

مدل سازی تجربی چروکیدگی قطعات سیبزمینی پیش تیمار شده با اولتراسوند و خشک کردن طی فرایند سرخ کردن عمیق

عنایت‌الله نقوی¹، جلال دهقان‌نیا²، بابک قنبرزاده³، رضا رضایی‌مکرم⁴

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 سرخ کردن عمیق محصولات غذایی از طریق انجام مدل سازی، می‌تواند راه مناسبی برای کنترل بهینه شرایط فرایند و در نتیجه، افزایش کیفیت محصول سرخ شده نهایی باشد. در این تحقیق، تأثیر پیش تیمارهای اولتراسوند و خشک کردن بر میزان چروکیدگی قطعات سیبزمینی سرخ شده بررسی شد. همچنین، چروکیدگی نمونه‌ها بر حسب زمان فرایند مدل سازی گردید.

مواد و روش‌ها: پیش تیمار اولتراسوند در دو سطح فرکانس 28 و 40 کیلوهرتز و زمان 15 دقیقه و پیش تیمار خشک کردن در دو زمان 8 و 15 دقیقه و دمای 80°C صورت گرفت. سرخ کردن قطعات سیبزمینی در دماهای 170، 150، 170 و 190°C به مدت 60، 120، 180 و 240 ثانیه انجام شد. علاوه بر این، به منظور مدل سازی 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 پیش تیمارهای اولتراسوند و خشک کردن به صورت مجزا میزان چروکیدگی نمونه‌های سرخ شده 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.

نتیجه گیری: استفاده از پیش تیمار اولتراسوند به عنوان یک روش امید بخش مناسب در بهبود خصوصیات کمی و کیفی محصولات سرخ شده، 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 سرخ کردن عمیق مفید باشند و به کنترل کیفیت محصول نهایی سرخ شده از لحاظ میزان چروکیدگی کمک کنند.

واژگان کلیدی: اولتراسوند، چروکیدگی، خشک کردن، سرخ کردن عمیق، مدل سازی

• مقدمه

سرخ کردن 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

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)

چروکیدگی که طی انجام پیش‌تیمار خشک کردن در نمونه غذایی اتفاق می‌افتد، به دلیل کاهش نسبت منافذ باز، جذب روغن را در محصول سرخ‌شده کاهش می‌دهد (9).

علاوه بر خشک کردن، استفاده از اولتراسوند به عنوان یک پیش‌تیمار قبل از سرخ کردن عمیق می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. تاکنون از فناوری اولتراسوند در فرایندهای مختلفی مانند خشک کردن، 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 (10-12)؛ با این حال، هیچ‌گونه پژوهشی مرتبط با کاربرد این تکنیک در فرایند سرخ کردن، 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)، بنابراین، می‌توان انتظار داشت که استفاده از اولتراسوند به عنوان پیش‌تیمار قبل از فرایند سرخ کردن، باعث افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت، کاهش زمان سرخ کردن 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 سرخ کردن 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 سرخ کردن 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 سرخ کردن، به منظور کنترل بهینه شرایط فرایند و در نتیجه، 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

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 سرخ کردن 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 سرخ کردن، رابطه بسیار نزدیکی با بروز پدیده چروکیدگی دارد. چروکیدگی یا به عبارت دیگر، کاهش حجم ظاهری محصول نهایی، یکی از معایب سرخ کردن است. از عوامل مؤثر بر میزان چروکیدگی محصول سرخ‌شده، می‌توان به دما و زمان سرخ کردن، ضخامت اولیه نمونه، میزان از دست دادن آب و جذب روغن توسط محصول سرخ‌شده اشاره کرد (5-7). 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 خشک کردن، قبل از سرخ کردن، می‌تواند روشی برای بهبود خصوصیات مواد غذایی سرخ‌شده باشد. پیش‌تیمار خشک کردن، 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 سرخ کردن را محدود می‌کند (9). با این حال، 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

عدم در دسترس بودن پژوهشی مرتبط با تأثیر اولتراسوند بر تغییرات فیزیکی ماده غذایی (مانند پدیده چروکیدگی) طی فرایند سرخ کردن عمیق، این تحقیق، با هدف بررسی تأثیر این پیش تیمار و تلفیق آن با پیش تیمار خشک کردن بر چروکیدگی قطعات سیب زمینی طی فرایند سرخ کردن عمیق و هم چنین، مدل سازی پدیده چروکیدگی طی این فرایند انجام شد.

