

تأثیر امواج فراصوت و آبگیری اسمزی روی چگالی ظاهری قطعات سیب‌زمینی طی سرخ کردن

لیدا عابدپور^۱ و جلال دهقان‌نیا^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۸/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۱/۱۹

^۱دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

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

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

چکیده

در این مطالعه، به منظور تولید سیب‌زمینی‌های سرخ‌شده با کیفیت مناسب از پیش‌تیمارهای امواج فراصوت و آبگیری اسمزی استفاده گردید. تأثیر این پیش‌تیمارها (امواج فراصوت در فرکانس‌های ۲۸ و ۴۰ کیلوهرتز و آبگیری اسمزی در محلول نمک با غلظت‌های ۲ و ۴٪) روی چگالی ظاهری قطعات سیب‌زمینی سرخ‌شده به مدت ۴ دقیقه با فواصل زمانی ۶۰ ثانیه در دماهای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰°C مورد بررسی قرار گرفت. به منظور کنترل بهینه شرایط فرآیند و افزایش کیفیت نهایی محصول سرخ‌شده، تغییرات چگالی ظاهری بر حسب سه پارامتر زمان سرخ‌کردن، محتوای روغن و محتوای رطوبت بدون بعد مدل‌سازی گردید. نتایج نشان داد که پیش‌تیمار آبگیری اسمزی و تلفیق آن با امواج فراصوت به شکل معنی‌داری باعث کاهش میزان چگالی ظاهری نمونه‌های پیش‌تیمار شده شدند. همچنین، داده‌های حاصل از آزمایش به خوبی توسط مدل‌های پیشنهادی در این مطالعه با داشتن ضرایب تبیین بالا برازش گردیدند.

واژگان کلیدی: امواج فراصوت، آبگیری اسمزی، چگالی ظاهری، زمان فرآیند، محتوای رطوبت

مقدمه

تا محصول ماندگاری بالایی داشته باشد. سیب‌زمینی سرخ‌شده یک محصول غذایی آماده مصرف، با محتوای رطوبت حدود ۴۰-۵۰٪ می‌باشد (گرینفیلد و همکاران ۱۹۸۴) و شرایط زمان و دمای سرخ‌کردن به گونه‌ای انتخاب می‌شود که از پخته‌شدن قسمت مرکزی اطمینان حاصل شده و در عین حال رنگ رضایت‌بخش و بافت دل‌پسندی داشته باشد (پراویسانی و کالولو ۱۹۸۶).

طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق، تغییرات فیزیکی مختلفی شامل کاهش محتوای رطوبت، افزایش دما و محتوای

سیب‌زمینی یکی از مهم‌ترین مواد غذایی سرخ‌کردنی می‌باشد که معمولاً به دو شکل چیپس^۱ (برش‌های گرد با ضخامت کم) یا سیب‌زمینی سرخ‌شده^۲ (خلال‌های با ضخامت زیاد) عرضه می‌شود. زمان و دمای سرخ‌کردن چیپس‌ها به اندازه‌ای می‌باشد که محتوای رطوبت محصول به حدود ۲-۱٪ کاهش داده شده (موتور ۱۹۸۹)

^۱ Chips

^۲ French Fries

روغن، ایجاد و گسترش پوسته و چروکیدگی یا تورم محصول رخ می‌دهد (فارکاس و همکاران ۱۹۹۶؛ میربل و همکاران ۲۰۰۹). کیفیت سیب‌زمینی سرخ‌شده به شکل عمده به ویژگی‌های ساختاری آن از جمله چگالی و تخلخل بستگی دارد. در اثر خروج رطوبت از ماده غذایی طی سرخ‌کردن، پدیده چروکیدگی رخ می‌دهد و این پدیده به نوبه خود روی ویژگی‌های فیزیکی مواد غذایی از جمله چگالی و تخلخل تأثیر می‌گذارد. ویژگی‌های فیزیکی مانند چگالی، چروکیدگی و تخلخل از جمله فاکتورهای مهم موثر بر بافت و پدیده‌های انتقال جرم در غذاهای سرخ‌شده می‌باشند. طی فرآیند سرخ‌کردن، در اثر خروج رطوبت از سلول‌ها و همچنین شکستن دیواره بعضی حفرات در اثر فشار بخار آب و پیوستن این حفرات به هم، تخلخل گسترش می‌یابد؛ در حالی‌که از وزن ماده غذایی کاسته می‌شود. این پدیده، کاهش چگالی ظاهری و افزایش جذب روغن را در پی خواهد داشت. به دلیل این-که، تخلخل باعث افزایش جذب روغن می‌شود و با محاسبه چگالی ظاهری می‌توان میزان تخلخل را حدس زد، اندازه‌گیری چگالی ظاهری اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. از طرف دیگر، چگالی از جمله ویژگی‌های فیزیکی می‌باشد که به صورت گسترده در مدل‌سازی پدیده‌های انتقال مورد استفاده قرار می‌گیرند (نلسون ۱۹۸۰). تجزیه و تحلیل و کمی‌سازی تغییرات ساختاری ماده غذایی به منظور درک و مدل‌سازی مکانیسم‌های انتقال (خروج رطوبت، جذب روغن و انتقال حرارت) طی سرخ-کردن، از اهمیت بسیاری برخوردار می‌باشد. در مطالعات انجام‌شده، چگالی ظاهری محصول بیشتر به صورت تابعی از محتوای رطوبت مواد غذایی گزارش شده است (لوزانو و همکاران ۱۹۸۳).

طی دهه‌های اخیر به منظور حفظ سلامت مصرف‌کنندگان، تلاش شده است با به‌کارگیری روش‌هایی مانند استفاده از پیش‌تیمارهای مختلف، محتوای روغن در سیب‌زمینی سرخ‌شده کاهش داده شود. با این وجود مطالعات کمی در مورد تأثیر این

پیش‌تیمارها روی ویژگی‌های فیزیکی محصول نهایی انجام شده است. از جمله این پیش‌تیمارها می‌توان از آبیگری اسمزی^۳ نام برد که برای تولید محصولات سرخ‌شده کم‌چرب بسیار مورد توجه می‌باشد. طی آبیگری اسمزی، ویژگی‌های ساختاری ماده اولیه از جمله چگالی ظاهری و تخلخل دست‌خوش تغییراتی می‌شوند. علاوه بر این پیش‌تیمار، استفاده از امواج فراصوت^۴ نیز در دهه‌های اخیر در فرآیندهای صنایع غذایی مورد توجه قرار گرفته است. پژوهش‌های انجام-شده در زمینه استفاده از پیش‌تیمار امواج فراصوت در فرآیند خشک‌کردن، نتایجی مانند افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت، کاهش چروکیدگی و بهبود ویژگی‌های ظاهری و حسی محصول نهایی به همراه داشته است. امواج فراصوت با ایجاد لرزش و انقباض و انبساط‌های پیایی و همچنین ایجاد پدیده کاویتاسیون (تشکیل حفره) در داخل ماده غذایی، یکسری کانال‌های ریزمیکروسکوپی تشکیل داده و باعث تسهیل خروج رطوبت از این کانال‌ها به دلیل فشار بخار ایجاد شده می‌گردد (فرناندز و همکاران ۲۰۰۹). پژوهش‌های مختلف نشان داده‌اند که امواج فراصوت در فرآیند خشک‌کردن، باعث افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت می‌شود (فرناندز و رودریگوئز ۲۰۰۷). با توجه به شباهت فرآیند سرخ‌کردن با خشک‌کردن از نظر انتقال جرم (فرید و کیزیل ۲۰۰۹)، استفاده از امواج فراصوت در فرآیند سرخ‌کردن نیز از طریق افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت، می‌تواند خروج رطوبت را تسهیل نموده و با کاهش مدت زمان لازم برای سرخ‌کردن، جذب روغن را در دماهای مختلف و با توجه به مکانیسم جایگزینی آب و روغن در فرآیند سرخ‌کردن کاهش دهد. با این‌که تاکنون مطالعات بسیار اندکی در زمینه تأثیر پیش‌تیمار امواج فراصوت بر ویژگی‌های فیزیکی محصولات نهایی در فرآیند سرخ‌کردن انجام شده است، ولی انتظار

³ Osmotic Dehydration

⁴ Ultrasound

مدل‌سازی آن صورت گرفته است، هدف از این مطالعه، بررسی تأثیر زمان، دما و پیش‌تیمارهای امواج فراصوت و آبیگری اسمزی روی چگالی ظاهری و مدل‌سازی تجربی آن به صورت تابعی از زمان، محتوای روغن و محتوای رطوبت بدون بعد بود.

مواد و روش‌ها

مواد

مواد خام مورد استفاده در این پژوهش، سیب‌زمینی (رقم آگریا) و روغن سرخ‌کردنی بود. سیب‌زمینی‌های خریداری‌شده از بازار محلی در سردخانه تاریک بالای صفر (با دمای ۱۲ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۸۵٪) نگهداری شدند. روغن سرخ‌کردنی مورد استفاده نیز مخلوطی از روغن‌های آفتابگردان، سویا و پنبه دانه (با چگالی ۹۲۴ کیلوگرم بر مترمکعب در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد) بود.

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

پیش‌تیمارها

نمونه‌ها بر حسب نوع پیش‌تیمار انجام‌شده، بر اساس جدول ۱، به گروه‌های مختلفی تقسیم شدند.

شرایط سرخ‌کردن

سرخ‌کردن سیب‌زمینی‌ها در سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰°C و به مدت ۱، ۲، ۳ و ۴ دقیقه با استفاده از یک سرخ‌کن خانگی (Mulinex مدل F430.R، ساخت فرانسه، مجهز به سیستم تنظیم دما در محدوده ۱۵۰ تا ۱۹۰°C) انجام شد. برای این منظور، سرخ‌کن با ۲ لیتر روغن پر شده و بعد از رسیدن روغن به دمای مورد نظر ۷ قطعه سیب‌زمینی داخل سبد مشبک قرار گرفته و به شکل اتوماتیک تا زمان موردنظر سرخ شدند. سپس، روغن

می‌رود به دلیل وجود شباهت‌هایی در زمینه خروج رطوبت در دو فرآیند خشک‌کردن و سرخ‌کردن، نتایج مشابهی نیز در زمینه تغییرات ساختاری به‌دست آید.

