مجله علوم تغذیه و صنایع غذایی ایران
سال هشتم، شماره 3، پاییز 1392، صفحات 111-99

مدل‌سازی تجربی چروکیدگی قطعات سیب‌زمینی پیش‌تیمارشده با اولتراسوند و خشک‌کردن طی فرایند سرخ‌کردن عمیق

عنایت‌الله نقوی[1]، جلال دهقان‌نیا[2]، بابک قنبرزاده[3]، رضا رضایی‌مکرم[4]

1- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، ایران
2- نویسنده مسئول: استادیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، ایران، پست الکترونیکی:J_dehghannya@tabrizu.ac.ir
3- دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، ایران
4- استادیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، ایران

تاریخ دریافت: 91/10/5 تاریخ پذیرش: 92/2/15

چکیده

سابقه و هدف: آگاهی از روابط بین متغیرهای مختلف طی فرایند سرخ‌کردن عمیق محصولات غذایی از طریق انجام مدل‌سازی، می‌تواند راه مناسبی برای کنترل بهینه شرایط فرایند و در نتیجه، افزایش کیفیت محصول سرخ‌شده نهایی باشد. در این تحقیق، تأثیر پیش‌تیمارهای اولتراسوند و خشک‌کردن بر میزان چروکیدگی قطعات سیب‌زمینی سرخ‌شده بررسی شد. هم‌چنین، چروکیدگی نمونه‌ها بر حسب زمان فرایند مدل‌سازی گردید.

مواد و روش‌ها: پیش‌تیمار اولتراسوند در دو سطح فرکانس 28 و 40 کیلوهرتز و زمان 15 دقیقه و پیش‌تیمار خشک‌کردن در دو زمان 8 و 15 دقیقه و دمای 80°C صورت گرفت. سرخ‌کردن قطعات سیب‌زمینی در دماهای 150، 170 و 190°C به مدت 60، 120، 180 و 240 ثانیه انجام شد. علاوه بر این، به منظور مدل‌سازی چروکیدگی، داده‌های آزمایشی با شش مدل تجربی پیشنهادی در این تحقیق برازش شدند. برای تعیین بهترین مدل، از دو معیار R^2 و RMSE استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که پیش‌تیمارهای اولتراسوند و خشک‌کردن به صورت مجزا میزان چروکیدگی نمونه‌های سرخ‌شده را نسبت به نمونه شاهد، به ترتیب کاهش و افزایش داد. هم‌چنین، مدل‌های به کار رفته، با داشتن R^2 بالا و RMSE پایین، به خوبی داده‌های آزمایشی را برازش کردند.

نتیجه‌گیری: استفاده از پیش‌تیمار اولتراسوند به عنوان یک روش امید بخش مناسب در بهبود خصوصیات کمی و کیفی محصولات سرخ‌شده، از جمله کاهش میزان چروکیدگی نمونه‌ها، می‌تواند در تحقیقات آتی مد نظر قرار گیرد. هم‌چنین، مدل‌های پیشنهاد شده در این تحقیق، می‌توانند جهت استفاده در فرایند سرخ‌کردن عمیق مفید باشند و به کنترل کیفیت محصول نهایی سرخ‌شده از لحاظ میزان چروکیدگی کمک کنند.

واژگان کلیدی: اولتراسوند، چروکیدگی، خشک‌کردن، سرخ‌کردن عمیق، مدل‌سازی

• مقدمه

سیب زمینی با نام علمی *Solanum tuberosum*، گیاهی است از خانواده سیب‌زمینیان (*Solanaceae*) و با تولید سالانه بیش از 300 میلیون تن در دنیا پس از گندم، ذرت و برنج از مهم ترین محصولات کشاورزی به شمار می‌رود (2، 1).

سرخ‌کردن عمیق در روغن یک روش پخت سریع است که در آن ماده غذایی در داخل روغن داغ غوطه‌ور می‌شود. روغن به عنوان محیط انتقال حرارت، در تماس مستقیم با ماده غذایی و در دمایی بالاتر از نقطه جوش آب، معمولاً 150-200°C مورد استفاده قرار می‌گیرد (3). طی این

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-18]

فرایند، در نتیجه به کارگیری دماهای بالا، قسمت اعظم آب ماده غذایی به شکل بخار از آن خارج می‌شود و در مقابل، روغن توسط ماده غذایی جذب می‌شود. در حین سرخ‌کردن عمیق، تغییرات فیزیکی، شیمیایی و حسی مختلفی در ماده غذایی اتفاق می‌افتد که مجموعه این تغییرات، به طور قابل توجهی کیفیت محصول را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در میان محصولات سرخ‌شده توسط این فرایند، پرمصرف‌ترین مواد غذایی، فرآورده‌های سیب‌زمینی مانند چیپس و خلال‌های سیب‌زمینی سرخ‌شده می‌باشند (4). وجود محتوای رطوبتی کافی در قطعات سیب‌زمینی سرخ‌شده، جهت داشتن یک بخش داخلی نرم و مرطوب، در کنار پوسته ترد و خوشمزه در محصول نهایی بسیار حائز اهمیت است. علاوه بر این، میزان خروج آب از ماده غذایی طی فرایند سرخ‌کردن، رابطه بسیار نزدیکی با بروز پدیده چروکیدگی دارد. چروکیدگی یا به عبارت دیگر، کاهش حجم ظاهری محصول نهایی، یکی از معایب سرخ‌کردن است. از عوامل مؤثر بر میزان چروکیدگی محصول سرخ‌شده، می‌توان به دما و زمان سرخ‌کردن، ضخامت اولیه نمونه، میزان از دست‌دادن آب و جذب روغن توسط محصول سرخ‌شده اشاره کرد (7-5). چروکیدگی، بر روی ضریب انتشار مؤثر رطوبت اثر گذاشته و به عنوان یک عامل محدودکننده در برابر پدیده انتقال جرم، باعث افت خصوصیات کمی و کیفی محصول سرخ‌شده می‌شود. معمولاً از نظر کیفی، چروکیدگی یک ویژگی منفی از دید مصرف‌کننده محسوب می‌شود (8). بنابراین، به کارگیری برخی راه‌حل‌ها، مانند استفاده از پیش‌تیمارهایی که بتوانند میزان چروکیدگی ماده غذایی سرخ‌شده را کاهش دهند، در نهایت منجر به بهبود خصوصیات کیفی محصول نهایی خواهند شد.

استفاده از پیش‌تیمار خشک‌کردن، قبل از سرخ‌کردن، می‌تواند روشی برای بهبود خصوصیات مواد غذایی سرخ‌شده باشد. پیش‌تیمار خشک‌کردن، محتوای آب آزاد اولیه ماده غذایی را کاهش داده و از این طریق، منجر به کاهش زمان فرایند می‌شود و در نتیجه، جذب روغن طی فرایند سرخ‌کردن را محدود می‌کند (9). با این‌حال، همان‌طور که انتظار می‌رود، به علت خروج بخشی از محتوای رطوبتی نمونه غذایی طی انجام این پیش‌تیمار، حجم محصول تا حدودی کاهش می‌یابد که البته از طریق انتخاب شرایط مناسب (مانند زمان و دمای بهینه) برای پیش‌تیمار، می‌توان میزان کاهش حجم را به حداقل رساند. از طرف دیگر، پدیده چروکیدگی که طی انجام پیش‌تیمار خشک‌کردن در نمونه غذایی اتفاق می‌افتد، به دلیل کاهش نسبت منافذ باز، جذب روغن را در محصول سرخ‌شده کاهش می‌دهد (9).