• مواد و روشها

مواد: در این تحقیق، سیب زمینی و روغن مایع به عنوان مواد خام، مورد استفاده قرار گرفتند. سیب زمینی (رقم آگریا) پس از خریداری، در سردخانه بالای صفر نگهداری شد. روغن مورد استفاده نیز، روغن مخصوص سرخ کردنی بهار (مخلوطی از روغن های آفتابگردان، سویا و پنبه دانه)، تهیه شده در شرکت صنعتی بهشهر بود.

تجهیزات: در این تحقیق، از یک سرخ کن خانگی (مدل F430.R، با ظرفیت 2/2 لیتر روغن، ساخت فرانسه، مجهز به سیستم تنظیم دما در محدوده 150 تا 190°C)، خشک کن سینی دار طراحی شده در مقیاس آزمایشگاهی (مدل UOP 8 Tray dryer, Armfield, UK، مجهز به سیستم ثبت خودکار داده ها، واحد کنترل کننده دما، سرعت جریان و رطوبت نسبی هوا) برای انجام پیش تیمار خشک کردن، دستگاه حمام اولتراسوند (مدل USD - 4R، ساخت ژاپن، مجهز به سیستم تنظیم فرکانس و زمان اولتراسونیکاسیون) استفاده شد.

آماده سازی نمونه ها: برای انجام هر آزمایش، سیب زمینی ها پس از شستشو و پوست گیری، توسط یک کاتر دستی طراحی شده به ابعاد 4×1/2×1/2cm (ارتفاع×عرض×طول)، به قطعات مکعب مستطیلی برش داده شدند. نمونه های برش داده شده، جهت جلوگیری از اتلاف رطوبت در درون یک پلیت قرار گرفته و قبل از سرخ کردن، جهت حذف نشاسته سطحی با آب مقطر شسته شدند. آب اضافی سطحی نیز توسط یک کاغذ رطوبت گیر گرفته شد. از این مرحله به بعد، نمونه ها بر حسب انجام نوع پیش تیمار، به چند دسته تقسیم شدند (جدول 1):

کاهش حجم ماده غذایی طی این فرایند را ارائه نماید و از سوی دیگر، با در اختیار داشتن مدل های مناسب، ضرورت انجام آزمایشات پرهزینه نیز کاهش می یابد. اگرچه در فرایندهای دیگر مانند خشک کردن مواد غذایی، مدل سازی تجربی چروکیدگی در سطح وسیعی انجام گرفته است (19-16)، با این حال، در فرایند سرخ کردن عمیق، کارهای تحقیقاتی اندکی در این ارتباط در دسترس می باشد.

Krokida و همکاران اثر مدت زمان پیش تیمار خشک کردن بر خصوصیات ساختاری قطعات سیب زمینی سرخ شده را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که پیش تیمار خشک کردن، حجم ویژه (حجم ماده غذایی به ازاء واحد جرم آن، m^3/kg) اولیه قطعات سیب زمینی و نیز، حجم ویژه محصول سرخ شده را کاهش می دهد. علاوه بر این، پدیده چروکیدگی که طی پیش تیمار خشک کردن اتفاق افتاد، به دلیل کاهش نسبت منافذ باز، جذب روغن طی سرخ کردن قطعات سیب زمینی را کاهش داد (9). هم چنین، *Ziaifar* و همکاران اثر دما و زمان سرخ کردن بر میزان چروکیدگی قطعات سیب زمینی را بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که بیشترین میزان چروکیدگی در مراحل اولیه سرخ کردن رخ می دهد و در نهایت، به علت تشکیل یک پوسته سخت، چروکیدگی متوقف شد. علاوه بر این، با افزایش دمای روغن، برای یک زمان سرخ کردن یکسان، میزان چروکیدگی افزایش یافت (7). *Yamsaengsung* و همکاران نیز، در مطالعه روی تغییرات ساختاری چیپس موز طی سرخ کردن عمیق تحت خلأ پی بردند که طی 5 دقیقه اول از زمان فرایند، به علت خروج سریع رطوبت، نمونه ها متحمل بیشترین میزان چروکیدگی می شوند. با این حال، در زمان های بالاتر، چروکیدگی نمونه ها به علت تشکیل یک پوسته سخت و هم چنین، انبساط داخلی چیپس ها (در اثر تجمع بخارهای آب به دام افتاده) کاهش یافت (20). نتایج مشابهی نیز توسط محققان دیگر گزارش شده است (21، 22).

