰۰۶۷	۰/۹۴	۰/۶۹	۰/۸۳	۰/۴۱	U28 – O4
۰/۰۰۶۹	۰/۸۶	۰/۵۵	۰/۹۹	۰/۳۸	۰/۰۲۱۵	۰/۶۶	۰/۳۸	۰/۹۹	۰/۳۸	۰/۰۳۱۵	۰/۷۸	۰/۱۲	۰/۹۷	۰/۴۰	U40 – O4

نتیجه‌گیری

میزان چروکیدگی محصول با افزایش دمای فرآیند سرخ‌کردن افزایش یافت. پدیده چروکیدگی در مراحل ابتدایی سرخ‌کردن به سرعت رخ داده و با کاهش محتوای رطوبت از سرعت وقوع آن کاسته شد؛ به‌طوریکه در محتوای رطوبت پایین به دلیل تشکیل پوسته و ممانعت از خروج بخار آب، پدیده پف‌کردن یا افزایش حجم دیده شد. پیش‌تیمار اولتراسوند در فرکانس‌های ۲۸ و ۴۰ کیلوهرتز در دمای ۱۵۰ باعث کاهش غیر معنی‌دار میزان چروکیدگی در مقایسه با نمونه شاهد گردید. آبگیری اسمزی نیز در غلظت‌های ۲ و ۴٪ باعث افزایش معنی‌دار چروکیدگی در مقایسه با نمونه شاهد شد. پیش‌تیمارهای تلفیقی نیز تاثیری مشابه پیش‌تیمار آبگیری اسمزی از خود نشان دادند. مدل‌های پیشنهادی در این مطالعه با داشتن ضریب همبستگی بالا و ریشه میانگین مربعات خطای پایین به خوبی توانستند داده‌های آزمایشی میزان چروکیدگی را بر حسب زمان، محتوای روغن، محتوای رطوبت بدون بعد و میزان دانسیته ظاهری برازش نمایند. مدل‌های پیشنهاد شده در این مطالعه، می‌توانند مدل‌های مفیدی جهت استفاده در فرآیند سرخ‌کردن عمیق در شرایط دمایی و زمانی مختلف باشند و با پیش‌بینی روند تغییرات میزان چروکیدگی طی فرآیند سرخ‌کردن، به کنترل کیفیت محصول نهایی کمک کنند.



شکل ۳- تغییرات میزان (درصد) چروکیدگی حاصل از آزمایش (Exp) و برازش شده (Fit) با مدل‌های ۷، ۸ و ۹ جدول ۳ بر اساس محتوای روغن (الف)، محتوای رطوبت بدون بعد (ب) و دانسیته ظاهری (ج) در دماهای مختلف در نمونه‌های شاهد

