

بررسی میزان جذب روغن طی فرآیند سرخ کردن عمیق قطعات سیب زمینی پیش تیمار شده با فراصوت و آبگیری اسمزی

لیدا عابدپور^۱، جلال دهقان نیا^{۲*}

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

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

(تاریخ دریافت: ۹۲/۱۰/۲۳ تاریخ پذیرش: ۹۳/۴/۸)

چکیده

با تغییر تمایل مصرف کنندگان به استفاده از مواد غذایی سالم و محصولات کم چرب، کاهش محتوای روغن در مواد غذایی سرخ شده با حفظ کیفیت حسی اجتناب ناپذیر است. در این پژوهش، پیش تیمار فراصوت در دو سطح فرکانس ۲۰ و ۴۰ kHz به مدت ۱۵ دقیقه و پیش تیمار آبگیری اسمزی در دو غلظت ۲ و ۴ درصد محلول نمک به مدت ۳ ساعت روی قطعات سیب زمینی اعمال شده و به دنبال آن فرآیند سرخ کردن در ۳ دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰°C به مدت ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ ثانیه انجام شد. تأثیر پیش تیمارهای فوق روی جذب روغن و ویژگی های حسی مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت و برای بهینه سازی و بهبود تجهیزات و شرایط فرآیند سرخ کردن، میزان جذب روغن در قطعات سیب زمینی پیش تیمار شده با فراصوت و آبگیری اسمزی بررسی شد. پیش تیمار آبگیری اسمزی باعث کاهش معنی دار ($P < 0.05$) میزان جذب روغن در قطعات سیب زمینی سرخ شده گردید. استفاده از پیش تیمار فراصوت به همراه آبگیری اسمزی منجر به کاهش معنی دار میزان جذب روغن نسبت به نمونه های دیگر شد. مدل های تجربی پیشنهاد شده در این پژوهش، به خوبی توانستند داده های آزمایشی را برازش نمایند. هم چنین، پیش تیمار آبگیری اسمزی و تلفیق آن با پیش تیمار فراصوت، ویژگی های حسی سیب زمینی های سرخ شده را بهبود بخشید.

کلید واژگان: سرخ کردن عمیق، فراصوت، آبگیری اسمزی، جذب روغن

* مسئول مکاتبات: J_dehghan@tabrizu.ac.ir

۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین پارامترهای کیفی مواد غذایی سرخ‌شده، مقدار روغن جذب‌شده در طی سرخ‌کردن می‌باشد. میزان جذب روغن زیاد در مواد غذایی سرخ‌شده که گاه به یک سوم وزن کل محصول نهایی می‌رسد، جزء معایب محصول سرخ‌شده محسوب می‌شود [۱]. بنابراین، در دهه‌های اخیر در بسیاری از پروژه‌های پژوهشی تلاش شده است فرآیندهای مکمل متعددی با هدف کاهش محتوای روغن در عین حفظ کیفیت حسی پیشنهاد شود. از جمله این فرآیندها می‌توان به سرخ‌کردن در خلأ [۲]، استفاده از پیش‌تیمارهایی مثل آبگیری اسمزی [۳]، پیش خشک‌کردن [۴] و پوشش‌های خوراکی [۵] اشاره کرد.

طی دهه‌های اخیر استفاده از امواج فراصوت در فرآیندهای صنایع غذایی با هدف بهینه‌سازی فرآیند و بهبود کیفیت ماده غذایی مورد توجه قرار گرفته است. مطالعات مختلفی در زمینه استفاده از پیش‌تیمار فراصوت در فرآیند خشک‌کردن انجام‌شده است [۶-۸]. نتایج پژوهش‌های انجام‌شده نشان داده‌اند که استفاده از پیش‌تیمار فراصوت موجب افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت، کاهش چروکیدگی و بهبود ویژگی‌های ظاهری و حسی ماده خشک‌شده می‌گردد. دلیل این امر به شکل‌گیری کانال‌های میکروسکوپی در ماده غذایی در اثر انقباض و انبساط‌های متوالی ایجادشده توسط امواج فراصوت نسبت داده می‌شود که باعث تسهیل خروج آب از ماده غذایی می‌گردد [۷]. تاکنون مطالعات محدودی در زمینه استفاده از پیش‌تیمار فراصوت در فرآیند سرخ‌کردن صورت گرفته است؛ ولی انتظار می‌رود با توجه به شباهت فرآیند سرخ‌کردن با خشک‌کردن از نظر از دست‌دادن آب [۹]، استفاده از امواج فراصوت در فرآیند سرخ‌کردن به دلیل افزایش ضریب انتشار مؤثر رطوبت، کاهش زمان فرآیند و در نتیجه کاهش جذب روغن را در پی داشته باشد.

