

# مدل سازی دانسیته ظاهری قطعات سیب زمینی پیش تیمار شده با فراصوت و خشک کردن طی فرآیند سرخ کردن عمیق

عنایت الله نقوی<sup>۱</sup>، جلال دهقان نیا<sup>۲\*</sup>، بابک قنبرزاده<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۲- دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۳- استاد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

(تاریخ دریافت: ۹۳/۱/۲۴ تاریخ پذیرش: ۹۳/۴/۳۱)

## چکیده

این تحقیق، با هدف بررسی تأثیر پیش تیمارهای فراصوت و خشک کردن بر دانسیته ظاهری قطعات سیب زمینی و همچنین، مدل سازی دانسیته ظاهری طی فرآیند سرخ کردن عمیق انجام شد. بدین منظور، پیش تیمار فراصوت در دو سطح فرکانس ۲۸ و ۴۰ کیلوهرتز و زمان ۱۵ دقیقه و همچنین، پیش تیمار خشک کردن در دو زمان ۸ و ۱۵ دقیقه و دمای ۸۰°C صورت گرفته و سپس سرخ کردن قطعات سیب زمینی در دماهای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰°C به مدت ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ ثانیه انجام شد. از طرف دیگر، به منظور مدل سازی دانسیته ظاهری، داده های آزمایشی با شش مدل پیشنهادی در این تحقیق برازش شد. نتایج نشان داد که طی فرآیند سرخ کردن، دانسیته ظاهری نمونه های مختلف کاهش پیدا می کند؛ به طوری که در نمونه های پیش تیمار شده با فراصوت (۲۸ و ۴۰ کیلوهرتز)، مقادیر دانسیته ظاهری در زمان های ۱۸۰ یا ۲۴۰ ثانیه از فرآیند، به طور معنی داری نسبت به نمونه شاهد کاهش یافت؛ ولی در نمونه های پیش تیمار شده با خشک کردن (۸ و ۱۵ دقیقه)، در زمان های سرخ کردن یکسان، کاهش در مقادیر دانسیته ظاهری نسبت به نمونه شاهد از لحاظ آماری معنی دار نبود. علاوه بر این، با افزایش دمای فرآیند از ۱۵۰ به ۱۹۰°C، میزان کاهش در دانسیته ظاهری افزایش پیدا کرد. از طرف دیگر، مدل های بکار رفته با داشتن  $R^2$  بالا و RMSE پایین، به خوبی داده های آزمایشی را برازش نمودند. همچنین، از طریق انجام تجزیه و تحلیل رگرسیون چند متغیره، مدل هایی با  $R^2$  بالا، به جهت قابلیت کاربرد در شرایط مختلف زمان و دمایی فرآیند سرخ کردن عمیق نمونه های مختلف، پیشنهاد شد.

کلید واژگان: فراصوت، خشک کردن، دانسیته ظاهری، سرخ کردن عمیق، مدل سازی

## ۱- مقدمه

سیب‌زمینی با نام علمی *Solanum tuberosum*<sup>۱</sup>، گیاهی است از خانواده سیب‌زمینیان (*Solanaceae*)<sup>۲</sup> که با تولید سالانه بیش از ۳۰۰ میلیون تن در دنیا پس از گندم، ذرت و برنج از مهم‌ترین محصولات کشاورزی به شمار می‌رود [۱، ۲]. بر اساس آمار فائو، میزان تولید سیب‌زمینی در سال ۲۰۱۰ در ایران، ۴۰۵۴۹۰ تن می‌باشد و ایران از این نظر، رتبه شانزدهم جهانی را به خود اختصاص داده است [۳].

سرخ‌کردن عمیق در روغن، یک روش پخت سریع است که در آن ماده غذایی در داخل روغن داغ غوطه‌ور می‌شود و طی آن روغن به عنوان محیط انتقال حرارت، در تماس مستقیم با ماده غذایی و در دمایی بالاتر از نقطه جوش آب، معمولاً  $200^{\circ}\text{C}$  - ۱۵۰ مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴]. این فرآیند، یک فرآیند انتقال جرم و حرارت همزمان می‌باشد که در آن انتقال حرارت توسط ترکیبی از روش جابجایی و هدایت صورت می‌گیرد. همچنین، در نتیجه بکارگیری دماهای بالا، قسمت اعظم آب ماده غذایی به شکل بخار از آن خارج می‌شود و در مقابل روغن توسط ماده غذایی جذب می‌شود. حین فرآیند سرخ‌کردن عمیق، تغییرات فیزیکی، شیمیایی و حسی مختلفی مانند ژلاتینه شدن نشاسته، دناتوره شدن پروتئین‌ها، تبخیر آب، تشکیل پوسته، چروکیدگی، تغییررنگ، ایجاد تخلخل و مهاجرت روغن به داخل ماده غذایی اتفاق می‌افتد که مجموعه این تغییرات، به طور قابل توجهی کیفیت ماده غذایی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. بسیاری از مواد غذایی با موفقیت توسط این فرآیند سرخ شده‌اند. در میان محصولات سرخ‌شده، پرمصرف‌ترین مواد غذایی، فرآورده‌های سیب‌زمینی مانند چیپس و خلال‌های سیب‌زمینی سرخ‌شده می‌باشند [۵]. محتوی رطوبت نهایی خلال‌های سیب‌زمینی سرخ‌شده تقریباً ۳۸٪ کل وزن محصول نهایی می‌باشد [۶] که البته بسته به مدت زمان سرخ‌کردن این مقدار می‌تواند متفاوت باشد. بنابراین، محتوی 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 می‌باشد. همچنین، میزان خروج آب از ماده غذایی طی فرآیند سرخ‌کردن، رابطه نزدیکی با بروز پدیده چروکیدگی و تغییر در

دانسیته محصول سرخ‌شده دارد. چروکیدگی یا به عبارت دیگر، کاهش حجم ظاهری محصول، یکی از معایب سرخ‌کردن می‌باشد که در نتیجه تغییرات ساختاری ایجاد شده طی این فرآیند رخ می‌دهد. چروکیدگی، خصوصیات فیزیکی ماده غذایی مانند دانسیته و تخلخل را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۷]. دانسیته یا به عبارت دیگر، نسبت جرم به واحد حجم ماده غذایی، یکی از خصوصیات ترموفیزیکی مؤثر بر کیفیت محصول سرخ‌شده می‌باشد. در ارتباط با اهمیت دانسیته، باید توجه داشت که یک ماده خام اولیه (مانند قطعات سیب‌زمینی) با دانسیته بالاتر، می‌تواند جذب روغن را در محصول سرخ‌شده، به دلیل رابطه بین دانسیته محصول و محتوی آب اولیه کاهش دهد [۸، ۹]. از طرف دیگر، در مطالعات مختلف صورت گرفته، دانسیته به شکل‌های مختلفی مانند دانسیته واقعی<sup>۳</sup> (دانسیته یک ماده بدون در نظر گرفتن حفرات یا فضاهای خالی در آن)، دانسته توده-ای<sup>۴</sup>، دانسیته جامد<sup>۵</sup>، دانسیته ذره‌ای<sup>۶</sup> و دانسیته ظاهری<sup>۷</sup> (دانسیته یک ماده با در نظر گرفتن تمام حفرات یا منافذ داخلی آن) بیان شده است. بنابراین، ضروری است که قبل از هر گونه گزارشی از داده‌ها، نحوه بیان دانسیته به خوبی تعریف و مشخص گردد. دانسیته ظاهری، یکی از پارامترهایی است که بر روی میزان تخلخل ماده غذایی مؤثر می‌باشد و در نتیجه، می‌تواند خصوصیات کمی و کیفی محصول سرخ‌شده، از جمله میزان جذب روغن و خصوصیات بافتی (مانند تردی) آن را تحت تأثیر قرار دهد. از عوامل مؤثر بر دانسیته ظاهری محصول سرخ‌شده، می‌توان به دما و زمان سرخ‌کردن، ضخامت اولیه ماده غذایی، محتوی رطوبت اولیه نمونه، میزان از دست دادن آب و جذب روغن توسط محصول سرخ‌شده و همچنین، میزان تخلخل ماده غذایی اشاره کرد. در این ارتباط، یک ماده غذایی با محتوی رطوبت اولیه بالاتر (دانسیته کمتر)، آب بیشتری طی فرآیند از دست داده و در نتیجه، با افزایش میزان تخلخل در آن، می‌تواند میزان روغن بیشتری را جذب کند. بنابراین، استفاده از پیش‌تیمارهایی که بتوانند محتوی آب اولیه محصول را کاهش دهند، در نهایت منجر به بهبود خصوصیات کیفی محصول سرخ‌شده خواهند شد.

استفاده از پیش‌تیمار خشک‌کردن قبل از سرخ‌کردن می‌تواند

3. Real or True density
4. Bulk density
5. Solid density
6. Particle density
7. Apparent density

1. *Solanum tuberosum*
2. *Solanaceae*

علاوه بر این، با افزایش دمای روغن، دانسیته ظاهری نمونه‌های سرخ‌شده، به دلیل تشدید در پدیده انتقال جرم، کاهش یافت [۹]. در مطالعه‌ای دیگر، اثر مدت زمان پیش‌تیمار خشک‌کردن (در یک خشک‌کن با جریان هوای داغ در دمای  $70^{\circ}\text{C}$  به مدت ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه) بر خصوصیات ساختاری قطعات سیب‌زمینی سرخ شده ارزیابی شد. نتایج نشان داد که پیش‌تیمار خشک‌کردن، دانسیته واقعی اولیه قطعات سیب‌زمینی را افزایش می‌دهد و حین فرآیند سرخ‌کردن نیز، دانسیته واقعی به دلیل پدیده‌های خروج رطوبت و جذب روغن افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، پیش‌تیمار خشک‌کردن، دانسیته ظاهری اولیه نمونه‌ها را افزایش داد و حین سرخ‌کردن، دانسیته ظاهری به دلیل وقوع پدیده‌های انتقال جرم کاهش یافت [۱۰]. همچنین، در مطالعه دیگری روی اثر شرایط فرآیند سرخ‌کردن بر دانسیته ظاهری پایاد<sup>۱</sup>، دانسیته ظاهری نمونه‌ها طی سرخ‌کردن کاهش پیدا کرد [۲۳]. در این پژوهش نیز با افزایش دمای سرخ‌کردن (از  $165^{\circ}\text{C}$  به  $185^{\circ}\text{C}$ )، میزان دانسیته ظاهری کاهش یافت. علاوه بر این، در پژوهشی جهت بررسی خصوصیات منافذ پوشش ناگت‌های جوجه سرخ‌شده به طور عمیق تحت شرایط فرآیند مختلف (دما و زمان‌های مختلف) نشان داده شد که دانسیته ظاهری پوشش ناگت‌های جوجه سرخ‌شده در دمای  $180^{\circ}\text{C}$ ، بعد از گذشت ۶۰، ۱۲۰ و  $240$  ثانیه از فرآیند، از مقدار اولیه  $1/48$  به ترتیب به مقادیر  $1/40$ ،  $1/35$  و  $1/26$  گرم بر سانتیمتر مکعب کاهش پیدا می‌کند [۲۴]. همچنین، در مطالعه‌ای دیگر، نتایج بررسی اثر دمای روغن و زمان سرخ‌کردن بر دانسیته ظاهری قطعات سیب‌زمینی طی فرآیند سرخ‌کردن حاکی از آن بود که با افزایش زمان و دمای سرخ‌کردن، دانسیته ظاهری قطعات سیب‌زمینی به علت از دست دادن آب، جذب روغن و ایجاد منافذ حاوی هوا (تخلخل)، کاهش یافت [۲۵]. از طرف دیگر، در پژوهشی مشابه، تغییرات دانسیته ظاهری ناگت‌های جوجه حین فرآیند سرخ‌کردن عمیق در دماها و زمان‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این مطالعه نیز نشان داد که دانسیته ظاهری از مقدار اولیه حدود  $1080$  به  $980$  کیلوگرم بر متر مکعب (بعد از  $300$  ثانیه از زمان فرآیند) حین سرخ‌کردن کاهش پیدا کرد. همچنین، با افزایش زمان سرخ‌کردن دانسیته ظاهری به طور