علاوه بر خشک‌کردن، استفاده از اولتراسوند به عنوان یک پیش‌تیمار قبل از سرخ‌کردن عمیق می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. تاکنون از فناوری اولتراسوند در فرایندهای مختلفی مانند خشک‌کردن، انجماد، رفع انجماد، پاستوریزاسیون، امولسیون‌سازی، برش دادن، کف‌زدایی، تعیین ترکیبات تشکیل‌دهنده یک ماده غذایی، استخراج برخی از اجزاء ماده غذایی و غیره، استفاده شده است (12-10)؛ با این‌حال، هیچ‌گونه پژوهشی مرتبط با کاربرد این تکنیک در فرایند سرخ‌کردن، جهت ارزیابی تغییرات فیزیکی ماده غذایی در دسترس نمی‌باشد. امواج اولتراسوند، با ایجاد انقباض و انبساط‌های متوالی (اثر اسفنجی، Sponge effect) در ماده غذایی، باعث تشکیل کانال‌های میکروسکوپی و تسهیل خروج آب از محصول به واسطه این کانال‌ها می‌گردد (14، 13). بنابراین، می‌توان انتظار داشت که استفاده از اولتراسوند به عنوان پیش‌تیمار قبل از فرایند سرخ‌کردن، باعث افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت، کاهش زمان سرخ‌کردن و هم‌چنین، آسیب کمتر به لوله‌های موئین موجود در نمونه غذایی شود (در فرکانس و توان‌های مناسب) و از این طریق، منجر به کاهش میزان چروکیدگی در محصول نهایی و در نتیجه، بهبود خصوصیات کیفی ماده غذایی گردد.

از طرف دیگر، شناخت پدیده‌های پیچیده‌ای مانند تغییرات ساختاری که حین سرخ‌کردن عمیق مواد غذایی در روغن اتفاق می‌افتند، به منظور کنترل کیفیت محصول سرخ‌شده نهایی حائز اهمیت می‌باشد. علاوه بر این، برای پیش‌بینی صحیح روند سرخ‌شدن مواد غذایی با هدف افزایش کیفیت محصول سرخ‌شده، می‌توان تغییرات چروکیدگی طی فرایند سرخ‌کردن عمیق را مدل‌سازی نمود. مدل‌سازی، شامل ساخت ابزاری با درجه دقت خوب و کافی است که بتواند خصوصیات یک محصول یا فرایند را پیشگویی نماید (15). در این رابطه، پیشگویی تغییرات حجمی یا ابعادی ماده غذایی طی فرایند سرخ‌کردن، به منظور کنترل بهینه شرایط فرایند و درنتیجه، کنترل کیفیت محصول نهایی حائز اهمیت می‌باشد. مدل‌سازی چروکیدگی، روابط بین متغیرهای گوناگون، از جمله تغییرات حجم و زمان را ارائه می‌دهد، به نحوی که قادر است از یک سو اطلاعاتی در ارتباط با میزان چروکیدگی در زمان‌های مختلف یا آهنگ

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-18]

کاهش حجم ماده غذایی طی این فرایند را ارائه نماید و از سوی دیگر، با در اختیار داشتن مدل‌های مناسب، ضرورت انجام آزمایشات پرهزینه نیز کاهش می‌یابد. اگرچه در فرایندهای دیگر مانند خشک‌کردن مواد غذایی، مدل‌سازی تجربی چروکیدگی در سطح وسیعی انجام گرفته است (19-16)، با این‌حال، در فرایند سرخ‌کردن عمیق، کارهای تحقیقاتی اندکی در این ارتباط در دسترس می‌باشد.

Krokida و همکاران اثر مدت زمان پیش‌تیمار خشک‌کردن بر خصوصیات ساختاری قطعات سیب‌زمینی سرخ‌شده را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که پیش‌تیمار خشک‌کردن، حجم ویژه (حجم ماده غذایی به ازاء واحد جرم آن، m^3/kg) اولیه قطعات سیب‌زمینی و نیز، حجم ویژه محصول سرخ‌شده را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، پدیده چروکیدگی که طی پیش‌تیمار خشک‌کردن اتفاق افتاد، به دلیل کاهش نسبت منافذ باز، جذب روغن طی سرخ‌کردن قطعات سیب‌زمینی را کاهش داد (9). هم‌چنین، *Ziaiifar* و همکاران اثر دما و زمان سرخ‌کردن بر میزان چروکیدگی قطعات سیب‌زمینی را بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که بیشترین میزان چروکیدگی در مراحل اولیه سرخ‌کردن رخ می‌دهد و در نهایت، به علت تشکیل یک پوسته سخت، چروکیدگی متوقف شد. علاوه بر این، با افزایش دمای روغن، برای یک زمان سرخ‌کردن یکسان، میزان چروکیدگی افزایش یافت (7). *Yamsaengsung* و همکاران نیز، در مطالعه روی تغییرات ساختاری چیپس موز طی سرخ‌کردن عمیق تحت خلأ پی بردند که طی 5 دقیقه اول از زمان فرایند، به علت خروج سریع رطوبت، نمونه‌ها متحمل بیشترین میزان چروکیدگی می‌شوند. با این‌حال، در زمان‌های بالاتر، چروکیدگی نمونه‌ها به علت تشکیل یک پوسته سخت و هم‌چنین، انبساط داخلی چیپس‌ها (در اثر تجمع بخارهای آب به دام افتاده) کاهش یافت (20). نتایج مشابهی نیز توسط محققان دیگر گزارش شده است (22، 21).

با توجه به مطالعات بسیار اندک صورت گرفته جهت به دست‌آوردن مدل‌های تجربی مناسب برای بررسی تغییرات حجمی ماده غذایی طی فرایند سرخ‌کردن عمیق و هم‌چنین، عدم در دسترس بودن پژوهشی مرتبط با تأثیر اولتراسوند بر تغییرات فیزیکی ماده غذایی (مانند پدیده چروکیدگی) طی فرایند سرخ‌کردن عمیق، این تحقیق، با هدف بررسی تأثیر این پیش‌تیمار و تلفیق آن با پیش‌تیمار خشک‌کردن بر چروکیدگی قطعات سیب‌زمینی طی فرایند سرخ‌کردن عمیق و هم‌چنین، مدل‌سازی پدیده چروکیدگی طی این فرایند انجام شد.

• مواد و روش‌ها

مواد: در این تحقیق، سیب‌زمینی و روغن مایع به عنوان مواد خام، مورد استفاده قرار گرفتند. سیب‌زمینی (رقم آگریا) پس از خریداری، در سردخانه بالای صفر نگهداری شد. روغن مورد استفاده نیز، روغن مخصوص سرخ‌کردنی بهار (مخلوطی از روغن‌های آفتابگردان، سویا و پنبه‌دانه)، تهیه شده در شرکت صنعتی بهشهر بود.

تجهیزات: در این تحقیق، از یک سرخ‌کن خانگی (مدل F430.R، با ظرفیت 2/2 لیتر روغن، ساخت فرانسه، مجهز به سیستم تنظیم دما در محدوده 150 تا 190°C)، خشک‌کن سینی‌دار طراحی شده در مقیاس آزمایشگاهی (مدل UOP 8 Tray dryer, Armfield, UK، مجهز به سیستم ثبت خودکار داده‌ها، واحد کنترل‌کننده دما، سرعت جریان و رطوبت نسبی هوا) برای انجام پیش‌تیمار خشک‌کردن، دستگاه حمام اولتراسوند (مدل 4R – USD، ساخت ژاپن، مجهز به سیستم تنظیم فرکانس و زمان اولتراسونیکاسیون) استفاده شد.

آماده‌سازی نمونه‌ها: برای انجام هر آزمایش، سیب‌زمینی‌ها پس از شستشو و پوست‌گیری، توسط یک کاتر دستی طراحی شده به ابعاد 1/2cm×1/2×4 (ارتفاع×عرض×طول)، به قطعات مکعب مستطیلی برش داده شدند. نمونه‌های برش‌داده شده، جهت جلوگیری از اتلاف رطوبت در درون یک پلیت قرار گرفته و قبل از سرخ‌کردن، جهت حذف نشاسته سطحی با آب مقطر شسته شدند. آب اضافی سطحی نیز توسط یک کاغذ رطوبت‌گیر گرفته شد. از این مرحله به بعد، نمونه‌ها بر حسب انجام نوع پیش‌تیمار، به چند دسته تقسیم شدند (جدول 1):

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-18]

جدول 1. علائم اختصاری مورد استقاده برای تیمارهای مختلف

ردیف	تیمار	علامت اختصاری
1	شاهد	Control
2	خشک‌کردن در زمان 8 دقیقه	D8
3	خشک‌کردن در زمان 15 دقیقه	D15
4	اولتراسوند با فرکانس 28 کیلوهرتز	U28
5	اولتراسوند با فرکانس 40 کیلوهرتز	U40
6	اولتراسوند با فرکانس 28 کیلوهرتز – خشک‌کردن در زمان 8 دقیقه	U28 – D8
7	اولتراسوند با فرکانس 40 کیلوهرتز – خشک‌کردن در زمان 8 دقیقه	U40 – D8
8	اولتراسوند با فرکانس 28 کیلوهرتز – خشک‌کردن در زمان 15 دقیقه	U28 – D15
9	اولتراسوند با فرکانس 40 کیلوهرتز – خشک‌کردن در زمان 15 دقیقه	U40 – D15

1: نمونه‌های شاهد که بلافاصله در دما و زمان مورد نظر سرخ شدند.