با توجه به مطالعات بسیار اندک صورت گرفته جهت به دست آوردن مدل های تجربی مناسب برای بررسی تغییرات حجمی ماده غذایی طی فرایند سرخ کردن عمیق و هم چنین،

جدول 1. علائم اختصاری مورد استفاده برای تیمارهای مختلف

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

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 پیش تیمارهای اولتراسوند و خشک کردن، ابتدا در دستگاه حمام اولتراسوند در معرض فرکانس‌های 28 و 40 کیلوهرتز و مدت زمان 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.

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

V: حجم ظاهری نمونه (اولیه یا سرخ‌شده) (cm³)

(M₁, 00): وزن نمونه (g)

M₂: وزن پیکنومتر خالی و حلال (g)

M₃: وزن پیکنومتر محتوی نمونه و حلال (g)

ρ: دانسیته حلال مورد استفاده (g/cm³)

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

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

S(t): درصد چروکیدگی در زمان‌های مختلف

V_t: حجم ظاهری نمونه در زمان t از فرآیند سرخ کردن (cm³)

V₀: حجم ظاهری نمونه اولیه (cm³)

مدل‌سازی ریاضی: در این تحقیق، مدل‌سازی چروکیدگی قطعات سیب‌زمینی طی فرآیند سرخ کردن 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 سرخ کردن (s) می‌باشند. علاوه بر این، پارامترهای مربوط به مدل‌های به کار رفته، از طریق برازش کردن داده‌های آزمایشی در نرم‌افزار MATLAB (Version 7.12.0.635, R2011a) به دست

شرایط سرخ کردن: در هر آزمایش پس از آماده‌سازی نمونه‌ها (بر اساس جدول 1)، جهت سرخ کردن آن‌ها، ابتدا سرخ‌کن با 1/5 لیتر روغن پر شد و بعد از تنظیم دما و زمان سرخ کردن مورد نظر، سرخ‌کن بر روی حالت اتوماتیک قرار داده شد؛ به طوری که پس از رسیدن دمای سرخ‌کن به دمای مورد نظر، نمونه‌های سیب‌زمینی به میزان 100-120 گرم در داخل سبد مشبک سرخ‌کن قرار داده شدند و سپس، سبد حاوی نمونه‌ها، به طور اتوماتیک در روغن غوطه‌ور شد. پس از سرخ شدن 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 گزارش شده، میانگین داده‌های آزمایشی هستند.

اندازه‌گیری محتوای رطوبتی: محتوای رطوبتی نمونه‌های سرخ‌شده، از طریق خشک کردن آن‌ها در آون کنوکسیونی در دمای 105±1°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 سرخ شدن، با بکارگیری تکنیک جابجایی حلال (تولون)، از طریق استفاده از یک پیکنومتر شیشه‌ای و طبق رابطه 1 اندازه‌گیری شد (7).

• یافته‌ها

اثر شرایط فرایند سرخ کردن 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 سرخ کردن، میزان چروکیدگی نمونه‌ها افزایش پیدا می‌کند؛ به طوری که 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 ثابت شدن 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 سرخ کردن یکسان، با افزایش دما از 150 به 190°C، آهنگ وقوع چروکیدگی افزایش پیدا کرد (شکل 1-الف)؛ به طوری که 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 (پیش- تیمارشده با اولتراسوند و خشک کردن به صورت مجزا و تلفیقی) مشاهده شد (داده‌ها نشان داده نشده‌اند).