روشی برای بهبود خصوصیات مواد غذایی سرخ‌شده باشد. پیش‌تیمار خشک‌کردن، محتوی آب آزاد اولیه ماده غذایی را کاهش داده و از این طریق منجر به کاهش زمان فرآیند سرخ‌کردن می‌شود و در نتیجه، جذب روغن طی فرآیند را محدود می‌کند [۱۰، ۱۱]. در واقع، محتوی ماده جامد اولیه ماده غذایی یکی از مهمترین عوامل مؤثر بر جذب روغن توسط محصول سرخ‌شده می‌باشد که می‌توان آن را از طریق انجام پیش‌تیمار خشک‌کردن افزایش داد.

علاوه بر خشک‌کردن، استفاده از فراصوت به عنوان یک پیش‌تیمار قبل از سرخ‌کردن عمیق می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. تاکنون از فناوری فراصوت در فرآیندهای مختلفی مانند خشک‌کردن، سرخ‌کردن، انجماد، رفع انجماد، پاستوریزاسیون، امولسیون‌سازی، برش‌دادن، کف‌زدایی، تعیین ترکیبات تشکیل‌دهنده یک ماده غذایی و استخراج برخی از اجزاء ماده غذایی استفاده گردیده است [۲۰-۱۱]. امواج فراصوت، با ایجاد انقباض و انبساط‌های متوالی (اثر اسفنجی<sup>۱</sup>) در ماده غذایی، باعث تشکیل کانال‌های میکروسکوپی و سهولت خروج آب از داخل محصول از طریق این کانال‌ها می‌شوند [۲۱، ۲۲]. بنابراین، می‌توان انتظار داشت که استفاده از فراصوت (در فرکانس و توان‌های مناسب) به عنوان پیش‌تیمار قبل از فرآیند سرخ‌کردن، باعث افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت، کاهش زمان سرخ‌کردن و همچنین، آسیب کمتر به لوله‌های موئین موجود در ماده غذایی طی فرآیند سرخ‌کردن شود و از این طریق، منجر به بهبود خصوصیات کیفی محصول سرخ‌شده گردد [۱۱، ۱۲].

بر اساس اطلاعات موجود و کارهای تحقیقاتی مختلف صورت گرفته تا حال حاضر، مطالعات اندکی جهت بررسی تغییرات دانسیته ظاهری مواد غذایی طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق انجام گرفته است. در این ارتباط، در پژوهشی اثر شرایط سرخ‌کردن بر خصوصیات ساختاری (دانسیته ظاهری و دانسیته واقعی) قطعات سیب‌زمینی سرخ شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که با افزایش زمان سرخ‌کردن، دانسیته واقعی نمونه‌های سرخ‌شده به دلیل پدیده‌های انتقال جرم (خروج رطوبت و جذب روغن) افزایش می‌یابد. همچنین، دانسیته ظاهری با افزایش زمان سرخ‌کردن، به دلیل تبخیر آب، ایجاد منافذ حاوی هوا (تخلخل) و جذب روغن کاهش یافت.

۲. یک ماده غذایی اسنک (Snack food) که از خمیری شامل عمدتاً آرد نخود سیاه، نمک و ادویه تهیه می‌شود.

1. Sponge effect

کردن عمیق، تحقیق حاضر با هدف بررسی تأثیر این پیش‌تیمار به همراه تلفیق آن با پیش‌تیمار خشک‌کردن بر دانسیته ظاهری قطعات سیب‌زمینی طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق و همچنین، مدل‌سازی دانسیته ظاهری نمونه‌ها طی این فرآیند انجام شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

**۲-۱- مواد:** در این تحقیق، سیب‌زمینی و روغن مایع به عنوان مواد خام، مورد استفاده قرار گرفتند. سیب‌زمینی (رقم آگریا) از بازار محلی خریداری و قبل از انجام آزمایشات در سردخانه بالای صفر (۱۲°C) نگهداری شد. روغن مورد استفاده در این مطالعه، روغن مایع مخصوص سرخ‌کردنی (مخلوطی از روغن‌های آفتابگردان، سویا و پنبه‌دانه با نام تجاری بهار) بود.

**۲-۲- تجهیزات:** در این تحقیق، از یک سرخ‌کن خانگی (Mulinex مدل F430.R با ظرفیت ۲/۲ لیتر روغن، ساخت فرانسه، مجهز به سیستم تنظیم دما در محدوده ۱۵۰ تا ۱۹۰°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 و دستگاه حمام فراصوت (مدل USD - 4R)، ساخت ژاپن، شرکت AS ONE، مجهز به سیستم تنظیم فرکانس و زمان اولتراسونیکاسیون) استفاده شد.

**۲-۳- آماده‌سازی نمونه‌ها:** برای انجام هر آزمایش، سیب‌زمینی‌ها پس از شستشو و پوست‌گیری، توسط یک کاتر دستی طراحی شده به ابعاد ۱/۲×۱/۲×۱/۲ cm (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 و 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 ۱):

معنی‌داری کاهش یافت. علاوه بر این، اثر دما روی دانسیته ظاهری معنی‌دار نبود [۲۶].

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 [۱۲]. همچنین، برای پیش‌بینی صحیح روند سرخ‌شدن مواد غذایی با هدف افزایش کیفیت محصول سرخ‌شده، می‌توان تغییرات دانسیته ماده غذایی طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق را مدل‌سازی نمود. یک تعریف مختصر از مدل‌سازی، شامل ساخت ابزاری با درجه دقت خوب و کافی می‌باشد که بتواند خصوصیات یک محصول یا فرآیند را پیش‌گویی کند [۲۷]. یکی از اهداف اصلی فرآیند سرخ‌کردن عمیق، کاهش محتوی رطوبتی ماده غذایی تا یک حد معین می‌باشد. علاوه بر این، خروج رطوبت (به جز برای محتوی رطوبتی بسیار پایین) از ماده غذایی طی فرآیند سرخ‌کردن، از عوامل اصلی در بروز پدیده کاهش حجم و تغییر در دانسیته ظاهری محصول نهایی سرخ‌شده می‌باشد. بنابراین، پیش‌گویی تغییرات دانسیته ماده غذایی طی فرآیند سرخ‌کردن، به منظور کنترل بهینه شرایط فرآیند و در نتیجه، کنترل کیفیت محصول نهایی حائز اهمیت می‌باشد. مدل‌سازی دانسیته ظاهری، روابط بین متغیرهای گوناگون، از جمله دانسیته و زمان را ارائه می‌دهد و می‌تواند اطلاعاتی در ارتباط با میزان دانسیته ماده غذایی در زمان‌های مختلف یا آهنگ تغییرات دانسیته نمونه غذایی طی این فرآیند را فراهم کند. به عبارت دیگر، مدل‌های مناسب می‌توانند به تهیه‌کنندگان مواد غذایی، جهت کنترل بهینه شرایط فرآیند و در نتیجه کنترل کیفیت محصول نهایی، از طریق پیش‌بینی روند تغییرات ماده غذایی طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق کمک کنند. از طرف دیگر، با بدست آوردن مدل‌های مناسب، ضرورت انجام آزمایشات پرهزینه بسیار کاهش پیدا می‌کند [۱۱، ۱۲]. بنابراین، برای بررسی بهتر تغییرات کمی و کیفی محصول سرخ‌شده، مدل‌سازی دانسیته ماده غذایی طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق حائز اهمیت می‌باشد.

با توجه به مطالعات اندک صورت گرفته جهت بدست آوردن مدل‌های تجربی مناسب برای بررسی تغییرات دانسیته ماده غذایی طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق و همچنین، عدم دسترسی بودن پژوهشی مرتبط با تأثیر فراصوت بر تغییرات ساختاری ماده غذایی (مانند دانسیته ظاهری) طی فرآیند سرخ-

جدول ۱ علائم اختصاری مورد استفاده برای تیمارهای مختلف

ردیف	تیمار	علامت اختصاری
۱	شاهد	Control
۲	خشک کردن در زمان ۸ دقیقه	D8
۳	خشک کردن در زمان ۱۵ دقیقه	D15
۴	فراصوت با فرکانس ۲۸ کیلوهرتز	U28
۵	فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز	U40
۶	فراصوت با فرکانس ۲۸ کیلوهرتز - خشک کردن در زمان ۸ دقیقه	U28 - D8
۷	فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز - خشک کردن در زمان ۸ دقیقه	U40 - D8
۸	فراصوت با فرکانس ۲۸ کیلوهرتز - خشک کردن در زمان ۱۵ دقیقه	U28 - D15
۹	فراصوت با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز - خشک کردن در زمان ۱۵ دقیقه	U40 - D15

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

۲ و ۳: نمونه‌هایی که جهت انجام اولتراسونیکاسیون، در حمام فراصوت در معرض فرکانس‌های ۲۸ و ۴۰ کیلوهرتز و مدت زمان ۱۵ دقیقه به طور مجزا قرار گرفتند.

۴ و ۵: نمونه‌هایی که جهت انجام پیش‌تیمار خشک‌کردن، در دستگاه خشک‌کن سینی‌دار، در دمای  $80^{\circ}\text{C}$ ، زمان‌های ۸ و ۱۵ دقیقه و سرعت جریان هوای  $1/5$  متر بر ثانیه به طور مجزا قرار گرفتند.

۶، ۷، ۸ و ۹: نمونه‌هایی که جهت انجام تلفیقی از پیش‌تیمارهای فراصوت و خشک‌کردن، ابتدا در حمام فراصوت در معرض فرکانس‌های ۲۸ و ۴۰ کیلوهرتز و مدت زمان ۱۵ دقیقه به طور مجزا قرار گرفتند و سپس در دستگاه خشک‌کن سینی‌دار، در دمای  $80^{\circ}\text{C}$ ، زمان‌های ۸ و ۱۵ دقیقه و سرعت جریان هوای  $1/5$  متر بر ثانیه به طور مجزا خشک شدند.