2 و 3: نمونه‌هایی که در خشک‌کن سینی‌دار، در دمای 80°C، زمان‌های 8 و 15 دقیقه و سرعت جریان هوای 1/5 متر بر ثانیه به طور مجزا قرار گرفتند.

4 و 5: نمونه‌هایی که در حمام اولتراسوند در معرض فرکانس‌های 28 و 40 کیلوهرتز و مدت زمان 15 دقیقه به طور مجزا قرار گرفتند.

6، 7، 8 و 9: نمونه‌هایی که جهت انجام تلفیقی از پیش‌تیمارهای اولتراسوند و خشک‌کردن، ابتدا در دستگاه حمام اولتراسوند در معرض فرکانس‌های 28 و 40 کیلوهرتز و مدت‌زمان 15 دقیقه به طور مجزا قرار گرفتند و سپس در دستگاه خشک‌کن سینی‌دار، در دمای 80°C، زمان‌های 8 و 15 دقیقه و سرعت جریان هوای 1/5 متر بر ثانیه به طور مجزا خشک شدند.

شرایط سرخ‌کردن: در هر آزمایش پس از آماده‌سازی نمونه‌ها (بر اساس جدول 1)، جهت سرخ‌کردن آن‌ها، ابتدا سرخ‌کن با 1/5 لیتر روغن پر شد و بعد از تنظیم دما و زمان سرخ‌کردن موردنظر، سرخ‌کن بر روی حالت اتوماتیک قرار داده شد؛ به طوری‌که پس از رسیدن دمای سرخ‌کن به دمای موردنظر، نمونه‌های سیب‌زمینی به میزان 120-100 گرم در داخل سبد مشبک سرخ‌کن قرار داده شدند و سپس، سبد حاوی نمونه‌ها، به طور اتوماتیک در روغن غوطه‌ور شد. پس از سرخ‌شدن نمونه‌ها به مدت زمان مورد نظر، نمونه‌ها از سرخ‌کن بیرون آورده شدند و روغن اضافی آن‌ها توسط یک کاغذ جاذب گرفته شد و بلافاصله آنالیزهای مربوطه بر روی آن‌ها انجام گرفت. تمامی آزمایشات با 2 تکرار انجام شد و داده‌های گزارش‌شده، میانگین داده‌های آزمایشی هستند.

اندازه‌گیری محتوای رطوبتی: محتوای رطوبتی نمونه‌های سرخ‌شده، از طریق خشک‌کردن آن‌ها در آون کنوکسیونی در دمای 1±105°C، تا رسیدن به وزن ثابت انجام (23) و در نهایت بر حسب گرم رطوبت بر گرم ماده خشک بدون روغن گزارش شد.

محاسبه چروکیدگی: برای محاسبه چروکیدگی، ابتدا حجم ظاهری نمونه‌ها قبل و پس از سرخ‌شدن، با بکارگیری تکنیک جابجایی حلال (تولوئن)، از طریق استفاده از یک پیکنومتر شیشه‌ای و طبق رابطه 1 اندازه‌گیری شد (7).

$$V = \frac{M_1 + M_2 - M_3}{\rho} \qquad [1]$$

V: حجم ظاهری نمونه (اولیه یا سرخ‌شده) (cm^3)

M_1: وزن نمونه (g)

M_2: وزن پیکنومتر خالی و حلال (g)

M_3: وزن پیکنومتر محتوی نمونه و حلال (g)

ρ: دانسیته حلال مورد استفاده (g/cm^3)

با به دست‌آوردن حجم ظاهری نمونه‌ها از رابطه 1، میزان چروکیدگی نمونه‌های سرخ‌شده از طریق رابطه 2 محاسبه شد (22، 7).

$$S(t) = \frac{(V_0 - V_t)}{V_0} \times 100 \qquad [2]$$

$S(t)$: درصد چروکیدگی در زمان‌های مختلف

V_t: حجم ظاهری نمونه در زمان t از فرآیند سرخ‌کردن (cm^3)

V_0: حجم ظاهری نمونه اولیه (cm^3)

مدل‌سازی ریاضی: در این تحقیق، مدل‌سازی چروکیدگی قطعات سیب‌زمینی طی فرایند سرخ‌کردن عمیق، بر حسب زمان صورت گرفت و از شش مدل تجربی استفاده شد (جدول 2). مطابق این جدول، حروف a، b و c ثابت‌های مدل، S بیانگر میزان چروکیدگی و t زمان سرخ‌کردن (s) می‌باشند. علاوه بر این، پارامترهای مربوط به مدل‌های به کار رفته، از طریق برازش‌کردن داده‌های آزمایشی در نرم‌افزار MATLAB (Version 7.12.0.635, R2011a) به دست

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-18]

آمدند. برای تعیین بهترین مدل، از دو معیار ضریب همبستگی (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد. با توجه به این دو معیار، مدلی که دارای R^2 بالاتر و RMSE پایین‌تر بود، به عنوان مدل بهتر انتخاب شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(MR_{pred,i} - MR_{exp,i})^2} \quad [3]$$

$MR_{pred,i}$: نسبت محتوای رطوبتی پیشگویی‌شده iام

$MR_{exp,i}$: نسبت محتوای رطوبتی آزمایشی iام

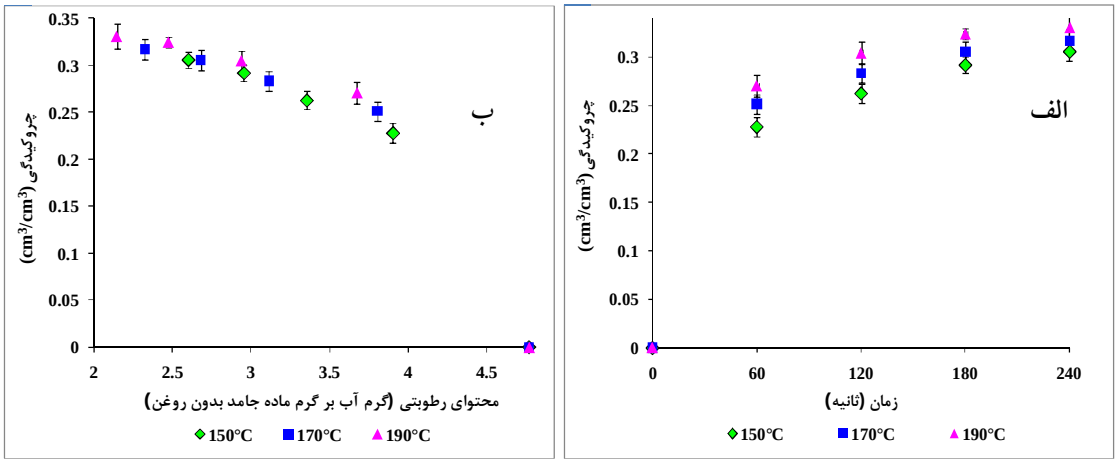
N: تعداد مشاهدات

هم‌چنین، به منظور یافتن رابطه بین ضرایب مدل‌ها و متغیرهای مرتبط با فرایند سرخ‌کردن (زمان پیش‌تیمار خشک‌کردن، فرکانس پیش‌تیمار اولتراسوند و دمای فرایند سرخ‌کردن)، از تجزیه و تحلیل رگرسیون چند متغیره در نرم‌افزار Microsoft Excel 2007 استفاده و معیار ضریب همبستگی (R^2) برای انتخاب بهترین رابطه در نظر گرفته شد.