ضیایی‌فر و همکاران (۲۰۰۸)، ویژگی‌های فیزیکی سیب‌زمینی سرخ‌شده از جمله چگالی و تخلخل را مورد مطالعه قرار دادند. سیب‌زمینی‌ها در ۴ دمای ۱۴۰، ۱۵۵، ۱۷۰ و ۱۸۵°C به مدت ۴ دقیقه با فواصل زمانی ۶۰ ثانیه سرخ شدند. نتایج حاصل نشان داد که چگالی ظاهری با گذشت زمان طی فرآیند سرخ‌کردن در تمامی دماها کاهش یافت و افزایش دما تأثیر منفی بر میزان چگالی ظاهری نمونه‌ها داشت. کروکیدا و همکاران (۲۰۰۰)، تأثیر شرایط فرآیند سرخ‌کردن را روی چگالی سیب‌زمینی سرخ‌شده مورد بررسی قرار دادند. چگالی ظاهری نمونه‌ها طی فرآیند سرخ‌کردن و با افزایش دما کاهش یافت. در مطالعه دیگری تأثیر شرایط فرآیند سرخ‌کردن روی چگالی ظاهری پایاد (نوعی ماده غذایی سرخ‌شده تهیه‌شده از خمیر آرد نخود به همراه نمک و ادویه) مورد مطالعه قرار گرفت (مٹ و همکاران ۲۰۰۴). نمونه‌های پایاد در دماهای ۱۶۵، ۱۷۵، ۱۸۰ و ۱۸۵°C سرخ شدند. نتایج نشان داد که در اوایل فرآیند سرخ‌کردن تغییر زیادی در چگالی ظاهری نمونه‌ها در دماهای مختلف روی نداد؛ ولی با ادامه فرآیند، چگالی ظاهری با گذشت زمان در تمامی دماها کاهش یافت. افزایش دما نیز تأثیر منفی بر چگالی ظاهری نمونه‌ها داشت و باعث کاهش بیشتر چگالی ظاهری گردید. کروکیدا و همکاران (۲۰۰۱)، تأثیر پیش‌تیمار آبیگری اسمزی را روی ویژگی‌های ساختاری از جمله چگالی ظاهری سیب‌زمینی سرخ‌شده مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با گذشت زمان، چگالی ظاهری نمونه‌ها کاهش یافت. همچنین، نمونه‌های پیش‌تیمار شده با محلول نمک دارای چگالی ظاهری کمتری نسبت به نمونه‌های شاهد بودند.

با توجه به مطالعات اندکی که تاکنون در زمینه بررسی تغییرات چگالی ظاهری طی فرآیند سرخ‌کردن و

سطحی بلافاصله پس از خروج از سرخ‌کن با کاغذ خشک‌کن گرفته شد. پس از هر ۲ ساعت سرخ‌کردن، روغن داخل دستگاه تعویض گردید.

جدول ۱- علائم اختصاری مورد استفاده برای تیمارهای مختلف

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

(۱) نمونه‌های شاهد

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

(۴) و (۵): نمونه‌های آبگیری‌شده اسمزی با استفاده از محلول نمک در دو غلظت ۲ و ۴ درصد وزنی/وزنی در دمای ۴۰°C و نسبت ۱:۱ نمونه به محلول اسمزی به مدت ۳ ساعت (نمونه‌ها بلافاصله بعد از پوست‌گیری و شستشو در محلول اسمزی قرار گرفتند. آبگیری اسمزی بدون عمل همزنی صورت گرفت).

(۶)، (۷)، (۸) و (۹): نمونه‌های حاصل از تلفیق پیش‌تیمارهای امواج فراصوت و آبگیری اسمزی که ابتدا در دستگاه حمام امواج فراصوت در معرض فرکانس‌های ۲۸ و ۴۰ kHz به مدت ۱۵ دقیقه قرار گرفته و سپس با استفاده از محلول‌های نمک در دو غلظت ۲ و ۴ درصد وزنی/وزنی در دمای ۴۰°C به مدت ۳ ساعت تحت آبگیری اسمزی قرار گرفتند (نمونه‌ها بلافاصله پس از خروج از حمام فراصوت وارد محلول اسمزی شدند. آبگیری اسمزی بدون عمل همزنی صورت گرفت).

اندازه‌گیری محتوای رطوبت

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

اندازه‌گیری محتوای روغن

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

اندازه‌گیری چگالی ظاهری

چگالی ظاهری با در نظر گرفتن حجم فضاهای داخلی^۵ اندازه‌گیری می‌شود (ضیایی فر و همکاران ۲۰۱۰). چگالی ظاهری قطعات سیب‌زمینی سرخ‌شده از طریق رابطه زیر حساب شد (ضیایی فر و همکاران ۲۰۰۸):

$$\rho = \frac{M}{V} \quad [1]$$

ρ : چگالی ظاهری محصول (g/cm³)

M: جرم محصول (g)

V: حجم ظاهری محصول (cm³)

⁵ Pores

(استیل و همکاران ۱۹۹۶) در سطح احتمال ۵٪ بر اساس آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی استفاده شد.

نتایج و بحث

اثر شرایط فرآیند روی چگالی ظاهری

شکل ۱- الف، میزان چگالی ظاهری نمونه‌های شاهد را بعد از سرخ‌شدن در سه دمای ۱۷۰، ۱۵۰ و ۱۹۰°C با گذشت زمان نشان می‌دهد. طبق نتایج، در تمامی دماها، چگالی ظاهری نمونه‌ها با گذشت زمان کاهش یافت. نتایج مشابهی در پژوهش‌های انجام‌شده توسط کروکیدا و همکاران (۲۰۰۰)، کروکیدا و همکاران (۲۰۰۱)، مٹ و همکاران (۲۰۰۴) و ضیایی‌فر و همکاران (۲۰۰۸) به دست آمده است. کاهش چگالی ظاهری با گذشت زمان را می‌توان به خروج رطوبت، جذب روغن و ایجاد حفرات هوا ارتباط داد (کروکیدا و همکاران ۲۰۰۰؛ ضیایی‌فر و همکاران ۲۰۰۸). در مراحل اولیه سرخ‌کردن، چگالی ظاهری تغییرات کمی از خود نشان داد؛ زیرا هم‌زمان با خروج رطوبت، به دلیل وقوع چروکیدگی، کاهش حجم نیز رخ داده و نسبت جرم به حجم (چگالی ظاهری) تغییر چندانی نمی‌کند ولی با گذشت زمان و ادامه خروج رطوبت، به دلیل کاهش چروکیدگی، میزان چگالی ظاهری کاهش می‌یابد. با متوقف‌شدن چروکیدگی و در مواردی بروز افزایش حجم در مراحل انتهایی فرآیند، چگالی ظاهری با سرعت بیشتری کاهش یافت. از طرف دیگر، سرخ‌کردن در دماهای بالاتر منجر به کاهش چگالی ظاهری نمونه‌های سرخ‌شده در زمان‌های یکسان شد. این نتایج با یافته‌های کروکیدا و همکاران (۲۰۰۰)، کروکیدا و همکاران (۲۰۰۱)، مٹ و همکاران (۲۰۰۴) و ضیایی‌فر و همکاران (۲۰۰۸) مطابقت دارد. در مورد سایر نمونه‌ها (پیش‌تیمارشده با امواج فراصوت و آبیگری اسمزی و تلفیقی از این دو) نیز روند مشابهی وجود داشت (داده‌ها نشان داده نشده‌اند). دلیل این امر

حجم ظاهری نمونه‌ها با به‌کارگیری تکنیک جابجایی حلال با استفاده از تولوئن توسط پیکنومتر شیشه‌ای، اندازه‌گیری و با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید (ضیایی‌فر و همکاران ۲۰۱۰):

$$V = \frac{M + M_1 - M_2}{\rho} \quad [2]$$

V: حجم ظاهری نمونه

M: وزن نمونه

M₁: وزن پیکنومتر خالی و حلال

M₂: وزن پیکنومتر حاوی نمونه و حلال

ρ: چگالی تولوئن

مدل‌سازی

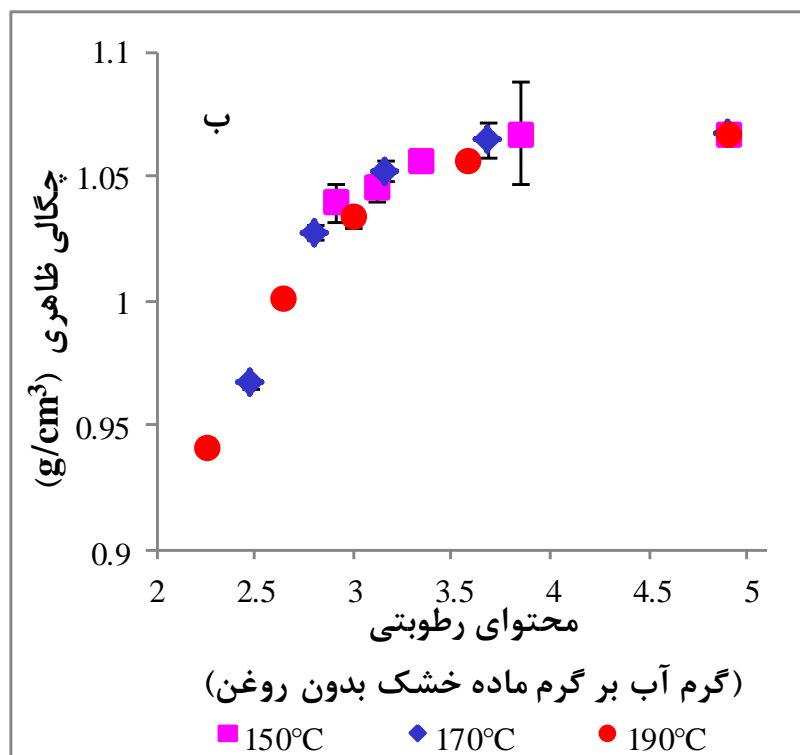
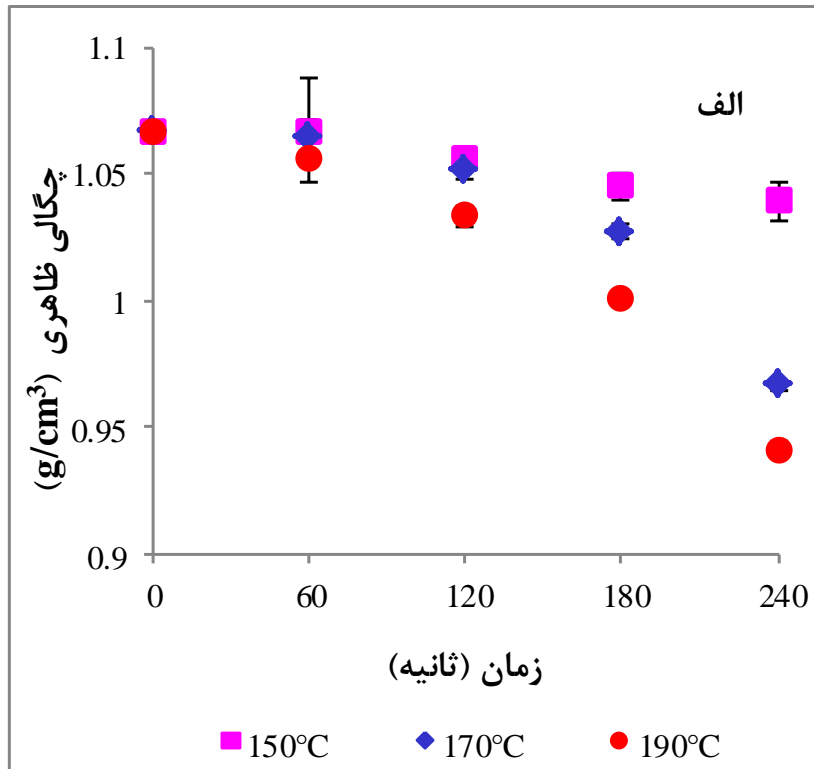
میزان چگالی ظاهری نمونه‌های سیب‌زمینی طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق برحسب سه پارامتر زمان، محتوای روغن و محتوای رطوبت بدون بعد مدل‌سازی شد. مدل‌های پیشنهادی از طریق برازش داده‌های حاصل از آزمایش با استفاده از نرم‌افزار MATLAB (Version 7.12.0.635, R2011a) به دست آمد. ۶ مدل تجربی برای بررسی میزان چگالی ظاهری قطعات سیب‌زمینی با گذشت زمان (جدول ۲) و ۲ مدل تجربی برای بررسی میزان چگالی ظاهری نمونه‌ها بر حسب محتوای روغن و محتوای رطوبت بدون بعد طی سرخ کردن عمیق محصول پیشنهاد گردید (جدول ۴). ارزیابی مدل‌ها با استفاده از دو معیار ضریب تبیین (R²) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) انجام شد. مدل‌هایی که دارای R² بالاتر و RMSE پایین‌تری بودند به عنوان مدل پیشنهادی انتخاب گردیدند.