علاوه بر پیش‌تیمار فراصوت، پیش‌تیمار آبگیری اسمزی قبل از سرخ‌کردن نیز برای تولید محصولات سرخ‌شده کم‌چرب مورد توجه می‌باشد. آبگیری اسمزی از طریق حذف بخش بزرگی از آب موجود در ماده غذایی و ورود ماده جامد به شبکه ماده غذایی، باعث تغییر ویژگی‌های ساختاری ماده غذایی از جمله دانسیته ظاهری و تخلخل داخلی می‌گردد. پیش‌تیمار اسمزی، محتوای رطوبت اولیه ماده غذایی و محتوای روغن

محصول نهایی را کاهش داده و باعث افزایش دانسیته ظاهری اولیه می‌گردد [۱۰-۱۲]. مطالعات مختلف نشان داده است که به‌طورکلی محتوای رطوبت اولیه بالاتر در نهایت منجر به افزایش میزان روغن جذب‌شده می‌گردد. روغن واردشده به ماده غذایی در حفره‌های ایجادشده در اثر خروج آب قرار می‌گیرد و محتوای رطوبت بالاتر منجر به ایجاد حفره‌های بیشتر در ماده غذایی می‌گردد [۱۳]. در پژوهشی، از چهار نوع محلول اسمزی (شکر، نمک، مالتودکسترین ۱۲ و مالتودکسترین ۲۱) به عنوان پیش‌تیمار قبل از سرخ‌کردن به منظور تولید سیب‌زمینی سرخ‌شده کم‌چرب استفاده شد [۱۰]. نتایج حاصل نشان داد که پیش‌تیمار آبگیری اسمزی، محتوای رطوبت و محتوای روغن سیب‌زمینی سرخ‌شده را کاهش می‌دهد؛ درحالی‌که تخلخل را افزایش داده و منجر به تیره‌شدن رنگ سیب‌زمینی‌های سرخ‌شده می‌گردد. پژوهش مشابه دیگری نشان داد که سیب‌زمینی‌های پیش‌تیمارشده با محلول ترکیبی ۲۰ درصد گلوکز و نمک (با نسبت یک به یک) و سرخ‌شده با روغن کانولا در دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱، ۲، ۵ و ۱۰ دقیقه باعث کاهش جذب روغن شد [۱۱].

ویژگی‌های فیزیکی محصول مانند دانسیته، تخلخل و چروکیدگی طی فرآیند سرخ‌کردن دست‌خوش تغییراتی می‌شوند که می‌توانند روی پدیده انتقال جرم و قابلیت پذیرش محصول نهایی تأثیر داشته باشند. با توجه به وجود رابطه بین دانسیته و محتوای رطوبت [۱۴]، انتظار می‌رود ماده غذایی با دانسیته اولیه بالا جذب روغن کمتری طی فرآیند سرخ‌کردن داشته باشد [۱۵]. از طرف دیگر، تخلخل شکل‌گرفته در محصول حین سرخ‌کردن، نقش مهمی در جذب بعدی روغن بازی می‌کند [۱۶]. رابطه خطی مستقیم بین میزان جذب روغن و تخلخل شکل‌گرفته در محصول سرخ‌شده توسط پژوهش-گران مختلف ارائه شده است [۱۷، ۱۸]. بررسی این ویژگی‌های فیزیکی می‌تواند در ارزیابی تأثیر استفاده از پیش‌تیمارها بر روی ویژگی‌های کمی و کیفی محصول مفید باشد. بدیهی است برای بهینه‌سازی و بهبود تجهیزات و شرایط فرآیند سرخ‌کردن به مدل‌های ریاضی توصیف‌کننده این سیستم‌ها نیاز می‌باشد [۱۹]. این مدل‌ها قادر به پیش‌بینی انتقال جرم (از دست دادن آب و جذب روغن) طی فرآیند سرخ‌کردن می‌باشند.