آنالیز آماری: در این مطالعه، 9 تیمار نشان داده شده در جدول 1، در سه دمای 150، 170 و 190°C و چهار زمان 60، 120، 180 و 240 ثانیه در دو تکرار (9×3×4×2=216) سرخ شدند. تجزیه و تحلیل داده‌ها بر اساس آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی، با استفاده از نرم افزار SAS 9.1 انجام شد. هم‌چنین، برای انجام مقایسه میانگین از آزمون *Bonferroni* (24) در سطح احتمال 5% ($P<0/05$) استفاده شد.

• یافته‌ها

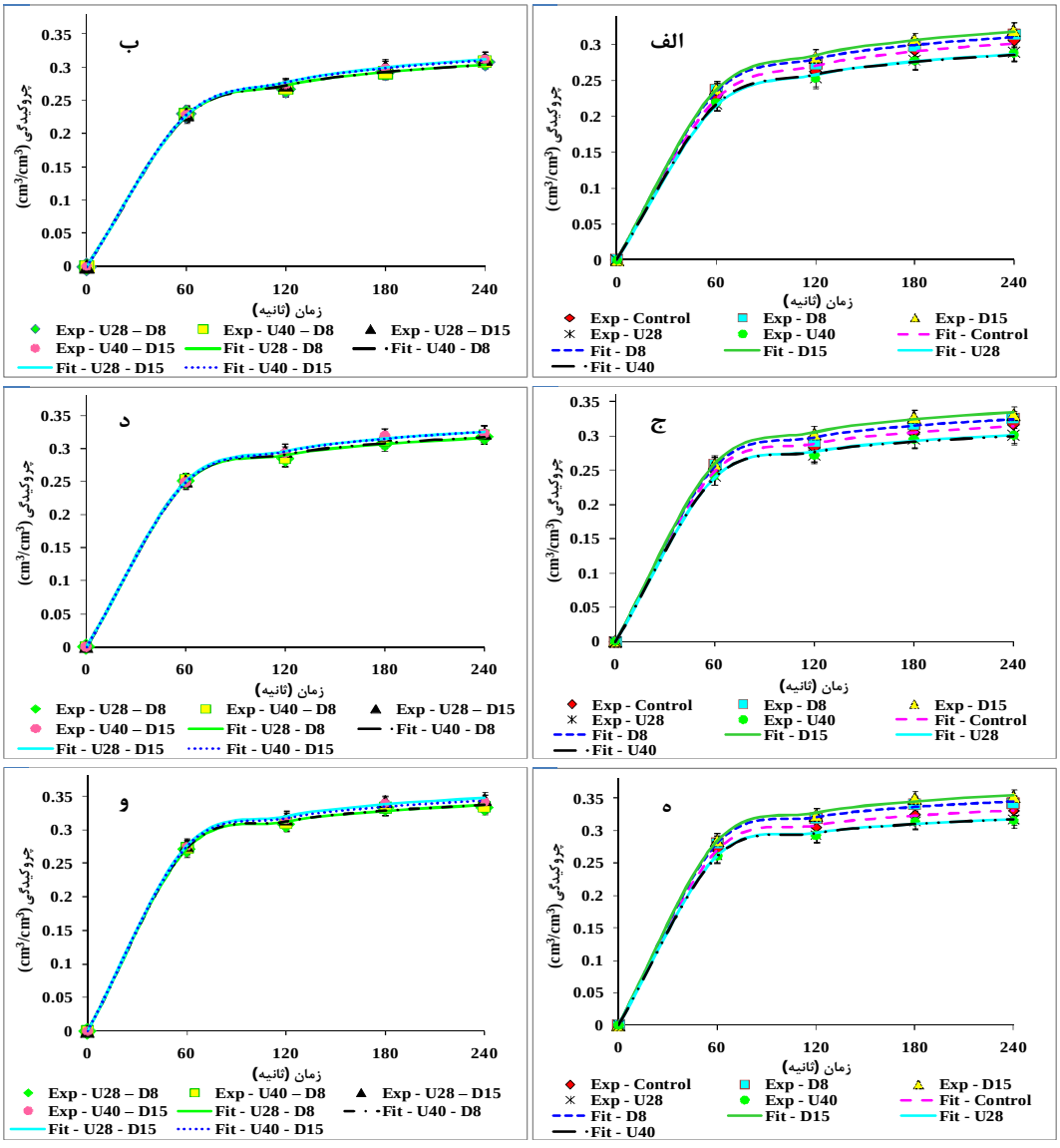
اثر شرایط فرایند سرخ‌کردن بر میزان چروکیدگی نمونه‌های سرخ‌شده: شکل 1، تغییرات چروکیدگی نمونه‌های شاهد سرخ‌شده در 4 زمان 60، 120، 180 و 240 ثانیه و 3 دمای 150، 170 و 190°C را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل 1- الف، پیداست، در تمامی دماها، با افزایش زمان سرخ‌کردن، میزان چروکیدگی نمونه‌ها افزایش پیدا می‌کند؛ به طوری‌که پدیده چروکیدگی در فواصل زمانی اولیه یک رفتار نمایی را نشان می‌دهد و آهنگ وقوع آن در قطعات سیب‌زمینی با گذشت زمان (از 60 به 240 ثانیه) کاهش یافته و به سمت ثابت‌شدن سوق پیدا می‌کند. هم‌چنین، مطابق شکل 1- ب، با کاهش محتوای رطوبتی، چروکیدگی نمونه‌ها افزایش پیدا می‌کند. از طرف دیگر، در بررسی اثر دما بر چروکیدگی نمونه‌های شاهد، در تمامی زمان‌های سرخ‌کردن یکسان، با افزایش دما از 150 به 190°C، آهنگ وقوع چروکیدگی افزایش پیدا کرد (شکل 1- الف)؛ به طوری‌که بین دماهای 150 و 170°C و هم‌چنین 170 و 190°C، از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری وجود نداشت؛ ولی در نمونه‌های سرخ‌شده در زمان‌های 60 یا 120 ثانیه، اختلاف موجود بین دماهای 150 و 190°C معنی‌دار بود. روند مشابهی نیز در مورد سایر نمونه‌ها (پیش‌تیمارشده با اولتراسوند و خشک‌کردن به صورت مجزا و تلفیقی) مشاهده شد (داده‌ها نشان داده نشده‌اند).



شکل 1. میزان چروکیدگی قطعات سیب‌زمینی سرخ‌شده (نمونه شاهد)، به عنوان تابعی از زمان (الف) و محتوای رطوبتی (ب)، طی فرایند سرخ‌کردن عمیق در دماهای 150، 170 و 190°C

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-18]

تأثیر پیش‌تیمارهای انجام شده بر میزان چروکیدگی قطعات سیب‌زمینی سرخ‌شده: شکل 2- الف منحنی تغییرات چروکیدگی قطعات سیب‌زمینی در زمان‌های 60، 120، 180 و 240 ثانیه، در تیمار شاهد و هم‌چنین نمونه‌های پیش‌تیمارشده با اولتراسوند (در فرکانس‌های 28 و 40 کیلوهرتز) و خشک‌کردن (در زمان‌های 8 و 15 دقیقه) به صورت مجزا و سپس سرخ‌شده در دمای 150°C را نشان می‌دهد. مطابق نتایج به دست‌آمده، با افزایش زمان سرخ‌کردن، میزان چروکیدگی در تمامی نمونه‌های فوق افزایش پیدا کرد؛ به طوری‌که در زمان‌های سرخ‌کردن یکسان، نمونه‌های پیش‌تیمارشده با اولتراسوند (28 و 40 کیلوهرتز) در مقایسه با 4 نمونه دیگر، کمترین میزان چروکیدگی را داشتند. علاوه بر این، مقایسه بین این نمونه‌ها نیز نشان می‌دهد که چروکیدگی قطعات سیب‌زمینی شاهد در مقایسه با نمونه‌های پیش‌تیمارشده با خشک‌کردن (8 و 15 دقیقه)، کمتر و هم‌چنین، نسبت به نمونه‌های پیش‌تیمارشده با اولتراسوند (28 و 40 کیلوهرتز) بیشتر می‌باشد؛ با این‌حال، این اختلافات از لحاظ آماری معنی‌دار نبود. هم‌چنین، هیچ گونه اختلاف معنی‌داری بین میزان چروکیدگی نمونه‌های پیش‌تیمارشده با اولتراسوند در فرکانس‌های 28 و 40 کیلوهرتز مشاهده نشد.