آنالیز آماری

در این مطالعه، ۹ تیمار نشان‌داده‌شده در جدول ۱، در سه دمای ۱۷۰، ۱۵۰ و ۱۹۰°C و چهار زمان ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ ثانیه در دو تکرار (۲×۴×۳=۲۴) سرخ شدند. برای تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها از نرم‌افزار SAS 9.1 و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون بونفرونی^۶

⁶ Bonferroni

افزایش آهنگ انتقال رطوبت در دماهای بالاتر و افزایش هم‌زمان تخلخل می‌باشد (مٹ و همکاران ۲۰۰۴).



شکل ۱- میزان چگالی ظاهری قطعات سیب‌زمینی شاهد سرخ‌شده به صورت تابعی از زمان (الف) و محتوای رطوبت (ب) طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق در دماهای مختلف

افزایش پیدا کند. در مورد نمونه‌های پیش‌تیمارشده با آبیگری اسمزی نیز بروز چروکیدگی بیشتر طی آبیگری اسمزی به نسبت خروج رطوبت و جذب نمک می‌تواند دلیل افزایش چگالی ظاهری اولیه باشد. با گذشت زمان طی فرآیند سرخ‌کردن، میزان چگالی ظاهری در تمام نمونه‌ها کاهش یافت. اختلاف معنی‌داری بین چگالی ظاهری نمونه‌های پیش‌تیمارشده با امواج فراصوت و نمونه‌های شاهد طی فرآیند مشاهده نگردید. همچنین، دو سطح فرکانس ۲۸ و ۴۰ kHz نیز با یکدیگر اختلاف معنی‌داری نداشتند. کاهش چگالی ظاهری نمونه‌های پیش‌تیمارشده با آبیگری اسمزی نسبت به نمونه‌های شاهد از سرعت بیشتری برخوردار بود؛ به طوری‌که در نهایت کمترین چگالی ظاهری را در بین تمام نمونه‌ها داشتند. از نظر آماری، پیش‌تیمار آبیگری اسمزی تأثیر معنی‌داری روی چگالی ظاهری نمونه‌های سیب‌زمینی سرخ‌شده داشت. همچنین، میزان چگالی ظاهری در دو سطح غلظت ۲ و ۴٪ محلول نمک نیز دارای اختلاف معنی‌داری با یکدیگر بودند. از دلایل کاهش زیاد چگالی ظاهری در هنگام استفاده از این پیش‌تیمار می‌توان به ایجاد تخلخل بیشتر و بروز پدیده پف‌کردن در این نمونه‌ها به دلیل انبساط بخار در داخل ماده غذایی اشاره کرد. در مطالعه انجام‌شده توسط کروکید و همکاران (۲۰۰۱) نیز نتایج مشابهی به‌دست آمده است.

شکل ۲-ب، تغییرات میزان چگالی ظاهری را در نمونه‌های پیش‌تیمارشده تلفیقی با امواج فراصوت در دو فرکانس ۲۸ و ۴۰ kHz و آبیگری اسمزی در دو محلول ۲ و ۴٪ نمک (مطابق جدول ۱) در زمان‌های سرخ‌کردن ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ ثانیه در دمای ۱۵۰°C نشان می‌دهد. مقادیر چگالی ظاهری اولیه در این پیش‌تیمارها نیز بیشتر از چگالی ظاهری اولیه نمونه‌های شاهد بود. در این پیش‌تیمارها نیز چگالی ظاهری با گذشت زمان کاهش یافت که به دلیل بالا بودن سرعت این کاهش، در مقایسه با نمونه‌های شاهد بعد از دقیقه اول فرآیند، میزان چگالی ظاهری نمونه‌های پیش‌تیمارشده کمتر از

میزان چگالی ظاهری نمونه‌های شاهد بر حسب محتوای رطوبت آن‌ها نیز در سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰°C در شکل ۱-ب نشان داده شده است. چگالی ظاهری، با کاهش محتوای رطوبت نمونه‌های شاهد به ۳/۷۵ گرم آب بر گرم ماده خشک بدون روغن تغییر چندانی از خود نشان نداد؛ ولی با کاهش بیشتر محتوای رطوبت، چگالی ظاهری نمونه‌های سرخ‌شده کاهش یافت. همچنین، با افزایش دمای سرخ‌کردن به دلیل خروج بیشتر رطوبت، چگالی ظاهری نمونه‌های سرخ‌شده کاهش بیشتری از خود نشان داد. در مطالعه انجام‌شده توسط ضیایی‌فر و همکاران (۲۰۰۸) نیز نتایج مشابهی گزارش شده است.

اثر پیش‌تیمارها روی چگالی ظاهری

شکل ۲-الف، تغییرات چگالی ظاهری را در نمونه‌های شاهد، پیش‌تیمارشده با امواج فراصوت در دو فرکانس ۲۸ و ۴۰ kHz و آبیگری اسمزی در دو محلول ۲ و ۴٪ نمک در زمان‌های سرخ‌کردن ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ ثانیه در دمای ۱۵۰°C نشان می‌دهد. پیش‌تیمارهای انجام‌شده باعث افزایش میزان چگالی ظاهری اولیه در مقایسه با نمونه‌های شاهد شدند. بیشترین چگالی ظاهری اولیه مربوط به نمونه‌های پیش‌تیمارشده با آبیگری اسمزی در محلول ۲٪ نمک با مقدار ۱/۱۴۲۸ گرم بر سانتیمتر مکعب بود و بعد از آن پیش‌تیمارهای آبیگری اسمزی در محلول ۴٪، امواج فراصوت با فرکانس ۴۰ kHz، امواج فراصوت با فرکانس ۲۸ kHz و نمونه‌های شاهد به ترتیب دارای چگالی ظاهری ۱/۰۹۹۷، ۱/۰۷۷۱، ۱/۰۷۴۸ و ۱/۰۶۶۲ گرم بر سانتیمتر مکعب بودند. دلیل این امر در نمونه‌های پیش‌تیمارشده با امواج فراصوت، ناشی از افزایش محتوای رطوبت اولیه آن‌ها بدون ایجاد تغییر چندانی در حجم این نمونه‌ها بود. در ارتباط با نمونه‌های پیش‌تیمارشده با فراصوت، افزایش در میزان چگالی ظاهری اولیه را می‌توان به جذب مقداری آب توسط قطعات سیب‌زمینی طی غوطه‌ور کردن آن‌ها در حمام فراصوت نسبت داد. این مسئله باعث شد که در پایان انجام پیش‌تیمار، وزن نمونه‌ها بدون کاهش حجم مقداری

داشتن R^2 بالا و RMSE پایین به خوبی توانستند داده‌های آزمایشی را برازش نمایند. شکل ۲، برازش داده‌های حاصل از آزمایش را با مدل پیشنهادی شماره ۱ در شرایط مختلف دما و زمان در نمونه‌های شاهد و پیش‌تیمار شده نشان می‌دهد.