در پژوهشی، جذب روغن در برش‌های سیب‌زمینی تازه، آنزیم‌بری‌شده و آنزیم‌بری-خشک‌شده طی سرخ‌کردن مورد بررسی قرار گرفته است [۲۰]. در این پژوهش، برای برازش

همچنین بررسی تأثیر این پیش تیمارها بر روی میزان جذب روغن بود.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- مواد: مواد خام مورد استفاده در این پژوهش، سیب زمینی و روغن سرخ کردنی بود. سیب زمینی های خریداری شده از بازار محلی در سردخانه تاریک نگهداری شدند. روغن سرخ کردنی مورد استفاده مخلوطی از روغن های آفتابگردان، سویا و پنبه دانه بود. برای آماده سازی نمونه ها، ابتدا سیب زمینی ها شسته شده و پس از پوست گیری، با استفاده از یک کاتر دستی به قطعاتی به شکل مکعب مستطیل به ابعاد $4 \times 1/2 \times 1/2$ cm (ارتفاع $\times$ عرض $\times$ طول) برش داده شدند. قطعات برش داده شده به منظور حذف نشاسته سطحی با آب مقطر شستشو داده شدند و آب اضافی سطحی نیز توسط یک کاغذ خشک کن گرفته شد.

۲-۲- پیش تیمارها: نمونه ها بر حسب نوع پیش تیمار انجام شده، به گروه های زیر تقسیم شدند (جدول ۱):

جذب روغن از دو مدل تجربی بهره گرفته شد. نتایج نشان داد که در برش های شاهد با کاهش دما از 180°C به 120°C جذب روغن تقریباً ۳۲٪ افزایش می یابد. در برش های آنزیم بری شده و آنزیم بری - خشک شده و سپس سرخ شده، دمای سرخ کردن تأثیر معنی داری بر جذب روغن نداشت. دو مدل مورد استفاده در این بررسی به خوبی مقادیر جذب روغن را برازش کردند. از طرف دیگر، برخی ویژگی های فیزیکی برش های سیب زمینی پیش تیمار شده با محلول اسمزی و آنزیم بری، مثل محتوای رطوبت، محتوای روغن، بافت و رنگ حین سرخ کردن در 120°C ، 140°C و 160°C مورد بررسی قرار گرفته شده است [۲۱]. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که با کاهش دمای سرخ کردن، جذب روغن تا ۲۰٪ افزایش می یابد. غوطه ور کردن چیپس های آنزیم بری شده در محلول نمک، جذب روغن را حدود ۷٪ کاهش داد و موجب تولید چیپس های با رنگ روشن تر در مقایسه با نمونه های شاهد گردید. همچنین، تردی نمونه های آنزیم بری شده و غوطه ور شده در نمک طعام پس از سرخ شدن در دماهای بیان شده افزایش یافت.

هدف از این پژوهش، بررسی جذب روغن در قطعات سیب زمینی پیش تیمار شده با فراصوت و آبیگری اسمزی و

جدول ۱ علائم اختصاری مورد استفاده برای تیمارهای مختلف

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

۱: نمونه های شاهد

۲ و ۳: نمونه های قرار گرفته در معرض اولتراسونیکاسیون با استفاده از دستگاه حمام فراصوت (مدل USD-4R، مجهز به سیستم تنظیم فرکانس و زمان اولتراسونیکاسیون) در فرکانس های ۲۸ و 40 kHz و به مدت زمان ۱۵ دقیقه.

۴ و ۵: نمونه های آبیگری اسمزی شده با استفاده از محلول نمک در دو غلظت ۲ و ۴ درصد وزنی/وزنی در دمای 40°C و نسبت ۱۰:۱ نمونه به محلول اسمزی به مدت ۳ ساعت

۶، ۷، ۸ و ۹: نمونه های حاصل از تلفیق پیش تیمارهای فراصوت و آبیگری اسمزی، که ابتدا در دستگاه حمام فراصوت در معرض فرکانس های ۲۸ و 40 kHz به مدت زمان ۱۵ دقیقه قرار گرفته و سپس با استفاده از محلول های نمک در دو غلظت ۲ و ۴ درصد وزنی/وزنی در دمای 40°C به مدت زمان ۳ ساعت تحت آبیگری اسمزی واقع شدند.