## ۲-۴- شرایط سرخ کردن

در هر آزمایش پس از آماده‌سازی نمونه‌ها (بر اساس جدول ۱)، جهت سرخ کردن 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 طوری که پس از رسیدن دمای سرخ‌کن به دمای موردنظر، 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 سرخ‌شدن نمونه‌ها به مدت زمان موردنظر، 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 ۲ تکرار انجام شد و داده‌های گزارش شده، میانگین داده‌های آزمایشی هستند [۱۱، ۱۲].

## ۲-۵- آزمایش‌ها

### ۲-۵-۱- اندازه‌گیری محتوی رطوبتی

محتوی رطوبتی نمونه‌های سرخ‌شده، از طریق خشک‌کردن

آن‌ها در آون کتوکسیونی در دمای  $105 \pm 1^{\circ}\text{C}$ ، تا رسیدن به وزن ثابت انجام شد [۲۸] و در نهایت بر حسب گرم رطوبت بر گرم ماده خشک بدون روغن گزارش شد.

### ۲-۵-۲- اندازه‌گیری دانسیته ظاهری

برای محاسبه دانسیته ظاهری، ابتدا حجم ظاهری نمونه‌ها قبل و پس از سرخ‌شدن، با بکارگیری تکنیک جابجایی حلال (تولون)، از طریق استفاده از یک پیکنومتر شیشه‌ای و طبق معادله ۱ اندازه‌گیری گردید [۲۵].

(معادله ۱)

$$V = \frac{m_1 + m_2 - m_3}{\rho}$$

V: حجم ظاهری نمونه اولیه یا سرخ‌شده ( $\text{m}^3$ )

$m_1$ : جرم نمونه (kg)

$m_2$ : جرم پیکنومتر خالی و حلال (kg)

$m_3$ : جرم پیکنومتر محتوی نمونه و حلال (kg)

$\rho$ : دانسیته حلال مورد استفاده ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

با بدست آوردن حجم ظاهری نمونه‌ها از معادله ۱ و داشتن جرم قطعات سیب‌زمینی (خام یا سرخ‌شده)، میزان دانسیته

ظاهری نمونه‌ها از طریق رابطه ۲ محاسبه گردید [۲۵].

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{(معادله ۲)}$$

$\rho$ : دانسیته ظاهری نمونه خام یا سرخ‌شده ( $\text{kg/m}^3$ )

$m$ : جرم نمونه (kg)

$V$ : حجم ظاهری نمونه ( $\text{m}^3$ )

## ۶-۲- مدل‌سازی ریاضی

در این تحقیق، مدل‌سازی دانسیته ظاهری قطعات سیب‌زمینی طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق، بر حسب زمان صورت گرفت و از شش مدل تجربی استفاده شد (جدول ۲). پارامترهای مربوط به این مدل‌ها، از طریق برازش کردن داده‌های آزمایشی در نرم‌افزار MATLAB (Version 7.12.0.635, R2011a) بدست آمدند. برای تعیین بهترین مدل، از دو معیار ضریب همبستگی ( $R^2$ ) و خطای جذر میانگین مربع‌ها<sup>۱</sup> (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. همچنین، به منظور یافتن رابطه بین ضرایب مدل‌ها و متغیرهای مرتبط با فرآیند سرخ‌کردن (زمان پیش‌تیمار خشک‌کردن، فرکانس پیش‌تیمار فراصوت و دمای فرآیند سرخ‌کردن)، از تجزیه و تحلیل رگرسیون چند متغیره<sup>۲</sup> در نرم‌افزار Excel 2007 استفاده و معیار ضریب همبستگی ( $R^2$ ) برای انتخاب بهترین رابطه در نظر گرفته شد [۱۱، ۱۲].

جدول ۲ مدل‌های ریاضی مورد استفاده برای بررسی تغییرات دانسیته ظاهری ( $\rho$ ) قطعات سیب‌زمینی با گذشت زمان ( $t$ )

شماره	مدل ریاضی
۱	$\rho = a \cdot t^2 + b \cdot t + c$
۲	$\rho = a \cdot \exp(b \cdot t^2) + c$
۳	$\rho = a (1 + b \cdot t)^{t+1}$
۴	$\rho = \frac{a}{1 + b \cdot t^2}$
۵	$\rho = \frac{1}{\exp(a \cdot t^2) + b}$
۶	$\rho = \frac{1 + a \cdot \exp(b \cdot t)}{(1 + b \cdot t)^t}$

1. Root Mean Square Error
2. Multiple regression analysis

## ۷-۲- آنالیز آماری

در این مطالعه، ۹ تیمار نشان داده شده در جدول ۱، در سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و  $190^\circ\text{C}$  و چهار زمان ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ ثانیه سرخ شدند و کلیه آزمایشات در دو تکرار ( $2 \times 4 \times 3 \times 9 = 216$ ) انجام شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها بر اساس آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی، با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.1 انجام شد [۱۱، ۱۲]. همچنین، برای انجام مقایسه میانگین از آزمون بونفرونی<sup>۳</sup> [۲۹] در سطح احتمال ۵٪ ( $P < 0.05$ ) استفاده شد.

## ۳- نتایج و بحث

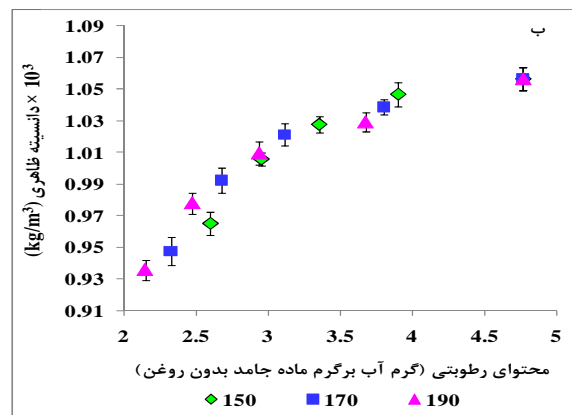
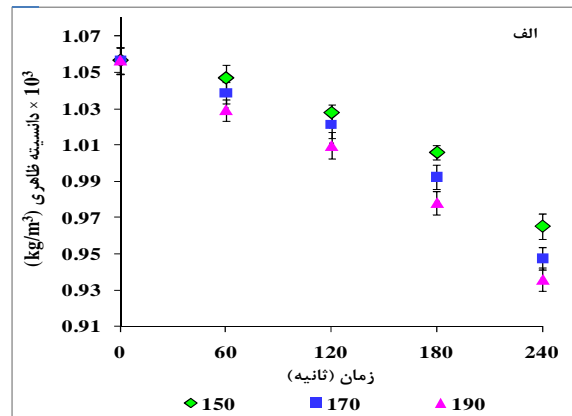
### ۳-۱- اثر شرایط فرآیند سرخ‌کردن بر دانسیته ظاهری نمونه‌های سرخ‌شده

شکل ۱- الف، تغییرات دانسیته ظاهری نمونه‌های شاهد سرخ‌شده در ۴ زمان ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ ثانیه و ۳ دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و  $190^\circ\text{C}$  را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از این شکل پیداست، در تمامی دماها، با افزایش زمان سرخ‌کردن، میزان دانسیته ظاهری نمونه‌ها کاهش پیدا می‌کند؛ به طوری- که با گذشت زمان سرخ‌کردن (از ۶۰ به ۲۴۰ ثانیه)، میزان کاهش در دانسیته ظاهری افزایش پیدا می‌کند. نتایج مشابهی توسط دیگر پژوهشگران گزارش شده است [۱۰، ۲۳، ۲۵، ۳۰]. این مسئله را می‌توان به وقوع پدیده‌های انتقال جرم (خروج رطوبت و جذب روغن) و همچنین ایجاد منافذ و فضاهای خالی (افزایش تخلخل) در قطعات سیب‌زمینی طی فرآیند سرخ‌کردن نسبت داد [۱۰، ۳۰]. علاوه بر این، در بررسی اثر دما بر دانسیته ظاهری نمونه‌های شاهد (شکل ۱- الف)، در تمامی زمان‌های سرخ‌کردن یکسان، با افزایش دما از ۱۵۰ به  $190^\circ\text{C}$ ، میزان دانسیته ظاهری کاهش پیدا کرد؛ ولی این کاهش از لحاظ آماری معنی‌دار نبود. این یافته نیز در تطابق با نتایج بدست آمده توسط سایر محققان می‌باشد [۱۰، ۲۳، ۲۵، ۳۰]. روند مشابهی نیز در مورد سایر نمونه‌ها (پیش‌تیمار شده با فراصوت و خشک‌کردن به صورت مجزا و تلفیقی) مشاهده

3. Bonferroni

های ۲۸ و ۴۰ کیلوهرتز) و خشک کردن (در زمان های ۸ و ۱۵ دقیقه) به صورت مجزا و سپس سرخ شده در دمای  $150^{\circ}\text{C}$  را نشان می دهد. همان طور که ملاحظه می شود، مقادیر دانسیته اولیه نمونه های مختلف (شاهد و پیش تیمار شده) متفاوت می باشد؛ به طوری که دانسیته اولیه نمونه شاهد، پیش تیمار فراصوت در فرکانس ۲۸ کیلوهرتز، پیش تیمار فراصوت در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز، خشک کردن در زمان ۸ دقیقه و خشک کردن در زمان ۱۵ دقیقه، به ترتیب برابر  $1/079$ ،  $1/077$ ،  $1/041$  و  $1/013$  ( $\text{kg/m}^3 \times 10^3$ ) می باشد. همچنین، با افزایش زمان سرخ کردن، میزان دانسیته ظاهری در تمامی نمونه های فوق کاهش پیدا می کند؛ به طوری که با گذشت زمان فرآیند، میزان کاهش در دانسیته ظاهری نمونه های سرخ شده افزایش پیدا کرده و نمونه های پیش تیمار شده با فراصوت (۲۸ و ۴۰ کیلوهرتز)، در نهایت دارای پایین ترین میزان دانسیته ظاهری می باشند و کاهش دانسیته ظاهری در این نمونه ها، از یک الگوی تقریباً خطی پیروی می کند. قابل ذکر است که اختلاف معنی داری بین دانسیته ظاهری نمونه های پیش تیمار شده با فراصوت در فرکانس های ۲۸ و ۴۰ کیلوهرتز مشاهده نشد. همچنین، مطابق شکل ۲-الف، اختلاف مشاهده شده در دانسیته ظاهری اولیه نمونه های پیش تیمار شده با فراصوت و خشک کردن به صورت مجزا نسبت به نمونه شاهد، از لحاظ آماری معنی دار نبود. در ارتباط با نمونه های پیش تیمار شده با فراصوت (۲۸ و ۴۰ کیلوهرتز)، افزایش در میزان دانسیته ظاهری اولیه را می توان به جذب مقداری آب توسط قطعات سیب زمینی طی غوطه ور کردن آن ها در حمام فراصوت نسبت داد. این مسئله باعث شد که در پایان انجام پیش تیمار، وزن نمونه ها بدون کاهش حجم مقداری افزایش پیدا کند. علاوه بر این، در نمونه های پیش تیمار شده با خشک کردن (۸ و ۱۵ دقیقه)، کاهش در دانسیته ظاهری اولیه را می توان به کاهش وزن بیشتر نمونه ها در مقابل کاهش حجم آن ها نسبت داد که در نهایت، این مسئله منجر به کاهش نسبت جرم به حجم در این نمونه ها شد. در این ارتباط، ضخامت نسبتاً بالای قطعات سیب زمینی و همچنین زمان پیش تیمار نسبتاً کوتاه در این مطالعه، می تواند از دلایل اصلی برای کاهش حجم کمتر نمونه ها در مقابل کاهش جرم آن ها در پایان انجام پیش تیمار خشک کردن باشد. از طرف دیگر، مطابق شکل ۲-الف، ج، ه و همچنین نتایج بدست آمده، در نمونه های پیش تیمار شده با فراصوت و در زمان های سرخ کردن یکسان (۶۰ و ۱۲۰ ثانیه)، بین مقادیر دانسیته ظاهری این نمونه ها و نمونه شاهد از لحاظ