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.

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

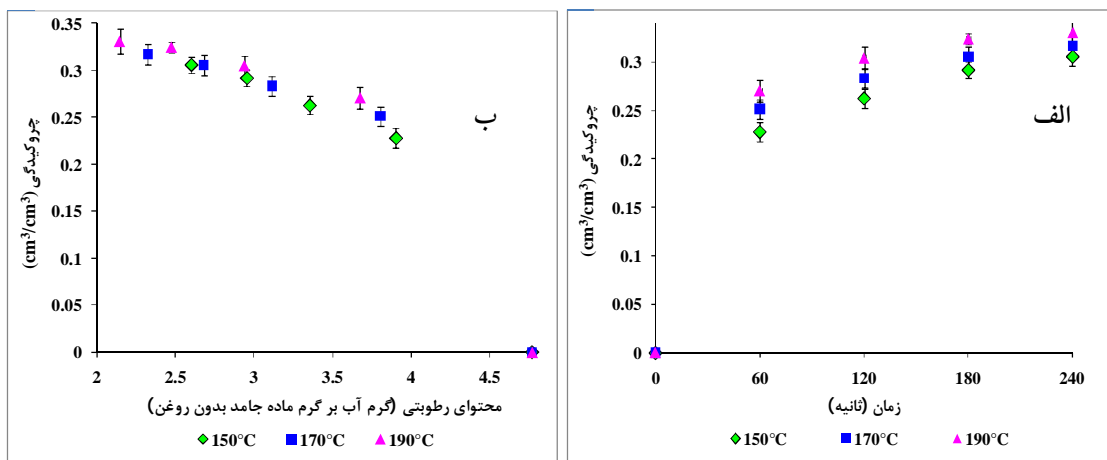
$MR_{pred,i}$: نسبت محتوای رطوبتی پیشگویی شده نام

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

N: تعداد مشاهدات

هم‌چنین، به منظور یافتن رابطه بین ضرایب مدل‌ها و متغیرهای مرتبط با فرایند سرخ کردن (زمان پیش تیمار خشک کردن، فرکانس پیش تیمار اولتراسوند و دمای فرایند سرخ کردن)، 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.