که در آن، $V(t)$: حجم ظاهری نمونه (cm^3)، m : وزن نمونه (g)، m_1 : وزن پیکنومتر خالی و حلال (g)، m_2 : وزن پیکنومتر حاوی نمونه و حلال (g) و ρ : دانسیته تولوئن (g/cm^3) بود.

۲-۴-۴- دانسیته ظاهری: دانسیته ظاهری قطعات سیب زمینی سرخ شده نیز از طریق رابطه زیر حساب شد [۱۵]:

$$\rho = \frac{m}{V(t)} \quad (\text{معادله ۳})$$

که در آن، ρ : دانسیته ظاهری محصول (g/cm^3)، m : جرم محصول (g) و $V(t)$: حجم ظاهری محصول (cm^3) بود.

۲-۴-۵- انرژی فعال سازی: برای محاسبه انرژی فعال سازی و بررسی تأثیر دما بر روی مقدار روغن تعادلی ($O_{\max}$) از رابطه آرنیوس (معادله ۴) استفاده شد [۲۴]:

$$O_{\max} = O_0 \exp(-E_a/RT) \quad (\text{معادله ۴})$$

که در آن، O_0 : پیش فاکتور نمایی، E_a : انرژی فعال سازی (J/mol)، R : ثابت جهانی گازها (8.314 J/mol K) و T : دما (K) بود.

لگاریتم مقدار روغن تعادلی ($O_{\max}$) به صورت تابعی از عکس دمای مطلق، یک رابطه خطی را حاصل نمود و از حاصلضرب شیب این خط در ثابت جهانی گازها، انرژی فعال سازی به دست آمد [۲۴].

۲-۴-۶- ارزیابی حسی: ارزیابی حسی بر روی نمونه های سیب زمینی سرخ شده در دمای 190°C به مدت ۴ دقیقه برای تمام پیش تیمارهای نشان داده شده در جدول ۱، توسط ۱۰ ارزیاب انجام شد. نمونه های سرخ شده پس از اختصاص کد به شکل تصادفی در میان ارزیاب ها توزیع گردید. ویژگی های حسی مورد ارزیابی و الگوی امتیازدهی به شکل زیر بود:

رنگ (زرد تیره: ۱؛ زرد روشن: ۵)، بافت (خیلی نرم: ۱؛ ترد: ۵)، طعم و مزه (طعم و مزه روغنی بسیار زیاد: ۱؛ بسیار کم: ۵)، شکل ظاهری (چروکیدگی خیلی زیاد: ۱؛ چروکیدگی خیلی کم: ۵)، بو (بوی روغنی خیلی کم: ۱؛ بوی روغنی خیلی زیاد: ۵) و ارزیابی کلی (بر اساس فاکتورهای بیان شده)

۲-۵- مدل سازی ریاضی: در این پژوهش، میزان جذب روغن نمونه های سیب زمینی طی فرآیند سرخ کردن عمیق برحسب چهار پارامتر زمان، محتوای رطوبت، میزان چروکیدگی و دانسیته ظاهری مدل سازی شد. مدل های پیشنهادی از طریق برازش داده های حاصل از آزمایش با استفاده از نرم افزار

۲-۳- شرایط سرخ کردن: در این پژوهش از یک سرخ-

کن خانگی (Mulinex مدل F430.R، ساخت فرانسه، مجهز به سیستم تنظیم دما در محدوده 150°C تا 190°C) استفاده شد. سرخ کردن در 3°C دمای 150°C و 170°C و به مدت زمان های ۱، ۲، ۳ و ۴ دقیقه انجام گردید. سرخ کن با ۲ لیتر روغن سرخ کردنی پر شده و بعد از رسیدن روغن به دمای مورد نظر ۷ قطعه سیب زمینی داخل سبد مشبک قرار گرفته و به شکل اتوماتیک تا زمان مورد نظر سرخ شدند. روغن سطحی نمونه های سرخ شده بلافاصله پس از خروج از سرخ کن با کاغذ خشک کن گرفته شد. پس از هر ۲ ساعت سرخ کردن، روغن داخل دستگاه تعویض می گردید. تمام آزمایش ها حداقل ۲ بار تکرار گردید و مقادیر گزارش شده میانگین داده های حاصل از آزمایش ها می باشند.