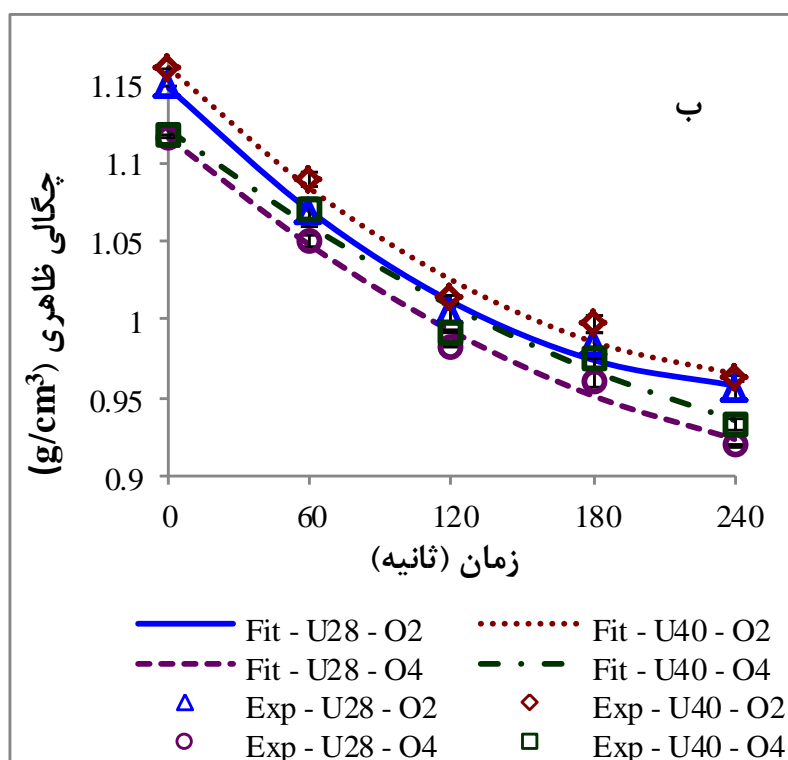
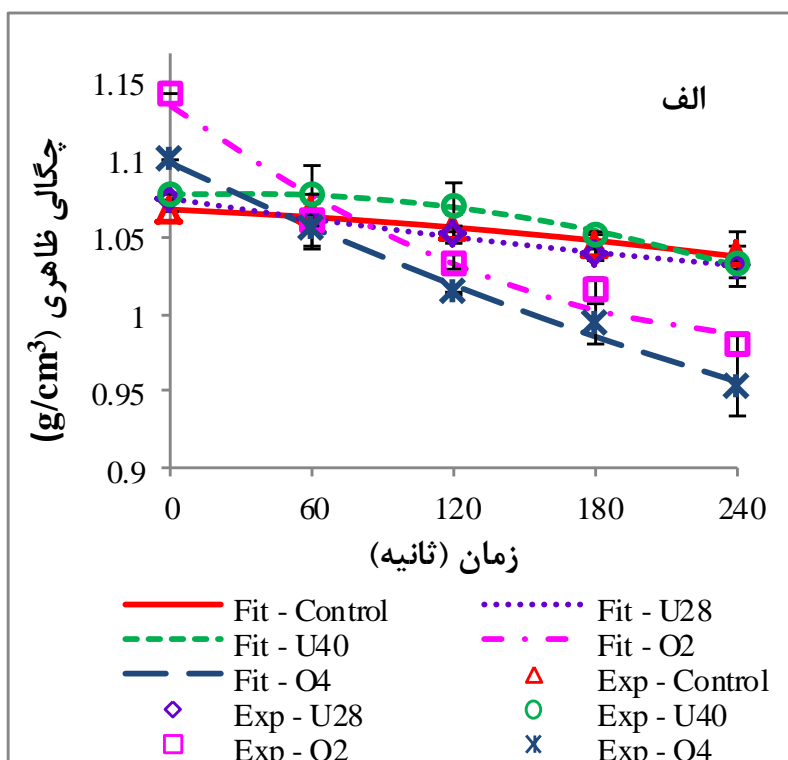
در این مطالعه، تغییرات چگالی ظاهری به صورت تابعی از محتوای رطوبت بدون بعد و همچنین به صورت تابعی از محتوای روغن مدل‌سازی گردید. جدول ۴، مدل‌های پیشنهادی و جدول ۵ ضرایب و مقادیر R^2 و RMSE مربوط به این مدل‌ها را نشان می‌دهد. نتایج حاصل نشان می‌دهند که مدل‌های پیشنهادی با داشتن R^2 بالا و RMSE پایین به خوبی داده‌های آزمایشی را برازش نموده‌اند. شکل ۳ (الف و ب) منحنی‌های حاصل از برازش داده‌های آزمایشی چگالی ظاهری نمونه‌های شاهد را در دماهای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰°C بر حسب محتوای روغن و محتوای رطوبت بدون بعد با مدل‌های پیشنهادی ۱ و ۲ جدول ۴ نشان می‌دهد. با استفاده از این مدل‌ها می‌توان چگالی ظاهری را با داشتن مقادیر مختلف محتوای روغن و محتوای رطوبت بدون بعد به دست آورده و زمان مناسب برای دستیابی به یک نمونه سرخ-شده با چگالی ظاهری معین و مناسب را محاسبه نموده و نمونه غذایی را تنها تا زمان مورد نظر سرخ کرد. از طرف دیگر، با داشتن این مدل‌ها، لزوم انجام آزمایش‌های پرهزینه در شرایط مختلف ذکر شده در فرآیند سرخ‌کردن کاهش پیدا می‌کند.

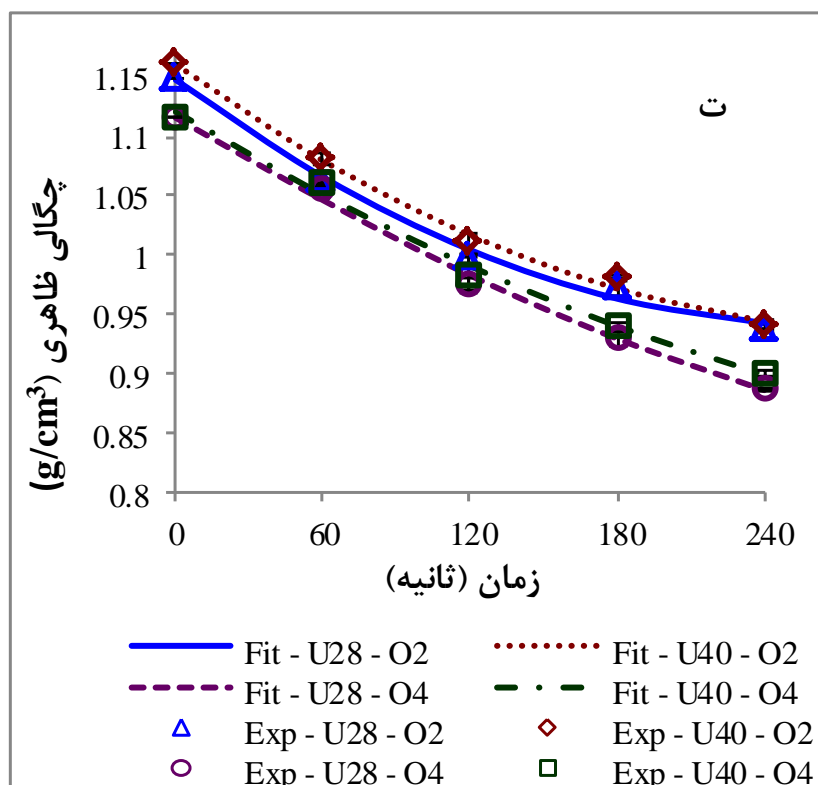
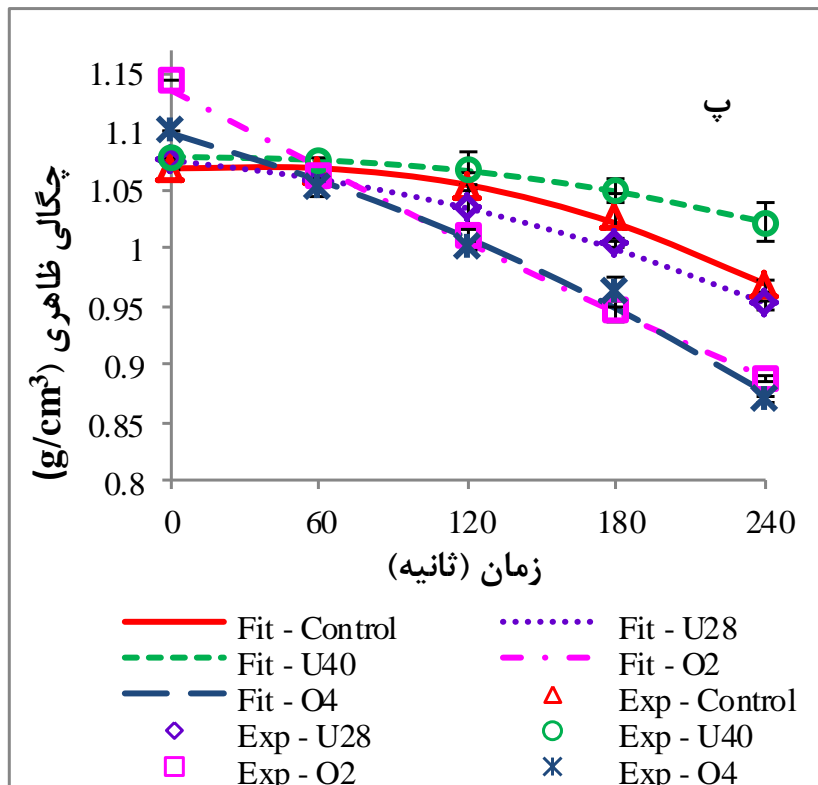
نمونه‌های شاهد به دست آمد. تحلیل آماری نیز نشان داد که پیش‌تیمارهای تلفیقی تأثیر معنی‌داری بر تغییرات چگالی ظاهری در مقایسه با نمونه‌های شاهد داشتند. رفتار کاهش چگالی ظاهری نمونه‌های پیش‌تیمار شده تلفیقی مشابه با نمونه‌های پیش‌تیمار شده با آگیری اسمزی بود؛ به طوری که تغییر فرکانس امواج فراصوت در تلفیق آن با پیش‌تیمار آگیری اسمزی در سطح غلظت یکسان محلول نمک، تأثیر معنی‌داری روی تغییرات چگالی ظاهری نداشت؛ در صورتی که تغییر سطح غلظت نمک در پیش‌تیمار اسمزی در فرکانس‌های یکسان امواج فراصوت دارای تأثیر معنی‌داری روی چگالی ظاهری این نمونه‌ها بود.

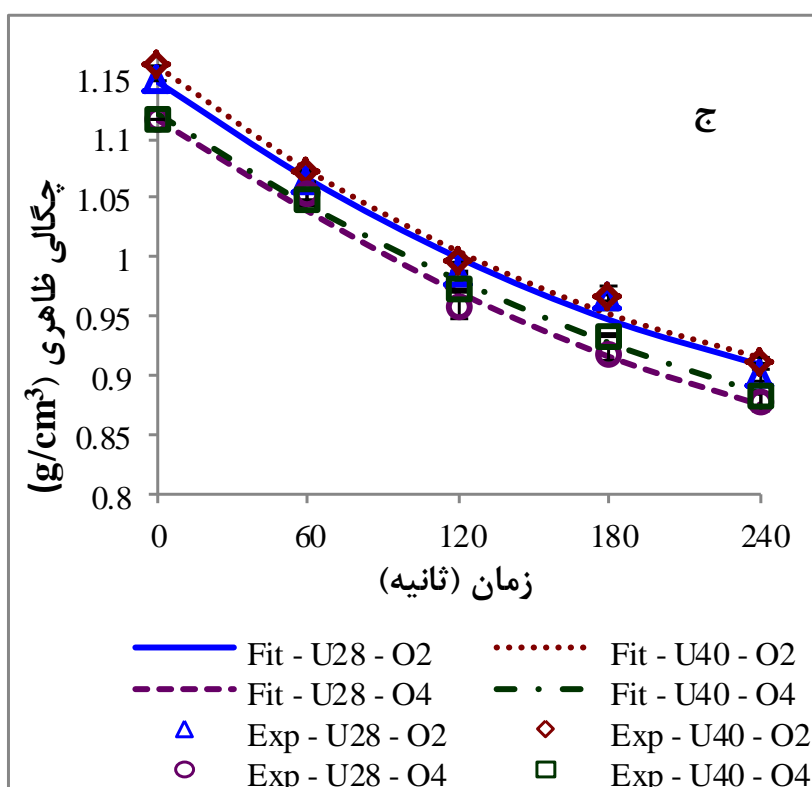
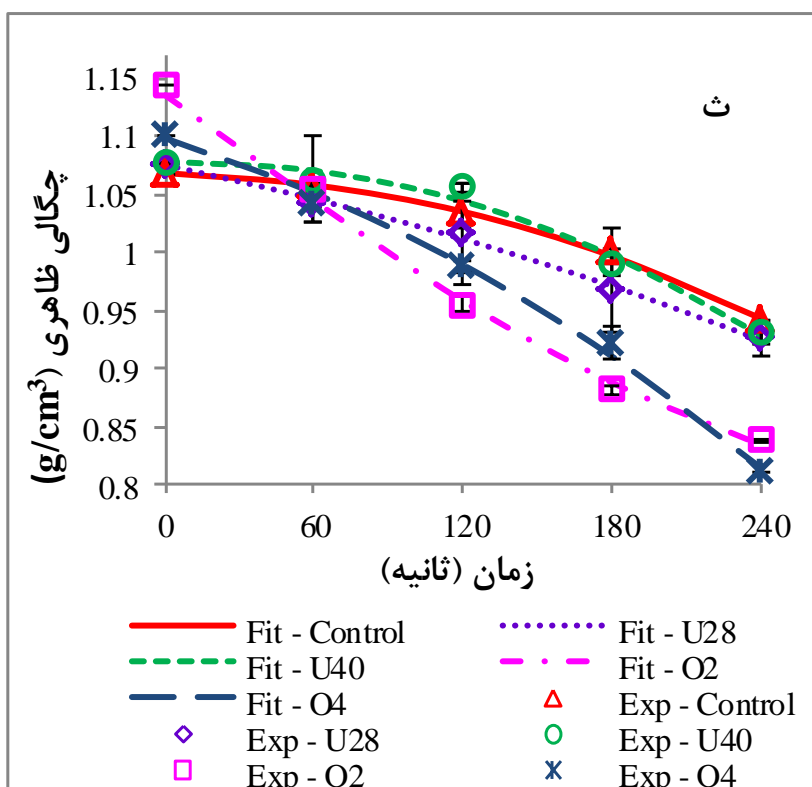
شکل‌های ۲- پ و ت، میزان تغییرات چگالی ظاهری در نمونه‌های شاهد و پیش‌تیمار شده با امواج فراصوت در دو فرکانس ۲۸ و ۴۰ kHz و آگیری اسمزی در دو محلول ۲ و ۴٪ نمک (جداگانه و تلفیقی) را با گذشت زمان در دمای ۱۷۰°C نشان می‌دهد. روند تغییرات میزان چگالی ظاهری در تمامی نمونه‌ها، مشابه نمونه‌های سرخ‌شده در ۱۵۰°C بود؛ با این تفاوت که با افزایش دما میزان چگالی ظاهری در تیمارها و زمان‌های یکسان کاهش یافت. میزان تغییرات چگالی ظاهری در تمامی تیمارها (مطابق جدول ۱) با گذشت زمان در دمای ۱۹۰°C نیز در شکل‌های ۲- ث و ج، نشان داده شده است. در این دما نیز روند کاهش چگالی ظاهری با گذشت زمان در تمامی تیمارها مشابه نمونه‌های سرخ‌شده در دماهای دیگر می‌باشد. به دلیل افزایش دما، کمترین میزان چگالی ظاهری در تیمارها و زمان‌های یکسان در این نمونه‌ها مشاهده گردید.