شکل 2. تغییرات چروکیدگی حاصل از آزمایش (Exp) و برازش شده (Fit) با مدل 5 (جدول 2)، طی فرایند سرخ‌کردن عمیق قطعات سیب‌زمینی با گذشت زمان، در دماهای 150°C (الف ، ب)، 170°C (ج ، د)، و 190°C (ه ، و)، در پیش‌تیمارهای مختلف بر اساس جدول 1

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-18]

از طرف دیگر، شکل 2- ب، تغییرات چروکیدگی نمونه-های پیش‌تیمارشده با اولتراسوند (در فرکانس‌های 28 و 40 کیلوهرتز) و خشک‌کردن (8 و 15 دقیقه) به صورت تلفیقی (جدول 1) و سپس سرخ‌شده در دمای 150°C را با گذشت زمان نشان می‌دهد. بر طبق نتایج به دست‌آمده، بین میزان چروکیدگی این نمونه‌ها، هیچ گونه اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. هم‌چنین، بین میزان چروکیدگی نمونه‌های پیش‌تیمارشده به صورت تلفیقی و نمونه شاهد نیز، از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری وجود نداشت. علاوه بر این، در نمونه‌های پیش‌تیمارشده به صورت تلفیقی، اثر فرکانس اولتراسوند (28 و 40 کیلوهرتز) بر میزان چروکیدگی نمونه‌های سرخ‌شده معنی‌دار نبود.

شکل 2 (ج، د)، تغییرات چروکیدگی نمونه‌های پیش-تیمارشده در شرایط مختلف (به صورت مجزا و تلفیقی) و سپس سرخ‌شده در دمای 170°C را با گذشت زمان نشان می‌دهد. مطابق این دو شکل، روند داده‌های آزمایشی به دست‌آمده در تیمار شاهد و هم‌چنین، نمونه‌های پیش‌تیمار-شده با اولتراسوند و خشک‌کردن به صورت مجزا و تلفیقی، مشابه روند داده‌های آزمایشی به دست‌آمده در دمای 150°C می‌باشد؛ به طوری‌که در نمونه‌های پیش‌تیمارشده به صورت مجزا (شکل 2- ج)، قطعات سیب‌زمینی پیش-تیمارشده با اولتراسوند (28 و 40 کیلوهرتز) در مقایسه با 4 نمونه دیگر، کمترین میزان چروکیدگی را داشتند.

علاوه بر این، شکل 2 (ه، و)، تغییرات چروکیدگی نمونه‌های مختلف سرخ‌شده در دمای 190°C را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، روند داده‌های آزمایشی به دست‌آمده در تمامی تیمارها، در جهت افزایش در میزان چروکیدگی با گذشت زمان سرخ‌کردن، مشابه روند داده‌های آزمایشی به دست‌آمده در دماهای 150 و 170°C می‌باشد. هم‌چنین، بین نمونه‌های مختلف سرخ‌شده در زمان‌های یکسان، از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد.

مدل‌سازی چروکیدگی: جدول 2، مدل‌های مورد استفاده برای برازش داده‌های آزمایشی چروکیدگی قطعات سیب‌زمینی سرخ‌شده را نشان می‌دهد. به دلیل عدم وجود مدل‌های تجربی مشابه در کارهای تحقیقاتی قبلی، تمامی مدل‌های به کار رفته، مدل‌های پیشنهادی در تحقیق حاضر می‌باشند.

جدول 2، مدل‌های ریاضی مورد استفاده برای بررسی تغییرات چروکیدگی (S) قطعات سیب‌زمینی با گذشت زمان (t)، طی فرایند سرخ‌کردن عمیق*

شماره	مدل ریاضی
1	$S = a.t^2 + b.t + c$
2	$S = a.(1 - \exp(-b\,t))$
3	$S = a.\exp(-b.t) + c$
4	$S = \frac{1 + t}{a.t + b}$
5	$S = \frac{a.b.t}{1 + b.t}$
6	$S = \frac{1 - \exp(-a.t)}{(1 - b.t)}$

*حروف a، b و c ثابت‌های مدل هستند.

علاوه بر این، شکل 2 منحنی‌های برازش داده‌های آزمایشی چروکیدگی نمونه‌های مختلف (جدول 1) سرخ‌شده در چهار زمان 60، 120، 180 و 240 ثانیه و سه دمای 150، 170 و 190°C را با مدل 5 (جدول 2) نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مدل تجربی به کار رفته، با داشتن R^2 بالا و RMSE پایین (جدول 3، مدل 5)، به خوبی داده‌های آزمایشی جذب روغن را برازش نموده است. هم‌چنین، مطابق نتایج به دست‌آمده و بر حسب دو معیار R^2 و RMSE، همه مدل‌های استفاده شده (به ویژه مدل‌های 2 تا 6)، به خوبی داده‌های آزمایشی چروکیدگی را برازش نمودند (جدول 3). با این حال، مدل 5 (جدول 2)، به دلیل داشتن پارامترهای آماری کمی بهتر (R^2>0/999 در اکثر موارد و RMSE پایین‌تر) به منظور برازش داده‌های آزمایشی چروکیدگی نمونه‌ها با آن انتخاب شد. از طرف دیگر، در مرحله بعد، به منظور به دست‌آوردن مدل‌های دارای قابلیت کاربرد در شرایط زمانی مختلف و هم‌چنین برای تیمارهای متفاوت در یک دمای مشخص، چروکیدگی بر حسب زمان، مدل‌سازی شد (جدول 4). علاوه بر این، در مرحله بعد با هدف به دست‌آوردن رابطه بین ضرایب مدل‌ها و متغیرهای مرتبط با فرایند سرخ‌کردن (زمان پیش‌تیمار خشک‌کردن، فرکانس پیش‌تیمار اولتراسوند و دمای فرایند سرخ کردن)، تجزیه و تحلیل رگرسیونی چند متغیره بر روی ضرایب تمامی مدل‌های مربوطه انجام گرفت. جدول 5، مدل‌های به دست‌آمده از این طریق را نشان می‌دهد؛ به طوری‌که چروکیدگی (S) نمونه‌ها به عنوان تابعی از زمان سرخ‌کردن (t) بوده و ضرایب هر مدل (a، b و c) نیز، تابعی از متغیرهای فرایند می‌باشند.