۲-۴-۲- آزمایش ها

۲-۴-۲-۱- محتوای رطوبت: محتوای رطوبت متوسط سیب زمینی های سرخ شده با خشک کردن در یک آون کنوکسیون (مدل BM120، ۱۲۰ لیتری، ساخت ایران، شرکت فن آزما گستر، هوشمند و مجهز به فن سیرکولاسیون هوا) تا رسیدن به وزن ثابت در دمای 105°C اندازه گیری گردید. محتوای رطوبت نمونه ها بر حسب گرم آب بر گرم ماده خشک بدون روغن گزارش شد.

۲-۴-۲-۲- محتوای روغن: محتوای روغن نمونه ها با بکارگیری روش استخراج سوکسله [۲۲] با استفاده از حلال پترولیوم اتر اندازه گیری شده و بر حسب گرم روغن بر گرم ماده خشک بدون روغن گزارش گردید.

۲-۴-۳- میزان چروکیدگی: میزان چروکیدگی نمونه های سرخ شده با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد [۲۳]:

$$S(t) = \frac{V_0 - V(t)}{V_0} \quad (\text{معادله ۱})$$

که در آن، $S(t)$: درصد چروکیدگی، V_0 : حجم ظاهری نمونه تازه (cm^3) و $V(t)$: حجم ظاهری نمونه پس از سرخ شدن (cm^3) بود. حجم ظاهری نمونه ها با به کارگیری تکنیک جابجایی حلال با استفاده از حلال تولوئن به کمک یک پیکنومتر شیشه ای، اندازه گیری و با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید [۲۳]:

$$V(t) = \frac{m + m_1 - m_2}{\rho} \quad (\text{معادله ۲})$$

دست آمد. ۶ مدل تجربی برای بررسی میزان جذب روغن قطعات سیب زمینی با گذشت زمان (جدول ۲) و ۳ مدل تجربی برای بررسی میزان محتوای روغن نمونه‌ها بر حسب محتوای رطوبت بدون بعد، میزان چروکیدگی و دانسیته ظاهری پیشنهاد

گردید (جدول ۳). ارزیابی مدل‌ها با استفاده از دو معیار ضریب تبیین (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) انجام شد. مدل‌هایی که دارای R^2 بالاتر و RMSE پایین‌تری بودند به عنوان مدل پیشنهادی انتخاب گردیدند.

جدول ۲ مدل‌های مورد استفاده برای بررسی تغییرات محتوای روغن قطعات سیب‌زمینی بر حسب زمان

شماره	مدل ریاضی	مرجع
۱	$O = \frac{at}{t+b}$	تحقیق حاضر
۲	$O = t \exp(at+b)$	تحقیق حاضر
۳	$O = at^b$	تحقیق حاضر
۴	$O = \exp(-at^b)$	تحقیق حاضر
۵	$O = \frac{O_{max} k_y t}{1 + k_y t}$	مویانو و پدرسچی (۲۰۰۶)
۶	$O = O_{max} \cdot (1 - \exp(-at))$	کروکیدا و همکاران (۲۰۰۱a)

جدول ۳ مدل‌های مورد استفاده برای بررسی تغییرات محتوای روغن قطعات سیب‌زمینی بر حسب محتوای رطوبت، میزان چروکیدگی و دانسیته ظاهری طی فرآیند سرخ کردن عمیق

شماره	مدل ریاضی	مرجع
۱	$O = a(1 - M_t^b)$	تحقیق حاضر
۲	$O = S_{(t)}(1 - \exp(aS_{(t)}))$	تحقیق حاضر
۳	$O = ap^2 + bp + c$	تحقیق حاضر