شد (داده ها نشان داده نشده اند). این مسئله، احتمالاً به دلیل تسریع در خروج رطوبت از نمونه ها با افزایش دمای سرخ کردن می باشد که منجر به تشکیل منافذ بیشتری در قطعات سیب زمینی می شود [۲۵]. از طرف دیگر، شکل ۱-ب، تغییرات دانسیته ظاهری نمونه های سرخ شده در دماهای مختلف در مقابل محتوی رطوبتی را نشان می دهد. مطابق این شکل، با کاهش محتوی رطوبتی نمونه ها طی فرآیند سرخ کردن، میزان دانسیته ظاهری قطعات سیب زمینی نیز کاهش پیدا می کند. همچنین، با افزایش دمای سرخ کردن از  $150^{\circ}\text{C}$  به  $190^{\circ}\text{C}$ ، در نتیجه خروج بیشتر رطوبت از نمونه ها، میزان کاهش در دانسیته ظاهری قطعات سیب زمینی افزایش پیدا می کند.



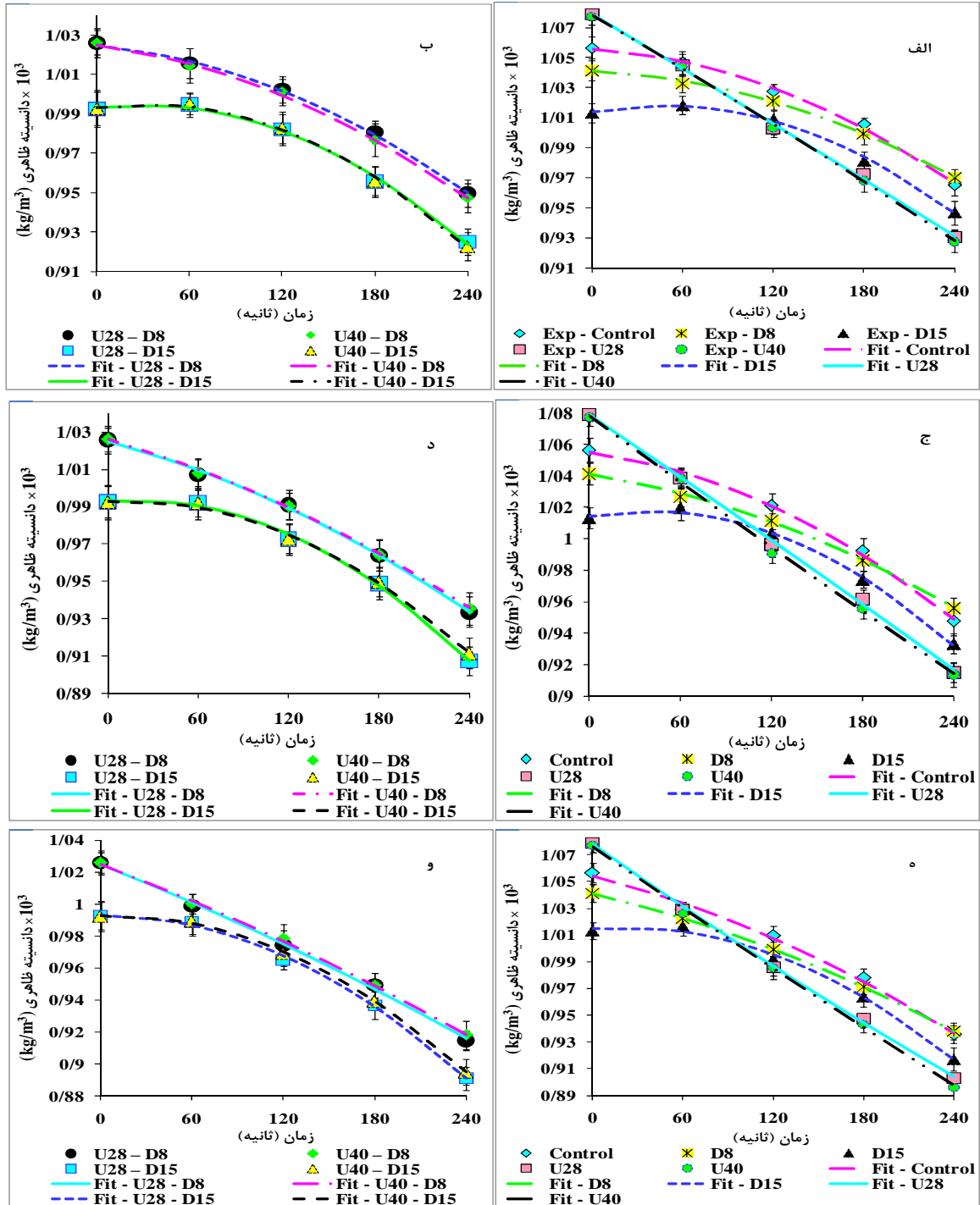
شکل ۱ دانسیته ظاهری قطعات سیب زمینی سرخ شده (نمونه شاهد) به عنوان تابعی از زمان (الف) و محتوی رطوبتی (ب)، طی فرآیند سرخ کردن عمیق در دماهای ۱۵۰، ۱۷۰ و  $190^{\circ}\text{C}$

### ۳-۲- اثر پیش تیمارهای انجام شده بر دانسیته ظاهری نمونه های سرخ شده

شکل ۲-الف، منحنی تغییرات دانسیته ظاهری قطعات سیب زمینی در زمان های ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ ثانیه، در تیمار شاهد و همچنین نمونه های پیش تیمار شده با فراصوت (در فرکانس-

از آن‌ها خارج شده و میزان منافذ و فضاهای خالی تشکیل شده (تخلخل) افزایش پیدا می‌کند. علاوه بر این، بر طبق نتایج بدست آمده، در نمونه‌های پیش‌تیمار شده با خشک کردن (۸ و ۱۵ دقیقه) و در زمان‌های سرخ کردن یکسان، دانسیته ظاهری این نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد پایین‌تر بود؛ ولی از لحاظ آماری اختلاف معنی‌دار بین این نمونه‌ها وجود نداشت.

آماري اختلاف معنی‌داری وجود نداشت؛ با این‌حال، در زمان‌های ۱۸۰ و ۲۴۰ ثانیه، دانسیته ظاهری این نمونه‌ها به طور معنی‌داری نسبت به نمونه شاهد پایین‌تر بود. این مسئله می‌تواند در نتیجه ایجاد کانال‌های میکروسکوپی در نمونه‌های پیش‌تیمار شده با فراصوت طی انجام پیش‌تیمار باشد که متعاقب آن، طی سرخ کردن نمونه‌ها، رطوبت با سهولت بیشتری



شکل ۲ تغییرات دانسیته ظاهری حاصل از آزمایش (Exp) و برازش شده (Fit) با مدل ۱ (جدول ۲)، طی فرآیند سرخ کردن عمیق قطعات سیب‌زمینی با گذشت زمان، در ماهای ۱۵۰°C (الف، ب)، ۱۷۰°C (ج، د) و ۱۹۰°C (ه، و)، در پیش‌تیمارهای مختلف بر اساس جدول ۱

شده با فراصوت (در فرکانس‌های ۲۸ و ۴۰ کیلوهرتز) و

شکل ۲-ب، تغییرات دانسیته ظاهری نمونه‌های پیش‌تیمار



ظاهری با گذشت زمان سرخ کردن، مشابه روند داده‌های آزمایشی بدست آمده در دماهای ۱۵۰ و ۱۷۰°C می‌باشد.

### ۳-۳- مدل‌سازی دانسیته ظاهری

جدول ۲، مدل‌های مورد استفاده برای برازش داده‌های آزمایشی دانسیته ظاهری با آن‌ها را نشان می‌دهد. به دلیل عدم وجود مدل‌های تجربی مشابه در کارهای تحقیقاتی قبلی، تمامی مدل‌های بکار رفته، مدل‌های پیشنهادی در تحقیق حاضر می‌باشند. علاوه بر این، شکل ۲، منحنی‌های برازش داده‌های آزمایشی دانسیته ظاهری نمونه‌های مختلف (بر اساس جدول ۱) سرخ‌شده در چهار زمان ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ ثانیه و سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰°C را با مدل ۱ (جدول ۲) نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مدل تجربی بکار رفته، با داشتن  $R^2$  بالا و RMSE پایین (جدول ۳، مدل ۱)، به خوبی داده‌های آزمایشی دانسیته ظاهری را برازش نموده است. همچنین، مطابق نتایج بدست آمده و بر حسب دو معیار  $R^2$  و RMSE، همه مدل‌های استفاده شده، به خوبی داده‌های آزمایشی دانسیته ظاهری را برازش نمودند (جدول ۳). با این‌حال، مدل ۱ (جدول ۳)، به دلیل داشتن پارامترهای آماری کمی بهتر ( $R^2 > 0.99$  و RMSE پایین‌تر)، به منظور برازش داده‌های آزمایشی دانسیته ظاهری نمونه‌ها انتخاب شد. از طرف دیگر، با توجه به الگوی کاهش خطی دانسیته ظاهری نمونه‌های پیش‌تیمار شده با فراصوت (۲۸ و ۴۰ کیلوهرتز) طی فرآیند سرخ کردن عمیق، مقادیر  $R^2$  بدست آمده از برازش داده‌های آزمایشی این نمونه‌ها با مدل‌های ۶-۳ (جدول ۲)، در مقایسه با سایر نمونه‌ها کمی کمتر می‌باشد (۰/۹۴۵- $R^2=0.911$ )؛ زیرا مدل‌های ۶-۳، مدل‌های نمایی (مدل‌های ۵ و ۶) یا تبعیت کننده از رفتار نمایی (مدل‌های ۳ و ۴) هستند. قابل ذکر است که مدل ۲ (جدول ۲) نیز یک مدل نمایی می‌باشد؛ ولی وجود ۳ ضریب (a، b و c) در این مدل، دلیل اصلی برازش بهتر ( $R^2=0.937-0.985$ ) داده‌های آزمایشی نمونه‌های پیش‌تیمار شده با فراصوت، نسبت به برازش داده‌های آزمایشی این نمونه‌ها با مدل‌های ۶-۳ می‌باشد.