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-18]

جدول 3. پارامترهای آماری حاصل از برازش داده‌های آزمایشی چروکیدگی با مدل‌های 6-1 موجود در جدول 2، برای تیمارها و دماهای مختلف، طی فرایند سرخ‌کردن عمیق

مدل (1)	دما (°C)					
	190		170		150	
پیش تیمار	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE
Control	0/9408	0/0430	0/9280	0/0500	0/9275	0/0531
D8	0/9372	0/0456	0/9318	0/0502	0/9325	0/0534
D15	0/9468	0/0429	0/9442	0/0466	0/9349	0/0537
U28	0/9426	0/0404	0/9327	0/0463	0/9266	0/0514
U40	0/9393	0/0414	0/9299	0/0472	0/9290	0/0505
U28 – D8	0/9403	0/0436	0/9315	0/0490	0/9355	0/0509
U40 – D8	0/9415	0/0431	0/9302	0/0497	0/9334	0/0518
U28 – D15	0/9507	0/0403	0/9473	0/0441	0/9372	0/0516
U40 – D15	0/9490	0/0409	0/9478	0/0438	0/9369	0/0514
مدل (2)	دما (°C)					
	190		170		150	
پیش تیمار	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE
Control	0/9941	0/0110	0/9961	0/0095	0/9981	0/0070
D8	0/9949	0/0106	0/9966	0/0092	0/9985	0/0064
D15	0/9973	0/0079	0/9985	0/0063	0/9979	0/0079
U28	0/9959	0/0088	0/9971	0/0078	0/9980	0/0069
U40	0/9956	0/0090	0/9966	0/0084	0/9981	0/0068
U28 – D8	0/9951	0/0102	0/9965	0/0090	0/9982	0/0069
U40 – D8	0/9958	0/0094	0/9955	0/0103	0/9984	0/0065
U28 – D15	0/9970	0/0081	0/9986	0/0059	0/9979	0/0077
U40 – D15	0/9970	0/0081	0/9983	0/0064	0/9983	0/0067
مدل (3)	دما (°C)					
	190		170		150	
پیش تیمار	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE
Control	0/9941	0/0135	0/9961	0/0116	0/9981	0/0085
D8	0/9949	0/0130	0/9966	0/0112	0/9985	0/0078
D15	0/9973	0/0097	0/9985	0/0077	0/9979	0/0096
U28	0/9959	0/0108	0/9971	0/0095	0/9980	0/0085
U40	0/9957	0/0110	0/9966	0/0103	0/9981	0/0083
U28 – D8	0/9951	0/0125	0/9965	0/0111	0/9982	0/0085
U40 – D8	0/9958	0/0116	0/9955	0/0126	0/9984	0/0079
U28 – D15	0/9970	0/0099	0/9986	0/0072	0/9979	0/0094
U40 – D15	0/9970	0/0099	0/9983	0/0079	0/9983	0/0083
مدل (4)	دما (°C)					
	190		170		150	
پیش تیمار	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE
Control	0/9969	0/0080	0/9967	0/0087	0/9965	0/0094
D8	0/9971	0/0079	0/9969	0/0087	0/9964	0/0101
D15	0/9982	0/0065	0/9974	0/0081	0/9966	0/0099
U28	0/9976	0/0067	0/9968	0/0082	0/9960	0/0098
U40	0/9973	0/0071	0/9966	0/0085	0/9961	0/0097
U28 – D8	0/9973	0/0075	0/9969	0/0085	0/9964	0/0098
U40 – D8	0/9977	0/0070	0/9965	0/0090	0/9965	0/0097
U28 – D15	0/9983	0/0061	0/9974	0/0079	0/9968	0/0094
U40 – D15	0/9982	0/0062	0/9975	0/0078	0/9967	0/0095
مدل (5)	دما (°C)					
	190		170		150	
پیش تیمار	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE
Control	0/9985	0/0055	0/9993	0/0039	0/9999	0/0019
D8	0/9989	0/0048	0/9994	0/0037	0/9997	0/0031
D15	0/9998	0/0020	0/9997	0/0028	0/9995	0/0037
U28	0/9993	0/0036	0/9995	0/0032	0/9996	0/0030
U40	0/9992	0/0039	0/9993	0/0037	0/9995	0/0033
U28 – D8	0/9990	0/0045	0/9994	0/0036	0/9994	0/0039
U40 – D8	0/9993	0/0037	0/9990	0/0049	0/9997	0/0030
U28 – D15	0/9997	0/0025	0/9996	0/0032	0/9995	0/0036
U40 – D15	0/9997	0/0024	0/9995	0/0033	0/9996	0/0033
مدل (6)	دما (°C)					
	190		170		150	
پیش تیمار	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE
Control	0/9868	0/0165	0/9861	0/0179	0/9886	0/0172
D8	0/9867	0/0171	0/9873	0/0176	0/9904	0/0165
D15	0/9911	0/0143	0/9923	0/0141	0/9896	0/0175
U28	0/9893	0/0142	0/9889	0/0154	0/9887	0/0164
U40	0/9885	0/0147	0/9876	0/0161	0/9894	0/0159
U28 – D8	0/9876	0/0162	0/9873	0/0172	0/9906	0/0158
U40 – D8	0/9886	0/0155	0/9859	0/0182	0/9904	0/0160
U28 – D15	0/9916	0/0136	0/9932	0/0129	0/9901	0/0167
U40 – D15	0/9913	0/0138	0/9928	0/0132	0/9908	0/0159

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-18]

جدول 4. ضرایب مدل‌های ریاضی پیشنهادی برای پیشگویی میزان چروکیدگی (S) قطعات سیب‌زمینی با گذشت زمان (t)، طی فرایند سرخ‌کردن عمیق در دماهای معین، بر اساس جدول 2*

دما (°C)	مدل ریاضی (1)	R^2	RMSE
150	$S = -8/798E-06t^2 + 0/0032t + 0/0202$	0/9386	0/0289
170	$S = -9/904E-06t^2 + 0/0035t + 0/0226$	0/9318	0/0322
190	$S = -1/100E-05t^2 + 0/0038t + 0/0248$	0/9278	0/0353
دما (°C)	مدل ریاضی (2)	R^2	RMSE
150	$S = 0/2992(1-\exp(-0/0226\times t))$	0/9910	0/0109
170	$S = 0/3123(1-\exp(-0/0258\times t))$	0/9925	0/0105
190	$S = 0/3311(1-\exp(-0/0279\times t))$	0/9929	0/0109
دما (°C)	مدل ریاضی (3)	R^2	RMSE
150	$S = -0/2985\exp(-0/0226\times t) + 0/2992$	0/9910	0/0110
170	$S = -0/3119\exp(-0/0258\times t) + 0/3124$	0/9925	0/0107
190	$S = -0/3308\exp(-0/0279\times t) + 0/3311$	0/9929	0/0111
دما (°C)	مدل ریاضی (4)	R^2	RMSE
150	$S = \frac{1+t}{2/886\,t + 98/55}$	0/9928	0/0098
170	$S = \frac{1+t}{2/821\,t + 78/32}$	0/9924	0/0106
190	$S = \frac{1+t}{2/690\,t + 65/82}$	0/9912	0/0122
دما (°C)	مدل ریاضی (5)	R^2	RMSE
150	$S = \frac{0/343\times 0/0322\times t}{1+(0/0322\times t)}$	0/9944	0/0086
170	$S = \frac{0/3497\times 0/0412\times t}{1+(0/0412\times t)}$	0/9948	0/0087
190	$S = \frac{0/3655\times 0/0486\times t}{1+(0/0486\times t)}$	0/9943	0/0098
دما (°C)	مدل ریاضی (6)	R^2	RMSE
150	$S = \frac{1-\exp(-0/0058\,t)}{1+0/0065\,t}$	0/9843	0/0144
170	$S = \frac{1-\exp(-0/0066\,t)}{1+0/0067\,t}$	0/9846	0/0151
190	$S = \frac{1-\exp(-0/0073\,t)}{1+0/0065\,t}$	0/9846	0/0161

* $E\text{-}0n = (\times 10^{-n})$

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-18]

جدول 5. مدل‌های نهایی حاصل از انجام تجزیه و تحلیل رگرسیون چند متغیره بر روی ضرایب مدل‌ها (a، b و c)، به صورت تابعی از زمان سرخ‌کردن و دیگر پارامترهای مربوطه*،**