منابع مورد استفاده

- AOAC, 1994. Association of official analytical chemists. Official Methods Of Analysis, Arlington, VA.
- Aguilera JM, Cadoche L, Lopez C and Gutierrez G, 2001. Microstructural changes of potato cells and starch granules heated in oil. *Food Research International* 34:939-947.
- Baik OD and Mittal GS, 2005. Heat and moisture transfer and shrinkage simulation of deep fat tofu frying. *Food Research International* 38:183-191.
- Farkas BE, Singh RP and Rumsey TR, 1996. Modeling heat and mass transfer in immersion frying, I. Model development. *Journal of Food Engineering* 29:211-226.
- Fernandes FAN, Gallão MI and Rodrigues S, 2009. Effect of osmosis and ultrasound on pineapple cell tissue structure during dehydration. *Journal of Food Engineering* 90:186-190.
- Greenfield H, Makinson J and Wills RBH, 1984. Lipids in French fries: a retail and laboratory study. *Journal of Food Technology* 19:239-245.
- Kawas ML and Moreira RG, 2000. Characterization of product quality attributes of tortilla chips during the frying process. *Journal of Food Engineering* 47:97-107.
- Kilpatrick PW, Lowe E and van Arsdell, 1955. Tunnel dehydrators for fruits and vegetables. *Advances in Food Research* 6:313-372.
- Krokida MK, Oreopoulou V and Maroulis ZB, 2000. Water loss and oil uptake as a function of frying time. *Journal of Food Engineering* 44:39-46.
- Lozano JE, Rotstein E and Urbicain MJ, 1983. Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture content. *Journal of Food Science* 48:1497-1553.
- McMinn WAM and Magee TRA, 1996. Quality and physical structure of dehydrated starch-based systems. *Drying Technology* 15:1961-1971.
- Mir-Bel J, Oria R and Salvador ML, 2009. Influence of the vacuum break conditions on oil uptake during potato post-frying cooling. *Journal of Food Engineering* 95:416-422.
- Moreira R, Figueiredo AM and Sereno AM, 2000. Shrinkage of apple disks during drying by warm air convection and freeze drying. *Drying Technology* 18:279-294.
- Mottur GP, 1989. A scientific look at potato chips – the original savory snack. *Cereal Chemistry* 34:620-626.
- Pravisani CI Calvelo A, 1986. Minimum cooking time for potato strip frying. *Journal of Food Science* 51:614-617.
- Rahman MS and Potluri PL, 1990. Shrinkage and density of squid flesh during air drying. *Journal of Food Engineering* 12:133-143.
- Steel RGD, Torrie JH and Dickey DA, 1996. Principles and procedures of statistics: a biometrical approach. New York, McGraw-Hill.
- Taiwo KA and Baik OD, 2007. Effects of pre-treatments on the shrinkage and textural properties of fried sweet potatoes. *LWT-Food Science and Technology* 40:661-668.
- Ziaiiifar AM, Achir N, Courtois F, Trezzani I and Trystram G, 2008. Review of mechanisms, conditions, and factors involved in the oil uptake phenomenon during the deep-fat frying process. *International Journal of Food Science and Technology* 43:1410-1423.
- Ziaiiifar AM, Courtois F and Trystram G, 2010. Porosity development and its effect on oil uptake during frying process. *Journal of Food Process Engineering* 33:191-212.
- Yamsaengsung R and Moriera RG, 2002. Modeling the transport phenomena and structural changes during deep fat frying. Part I: Model development. *Journal of Food Engineering* 53:1-10.
- Yamsaengsung R, Ariyapuchai T and Prasertsit K, 2011. Effects of vacuum frying on structural changes of bananas. *Journal of Food Engineering* 106:298-305.

Shrinkage modeling during deep-fat frying of potato strips pretreated with ultrasound and osmotic dehydration

J Dehghannya^{1*}, L Abedpour²

Received: November 26, 2015

Accepted: January 06, 2016

¹Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

²MSc Graduated, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

*Corresponding author: E-mail: J_dehghannya@tabrizu.ac.ir

Abstract

In this study, effect of ultrasound and osmotic dehydration pretreatments on shrinkage of fried potato strips was examined. Potato strips pretreated with ultrasound at 28 and 40 kHz frequencies and osmotic dehydration at salt solution concentrations of 2 and 4% were fried for 60, 120, 180 and 240 seconds at temperatures of 150, 170 and 190°C. Also, in order to control the optimal process conditions and improve the final quality of fried product, changes in the shrinkage were modeled in terms of frying time, oil content, dimensionless moisture content and apparent density. Ultrasound pretreatment at 28 and 40 kHz frequencies at 150°C led to a decrease in shrinkage compared to control samples. Application of osmotic dehydration and its combination with ultrasound pretreatment increased the shrinkage. In addition, experimental data were well fitted by proposed models in terms of frying time, oil content, dimensionless moisture content and apparent density parameters having high correlation coefficients.

Keywords: Osmotic dehydration, Ultrasound, Frying, Shrinkage, Modeling