خشک کردن (۸ و ۱۵ دقیقه) به صورت تلفیقی (بر اساس جدول ۱) و سپس سرخ‌شده در دمای ۱۵۰°C را با گذشت زمان نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، در تمامی نمونه‌ها با گذشت زمان سرخ کردن، دانسیته ظاهری کاهش پیدا می‌کند. همچنین، بر طبق نتایج بدست آمده، اثر فرکانس فراصوت (۲۸ و ۴۰ کیلوهرتز) بر میزان دانسیته ظاهری نمونه‌های سرخ‌شده، غیرمعنی‌دار بود. علاوه بر این، در زمان‌های سرخ کردن یکسان، میزان دانسیته ظاهری تمامی نمونه‌های پیش‌تیمار شده به صورت تلفیقی نسبت به نمونه شاهد پایین‌تر بود؛ به طوری که در نمونه‌های پیش‌تیمار شده با فراصوت و خشک کردن در زمان ۸ دقیقه به صورت تلفیقی، این اختلاف از لحاظ آماری معنی‌دار نبود؛ ولی مقادیر دانسیته ظاهری نمونه‌های پیش‌تیمار شده با فراصوت و خشک کردن در زمان ۱۵ دقیقه به صورت تلفیقی، به طور معنی‌داری نسبت به نمونه شاهد کاهش یافت. این مسئله می‌تواند به دلیل دانسیته ظاهری اولیه کمتر این نمونه‌ها در مقایسه با نمونه شاهد باشد که از طریق از دست دادن رطوبت طی انجام پیش‌تیمار تلفیقی حاصل شده و در نهایت، نسبت جرم به حجم و در نتیجه، دانسیته ظاهری آن‌ها به میزان بیشتری کاهش پیدا کرده است.

از طرف دیگر، شکل ۲ (ج، د)، تغییرات دانسیته ظاهری نمونه‌های پیش‌تیمار شده در شرایط مختلف (به صورت مجزا و تلفیقی) و سپس سرخ‌شده در دمای ۱۷۰°C را با گذشت زمان نشان می‌دهد. مطابق این دو شکل، روند داده‌های آزمایشی بدست آمده در تیمار شاهد و همچنین نمونه‌های پیش‌تیمار شده با فراصوت و خشک کردن به صورت مجزا و تلفیقی، مشابه روند داده‌های آزمایشی بدست آمده در دمای ۱۵۰°C می‌باشد؛ به طوری که در زمان‌های بالاتر سرخ کردن، نمونه‌های پیش‌تیمار شده با فراصوت (۲۸ و ۴۰ کیلوهرتز)، دارای پایین‌ترین میزان دانسیته ظاهری می‌باشند.

علاوه بر این، شکل ۲ (ه، و)، تغییرات دانسیته ظاهری نمونه‌های مختلف سرخ‌شده در دمای ۱۹۰°C را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، روند داده‌های آزمایشی بدست آمده در تمامی تیمارها، در جهت کاهش در میزان دانسیته

جدول ۳ پارامترهای آماری حاصل از برازش داده‌های آزمایشی دانسیته ظاهری با مدل‌های ۶-۱ جدول ۲، برای تیمارها و دماهای

مختلف

مدل (۱)													تیمار	
دما (°C)														
۱۹۰			۱۷۰			۱۵۰								
R <sup>2</sup>	RMSE	c	b×۱۰ <sup>-۵</sup>	a×۱۰ <sup>-۷</sup>	R <sup>2</sup>	RMSE	c	b×۱۰ <sup>-۵</sup>	a×۱۰ <sup>-۷</sup>	R <sup>2</sup>	RMSE	c	b×۱۰ <sup>-۵</sup>	a×۱۰ <sup>-۷</sup>
۰/۹۹۵	۰/۰۰۴۴	۱/۰۵	-۲۸/۸	-۸/۲۷	۰/۹۹۶	۰/۰۰۳۷	۱/۰۵	-۱۲/۸	-۱۳/۰۲	۰/۹۹۷	۰/۰۰۲۸	۱/۰۵	-۶/۵۲	-۱۲/۸
۱	۰/۰۰۰۲	۱/۰۴	-۲۶/۷	-۶/۷۸	۰/۹۹۹	۰/۰۰۱۴	۱/۰۴	-۱۵/۴	-۸/۲۷	۰/۹۹۹	۰/۰۰۱۱	۱/۰۴	-۴/۹۷	-۱۰/۱
۰/۹۹۵	۰/۰۰۳۹	۱/۰۱	۸۳۹	-۲۰/۴	۰/۹۹۷	۰/۰۰۲۶	۱/۰۱	۱۶/۵	-۲۱/۱	۰/۹۹۷	۰/۰۰۲۱	۱/۰۱	۱۷/۹	-۱۹/۲
۰/۹۹۹	۰/۰۰۲۹	۱/۰۷	-۷۹/۸	۳/۰۹	۰/۹۹۸	۰/۰۰۳۳	۱/۰۷	-۶۵/۵	-۰/۸۷۳	۰/۹۹۷	۰/۰۰۳۷	۱/۰۷	-۶۰/۱	-۰/۵۸۵
۰/۹۹۸	۰/۰۰۳۵	۱/۰۷	-۷۷	۱/۱۵	۰/۹۹۸	۰/۰۰۳۳	۱/۰۷	-۷۱/۱	۱/۱۷	۰/۹۹۹	۰/۰۰۲۲	۱/۰۷	-۵۸/۵	-۱/۶۹
۰/۹۹۷	۰/۰۰۲۸	۱/۰۲	-۳۷/۸	-۳/۱۳	۰/۹۹۸	۰/۰۰۲۲	۱/۰۲	-۲۱/۸	-۶/۷۳	۰/۹۹۸	۰/۰۰۱۵	۱/۰۲	-۷/۶۸	-۹/۸۴
۰/۹۹۸	۰/۰۰۱۹	۱/۰۲	-۳۵/۹	-۳/۵۶	۰/۹۹۹	۰/۰۰۱۴	۱/۰۲	-۲۳/۴	-۵/۸۸	۰/۹۹۸	۰/۰۰۱۵	۱/۰۲	-۱۰/۳	-۹/۲۲
۰/۹۹۸	۰/۰۰۲۲	۰/۹۹۳	-۰/۱۳۵	-۱۷/۶	۰/۹۹۷	۰/۰۰۲۴	۰/۹۹۳	۵/۶	-۱۷/۱	۰/۹۹۶	۰/۰۰۲۴	۰/۹۹۳	۸/۷۴	-۱۵/۷
۰/۹۹۹	۰/۰۰۱۲	۰/۹۳۳	۳/۱۹	-۱۸/۳	۰/۹۹۷	۰/۰۰۲۳	۰/۹۹۳	۳/۷۲	-۱۵/۷	۰/۹۹۷	۰/۰۰۲۰	۰/۹۹۳	۱۰/۸	-۱/۶۹

مدل (۲)													تیمار	
دما (°C)														
۱۹۰			۱۷۰			۱۵۰								
R <sup>2</sup>	RMSE	c	b×۱۰ <sup>-۶</sup>	a	R <sup>2</sup>	RMSE	c	b×۱۰ <sup>-۶</sup>	a	R <sup>2</sup>	RMSE	c	b×۱۰ <sup>-۶</sup>	a
۰/۹۸۱	۰/۰۰۹۱	۰/۸۶۲	-۱۵/۸	۰/۱۸۶	۰/۹۹۱	۰/۰۰۵۷	۰/۵۹۸	-۴/۵۵	۰/۴۵۲	۰/۹۹۵	۰/۰۰۳۶	۰/۳۷۴	-۲/۴۱	۰/۷۷۹
۰/۹۹۲	۰/۰۰۵۰	۰/۸۹۶	-۲۰/۷	۰/۱۴۰	۰/۹۹۳	۰/۰۰۳۹	۰/۸۷۹	-۱۲/۵	۰/۱۵۸	۰/۹۹۷	۰/۰۰۱۹	۰/۶۷۱	-۳/۶۲	۰/۳۶۸
۰/۹۸۹	۰/۰۰۵۹	۰/۵۰۹	-۳/۷۴	۰/۵۰۹	۰/۹۷۷	۰/۰۰۷۴	۰/۳۹۳	-۲/۵۲	۰/۶۲۷	۰/۹۶۶	۰/۰۰۷۷	۰/۴۸۴	-۲/۴۶	۰/۵۳۶
۰/۹۷۵	۰/۰۱۵۱	۰/۸۹۳	-۴۲/۶	۰/۱۷۵	۰/۹۷۹	۰/۰۱۲۹	۰/۸۹۷	-۳۵/۹	۰/۱۷۲	۰/۹۸۲	۰/۰۱۱۰	۰/۹۱۷	-۳۷/۶	۰/۱۵۵
۰/۹۷۵	۰/۰۱۵۶	۰/۸۸۰	-۳۸/۳	۰/۱۸۵	۰/۹۸۵	۰/۰۱۰۹	۰/۹۰۳	-۴۱/۷	۰/۱۶۶	۰/۹۳۷	۰/۰۰۹۳	۰/۹۱۰	-۳۵/۷	۰/۱۶۰
۰/۹۷۸	۰/۰۰۹۰	۰/۸۹۱	-۲۷/۶	۰/۱۲۸	۰/۹۸۸	۰/۰۰۵۴	۰/۸۸۴	-۱۷/۴	۰/۱۳۷	۰/۹۹۵	۰/۰۰۲۸	۰/۷۴۵	-۵/۳۲	۰/۲۷۸
۰/۹۸۴	۰/۰۰۷۵	۰/۸۹۳	-۲۷/۳	۰/۱۲۶	۰/۹۹۰	۰/۰۰۴۹	۰/۸۹۷	-۲۰/۱	۰/۱۲۴	۰/۹۹۵	۰/۰۰۲۹	۰/۸۳۳	-۸/۸۷	۰/۱۸۹
۰/۹۹۷	۰/۰۰۲۷	۰/۳۷۲	-۳/۰۶	۰/۶۲۰	۰/۹۹۲	۰/۰۰۴۳	۰/۱۸۱	-۱/۸۸	۰/۸۱۱	۰/۹۸۷	۰/۰۰۴۶	۰/۵۹۵	-۳/۳۶	۰/۴۰۲
۰/۹۹۷	۰/۰۰۲۸	۰/۴۶۳	-۳/۵۵	۰/۵۳۱	۰/۹۹۵	۰/۰۰۳۲	۰/۴۹۶	-۳/۱۲	۰/۴۹۸	۰/۹۸۶	۰/۰۰۵۰	۰/۴۰۵	-۲/۲۸	۰/۵۹۱