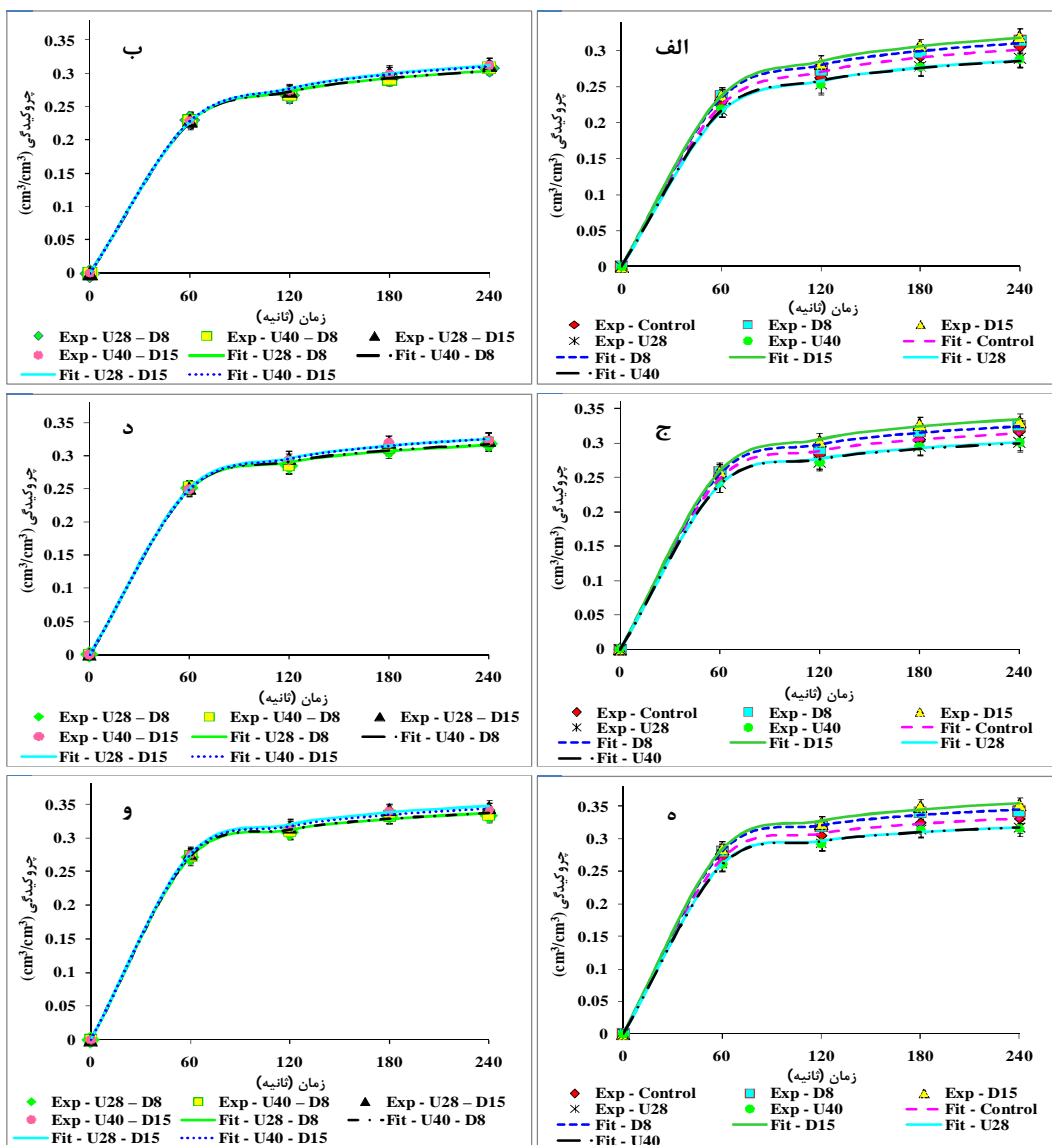
آنالیز آماری: در این مطالعه، 9 تیمار نشان داده شده در جدول 1، در سه دمای 150، 170 و 190°C و چهار زمان 60، 120، 180 و 240 ثانیه در دو تکرار ($2 \times 4 \times 3 = 24$) سرخ شدند. تجزیه و تحلیل داده‌ها بر اساس آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی، با استفاده از نرم افزار SAS 9.1 انجام شد. هم‌چنین،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



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

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 پیش-تیمارشده با اولتراسوند (28 و 40 کیلوهرتز) بیشتر می‌باشد؛ با این‌حال، این اختلافات از لحاظ آماری معنی‌دار نبود. هم‌چنین، هیچ‌گونه اختلاف معنی‌داری بین میزان چروکیدگی نمونه‌های پیش‌تیمارشده با اولتراسوند در فرکانس‌های 28 و 40 کیلوهرتز مشاهده نشد.

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 دست آمده، با افزایش زمان سرخ‌کردن، میزان چروکیدگی در تمامی نمونه‌های فوق افزایش پیدا کرد؛ به طوری که در زمان‌های سرخ‌کردن یکسان، نمونه‌های پیش‌تیمارشده با اولتراسوند (28 و 40



شکل 2. تغییرات چروکیدگی حاصل از آزمایش (Exp) و برازش شده (Fit) با مدل 5 (جدول 2)، طی فرایند سرخ‌کردن عمیق قطعات سیب-زمینی 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

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	$S = a \cdot t^2 + b \cdot t + c$
2	$S = a \cdot (1 - \exp(-bt))$
3	$S = a \cdot \exp(-b \cdot t) + c$
4	$S = \frac{1 + t}{a \cdot t + b}$
5	$S = \frac{a \cdot b \cdot t}{1 + b \cdot t}$
6	$S = \frac{1 - \exp(-a \cdot t)}{(1 - b \cdot t)}$

* 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 سرخ‌کردن)، 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 طوری که 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.