R^2	ضرایب مدل $S = a.t^2 + b.t + c$
0/9999	$a = 7/44E\text{-}09F_U - 4/47E\text{-}08T_D - 5/72E\text{-}08T$
0/9994	$b = -2/20E\text{-}06F_U + 1/83E\text{-}05T_D + 2/03E\text{-}05T$
0/9988	$c = -2/48E\text{-}05F_U - 1/83E\text{-}05T_D + 1/37E\text{-}04T$
R^2	ضرایب مدل $S = a.(1-\exp(-b.t))$
0/9972	$a = -1/36E\text{-}04F_U + 1/90E\text{-}03T_D + 1/77E\text{-}03T$
0/9993	$b = -6/76E\text{-}07F_U - 1/12E\text{-}04T_D + 1/55E\text{-}04T$
R^2	ضرایب مدل $S = a.\exp(-b.t) + c$
0/9973	$a = 1/37E\text{-}04F_U$ -1/897E-03T_D - 1/77E-03T
0/9993	$b = -1/02E\text{-}06F_U - 1/12E\text{-}04T_D + 1/55E\text{-}04T$
0/9972	$c = -1/35E\text{-}04F_U + 1/89E\text{-}03T_D + 1/77E\text{-}03T$
R^2	ضرایب مدل $S = \frac{1+t}{a.t+b}$
0/9999	$a = 4/35E\text{-}03F_U - 2/17E\text{-}02T_D + 3/91E\text{-}02T - 5/40E\text{-}05F_U^2 + 3/95E\text{-}04T_D^2 - 1/29E\text{-}04T^2$
0/9980	$b = 2/58E\text{-}01F_U - 6/05E\text{-}01T_D + 1/76T - 4/57E\text{-}03F_U^2 + 4/60E\text{-}02T_D^2 - 7/54E\text{-}03T^2$
R^2	ضرایب مدل $S = \frac{a.b.t}{1+b.t}$
0/9998	$a = -5/26E\text{-}04F_U + 2/56E\text{-}03T_D + 3/49E\text{-}03T + 6/46E\text{-}06F_U^2 - 3/53E\text{-}05T_D^2 - 8/55E\text{-}06T^2$
0/9988	$b = -6/26E\text{-}05F_U - 9/93E\text{-}05T_D + 9/78E\text{-}05T + 1/43E\text{-}06F_U^2 - 1/77E\text{-}05T_D^2 + 9/27E\text{-}07T^2$
R^2	ضرایب مدل $S = \frac{1-\exp(-a.t)}{(1-b.t)}$
0/9999	$a = -1/28E\text{-}05F_U + 3/80E\text{-}05T_D + 4/08E\text{-}05T + 2/04E\text{-}07F_U^2 - 1/73E\text{-}06T_D^2 - 9/27E\text{-}09T^2$
0/9997	$b = -9/62E\text{-}06F_U + 5/77E\text{-}05T_D - 8/12E\text{-}05T + 1/04E\text{-}07F_U^2 - 7/74E\text{-}07T_D^2 + 2/37E\text{-}07T^2$

* F_U، T_D و T، به ترتیب نشان‌دهنده فرکانس پیش‌تیمار اولتراسوند، زمان پیش‌تیمار خشک‌کردن و دمای سرخ‌کردن می‌باشند.

** $E\text{-}0n = (\times 10^{-n})$

• بحث

در تطابق با نتایج به دست‌آمده در این مطالعه مطابق شکل 1- الف، *Kawas* و *Moreira* در بررسی خصوصیات کیفی چیپس تورتیلا (Tortilla chips) طی فرایند سرخ‌کردن عمیق، گزارش کردند که بیشترین میزان چروکیدگی در نمونه‌های سرخ‌شده، طی 5 ثانیه اولیه فرایند (به علت آهنگ بالای از دست‌دادن آب) رخ می‌دهد (21). هم‌چنین، *Baik* و *Mittal* در مطالعه بر روی سرخ‌کردن Tofu (نوعی پنیر یا دلمه حاصل از شیر سویا)، به این نتیجه رسیدند که با افزایش دمای سرخ‌کردن، میزان چروکیدگی نمونه‌ها افزایش پیدا کرده و برای تمامی شرایط سرخ‌کردن، 50% چروکیدگی، تقریباً طی یک سوم ابتدایی از کل زمان فرایند اتفاق می‌افتد (25) نتایج مشابهی در ارتباط با تأثیر دمای فرایند روی چروکیدگی نمونه‌های سرخ‌شده توسط محققان دیگر گزارش شده است (7، 6). از طرف دیگر، *Taiwo* و *Baik* (2007)، در مطالعه بر روی سرخ‌کردن ورقه‌های سیب‌زمینی شیرین (Sweet potato)، گزارش کردند که با گذشت زمان سرخ‌کردن، درصد تغییر در حجم نمونه‌ها (چروکیدگی) افزایش می‌یابد و در زمان 120 ثانیه از فرایند، به حداکثر میزان خود رسیده و بعد از آن، میزان تغییر در حجم نمونه‌ها یا کاهش یافته و یا ثابت می‌شود (22).

چروکیدگی، ارتباط قوی با محتوای رطوبتی نمونه‌ها دارد. در این ارتباط و هم‌چنین، مطابق شکل 1- ب، با کاهش محتوای رطوبتی، چروکیدگی نمونه‌ها افزایش پیدا می‌کند؛ به طوری‌که در زمان‌های اولیه فرایند، در اثر خروج سریع

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-18]

رطوبت آزاد موجود در نمونه غذایی، چروکیدگی خیلی سریع اتفاق می‌افتد و با گذشت زمان سرخ‌کردن، آهنگ وقوع این پدیده کاهش پیدا می‌کند. در واقع، بروز پدیده چروکیدگی حجمی حین مراحل اولیه فرایند سرخ‌کردن، کاملاً معادل با حجم آب خارج شده از نمونه غذایی می‌باشد (26). از طرف دیگر، ثابت شدن میزان چروکیدگی در زمان‌های بالای فرایند سرخ‌کردن (در محتوای رطوبتی نسبتاً پایین) را می‌توان به تشکیل یک پوسته سخت بر سطح نمونه‌ها نسبت داد که این پوسته، کاهش حجم بیشتر ماده غذایی را محدود می‌کند (7). هم‌چنین، با افزایش دمای سرخ‌کردن، به علت افزایش آهنگ خروج رطوبت از نمونه‌ها، چروکیدگی افزایش پیدا می‌کند. علاوه بر این، چروکیدگی ابتدا در سطح نمونه‌ها اتفاق افتاده و به تدریج با گذشت زمان سرخ‌کردن، به سمت داخل ماده غذایی حرکت می‌کند (22). از طرف دیگر، در زمان‌های بالای فرایند، تجمع بخارهای آب به دام افتاده و هم‌چنین جذب روغن، می‌توانند به عدم تغییر حجم نمونه غذایی یا حتی افزایش حجم آن کمک کنند (6).

مطابق شکل 2 (الف، ج، ه)، میزان چروکیدگی پایین‌تر نمونه‌های پیش‌تیمارشده با اولتراسوند نسبت به نمونه شاهد را احتمالاً می‌توان به ایجاد کانال‌های میکروسکوپی در قطعات سیب‌زمینی طی انجام پیش‌تیمار نسبت داد؛ به طوری‌که حین سرخ‌کردن نمونه‌ها در روغن، رطوبت با سهولت بیشتری از آن‌ها خارج می‌شود و در نتیجه، آسیب کمتری به لوله‌های موئین موجود در قطعات سیب‌زمینی وارد می‌شود. علاوه بر این، آهنگ بالای خروج رطوبت از نمونه‌ها طی فرایند سرخ‌کردن، احتمالاً باعث تشکیل سریع‌تر یک پوسته سطحی سفت شده و از این طریق، از کاهش حجم بیشتر نمونه‌ها جلوگیری کند. از طرف دیگر، برای نمونه‌های پیش‌تیمارشده با خشک‌کردن (8 و 15 دقیقه) و سپس سرخ‌شده در دماهای مختلف، میزان چروکیدگی بالاتر نسبت به نمونه شاهد در تطابق با نتایج به دست‌آمده توسط محققان دیگر می‌باشد (22، 9). این مسئله را می‌توان به چروکیدگی قطعات سیب‌زمینی، طی انجام پیش‌تیمار خشک‌کردن، در نتیجه خروج بخشی از محتوای رطوبتی کل آن‌ها نسبت داد.