مدل (۳)													تیمار
دما (°C)													
۱۹۰			۱۷۰			۱۵۰							
R <sup>2</sup>	RMSE	b×۱۰ <sup>-۶</sup>	a	R <sup>2</sup>	RMSE	b×۱۰ <sup>-۶</sup>	a	R <sup>2</sup>	RMSE	b×۱۰ <sup>-۶</sup>	a		
۰/۹۷۱	۰/۰۰۹۱	-۱/۹۵۶	۱/۰۴۴	۰/۹۹۰	۰/۰۰۴۷	-۱/۷۸۹	۱/۰۵۱	۰/۹۹۵	۰/۰۰۲۹	-۱/۵۱۲	۰/۰۵۴		
۰/۹۷۳	۰/۰۰۷۷	-۱/۷۳۲	۱/۰۳۲	۰/۹۸۶	۰/۰۰۴۵	-۱/۴۲۳	۱/۰۳۵	۰/۹۹۷	۰/۰۰۱۶	-۱/۱۹۷	۱/۰۳۹		
۰/۹۹۱	۰/۰۰۴۴	-۱/۷۷۴	۱/۰۱۸	۰/۹۷۹	۰/۰۰۵۹	-۱/۵۰۲	۱/۰۲۱	۰/۹۶۸	۰/۰۰۶۱	-۱/۲۵۱	۱/۰۲۱		
۰/۹۱۲	۰/۰۲۳۵	-۲/۸۶۰	۱/۰۵۰	۰/۹۳۲۲	۰/۰۱۹۳	-۲/۶۶۸	۱/۰۵۶	۰/۹۳۰	۰/۰۱۷۹	-۲/۴۰۳	۱/۰۵۸		
۰/۹۲۳	۰/۰۲۲۶	-۲/۹۶۱	۱/۰۴۹	۰/۹۲۲	۰/۰۲۰۹	-۲/۶۸۹	۱/۰۵۳	۰/۹۳۷	۰/۰۱۷۱	-۲/۴۵۶	۱/۰۵۸		
۰/۹۴۷	۰/۰۱۱۴	-۱/۸۴	۱/۰۱۲	۰/۹۷۵	۰/۰۰۶۶	-۱/۵۵	۱/۰۱۸	۰/۹۹۵	۰/۰۰۲۴	-۱/۲۹۳	۱/۰۲۳		
۰/۹۵۲	۰/۰۱۰۷	-۱/۸۰۴	۱/۰۱۳	۰/۹۷۲	۰/۰۰۶۹	-۱/۵۲۴	۱/۰۱۷	۰/۹۹۲	۰/۰۰۳۴	۰/۹۹۵	۱/۰۲۲		
۰/۹۹۸	۰/۰۰۱۹	-۱/۸۷۲	۰/۹۹۳۷	۰/۹۹۴	۰/۰۰۰۳	-۱/۵۷۰	۰/۹۹۵۶	۰/۹۸۹	۰/۰۰۳۵	-۱/۲۸۱	۰/۹۹۷		
۰/۹۹۸	۰/۰۰۱۸	-۱/۸۰۴	۰/۹۹۴	۰/۹۹۶	۰/۰۰۲۴	-۱/۴۹۳	۰/۹۹۵	۰/۹۸۷	۰/۰۰۰۴	-۱/۳۲۰	۰/۹۹۷		

مدل (۴)													تیمار
دما (°C)													
۱۹۰			۱۷۰			۱۵۰							
R <sup>2</sup>	RMSE	b×۱۰ <sup>-۶</sup>	a	R <sup>2</sup>	RMSE	b×۱۰ <sup>-۶</sup>	a	R <sup>2</sup>	RMSE	b×۱۰ <sup>-۶</sup>	a		
۰/۹۷۳	۰/۰۰۸۷	۲/۰۸۲	۱/۰۴۵	۰/۹۹۱	۰/۰۰۴۶	۱/۸۹۱	۱/۰۵۱	۰/۹۹۵	۰/۰۰۲۹	۱/۵۸۵	۱/۰۵۴		
۰/۹۷۷	۰/۰۰۷۲	۱/۸۳۴	۱/۰۳۲	۰/۹۸۸	۰/۰۰۴۳	۱/۴۹۱	۱/۰۳۶	۰/۹۹۸	۰/۰۰۱۵	۱/۲۴۴	۱/۰۳۹		
۰/۹۹	۰/۰۰۴۷	۱/۸۷۱	۱/۰۱۹	۰/۹۷۷	۰/۰۰۶۱	۱/۵۷۱	۱/۰۲۱	۰/۹۶۶	۰/۰۰۶۳	۱/۲۹۸	۱/۰۲۱		
۰/۹۲۱	۰/۰۲۲۲	۳/۱۵۰	۱/۰۵۲	۰/۹۴۰	۰/۰۱۸۲	۲/۹۱۶	۱/۰۵۷	۰/۹۳۶	۰/۰۱۶۹	۲/۶۰۶	۱/۰۶۰		
۰/۹۳۱	۰/۲۱۳	۳/۲۶۹	۱/۰۵۱	۰/۹۳۱	۰/۰۱۹۶	۲/۹۴۷	۱/۰۵۵	۰/۹۴۵	۰/۰۱۶	۲/۶۶۸	۱/۰۵۹		
۰/۹۵۱	۰/۱۰۹	۱/۹۵۷	۱/۰۱۲	۰/۹۷۷	۰/۰۰۶۳	۱/۶۳۱	۱/۰۱۸	۰/۹۹۵	۰/۰۰۲۳	۱/۳۴۷	۱/۰۲۳		
۰/۹۵۶	۰/۰۱۰۲	۱/۹۱۷	۱/۰۱۳	۰/۹۷۵	۰/۰۰۶۵	۱/۶۰۳	۱/۰۱۸	۰/۹۹۳	۰/۰۰۲۹	۰/۹۹۵	۱/۰۲۲		
۰/۹۹۸	۰/۰۰۲۲	۱/۹۸۱	۰/۹۹۴۱	۰/۹۸۶	۰/۰۰۴۹	۱/۷۵۵	۰/۹۹۹۹	۰/۹۸۳	۰/۰۰۴۴	۱/۴۰۴	۰/۹۹۹۹		
۰/۹۹۷	۰/۰۰۲۳	۱/۹۰۵	۰/۹۹۵۱	۰/۹۹۵	۰/۰۰۲۶	۱/۵۶۳	۰/۹۹۵۳	۰/۹۸۲	۰/۰۰۴۶	۱/۴۳۱	۰/۹۹۹۹		

ادامه جدول ۳ پارامترهای آماری حاصل از برازش داده‌های آزمایشی دانسیته ظاهری با مدل‌های ۱-۶ جدول ۲، برای تیمارها و دماهای

مختلف

مدل (۵)												تیمار
دما (°C)												
۱۹۰				۱۷۰				۱۵۰				
R <sup>2</sup>	RMSE	b	a×10 <sup>-1</sup>	R <sup>2</sup>	RMSE	b	a×10 <sup>-1</sup>	R <sup>2</sup>	RMSE	b	a×10 <sup>-1</sup>	
۰/۹۷۰	۰/۰۰۹۱	-۰/۰۴۲	۱/۸۸۵	۰/۹۹۰	۰/۰۰۴۷	-۰/۰۴۸	۱/۷۱۴	۰/۹۹۴	۰/۰۰۲۹	-۰/۰۵۱	۱/۴۳۳	Control
۰/۹۷۳	۰/۰۰۷۷	-۰/۰۳۰	۱/۶۸۸	۰/۹۸۶	۰/۰۰۴۶	-۰/۰۳۴	۱/۳۸۲	۰/۹۹۷	۰/۰۰۱۶	-۰/۰۳۷	۱/۱۵۸	D8
۰/۹۹۱	۰/۰۰۴۴	-۰/۰۱۷	۱/۷۵۱	۰/۹۷۹	۰/۰۰۵۸	-۰/۰۰۲	۱/۴۷۹	۰/۹۶۸	۰/۰۰۰۶	-۰/۰۰۲	۱/۲۳۲	D15
۰/۹۱۲	۰/۰۲۳۵	-۰/۰۴۷	۲/۷۴۶	۰/۹۳۲	۰/۰۱۹۳	-۰/۰۵۲	۲/۵۴۸	۰/۹۲۹	۰/۰۱۷	-۰/۰۵۵	۲/۲۸۹	U28
۰/۹۲۲	۰/۰۲۲۶	-۰/۰۴۶	۲/۸۴۶	۰/۹۲۱	۰/۰۲۰۹	-۰/۰۰۵	۲/۵۷۵	۰/۹۳۷	۰/۰۱۷۱	-۰/۰۵۴	۲/۳۴۲	U40
۰/۹۴۷	۰/۰۱۱۴	-۰/۰۱۱	۱/۸۲۸	۰/۹۷۴	۰/۰۰۶۶	-۰/۰۱۷	۱/۵۳۱	۰/۹۹۵	۰/۰۰۲۵	-۰/۰۲۲	۱/۲۷	U28 – D8
۰/۹۵۱	۰/۰۱۰۷	-۰/۰۱۲	۱/۷۹	۰/۹۷۱	۰/۰۰۶۹	-۰/۰۱۷	۱/۵۰۵	۰/۹۹۲	۰/۰۰۳۱	-۰/۰۲۲	۱/۳۱۶	U40 – D8
۰/۹۹۸	۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۶۹	۱/۸۷۹	۰/۹۹۵	۰/۰۰۲۹	۰/۰۰۴۴	۱/۵۸۳	۰/۹۸۹	۰/۰۰۳۵	۰/۰۰۳	۱/۲۹	U28 – D15
۰/۹۹۸	۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۵۴	۱/۸۲۱	۰/۹۹۵	۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۵	۱/۵۰۷	۰/۹۸۷	۰/۰۰۳۹	۰/۰۰۲۴	۱/۳۲۹	U40 – D15
مدل (۶)												
دما (°C)												
۱۹۰				۱۷۰				۱۵۰				
R <sup>2</sup>	RMSE	b×10 <sup>-1</sup>	a	R <sup>2</sup>	RMSE	b×10 <sup>-1</sup>	a	R <sup>2</sup>	RMSE	b×10 <sup>-1</sup>	a	
۰/۹۷۰	۰/۰۰۹۲	۱/۹۶۴	۰/۰۴۴	۰/۹۹۰	۰/۰۰۴۷	۱/۷۹۷	۰/۰۵۰	۰/۹۹۴	۰/۰۰۳۰	۱/۵۱۸	۰/۵۳۳	Control
۰/۹۷۳	۰/۰۰۷۷	۱/۷۴۰	۰/۰۳۱	۰/۹۸۶	۰/۰۰۴۶	۱/۴۲۹	۰/۰۳۵	۰/۹۹۷	۰/۰۰۱۶	۱/۲۰۲	۰/۰۳۹	D8
۰/۹۹۱	۰/۰۰۴۴	۱/۷۸۲	۰/۰۱۸	۰/۹۷۹	۰/۰۰۵۸	۱/۵۰۹	۰/۰۲۰	۰/۹۶۹	۰/۰۰۶۰	۱/۲۵۶	۰/۰۲۰	D15
۰/۹۱۱	۰/۰۲۳۵	۲/۸۷۳	۰/۰۵۰	۰/۹۳۱	۰/۰۱۹۳	۲/۶۸۰	۰/۰۵۵	۰/۹۲۹	۰/۰۱۷۹	۲/۴۱۴	۰/۰۵۸	U28
۰/۹۲۲	۰/۰۲۲۷	۲/۹۷۴	۰/۰۴۸	۰/۹۲۱	۰/۰۲۰۹	۲/۷۰۱	۰/۰۵۳	۰/۹۳۷	۰/۰۱۷۱	۲/۴۶۷	۰/۰۵۷	U40
۰/۹۴۶	۰/۰۱۱۴	۱/۸۴۸	۰/۰۱۱	۰/۹۷۴	۰/۰۰۶۶	۱/۵۵۶	۰/۰۱۷	۰/۹۹۴	۰/۰۰۲۵	۱/۲۹۸	۰/۰۲۲	U28 – D8
۰/۹۵۱	۰/۰۱۰۷	۱/۸۱۲	۰/۰۱۲	۰/۹۷۱	۰/۰۰۶۹	۱/۵۳۰	۰/۰۱۷	۰/۹۹۲	۰/۰۰۳۱	۰/۰۲۱	۰/۰۲۱	U40 – D8
۰/۹۹۸	۰/۰۰۱۹	۱/۸۸	-۰/۰۰۶	۰/۹۹۴	۰/۰۰۲۹	۱/۵۷۷	-۰/۰۰۴	۰/۹۸۹	۰/۰۰۳۵	۱/۲۸۶	-۰/۰۰۳	U28 – D15
۰/۹۹۸	۰/۰۰۱۸	۱/۸۱۲	-۰/۰۰۵	۰/۹۹۶	۰/۰۰۲۴	۱/۵۰۰	-۰/۰۰۵	۰/۹۸۷	۰/۰۰۳۹	۱/۳۲۶	-۰/۰۰۲	U40 – D15