از طرف دیگر، شکل 2-ب، تغییرات چروکیدگی نمونه‌های پیش‌تیمار شده 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، هیچ‌گونه اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. هم‌چنین، بین میزان چروکیدگی نمونه‌های پیش‌تیمار شده به صورت تلفیقی و نمونه شاهد نیز، از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری وجود نداشت. علاوه بر این، در نمونه‌های پیش‌تیمار شده به صورت تلفیقی، اثر فرکانس اولتراسوند (28 و 40 کیلوهرتز) بر میزان چروکیدگی نمونه‌های سرخ‌شده معنی‌دار نبود.

شکل 2 (ج، د)، تغییرات چروکیدگی نمونه‌های پیش‌تیمار شده 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 طوری که در نمونه‌های پیش‌تیمار شده به صورت مجزا (شکل 2-ج)، قطعات سیب‌زمینی پیش‌تیمار شده 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 3. پارامترهای آماری حاصل از برازش داده‌های آزمایشی چروکیدگی با مدل‌های 1-6 موجود در جدول 2، برای تیمارها و دماهای

مختلف، طی فرایند سرخ‌کردن عمیق

دما (°C)						مدل (1)
190		170		150		
RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	پیش تیمار
0/0531	0/9275	0/0500	0/9280	0/0430	0/9408	Control
0/0534	0/9325	0/0502	0/9318	0/0456	0/9372	D8
0/0537	0/9349	0/0466	0/9442	0/0429	0/9468	D15
0/0514	0/9266	0/0463	0/9327	0/0404	0/9426	U28
0/0505	0/9290	0/0472	0/9299	0/0414	0/9393	U40
0/0509	0/9355	0/0490	0/9315	0/0436	0/9403	U28 - D8
0/0518	0/9334	0/0497	0/9302	0/0431	0/9415	U40 - D8
0/0516	0/9372	0/0441	0/9473	0/0403	0/9507	U28 - D15
0/0514	0/9369	0/0438	0/9478	0/0409	0/9490	U40 - D15

دما (°C)						مدل (2)
190		170		150		
RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	پیش تیمار
0/0070	0/9981	0/0095	0/9961	0/0110	0/9941	Control
0/0064	0/9985	0/0092	0/9966	0/0106	0/9949	D8
0/0079	0/9979	0/0063	0/9985	0/0079	0/9973	D15
0/0069	0/9980	0/0078	0/9971	0/0088	0/9959	U28
0/0068	0/9981	0/0084	0/9966	0/0090	0/9956	U40
0/0069	0/9982	0/0090	0/9965	0/0102	0/9951	U28 - D8
0/0065	0/9984	0/0103	0/9955	0/0094	0/9958	U40 - D8
0/0077	0/9979	0/0059	0/9986	0/0081	0/9970	U28 - D15
0/0067	0/9983	0/0064	0/9983	0/0081	0/9970	U40 - D15

دما (°C)						مدل (3)
190		170		150		
RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	پیش تیمار
0/0085	0/9981	0/0116	0/9961	0/0135	0/9941	Control
0/0078	0/9985	0/0112	0/9966	0/0130	0/9949	D8
0/0096	0/9979	0/0077	0/9985	0/0097	0/9973	D15
0/0085	0/9980	0/0095	0/9971	0/0108	0/9959	U28
0/0083	0/9981	0/0103	0/9966	0/0110	0/9957	U40
0/0085	0/9982	0/0111	0/9965	0/0125	0/9951	U28 - D8
0/0079	0/9984	0/0126	0/9955	0/0116	0/9958	U40 - D8
0/0094	0/9979	0/0072	0/9986	0/0099	0/9970	U28 - D15
0/0083	0/9983	0/0079	0/9983	0/0099	0/9970	U40 - D15

دما (°C)						مدل (4)
190		170		150		
RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	پیش تیمار
0/0094	0/9965	0/0087	0/9967	0/0080	0/9969	Control
0/0101	0/9964	0/0087	0/9969	0/0079	0/9971	D8
0/0099	0/9966	0/0081	0/9974	0/0065	0/9982	D15
0/0098	0/9960	0/0082	0/9968	0/0067	0/9976	U28
0/0097	0/9961	0/0085	0/9966	0/0071	0/9973	U40
0/0098	0/9964	0/0085	0/9969	0/0075	0/9973	U28 - D8
0/0097	0/9965	0/0090	0/9965	0/0070	0/9977	U40 - D8
0/0094	0/9968	0/0079	0/9974	0/0061	0/9983	U28 - D15
0/0095	0/9967	0/0078	0/9975	0/0062	0/9982	U40 - D15