علاوه بر این، در ارتباط با مدل‌سازی چروکیدگی، با توجه به رفتار تقریباً نمایی چروکیدگی نمونه‌ها با گذشت زمان (کاهش آهنگ وقوع پدیده چروکیدگی با گذشت زمان و رسیدن به میزان تقریباً ثابت) سرخ‌کردن، می‌توان بیان کرد که مدل‌های نمایی یا مدل‌های تبعیت کننده از رفتار نمایی (جدول 2، مدل‌های 1، 4 و 5)، مدل‌های بهتری جهت برازش داده‌های آزمایشی چروکیدگی با آن‌ها، برای دستیابی به ضریب همبستگی (R^2) بالاتر خواهند بود. هم‌چنین، در مدل‌های پیشنهادی، برای زمان‌های کوتاه، میزان چروکیدگی با گذشت زمان سرخ‌کردن از رفتار خطی تبعیت می‌کند؛ در حالی‌که در زمان‌های بالاتر، این رفتار حالت غیر خطی پیدا نموده و در نهایت، چروکیدگی در زمان‌های طولانی، به مقدار تعادلی خود می‌رسد. علاوه بر این، مطابق جدول 4، مدل‌های به دست‌آمده (به ویژه 6-2) با داشتن R^2 بالا و RMSE پایین، می‌توانند مدل‌های پیشنهادی مناسبی جهت کاربرد در شرایط زمانی مختلف و تیمارهای متفاوت طی فرایند سرخ‌کردن عمیق در دماهای مشخص ذکر شده باشند. از طرف دیگر، مطابق جدول 5، در ارتباط با ضرایب به دست‌آمده از طریق انجام تجزیه و تحلیل رگرسیون چند متغیره، می‌توان بیان کرد که با داشتن مقادیر مختلف این متغیرها، به راحتی می‌توان میزان چروکیدگی را با استفاده از این مدل‌ها به دست آورد. هم‌چنین، با به دست‌آوردن چنین مدل‌هایی، لزوم انجام آزمایشات در شرایط مختلف ذکر شده در فرایند سرخ‌کردن، بسیار کاهش پیدا می‌کند و این مسئله، بیانگر اهمیت چنین مدل‌هایی می‌باشد.

• References

1. Durán M, Pedreschi F, Moyano P, Troncoso E. Oil partition in pre-treated potato slices during frying and cooling. J Food Eng 2007;81:257-65.
2. Pedreschi F. Frying of Potatoes: Physical, Chemical, and Microstructural Changes. Drying Technol 2012;30:707-25.
3. Cuesta C, Sánchez-Muñiz FJ, Varela G. Nutritive value of frying fats. In: Varela G, Bender AE, Morton ID, editors. Frying of Foods. Chichester, United Kingdom:Ellis Horwood Ltd; 1988.p.112–28..
4. Clark JP. Happy birthday, potato chip! And other snack developments. Food Technol 2003;57:89–92.
5. Krokida MK, Oreopoulou V, Maroulis ZB. Effect of frying conditions on shrinkage and porosity of fried potatoes. J Food Eng 2000;43:147-54.
6. Costa RM, Oliveira FAR, Boutcheva G. Structural changes and shrinkage of potato during frying. Int J Food Sci Technol 2001;36:11-23.
7. Ziaiifar AM, Courtois F, Trystram G. Porosity development and its effect on oil uptake during

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-18]

frying process. J Food Process Eng 2010;33:191-212.

8. Brasiello A, Adiletta G, Russo P, Crescitelli S, Albanese D, Di-Matteo M. Mathematical modeling of eggplant drying: Shrinkage effect. J Food Eng 2012;114:99-105.

9. Krokida MK, Oreopoulou V, Maroulis ZB, Marinos-Kouris D. Effect of pre-drying on quality of French fries. J Food Eng 2001;49:347-354.

10. Awad TS, Moharram HA, Shaltout OE, Asker D, Youssef MM. Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review. Food Res Int 2012;48:410-27.

11. Cárcel JA, García-Pérez JV, Benedito J, Mulet A. Food process innovation through new technologies: Use of ultrasound. J Food Eng 2012;110:200-207.

12. Garcia-Perez JV, Ortuño C, Puig A, Carcel JA, Perez-Munuera I. Enhancement of Water Transport and Microstructural Changes Induced by High-Intensity Ultrasound Application on Orange Peel Drying. Food Biopro Technol 2012;5:2256-65.

13. Fernandes FAN, Gallão MI, Rodrigues S. Effect of osmosis and ultrasound on pineapple cell tissue structure during dehydration. J Food Eng 2009;90:186-90.

14. Rodrigues S, Gomes MCF, Gallão MI, Fernandes FAN. Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration on cell structure of sapotas. J Sci Food Agric 2009;89:665-70.

15. Trystram G. Modelling of food and food processes. J Food Eng 2012;110:269-77.

16. Koç B, Eren İ, Kaymak Ertekin F. Modeling bulk density, porosity and shrinkage of quince during drying: The effect of drying method. J Food Eng 2008;85:340-49.

17. Márquez CA, De-Michelis A. Comparison of drying kinetics for small fruits with and without particle shrinkage considerations. Food Biopro Technol 2011;4:1212–18.

18. Mayor L, Sereno AM. Modeling shrinkage during convective drying of food materials: a review. J Food Eng 2004;61:373-86.

19. Nahimana H, Zhang M, Mujumdar AS, Ding Z. Mass transfer modeling and shrinkage consideration during osmotic dehydration of fruits and vegetables. Food Rev Int 2011;27:331-56.

20. Yamsaengsung R, Ariyapuchai T, Prasertsit K. Effects of vacuum frying on structural changes of bananas. J Food Eng 2011;106:298-305.

21. Kawas ML, Moreira RG. Characterization of product quality attributes of tortilla chips during the frying process. J Food Eng 2001;47:97-107.

22. Taiwo KA, Baik OD. Effects of pre-treatments on the shrinkage and textural properties of fried sweet potatoes. LWT 2007;40:661-668.

23. AOAC. AOAC official method 9743.1: bioavailability of iron: rat hemoglobin repletion bioassay. In: Cunniff P, editor. Official methods of analysis of AOAC international, 16th ed. Gaithersburg: AOAC international; 1997. p. 62–3.

24. Steel RGD, Torrie JH, Dickey DA, editors. Principles and procedures of statistics: a biometrical approach. New York: McGraw-Hill; 1997.

25. Baik OD, Mittal GS. Heat and moisture transfer and shrinkage simulation of deep-fat tofu frying. Food Res Int 2005;38:183-91.

26. Garayo J, Moreira R. Vacuum frying of potato chips. J Food Eng 2002;55:181-91.

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-18]

Empirical shrinkage modeling of potato strips pretreated with ultrasound and drying during deep-fat frying

Naghavi E[1], Dehghannya J[2,], Ghanbarzadeh B[3], Rezaei-Mokarram R[4]*

1- M.Sc. in Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran

*2- *Corresponding author:Assistant Prof, Dept.of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran, E-mail: J_dehghannya@tabrizu.ac.ir*

3- Associate Prof, Dept.of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran

4- Assistant Prof, Dept.of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran

Received 26 Jul, 2012 **Accepted 5 May, 2013**

Background and Objectives: Modeling the relationships between variables during deep-fat frying of food products can be a useful tool for optimal control of the process conditions, thus increasing the quality of the final fried product. This study investigated the effect of ultrasound and drying pretreatments on the shrinkage rate of fried potato strips; shrinkage of the samples was modeled as a function of process time.

Materials and Methods: Ultrasound pretreatment was performed at 28 and 40 kHz for 15 min and drying pretreatment was conducted at 80°C for 8 and 15 min. Frying was done at 150, 170 and 190 °C for 60, 120, 180 and 240 s. In addition to model shrinkage, the experimental data were fitted to the six empirical models proposed in this study; to determine the best model, R2 and RMSE indices were used.

Results: The results showed that, applied separately, ultrasound pretreatment reduced the shrinkage of fried samples and drying pretreatment reduced the shrinkage when compared to the control samples. The applied models were well fitted to the experimental data and showed high R^2 and low RMSE values.

Conclusions: The use of ultrasound pretreatment is a promising method to improve qualitative and quantitative properties of fried products, including decreased sample shrinkage rate. The models proposed in this study can be useful to the deep-fat frying process and help control the quality and shrinkage rate of the final product.

Keywords: Deep-fat frying, Drying, Modeling, Shrinkage, Ultrasound

[Downloaded from nsft.sbmu.ac.ir on 2026-11-18]