توان بیان کرد که با داشتن مقادیر مختلف متغیرهای فوق، به راحتی می‌توان دانسیته ظاهری را با استفاده از این مدل‌ها بدست آورد. همچنین، با استفاده از چنین مدل‌هایی می‌توان زمان مناسب برای دستیابی به یک نمونه سرخ‌شده با میزان دانسیته ظاهری معین و مناسب را بدست آورد 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، بسیار کاهش پیدا می‌کند و این مسئله، بیانگر اهمیت بالای چنین مدل‌هایی می‌باشد [۱۱، ۱۲].

علاوه بر این، در مرحله بعد، به منظور بدست آوردن مدل‌های دارای قابلیت کاربرد در شرایط زمانی مختلف و با هدف تعیین رابطه بین ضرایب مدل‌ها و متغیرهای مرتبط با فرآیند سرخ‌کردن (زمان پیش‌تیمار خشک‌کردن، فرکانس پیش‌تیمار فراصوت و دمای فرآیند سرخ‌کردن)، تجزیه و تحلیل رگرسیونی چند متغیره بر روی ضرایب تمامی مدل‌های مربوطه انجام گرفت [۱۱، ۱۲]. جدول ۴، مدل‌های بدست آمده از این طریق را نشان می‌دهد؛ به طوری که دانسیته ظاهری به عنوان تابعی از زمان سرخ‌کردن بوده و ضرایب مدل‌ها (a، b و c) نیز، تابعی از متغیرهای فرآیند می‌باشند. مطابق این جدول، می

جدول ۴ مدل‌های نهایی حاصل از انجام تجزیه و تحلیل رگرسیونی چند متغیره بر روی ضرایب مدل‌ها (a، b و c)، به صورت تابعی از زمان سرخ‌کردن و دیگر پارامترهای مربوطه\*

$R^2$	$\rho = a \cdot t^\gamma + b \cdot t + c$
۰/۹۷۶	$a = \frac{1}{9} \cdot E - \frac{1}{8} F_U + \frac{1}{5} \frac{1}{4} E - \frac{1}{8} T_D - \frac{1}{9} \frac{1}{8} E - \frac{1}{8} T - \frac{1}{5} \frac{1}{1} E - \frac{1}{10} F_U - \frac{1}{7} \frac{1}{5} E - \frac{1}{9} T_D + \frac{1}{8} \frac{1}{12} E - \frac{1}{11} T - \frac{1}{9} \frac{1}{8} E - \frac{1}{12} F_U T_D T$
۰/۹۷۰	$b = -\frac{1}{2} \cdot E - \frac{1}{5} F_U + \frac{1}{8} \frac{1}{8} E - \frac{1}{5} T_D + \frac{1}{8} \frac{1}{6} E - \frac{1}{7} T + \frac{1}{5} \cdot E - \frac{1}{7} F_U + \frac{1}{8} \frac{1}{4} E - \frac{1}{7} T_D - \frac{1}{2} \frac{1}{4} E - \frac{1}{8} T + \frac{1}{6} \frac{1}{9} E - \frac{1}{9} F_U T_D T$
۰/۹۹۹	$c = -\frac{1}{2} \frac{1}{4} E - \frac{1}{4} F_U - \frac{1}{5} \frac{1}{3} E - \frac{1}{3} T_D + \frac{1}{2} \frac{1}{7} E - \frac{1}{2} T + \frac{1}{3} \frac{1}{1} E - \frac{1}{6} F_U + \frac{1}{4} \frac{1}{3} E - \frac{1}{5} T_D - \frac{1}{3} \frac{1}{7} E - \frac{1}{5} T$
$R^2$	$\rho = a \cdot \exp(b \cdot t^\gamma) + c$
۰/۹۵۰	$a = -\frac{1}{2} \frac{1}{4} E - \frac{1}{2} F_U - \frac{1}{5} \frac{1}{4} E - \frac{1}{2} T_D + \frac{1}{7} \frac{1}{6} E - \frac{1}{2} T + \frac{1}{4} \frac{1}{3} E - \frac{1}{2} T_D - \frac{1}{4} \frac{1}{7} E - \frac{1}{5} T + \frac{1}{3} \frac{1}{3} E - \frac{1}{9} F_U \cdot T + \frac{1}{8} \frac{1}{12} E - \frac{1}{6} F_U T_D T$
۰/۹۵۵	$b = -\frac{1}{10} \cdot E - \frac{1}{6} F_U + \frac{1}{10} \frac{1}{7} E - \frac{1}{7} T_D + \frac{1}{10} \frac{1}{6} E - \frac{1}{7} T + \frac{1}{9} \frac{1}{1} E - \frac{1}{9} F_U + \frac{1}{2} \frac{1}{10} E - \frac{1}{8} T_D - \frac{1}{3} \frac{1}{3} E - \frac{1}{9} T + \frac{1}{2} \frac{1}{4} E - \frac{1}{10} F_U T_D T$
۰/۹۸۵	$c = \frac{1}{9} \frac{1}{7} E - \frac{1}{2} F_U - \frac{1}{5} \frac{1}{3} E - \frac{1}{2} T_D + \frac{1}{9} \cdot E - \frac{1}{3} T - \frac{1}{4} \frac{1}{3} E - \frac{1}{2} T_D + \frac{1}{10} \frac{1}{9} E - \frac{1}{5} T - \frac{1}{3} \frac{1}{3} E - \frac{1}{4} F_U \cdot T - \frac{1}{2} \frac{1}{6} E - \frac{1}{6} F_U T_D T$
$R^2$	$\rho = a (1 + b \cdot t)^{t+1}$
۰/۹۹۹	$a = -\frac{1}{7} \frac{1}{9} E - \frac{1}{4} F_U - \frac{1}{4} \cdot E - \frac{1}{2} T_D + \frac{1}{2} \frac{1}{7} E - \frac{1}{2} T + \frac{1}{10} \frac{1}{2} E - \frac{1}{5} F_U + \frac{1}{5} \frac{1}{7} E - \frac{1}{5} T_D - \frac{1}{7} \frac{1}{9} E - \frac{1}{5} T$
۰/۹۸۹	$b = -\frac{1}{2} \frac{1}{12} E - \frac{1}{8} F_U + \frac{1}{6} \frac{1}{3} E - \frac{1}{7} T_D - \frac{1}{2} \frac{1}{3} E - \frac{1}{8} T + \frac{1}{5} \cdot E - \frac{1}{10} F_U - \frac{1}{7} \frac{1}{2} E - \frac{1}{9} T_D - \frac{1}{9} \frac{1}{4} E - \frac{1}{3} T$
$R^2$	$\rho = \frac{a}{1 + b \cdot t^\gamma}$
۰/۹۹۹	$a = -\frac{1}{3} \frac{1}{1} E - \frac{1}{4} F_U - \frac{1}{4} \frac{1}{2} E - \frac{1}{3} T_D + \frac{1}{2} \frac{1}{7} E - \frac{1}{2} T + \frac{1}{8} \frac{1}{2} E - \frac{1}{6} F_U + \frac{1}{7} \frac{1}{2} E - \frac{1}{5} T_D - \frac{1}{3} \frac{1}{8} E - \frac{1}{5} T$
۰/۹۸۸	$b = \frac{1}{6} \frac{1}{4} E - \frac{1}{8} F_U - \frac{1}{8} \frac{1}{8} E - \frac{1}{7} T_D + \frac{1}{2} \frac{1}{9} E - \frac{1}{8} T - \frac{1}{3} \frac{1}{9} E - \frac{1}{10} F_U + \frac{1}{8} \frac{1}{4} E - \frac{1}{9} T_D + \frac{1}{3} \cdot E - \frac{1}{2} T$
$R^2$	$\rho = \frac{1}{\exp(a \cdot t^\gamma) + b}$
۰/۹۹۰	$a = \frac{1}{2} \frac{1}{3} E - \frac{1}{8} F_U - \frac{1}{5} \cdot E - \frac{1}{7} T_D + \frac{1}{10} \cdot E - \frac{1}{8} T - \frac{1}{5} \cdot E - \frac{1}{10} F_U + \frac{1}{8} \frac{1}{3} E - \frac{1}{9} T_D + \frac{1}{4} \frac{1}{7} E - \frac{1}{2} T$
۰/۹۹۱	$b = -\frac{1}{4} \frac{1}{1} E - \frac{1}{5} F_U + \frac{1}{6} \frac{1}{6} E - \frac{1}{3} T_D - \frac{1}{7} \frac{1}{4} E - \frac{1}{5} T - \frac{1}{4} \frac{1}{3} E - \frac{1}{5} T_D + \frac{1}{6} \frac{1}{8} E - \frac{1}{7} T + \frac{1}{5} \frac{1}{10} E - \frac{1}{5} T_D \cdot F_U$
$R^2$	$\rho = \frac{1 + a \cdot \exp(b \cdot t)}{(1 + b \cdot t)^t}$
۰/۹۹۱	$a = \frac{1}{8} \frac{1}{8} E - \frac{1}{5} F_U - \frac{1}{9} \frac{1}{3} E - \frac{1}{2} T_D + \frac{1}{7} \frac{1}{6} E - \frac{1}{4} T + \frac{1}{5} \frac{1}{9} E - \frac{1}{5} T_D - \frac{1}{2} \frac{1}{8} E - \frac{1}{7} T - \frac{1}{5} \frac{1}{2} E - \frac{1}{5} T_D \cdot F_U$
۰/۹۹۷	$b = \frac{1}{2} \frac{1}{3} E - \frac{1}{8} F_U - \frac{1}{2} \frac{1}{7} E - \frac{1}{7} T_D + \frac{1}{9} \frac{1}{2} E - \frac{1}{9} T + \frac{1}{7} \frac{1}{2} E - \frac{1}{9} T_D + \frac{1}{10} \frac{1}{2} E - \frac{1}{11} T - \frac{1}{6} \frac{1}{4} E - \frac{1}{9} T_D \cdot F_U$