مدل‌سازی چگالی ظاهری

مدل‌سازی چگالی ظاهری نمونه‌ها در دماهای مختلف به صورت تابعی از زمان سرخ‌کردن انجام شد (جدول ۲). ضرایب و مقادیر R^2 و RMSE مربوط به مدل‌ها در جدول ۳ آورده شده است. تمامی مدل‌های پیشنهادی با







شکل ۲- تغییرات چگالی ظاهری حاصل از آزمایش (Exp) و برازش شده (Fit) با مدل ۱ جدول ۲، طی سرخ کردن عمیق قطعات سیب زمینی با گذشت زمان در دماهای ۱۵۰ (الف و ب)، ۱۷۰ (پ و ت) و ۱۹۰°C (ث و ج) در پیش تیمارهای مختلف طبق جدول ۱

جدول ۲- مدل‌های پیشنهادی برای بررسی تغییرات چگالی ظاهری قطعات سیب‌زمینی بر حسب زمان

شماره	مدل	مرجع
۱	$\rho = at^2 + bt + c$	تحقیق حاضر
۲	$\rho = (1 - at)/(bt + c)$	تحقیق حاضر
۳	$\rho = a/(1 + bt^c)$	تحقیق حاضر
۴	$\rho = a + \exp(bt^c)$	تحقیق حاضر
۵	$\rho = a + bt^{1/c}$	تحقیق حاضر
۶	$\rho = a \exp[-((t - b)/c)^2]$	تحقیق حاضر

جدول ۳- پارامترهای آماری حاصل از مدل‌های ۱-۶ جدول ۲ برای دماها و تیمارهای مختلف مطابق جدول ۱

پیش‌تیمار	دما (°C)														
	۱۹۰					۱۷۰					۱۵۰				
	RMSE	R ²	c	$b \times 10^{-5}$	$a \times 10^{-10}$	RMSE	R ²	c	$b \times 10^{-5}$	$a \times 10^{-10}$	RMSE	R ²	c	$b \times 10^{-5}$	$a \times 10^{-10}$
Control	۰/۰۰۳۸	۰/۹۹	۱/۰۶۵	۰/۴۳۸	-۲/۱۳۵	۰/۰۰۵۹	۰/۹۹	۱/۰۶۴	۲۲/۳۰	-۲/۵۷۹	۰/۰۰۳۸	۰/۹۵	۱/۰۶۸	-۶/۷۰۰	-۰/۲۵۰
U28	۰/۰۰۴۸	۰/۹۹	۱/۰۷۴	-۴۲/۴۳	-۰/۸۳۷	۰/۰۰۴۰	۰/۹۹	۱/۰۷۳	-۱۵/۴۷	-۱/۴۴۸	۰/۰۰۱۵	۰/۹۹	۱/۰۷۵	-۲۳/۴۳	۰/۲۲۴
U40	۰/۰۰۱۱۲	۰/۹۸	۱/۰۷۵	۸/۹۷۴	-۲/۹۱۱	۰/۰۰۱۸	۰/۹۹	۱/۰۷۶	۵/۳۴	-۱/۱۶۱	۰/۰۰۲۵	۰/۹۹	۱/۰۷۸	۵/۰۴۸	-۱/۰۱۶
O2	۰/۰۰۹۵	۰/۹۹	۱/۱۴۷	۱۸۴/۹	۲/۲۷۴	۰/۰۰۸۰	۰/۹۹	۱/۱۳۹	-۱۲۰/۴	-۰/۶۷۳	۰/۰۰۶۳	۰/۹۶	۱/۱۳۵	-۱۰۸/۹	۱/۹۶۴
O4	۰/۰۰۱۰۸	۰/۹۹	۱/۰۹۵	-۵۹/۶۳	-۲/۳۸۳	۰/۰۰۱۳۲	۰/۹۹	۱/۰۹۶	-۵۴/۹۷	-۱/۵۳۰	۰/۰۰۷۲	۰/۹۹	۱/۰۹۸	-۷۲/۹۱	۰/۵۷۷
U28 - O2	۰/۰۰۱۷۴	۰/۹۸	۱/۱۴۷	-۱۴۶/۹	۱/۹۹۲	۰/۰۰۹۲	۰/۹۹	۱/۱۴۸	-۱۵۳/۶	۲/۸۳۳	۰/۰۰۸۵	۰/۹۹	۱/۱۴۸	-۱۴۸/۵	۲/۸۸۳
U40 - O2	۰/۰۰۱۲۳	۰/۹۹	۱/۱۵۸	-۱۵۴/۳	۲/۲۱۴	۰/۰۰۸۲	۰/۹۹	۱/۱۶۰	-۱۴۸/۱	۲/۴۲۱	۰/۰۰۲۵	۰/۹۹	۱/۱۶۱	-۱۴۴/۷	۲/۶۲۹
U28 - O4	۰/۰۰۱۳۸	۰/۹۹	۱/۱۲۱	-۱۴۹	۱/۹۴۶	۰/۰۰۱۰۰	۰/۹۹	۱/۱۲۰	-۱۳۰/۸	۱/۳۸۹	۰/۰۰۱۰	۰/۹۹	۱/۱۱۶	-۱۲۵/۷	۱/۸۹۵
U40 - O4	۰/۰۰۰۸۳	۰/۹۹	۱/۱۱۸	-۱۳۲/۲	۱/۴۶۶	۰/۰۰۹۰	۰/۹۹	۱/۱۲۱	-۱۲۴/۴	۱/۳۳۱	۰/۰۰۵۶	۰/۹۸	۱/۱۲۱	-۱۱۰/۴	۱/۳۸۱

پیش‌تیمار	دما (°C)														
	۱۹۰					۱۷۰					۱۵۰				
	RMSE	R ²	c	b	a	RMSE	R ²	c	b	a	RMSE	R ²	c	b	a
Control	۰/۰۰۱۶	۰/۹۹	۰/۹۳۷	-۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۲۹	۰/۹۹	۰/۹۳۶	-۰/۰۰۳۱	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۹	۰/۹۵	۰/۹۳۶	-۰/۰۰۱۲	-۰/۰۰۱۳
U28	۰/۰۰۴۸	۰/۹۹	۰/۹۳۱	-۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۱۵	۰/۹۹	۰/۹۳۱	-۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۱۵	۰/۹۹	۰/۹۳۰	-۰/۰۰۱۳	-۰/۰۰۱۱
U40	۰/۰۰۱۴۲	۰/۹۷	۰/۹۳۵	-۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۲۵	۰/۹۹	۰/۹۳۷	-۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۲۹	۰/۰۰۴۶	۰/۹۷	۰/۹۳۶	-۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۲۷
O2	۰/۰۰۱۱۵	۰/۹۹	۰/۸۷۲	۰/۰۰۱۷	-۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۷۸	۰/۹۹	۰/۸۷۷	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۱۱۷	۰/۹۸	۰/۸۷۶	-۰/۰۰۶۲	-۰/۰۰۵۶
O4	۰/۰۰۰۷۷	۰/۹۹	۰/۹۱۳	-۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۱۱۷	۰/۹۹	۰/۹۱۴	-۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۷۰	۰/۹۹	۰/۹۱۰	-۰/۰۰۱۱	-۰/۰۰۰۵
U28 - O2	۰/۰۰۱۵۹	۰/۹۹	۰/۸۷۰	-۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۷۱	۰/۹۹	۰/۸۶۹	۰/۰۰۴۴	-۰/۰۰۳۴	۰/۰۰۷۱	۰/۹۹	۰/۸۶۹	-۰/۰۰۵۰	-۰/۰۰۴۰
U40 - O2	۰/۰۰۱۰۷	۰/۹۹	۰/۸۶۲	۰/۰۰۲۷	-۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۷۵	۰/۹۹	۰/۸۶۱	۰/۰۰۳۲	-۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۱۲۸	۰/۹۹	۰/۸۶۰	-۰/۰۰۳۹	-۰/۰۰۳۱
U28 - O4	۰/۰۰۱۵۰	۰/۹۹	۰/۸۹۲	۰/۰۰۱۸	-۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۱۰۷	۰/۹۹	۰/۸۹۳	۰/۰۰۱۳	-۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۹۷	۰/۹۹	۰/۸۹۵	-۰/۰۰۲۸	-۰/۰۰۱۹
U40 - O4	۰/۰۰۰۸۴	۰/۹۹	۰/۸۹۴	۰/۰۰۱۶	-۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۹۷	۰/۹۹	۰/۸۹۲	۰/۰۰۱۴	-۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۱۵۹	۰/۹۸	۰/۸۹۲	-۰/۰۰۱۸	-۰/۰۰۱۰