دما (°C)						مدل (5)
190		170		150		
RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	پیش تیمار
0/0019	0/9999	0/0039	0/9993	0/0055	0/9985	Control
0/0031	0/9997	0/0037	0/9994	0/0048	0/9989	D8
0/0037	0/9995	0/0028	0/9997	0/0020	0/9998	D15
0/0030	0/9996	0/0032	0/9995	0/0036	0/9993	U28
0/0033	0/9995	0/0037	0/9993	0/0039	0/9992	U40
0/0039	0/9994	0/0036	0/9994	0/0045	0/9990	U28 - D8
0/0030	0/9997	0/0049	0/9990	0/0037	0/9993	U40 - D8
0/0036	0/9995	0/0032	0/9996	0/0025	0/9997	U28 - D15
0/0033	0/9996	0/0033	0/9995	0/0024	0/9997	U40 - D15

دما (°C)						مدل (6)
190		170		150		
RMSE	R ²	RMSE	R ²	RMSE	R ²	پیش تیمار
0/0172	0/9886	0/0179	0/9861	0/0165	0/9868	Control
0/0165	0/9904	0/0176	0/9873	0/0171	0/9867	D8
0/0175	0/9896	0/0141	0/9923	0/0143	0/9911	D15
0/0164	0/9887	0/0154	0/9889	0/0142	0/9893	U28
0/0159	0/9894	0/0161	0/9876	0/0147	0/9885	U40
0/0158	0/9906	0/0172	0/9873	0/0162	0/9876	U28 - D8
0/0160	0/9904	0/0182	0/9859	0/0155	0/9886	U40 - D8
0/0167	0/9901	0/0129	0/9932	0/0136	0/9916	U28 - D15
0/0159	0/9908	0/0132	0/9928	0/0138	0/9913	U40 - D15

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*

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

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

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

* T و T_D به ترتیب نشان‌دهنده فرکانس پیش‌تیمار اولتراسوند، زمان پیش‌تیمار خشک‌کردن و دمای سرخ‌کردن می‌باشند.
^{**} $E-0n = (\times 10^n)$

• بحث

فرایند روی چروکیدگی نمونه‌های سرخ‌شده توسط محققان دیگر گزارش شده است (6, 7). 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 طوری که در زمان‌های اولیه فرایند، در اثر خروج سریع

در تطابق با نتایج به دست آمده 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 (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

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 تبعیت‌کننده 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 2-6) 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.

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 پیش‌تیمار شده 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 پیش‌تیمار شده با خشک‌کردن (8 و 15 دقیقه) و سپس سرخ‌شده در دماهای مختلف، میزان چروکیدگی بالاتر نسبت به نمونه شاهد در تطابق با نتایج به

• References

- 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.
- Pedreschi F. Frying of Potatoes: Physical, Chemical, and Microstructural Changes. *Drying Technol* 2012;30:707-25.
- Cuesta C, Sánchez-Muñoz 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..
- Clark JP. Happy birthday, potato chip! And other snack developments. *Food Technol* 2003;57:89-92.
- Krokida MK, Oreopoulou V, Maroulis ZB. Effect of frying conditions on shrinkage and porosity of fried potatoes. *J Food Eng* 2000;43:147-54.
- Costa RM, Oliveira FAR, Boutcheva G. Structural changes and shrinkage of potato during frying. *Int J Food Sci Technol* 2001;36:11-23.
- Ziaifar AM, Courtois F, Trystram G. Porosity development and its effect on oil uptake during

- 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, Marinou-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 Bioprocess 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 Bioprocess 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.

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

Naghavi E¹, Dehghannya J*², Ghanbarzadeh B³, Rezaei-Mokarram R⁴

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 R² 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