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

## ۴- نتیجه‌گیری

RMSE پایین، به خوبی داده‌های آزمایشی را برازش کردند. همچنین، مدل‌های پیشنهاد شده حاصل از انجام تجزیه و تحلیل رگرسیون چند متغیره در این مطالعه، با داشتن  $R^2$  بالا و RMSE پایین، می‌توانند مدل‌های مفیدی جهت استفاده در فرآیند سرخ‌کردن عمیق، در شرایط دما و زمانی مختلف باشند و با پیشگویی روند تغییرات دانسیته ظاهری طی فرآیند سرخ‌کردن، به کنترل کیفیت محصول نهایی کمک کنند.

طی فرآیند سرخ‌کردن، دانسیته ظاهری نمونه‌های مختلف کاهش پیدا کرد؛ به طوری که در نمونه‌های پیش‌تیمار شده با فراصوت (۲۸ و ۴۰ کیلوهرتز)، مقادیر دانسیته ظاهری در زمان‌های ۱۸۰ یا ۲۴۰ ثانیه از فرآیند، به طور معنی‌داری نسبت به نمونه شاهد کمتر بود؛ ولی در نمونه‌های پیش‌تیمار شده با خشک‌کردن (۸ و ۱۵ دقیقه)، در زمان‌های سرخ‌کردن یکسان، کاهش در مقادیر دانسیته ظاهری نسبت به نمونه شاهد از لحاظ آماری معنی‌دار نبود. علاوه بر این، با افزایش دمای فرآیند از ۱۵۰ به ۱۹۰°C، میزان کاهش در دانسیته ظاهری افزایش یافت. از طرف دیگر، مدل‌های بکار رفته با داشتن  $R^2$  بالا و

## ۵- منابع

[1] Durán, M., Pedreschi, F., Moyano, P. and Troncoso, E. 2007. Oil partition in pre-treated potato slices during frying and cool-

- (Accepted for publication).
- [14] Ghorbani, R., Dehghannya, J., Seiedlou-Heris., S.S. and Ghanbarzadeh, B. 2013. Modeling shrinkage during drying of plums pretreated with ultrasound and osmotic dehydration. *Agricultural Mechanization (in Persian)*. 1(1), 11-24.
- [15] Razzaghpour, E., Dehghannya, J. and Ghanbarzadeh, B. 2014. The effect of ultrasound and blanching on oil uptake during deep-fat frying of potato. *Journal of Research and Innovation in Food Science and Technology (in Persian)*. 2(4), 323-338.
- [16] Ronaghi, T. and Dehghannya, J. 2013. Kinetic modeling of water loss in potato slices pretreated with ultrasound and edible coating during deep-fat frying process. *Journal of Food Research (in Persian)*. 23(3), 329-346.
- [17] Awad, T.S., Moharram, H.A., Shaltout, O.E., Asker, D. and Youssef, M.M. 2012. Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review. *Food Research International*. 48(2), 410-427.
- [18] Cárcel, J.A., García-Pérez, J.V., Benedito, J. and Mulet, A. 2012. Food process innovation through new technologies: Use of ultrasound. *Journal of Food Engineering*. 110(2), 200-207.
- [19] Garcia-Perez, J.V., Ortuño, C., Puig, A., Carcel, J.A. and Perez-Munuera, I. 2012. Enhancement of water transport and microstructural changes induced by high-intensity ultrasound application on orange peel drying. *Food and Bioprocess Technology*. 5(6), 2256-2265.
- [20] Kentish, S. and Feng, H. 2014. Applications of power ultrasound in food processing. *Annual Review of Food Science and Technology*. 5(1), 263-284.
- [21] Fernandes, F.A.N., Gallão, M.I. and Rodrigues, S. 2009. Effect of osmosis and ultrasound on pineapple cell tissue structure during dehydration. *Journal of Food Engineering*. 90(2), 186-190.
- [22] Rodrigues, S., Gomes, M.C.F., Gallão, M.I. and Fernandes, F.A.N. 2009. Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration on cell structure of sapotas. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 89(4), 665-670.
- [23] Math, R.G., Velu, V., Nagender, A. and Rao, D.G. 2004. Effect of frying conditions on moisture, fat, and density of papad. *Journal of Food Engineering*. 64(4), 429-434.
- ing. *Journal of Food Engineering*. 81(1), 257-265.
- [2] Pedreschi, F. 2012. Frying of Potatoes: Physical, Chemical, and Microstructural Changes. *Drying Technology*. 30(7), 707-725.
- [3] FAO. (2010). Statistical Database. Available at: <http://faostat.fao.org/site/567/Default.aspx>.
- [4] Varela, G., Bender, A.E. and Morton, I.D. 1998. *Frying of Foods*. Ellis Horwood Ltd.: Chichester.
- [5] Clark, J.P. 2003. Happy birthday, potato chip! and other snack developments. *Food Technology*. 57(5), 89-92.
- [6] Saguy, I.S. and Dana, D. 2003. Integrated approach to deep fat frying: Engineering, nutrition, health and consumer aspects. *Journal of Food Engineering*. 56(2-3), 143-152.
- [7] Taiwo, K.A. and Baik, O.D. 2007. Effects of pre-treatments on the shrinkage and textural properties of fried sweet potatoes. *LWT-Food Science and Technology*. 40(4), 661-668.
- [8] Paul, S. and Mittal, G.S. 1997. Regulating the use of degraded oil/fat in deep-fat/oil food frying. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 37(7), 635-662.
- [9] Krokida, M.K., Oreopoulou, V., and Maroulis, Z.B. 2000. Effect of frying conditions on shrinkage and porosity of fried potatoes. *Journal of Food Engineering*. 43(3), 147-154.
- [10] Krokida, M.K., Oreopoulou, V., Maroulis, Z.B. and Marinos-Kouris, D. 2001. Effect of pre-drying on quality of French fries. *Journal of Food Engineering*. 49(4), 347-354.
- [11] Naghavi, E.A., Dehghannya, J. and Ghanbarzadeh, B. 2013. Oil uptake modeling during deep-fat frying of potato strips pretreated with ultrasound and drying. *Journal of Food Research (in Persian)*. 23(3), 393-410.
- [12] Naghavi, E.A., Dehghannya, J., Ghanbarzadeh, B. and Rezaei-Mokarram, R. 2013. Empirical shrinkage modeling of potato strips pretreated with ultrasound and drying during deep-fat frying. *Iranian Journal of Nutrition Sciences & Food Technology (in Persian)*. 8(3), 99-111.
- [13] Abedpour, L. and Dehghannya, J. 2014. Investigation of oil uptake during potato strips deep-fat frying pretreated with ultrasound and osmotic dehydration. *Journal of Food Science & Technology (in Persian)*.

- [27] Trystram, G. 2012. Modelling of food and food processes. *Journal of Food Engineering*. 110(2), 269-277.
- [28] AOAC. 1990. *Official Methods of Analysis*. Association of Official Analytical Chemists., Washington, DC.
- [29] Steel, R.G.D., Torrie, J.H. and Dickey, D.A. 1997. *Principles and procedures of statistics: a biometrical approach*. New York: McGraw-Hill.
- [30] Krokida, M.K., Oreopoulou, V., Maroulis, Z.B. and Marinos-Kouris, D. 2001. Effect of osmotic dehydration pretreatment on quality of French fries. *Journal of Food Engineering*. 49(4), 339-345.
- [24] Adedeji, A.A. and Ngadi, M. 2010. Characterisation of pore properties of deep-fat-fried chicken nuggets breading coating using mercury intrusion porosimetry technique. *International Journal of Food Science & Technology*. 45(11), 2219-2226.
- [25] Ziaifar, A.M., Courtois, F. and Trystram, G. 2010. Porosity development and its effect on oil uptake during frying process. *Journal of Food Process Engineering*. 33(2), 191-212.
- [26] Wang, Y., Ngadi, M. and Adedeji, A.A. 2012. Shrinkage of chicken nuggets during deep-fat frying. *International Journal of Food Properties*. 13(2), 404-410.

## Modeling Apparent Density of Potato Strips Pretreated with Ultrasound and Drying During Deep-Fat Frying

Naghavi, E. A.<sup>1</sup>, Dehghannya, J.<sup>2\*</sup>, Ghanbarzadeh, B.<sup>3</sup>

1. Ph.D. Student, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

2. Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

3. Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

(Received: 93/1/24 Accepted: 93/4/31)

The aim of this study was to investigate the effect of ultrasound and drying pretreatments on apparent density as well as modeling apparent density during deep-fat frying of potato slices. Ultrasound pretreatment was performed at 28 and 40 kHz for 15 min and drying pretreatment were conducted at 80°C for 8 and 15 min. Then, the frying process was done at 150, 170 and 190°C for 60, 120, 180 and 240 seconds. In order to model apparent density, experimental data were fitted with six empirical models proposed in this study. The results showed that apparent density of various samples decreased during deep-fat frying. In samples pretreated with ultrasound (28 and 40 kHz), the process time for 180 or 240 s, significantly reduced the apparent density compared to control samples. However, in samples pretreated with pre-drying (8 and 15 min), the decrease in apparent density was not statistically significant in comparison with control samples for the same process time. Furthermore, by increasing the temperature from 150 to 190°C, the reduction in apparent density increased. In addition, applied models were well fitted to experimental data with high  $R^2$  and low RMSE. Also, through multiple regression analysis, models with high  $R^2$  were proposed that are applicable to the different conditions in terms of time and temperature of the deep-fat frying process.

**Keywords:** Apparent Density, Deep-fat frying, Drying, Modeling, Ultrasound

---

\* Corresponding Author E-Mail Address: j\_dehghannya@tabrizu.ac.ir