ادامه جدول ۳

دما (°C)															مدل ۳
۱۹۰					۱۷۰					۱۵۰					
RMSE	R ²	c	b× ^۵ -۱۰	a	RMSE	R ²	c	b× ^۵ -۱۰	a	RMSE	R ²	c	b× ^۵ -۱۰	a	پیش تیمار
-/۰۰۴۲	/۹۹	۲/۲۳۸	-/۰۶۰	۱/۰۶۴	-/۰۰۳۶	/۹۹	۳/۰۳۲	-/۰۰۰۶	۱/۰۶۶	-/۰۰۳۴	/۹۶	۱/۴۱۳	۱/۲۴۵	۱/۰۶۸	Control
-/۰۰۶۰	/۹۹	۱/۳۶۰	۹/۱۹۴	۱/۰۷۳	-/۰۰۵۸	/۹۹	۱/۷۷۹	-/۷۲۳	۱/۰۷۲	-/۰۰۱۶	/۹۹	-/۸۵۴	۳۹/۴۵	۱/۰۷۵	U28
-/۰۱۰۷	/۹۸	۲/۴۲۶	-/۰۲۶	۱/۰۷۶	-/۰۰۱۳	/۹۹	۲/۴۹۵	-/۰۰۰۶	۱/۰۷۶	-/۰۰۳۳	/۹۸	۲/۰۶۲	-/۰۵۵	۱/۰۷۸	U40
-/۰۱۱۹	/۹۹	-/۹۹۵	۱۶۲/۶	۱/۱۴۵	-/۰۰۸۳	/۹۹	۱/۰۲۳	۱۰۲/۹	۱/۱۴۱	-/۰۰۸۷	/۹۹	-/۵۶۸	۶۹۸/۳	۱/۱۴۲	O2
-/۰۱۷۶	/۹۹	۱/۶۷۱	۳/۴۹۳	۱/۰۹۱	-/۰۱۷۰	/۹۸	۱/۴۷۶	۷/۵۰۳	۱/۰۹۴	-/۰۰۶۷	/۹۹	-/۹۰۸	۱۰۲/۷	۱/۰۹۹	O4
-/۰۱۵۵	/۹۹	-/۸۲۳	۲۹۲/۹	۱/۱۵۰	-/۰۰۸۹	/۹۹	-/۶۸۹	۵۲۰/۳	۱/۱۵۱	-/۰۰۹۴	/۹۹	-/۶۵۷	۵۷۰	۱/۱۵۱	U28 – O2
-/۰۱۰۷	/۹۹	-/۸۱۹	۳۰۴/۱	۱/۱۶۱	-/۰۰۹۱	/۹۹	-/۷۷۰	۳۴۶/۶	۱/۱۶۱	-/۰۱۴۸	/۹۸	-/۷۲۳	۴۰۱/۸	۱/۱۶۲	U40 – O2
-/۰۱۶۰	/۹۹	-/۹۴۷	۱۵۸/۹	۱/۱۱۹	-/۰۱۱۱	/۹۹	-/۹۸۶	۱۱۹/۷	۱/۱۱۸	-/۰۱۰۶	/۹۹	-/۷۹۹	۲۶۸	۱/۱۱۷	U28 – O4
-/۰۰۸۹	/۹۹	-/۹۳۹	۱۵۴/۸	۱/۱۱۸	-/۰۱۰۲	/۹۹	-/۹۷۱	۱۲۱/۶	۱/۱۱۹	-/۰۱۶۶	/۹۷	-/۹۰۲	۱۴۳/۳	۱/۱۲۰	U40 – O4

دما (°C)															مدل ۴
۱۹۰					۱۷۰					۱۵۰					
RMSE	R ²	c	b× ^۵ -۱۰	a	RMSE	R ²	c	b× ^۵ -۱۰	a	RMSE	R ²	c	b× ^۵ -۱۰	a	پیش تیمار
-/۰۰۳۹	/۹۹	۲/۱۷۶	-/۰۸۵	-/۰۶۴	-/۰۰۳۶	/۹۹	۳/۰۳۲	-/۰۰۱۰	-/۰۶۶	-/۰۰۳۴	/۹۶	۱/۴۰۹	-۱/۳۵۹	-/۰۶۸	Control
-/۰۰۵۸	/۹۹	۱/۳۰۲	-۱۲/۷۲	-/۰۷۳	-/۰۰۵۵	/۹۹	۱/۷۱۵	-/۰۴۲	-/۰۷۲	-/۰۰۱۶	/۹۹	-/۸۴۳	-۴۴/۰۸	-/۰۷۵	U28
-/۰۱۱۰	/۹۸	۲/۳۲۶	-/۰۴۶	-/۰۷۶	-/۰۰۱۸	/۹۹	۲/۳۱۹	-/۰۱۶	-/۰۷۶	-/۰۰۲۸	/۹۹	۲/۲۶۳	-/۰۲۰	-/۰۷۸	U40
-/۰۱۳۳	/۹۹	-/۹۱۳	-۲۵۵/۶	-/۱۴۵	-/۰۰۷۵	/۹۹	-/۹۶۰	-۱۵۰	-/۱۴۱	-/۰۰۸۶	/۹۹	-/۵۵۴	-۸۵۴/۵	-/۱۴۲	O2
-/۰۱۵۹	/۹۹	۱/۵۴۷	-۶/۶۵۲	-/۰۹۲	-/۰۱۶۲	/۹۸	۱/۳۹۴	-۱۱/۷	-/۰۹۵	-/۰۰۶۶	/۹۹	-/۸۷۳	-۱۲۸/۸	-/۰۹۹	O4
-/۰۱۵۴	/۹۹	-/۷۷۳	-۴۰۳	-/۱۵۰	-/۰۰۹۲	/۹۹	-/۶۴۹	-۶۸۳/۶	-/۱۵۱	-/۰۰۹۷	/۹۹	-/۶۲۱	-۷۳۷/۴	-/۱۵۱	U28 – O2
-/۰۱۰۸	/۹۹	-/۷۶۸	-۴۲۳/۱	-/۱۶۱	-/۰۰۹۴	/۹۹	-/۷۲۶	-۴۶۹/۸	-/۱۶۱	-/۰۱۵۱	/۹۸	-/۶۸۴	-۵۳۳/۷	-/۱۶۲	U40 – O2
-/۰۱۶۹	/۹۸	-/۸۸۱	-۲۲۸/۴	-/۱۱۹	-/۰۱۱۹	/۹۹	-/۹۲۲	-۱۷۱/۷۴	-/۱۱۸	-/۰۱۰۸	/۹۹	-/۷۵۵	-۳۵۰/۴	-/۱۱۷	U28 – O4
-/۰۰۹۳	/۹۹	-/۸۷۹	-۲۱۷	-/۱۱۹	-/۰۱۰۹	/۹۹	-/۹۱۲	-۱۷۱	-/۱۲۰	-/۰۱۶۹	/۹۷	-/۸۵۶	-۱۹۰/۹	-/۱۲۰	U40 – O4

دما (°C)															مدل ۵
۱۹۰					۱۷۰					۱۵۰					
RMSE	R ²	c	b× ^۶ -۱۰	a	RMSE	R ²	c	b× ^۶ -۱۰	a	RMSE	R ²	c	b× ^۶ -۱۰	a	پیش تیمار
-/۰۰۳۶	/۹۹	-/۴۷۹	-۱/۳۱۴	۱/۰۶۴	-/۰۰۲۵	/۹۹	-/۳۰۶	-/۰۰۲	۱/۰۶۵	-/۰۰۳۵	/۹۶	-/۶۷۰	-۸/۶۲۵	۱/۰۶۸	Control
-/۰۰۵۵	/۹۹	-/۸۰۹	-۱۶۹/۱	۱/۰۷۳	-/۰۰۵۲	/۹۹	-/۵۷۹	-۹/۳۷۶	۱/۰۷۱	-/۰۰۱۶	/۹۹	۱/۲۰۵	-۴۶۴/۱	۱/۰۷۵	U28
-/۰۱۱۲	/۹۸	-/۴۵۴	-/۸۴۶	۱/۰۷۶	-/۰۰۱۳	/۹۹	-/۴۱۵	-/۰۰۹۹	۱/۰۷۶	-/۰۰۲۸	/۹۹	-/۴۴۹	-/۰۲۳۷	۱/۰۷۹	U40
-/۰۱۵۶	/۹۹	۱/۲۴۶	-۳۹۰۰	۱/۱۴۶	-/۰۰۶۳	/۹۹	۱/۱۴۳	-۲۰۹۰	۱/۱۴۲	-/۰۰۸۳	/۹۹	۱/۹۴۹	-۹۳۵۷	۱/۱۴۲	O2
-/۰۱۳۸	/۹۹	-/۷۱۵	-۱۳۰/۱	۱/۰۹۴	-/۰۱۵۰	/۹۸	-/۷۷۲	-۱۸۰	۱/۰۹۵	-/۰۰۶۷	/۹۹	۱/۲۰۴	-۱۵۱۱	۱/۱۰۰	O4
-/۰۱۵۴	/۹۹	۱/۴۲۰	-۵۱۴۱	۱/۱۵۰	-/۰۰۹۶	/۹۹	۱/۶۷۹	-۸۱۷۵	۱/۱۵۱	-/۰۱۰۱	/۹۹	۱/۷۴۷	-۸۶۳۵	۱/۱۵۱	U28 – O2
-/۰۱۱۰	/۹۹	۱/۴۳۴	-۵۴۴۵	۱/۱۶۱	-/۰۱۰۰	/۹۹	۱/۵۰۴	-۵۸۳۱	۱/۱۶۲	-/۰۱۵۵	/۹۸	۱/۵۸۶	-۶۴۱۰	۱/۱۶۲	U40 – O2
-/۰۱۸۰	/۹۸	۱/۲۵۱	-۳۱۲۲	۱/۱۱۹	-/۰۱۳۰	/۹۹	۱/۱۸۶	-۲۳۲۹	۱/۱۱۹	-/۰۱۱۱	/۹۹	۱/۴۲۹	-۴۲۶۳	۱/۱۱۷	U28 – O4
-/۰۱۰۰	/۹۹	۱/۲۴۴	-۲۸۸۳	۱/۱۱۹	-/۰۱۱۸	/۹۹	۱/۱۹۴	-۲۲۷۵	۱/۱۲۰	-/۰۱۷۳	/۹۷	۱/۲۵۳	-۲۳۷۵	۱/۱۲۰	U40 – O4

دما (°C)															مدل ۶
۱۹۰					۱۷۰					۱۵۰					
RMSE	R ²	c	b	a	RMSE	R ²	c	b	a	RMSE	R ²	c	b	a	پیش‌تیمار
-۰.۰۰۴۴	-۰.۹۹	۶۷۲/۶	۶/۰۴۶	۱/۰.۶۵	-۰.۰۰۶۵	-۰.۹۹	۶۲۲/۹	۴۴/۷۹	۱/۰.۶۹	-۰.۰۰۴۱	-۰.۹۴	۱۵۴۹	-۲۳/۸۳	۱/۰.۶۷	Control
-۰.۰۰۴۹	-۰.۹۹	۹۹۲	-۱۸۶/۷	۱/۱۱۲	-۰.۰۰۴۴	-۰.۹۹	۸۰۹/۶	-۴۲/۱۱	۱/۰.۷۶	-۰.۰۰۲۸	-۰.۹۹	۴۸۵۹	-۱۸۹۰	۱/۲۴۸	U28
-۰.۰۱۱۱	-۰.۹۸	۵۷۳/۵	۲۰/۵۸	۱/۰.۷۶	-۰.۰۰۲۳	-۰.۹۹	۹۱۰/۱	۲۸/۶۴	۱/۰.۷۷	-۰.۰۰۲۴	-۰.۹۹	۹۸۶/۱	۳۰/۳۲	۱/۰.۷۸	U40
-۰.۰۱۶۶	-۰.۹۹	۶۶۲۰	-۲/۹×۱۰ ^۴	۴/۴×۱۰ ^۸	-۰.۰۰۸۲	-۰.۹۹	۳۸۷۱	-۷۶۳۵	۵۵/۶۷	-۰.۰۰۲۳۶	-۰.۹۲	۹۳۶۳	-۲۵۹۲۰	۲۳۸۶	O2
-۰.۰۱۲۷	-۰.۹۹	۵۶۸/۴	-۷۷/۳۲	۱/۱۱۵	-۰.۰۱۴۱	-۰.۹۹	۷۲۶/۷	-۱۲۵/۲	۱/۱۲۹	-۰.۰۰۸۴	-۰.۹۹	۵۲۸۹	-۷۹۶۳	۱/۰.۵۶	O4
-۰.۰۲۲۶	-۰.۹۷	۸۰۰.۱	-۳/۱×۱۰ ^۴	۵/۷×۱۰ ^۷	-۰.۰۳۱۱	-۰.۹۳	۱۲۶۰	-۵۴۷/۹	۱/۳۶	-۰.۰۳۱۸	-۰.۹۲	۱۲۷۵	-۵۰.۷	۱/۳۱۸	U28 – O2
-۰.۰۲۰۴	-۰.۹۸	۹۰۳۹	-۴/۱×۱۰ ^۴	۷/۶×۱۰ ^۸	-۰.۰۲۱۱	-۰.۹۷	۸۸۲۰	-۳/۴×۱۰ ^۴	۳/۴×۱۰ ^۷	-۰.۰۳۰۸	-۰.۹۲	۱۲۶۷	-۵۰۹/۸	۱/۳۴	U40 – O2
-۰.۰۱۹۵	-۰.۹۸	۵۹۴۷	-۱/۸×۱۰ ^۴	۱/۶×۱۰ ^۴	-۰.۰۱۳۴	-۰.۹۹	۶۴۲۱	-۲×۱۰ ^۴	۲/۳×۱۰ ^۴	-۰.۰۲۳۳	-۰.۹۵	۱۲۶۶	-۵۲۱/۹	۱/۳۰۴	U28 – O4
-۰.۰۱۲۸	-۰.۹۹	۶۳۲۹	-۱/۹×۱۰ ^۴	۱/۶×۱۰ ^۴	-۰.۰۱۲۷	-۰.۹۹	۶۲۹۹	۱/۸×۱۰ ^۴	۵۱۴۷	-۰.۰۲۲۲	-۰.۹۶	۱۳۲۹	-۵۵۴/۱	۱/۳۱۹	U40 – O4

جدول ۴- مدل‌های پیشنهادی برای بررسی تغییرات چگالی ظاهری (ρ) قطعات سیب‌زمینی بر حسب محتوای روغن (O) و محتوای رطوبت بدون بعد (M_t) طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق

شماره	مدل	مرجع
۱	$\rho = a \exp(bO) + b \exp(cO)$	تحقیق حاضر
۲	$\rho = (aM_t + b)/(M_t + c)$	تحقیق حاضر

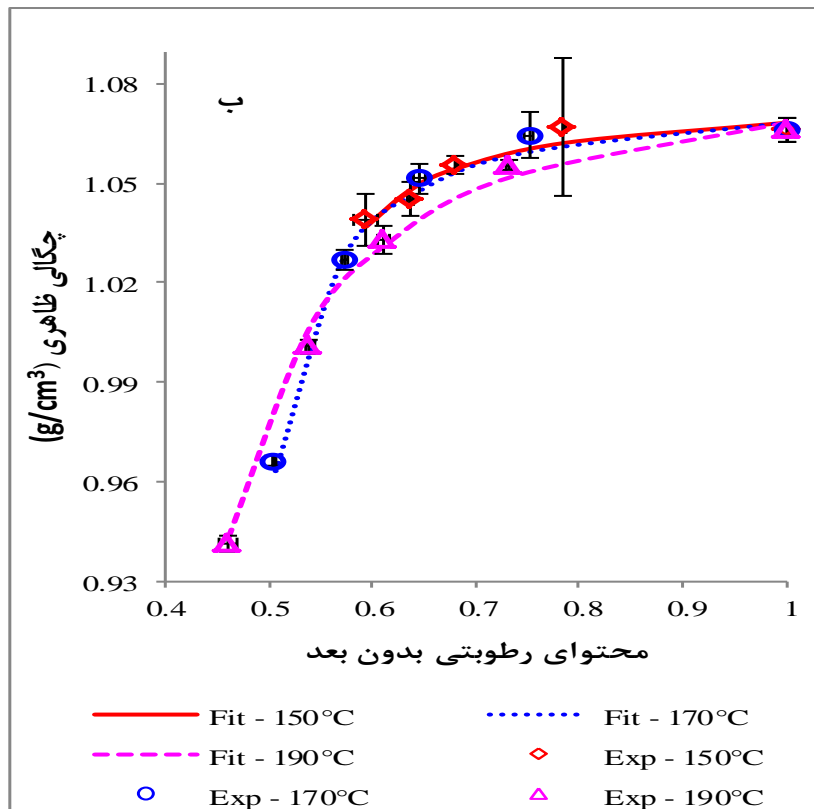
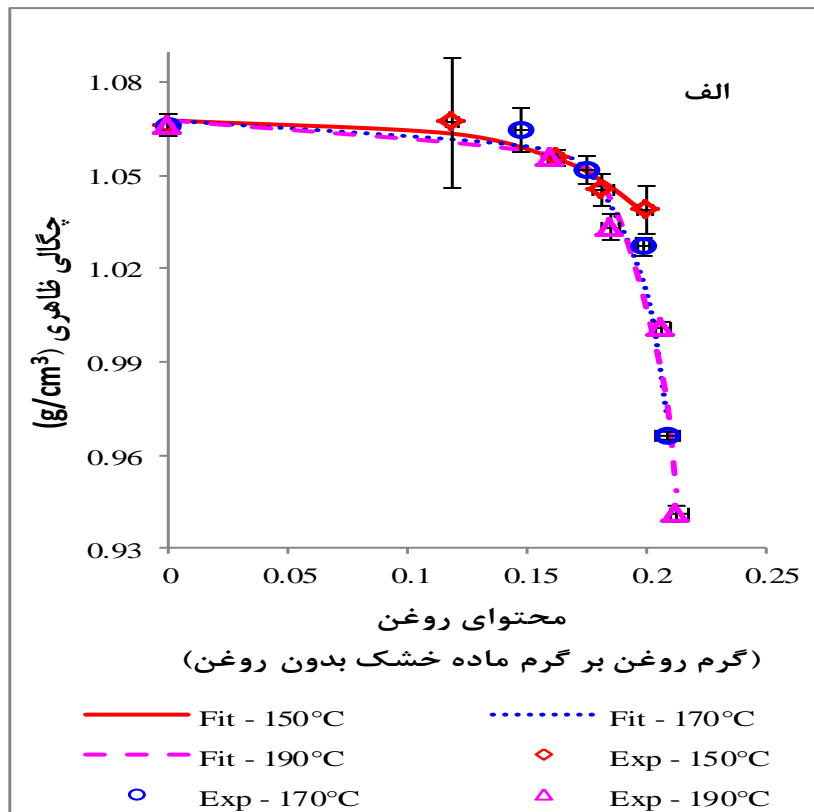
جدول ۵- پارامترهای آماری حاصل از مدل‌های ۱ و ۲ جدول ۴ برای دماها و تیمارهای مختلف مطابق جدول ۱

دما (°C)															مدل ۱
۱۹۰					۱۷۰					۱۵۰					
RMSE	R ²	c	b	a	RMSE	R ²	c	b	a	RMSE	R ²	c	b	a	پیش‌تیمار
-۰.۰۱۲۸	-۰.۹۷	۶۶/۸۹	-۷/۸×۱۰ ^{-۱۰}	۱/۰.۶۰	-۰.۰۱۰۷	-۰.۹۷	۶۷/۵۵	-۷×۱۰ ^{-۱۰}	۱/۰.۶۱	-۰.۰۰۳۶	-۰.۹۶	۲۳/۴۲	-۰/۰۰۰۳	۱/۰.۶۸	Control
-۰.۰۰۴۰	-۰.۹۹	۸/۸۶۴	-۰/۰.۱۷	۱/۰.۹۱	-۰.۰۱۹۹	-۰.۹۲	۱۷/۳۲	-۰/۰.۰۳	۱/۰.۷۴	-۰.۰۰۲۰	-۰.۹۹	۰/۶۶۵	۱/۸۰.۷	-۰/۷۳۲	U28
-۰.۰۲۱۱	-۰.۹۴	۷۹/۵۸	-۳/۹×۱۰ ^{-۱۰}	۱/۰.۶۸	-۰.۰۰۳۱	-۰.۹۹	۵۱/۰.۷	-۴/۶×۱۰ ^{-۱۰}	۱/۰.۷۶	-۰.۰۰۳۲	-۰.۹۹	۳۴/۵۳	-۳×۱۰ ^{-۱۰}	-۱/۰.۷۷	U40
-۰.۰۱۸۷	-۰.۹۹	-۱۲/۹۶	-۱/۰.۶۶	۱/۱۸۰	-۰.۰۱۱۲	-۰.۹۹	۴/۳۳۵	۵/۳۴۹	-۴/۲۰.۶	-۰.۰۰۴۵	-۰.۹۹	۱/۷۴۴	۳/۰.۳۵	-۱/۸۹۲	O2
-۰.۰۵۲۶	-۰.۹۸	۶/۸۰۰	۷/۵۸۳	-۶/۴۸۶	-۰.۰۳۴۸	-۰.۹۲	۴/۹۹	۵/۹۰.۲	-۴/۸۰.۵	-۰.۰۰۲۸	-۰.۹۹	۲/۳۵۶	۳/۵۰.۴	-۲/۴۰.۵	O4
-۰.۰۰۹۳	-۰.۹۹	۲/۷۱۳	۳/۹۶۱	-۲/۸۱	-۰.۰۰۴۶	-۰.۹۹	۱/۲۹۹	۲/۸۱۸	-۱/۶۶۸	-۰.۰۱۴۵	-۰.۹۸	۰/۹۳۰	-۰/۶۱۸	۱/۷۶۹	U28 – O2
-۰.۰۱۱۵	-۰.۹۹	۳/۱۹۶	۴/۳۸۱	-۳/۲۲۱	-۰.۰۰۲۴	-۰.۹۹	۲/۳۳	۳/۶۴۴	-۲/۴۸۳	-۰.۰۱۷۳	-۰.۹۸	۰/۶۰.۸	۲/۲۹۷	-۱/۱۲۴	U40 – O2
-۰.۰۱۶۲	-۰.۹۹	۴/۴۰.۶	۵/۴۹۵	-۴/۳۷۸	-۰.۰۱۰۴	-۰.۹۹	۳/۴۳۹	۴/۶۳۸	-۳/۵۲۲	-۰.۰۱۵۰	-۰.۹۸	۰/۵۰.۳	۲/۲۸۱	-۱/۱۶۵	U28 – O4
-۰.۰۱۶۵	-۰.۹۸	۳/۲۹۴	۴/۴۷۹	-۳/۳۶۱	-۰.۰۱۶۲	-۰.۹۸	۲/۸۰.۲	۴/۶۰	-۲/۹۴۱	-۰.۰۲۴۶	-۰.۹۴	۱/۸۳۴	۳/۲۵۷	-۲/۱۳۷	U40 – O4

دما (°C)															مدل ۲
۱۹۰					۱۷۰					۱۵۰					
RMSE	R ²	c	b	a	RMSE	R ²	c	b	a	RMSE	R ²	c	b	a	پیش‌تیمار
-۰.۰۰۵۶	-۰.۹۹	-۰/۳۴۷	-۰/۳۹۸	۱/۰.۹۷	-۰.۰۰۴۸	-۰.۹۹	-۰/۴۵۱	-۰/۴۹۴	۱/۰.۸۱	-۰.۰۰۴۴	-۰.۹۴	-۰/۴۷۸	-۰/۵۲۰	۱/۰.۷۸	Control
-۰.۰۰۳۱	-۰.۹۹	-۰/۲۹۵	-۰/۳۵۱	۱/۱۰.۸	-۰.۰۰۲۷	-۰.۹۹	-۰/۴۰۳	-۰/۴۵۸	۱/۰.۹۹	-۰.۰۰۲۹	-۰.۹۹	-۰/۱۰.۷	-۰/۱۵۹	۱/۱۱۹	U28
-۰.۰۱۰۹	-۰.۹۸	-۰/۳۰۳	-۰/۳۴۶	۱/۰.۹۹	-۰.۰۰۲۷	-۰.۹۹	-۰/۳۵۵	-۰/۳۹۱	۱/۰.۸۶	-۰.۰۰۴۶	-۰.۹۷	-۰/۴۴۳	-۰/۴۸۶	۱/۰.۸۹	U40
-۰.۰۲۱۶	-۰.۹۸	-۰/۳۰۹	-۰/۲۰.۵	۱/۳۹۹	-۰.۰۰۵۹	-۰.۹۹	-۰/۱۰۰	-۰/۲۷۵	۱/۳۰.۳	-۰.۰۰۸۲	-۰.۹۹	۰/۶۹۶	۰/۴۰.۸	۱/۵۲۷	O2
-۰.۰۰۰۸	۱	-۰/۱۲۳	-۰/۲۰.۵	۱/۶۶۹	-۰.۰۰۴۰	-۰.۹۹	-۰/۱۹۸	-۰/۲۷۳	۱/۱۵.۴	-۰.۰۰۲۸	-۰.۹۹	-۰/۱۸۳	-۰/۲۷۳	۱/۱۷۲	O4
-۰.۰۱۳۲	-۰.۹۹	۰/۲۵.۴	۰/۰.۵۳	۱/۳۸۸	-۰.۰۰۴۵	-۰.۹۹	-۰/۴۵۳	-۰/۱۸۰	۱/۴۹۲	-۰.۰۱۱۸	-۰.۹۹	۰/۹۱۶	۰/۴۳۳	۱/۷۷۴	U28 – O2
-۰.۰۱۴۳	-۰.۹۹	-۰/۰.۱۹	-۰/۲۷.۴	۱/۴۱۴	-۰.۰۱۴۲	-۰.۹۹	-۰/۴۳۵	-۰/۶۱	۱/۶۰.۸	-۰.۰۲۶۴	-۰.۹۴	۰/۱۵.۴	-۰/۱۹۶	۱/۵۳۹	U40 – O2
-۰.۰۲۵۹	-۰.۹۶	-۰/۲۴.۷	-۰/۵.۴۰	۱/۳۸۶	-۰.۰۱۵۴	-۰.۹۹	-۰/۲۰.۲	-۰/۵۲.۲	۱/۴۱.۶	-۰.۰۱۶۸	-۰.۹۸	۰/۷۵.۹	-۰/۱۸۵	۲/۱۵.۲	U28 – O4
-۰.۰۱۰۲	-۰.۹۹	-۰/۱۷.۰	-۰/۰.۷۳	۱/۳۸۲	-۰.۰۱۱۲	-۰.۹۹	-۰/۲۱.۴	-۰/۰.۹۷	۱/۴۵.۸	-۰.۰۱۹۲	-۰.۹۷	۰/۲۷.۹	-۰/۱۱۸	۱/۵۵.۲	U40 – O4

نتیجه‌گیری

پیش‌تیمار امواج فراصوت در هر دو سطح فرکانس ۲۸ و ۴۰ kHz چگالی ظاهری را در مقایسه با نمونه‌های شاهد کاهش داد؛ هر چند این کاهش از لحاظ آماری در سطح پنج درصد معنی‌دار نبود. آبگیری اسمزی در هر دو غلظت ۲ و ۴٪ باعث کاهش معنی‌دار میزان چگالی ظاهری نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌های شاهد گردید. پیش‌تیمارهای تلفیقی نیز تأثیری مشابه پیش‌تیمار آبگیری اسمزی از خود نشان دادند. مدل‌های پیشنهادی در این مطالعه با داشتن R^2 بالا و RMSE پایین به خوبی توانستند داده‌های آزمایشی چگالی ظاهری را بر حسب زمان، محتوای روغن و محتوای رطوبت بدون بعد برازش نمایند. مدل‌های پیشنهادشده در این مطالعه، می‌توانند مدل‌های مفیدی جهت استفاده در فرآیند سرخ کردن عمیق، در شرایط دما و زمانی مختلف باشند و با پیش‌بینی روند تغییرات چگالی ظاهری طی فرآیند سرخ‌کردن، به کنترل کیفیت محصول نهایی کمک کنند.



شکل ۳- تغییرات چگالی ظاهری حاصل از آزمایش (Exp) و برازش شده (Fit) با مدل‌های ۱ و ۲ جدول ۴، بر اساس محتوای روغن (الف) و محتوای رطوبت بدون بعد (ب) در دماهای مختلف در نمونه‌های شاهد

منابع مورد استفاده

- AOAC. 1994. Official Methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemists. Arlington, VA.
- Farid M, and Kizilel R, 2009. A new approach to the analysis of heat and mass transfer in drying and frying of food products. *Chemical Engineering and Processing* 48: 217-223.
- Farkas BE, Singh RP and Rumsey TR, 1996. Modeling heat and mass transfer in immersion frying, I. Model development. *Journal of Food Engineering* 29: 211-226.
- Fernandes AN, Gallão MI and Rodrigues S, 2009. Effect of osmosis and ultrasound on pineapple cell tissue structure during dehydration. *Journal of Food Engineering* 90: 186-190.
- Fernandes AN, and Rodrigues S, 2007. Ultrasound as pre-treatment for drying of fruits: Dehydration of banana. *Journal of Food Engineering* 82: 261-267.
- Greenfield H, Makinson J and Wills RBH, 1984. Lipids in French fries: A retail and laboratory study. *Journal of Food Technology* 19: 239-245.
- Krokida MK, Oreopoulou V and Maroulis ZB, 2000. Water loss and oil uptake as a function of frying time. *Journal of Food Engineering* 44: 39-46.
- Krokida MK, Oreopoulou V, Maroulis ZB and Marinos-Kouris D, 2001. Effect of osmotic dehydration pretreatment on quality of French fries. *Journal of Food Engineering* 49: 339-345.
- Lozano JE, Rotstein E and Urbicain MJ, 1983. Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture content. *Journal of Food Science* 48: 1497-1553.
- Math RG, Velu V, Nagender A and Rao DG, (2004). Effect of frying conditions on moisture, fat, and density of papad. *Journal of Food Engineering* 64: 429-434.
- Mir-Bel J, Oria R and Salvador ML, 2009. Influence of the vacuum break conditions on oil uptake during potato post-frying cooling. *Journal of Food Engineering* 95: 416-422.
- Mottur GP, 1989. A scientific look at potato chips – The original savory snack. *Cereal Chemistry* 34: 620-626.
- Nelson SO, 1980. Moisture dependent kernel and bulk density relationships for wheat and corn. *Transaction of the ASABE* 23: 139-143.
- Pravisani CI and Calvelo A, 1986. Minimum cooking time for potato strip frying. *Journal of Food Science* 51: 614-617.
- Steel RGD, Torrie JH and Dickey DA, 1996. Principles and procedures of statistics: A biometrical approach. McGraw-Hill, New York.
- Ziaiiifar AM, Achir N, Courtois F, Trezzani I and Trystram G, 2008. Review of mechanisms, conditions, and factors involved in the oil uptake phenomenon during the deep-fat frying process. *International Journal of Food Science and Technology* 43: 1410-1423.
- Ziaiiifar AM, Courtois F and Trystram G, 2010. Porosity development and its effect on oil uptake during frying process. *Journal of Food Process Engineering* 33: 191-212.

Influence of ultrasound and osmotic dehydration on apparent density of potato strips during frying

L Abedpour¹ and J Deghannya^{2*}

Received: November 04, 2015

Accepted: February 08, 2016

¹MSc Graduate, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

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

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

Abstract

In this study, ultrasound and osmotic dehydration pretreatments were used to produce good quality fried potato strips. Effect of the pretreatments (ultrasound at 28 and 40 kHz frequencies and osmotic dehydration at salt solution concentrations of 2 and 4%) on apparent density of potato strips fried for 4 minutes with intervals of 60 seconds at temperatures of 150, 170 and 190°C were investigated. Also, changes in the apparent density were modeled in terms of frying time, oil content and moisture content in order to control the optimal process conditions and improve the final quality of fried products. Results showed that osmotic dehydration and its combination with ultrasound pretreatment significantly reduced the apparent density of the pretreated samples. In addition, experimental data were well fitted by proposed models in this study having high correlation coefficients.

Keywords: Ultrasound, Osmotic dehydration, Apparent density, Process time, Moisture content