۳- نتایج و بحث

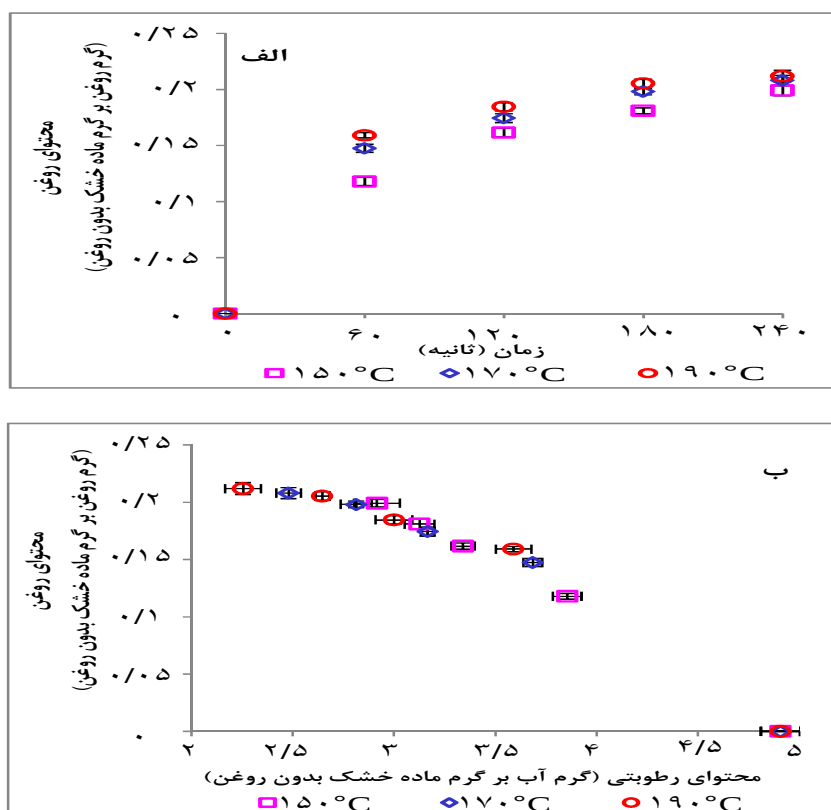
۳-۱- جذب روغن: با افزایش زمان در تمامی دماها میزان جذب روغن افزایش یافت (شکل ۱ الف). هم‌چنین، آهنگ تغییرات محتوای روغن با گذشت زمان کاهش و به مقدار تعادلی محتوای روغن نزدیک شد. از نقطه نظر تأثیر دما بر میزان جذب روغن، با افزایش دما در زمان‌های یکسان، محتوای روغن نمونه‌ها به‌طور غیرمعنی‌دار ($P > 0.05$) افزایش پیدا کرد [۲۶، ۲۷]. با کاهش محتوای رطوبت نمونه‌ها طی

۲-۶- آنالیز آماری: در این پژوهش، ۹ تیمار نشان‌داده-

شده در جدول ۱، در سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰°C و چهار زمان ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ ثانیه در دو تکرار (۲۱۶) $9 \times 3 \times 4 \times 2 =$ سرخ شدند (۲۱۶ تیمار). برای تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها از نرم‌افزار SAS 9.1 و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون Bonferroni [۲۵] در سطح احتمال ۵٪ ($P > 0.05$) بر اساس آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی استفاده شد.

فرآیند سرخ کردن و در تمامی دماها، محتوای روغن آن‌ها افزایش یافت (شکل ۱ ب). از نقطه نظر تأثیر دما بر میزان جذب روغن، در محتوای رطوبت کمتر از ۳ گرم آب بر گرم ماده جامد بدون روغن، افزایش دمای روغن منجر به کاهش میزان جذب روغن گردید [۲۰، ۲۳، ۲۸]. در توجیه این مسأله عنوان شده است که برای رسیدن به محتوای رطوبت یکسان، در دمای پایین سرخ کردن، زمان بیشتری نسبت به دماهای بالاتر

نیاز می‌باشد [۲۸]. همچنین، دماهای پایین سرخ کردن و در نتیجه آن انتقال کمتر رطوبت، منجر به تشکیل پوسته‌ای با ساختار مطلوب برای جذب روغن طی فرآیند سرخ کردن می‌شود. دماهای بالاتر منجر به ایجاد پوسته‌ای سخت و محکم می‌شود که باعث افزایش مقاومت در برابر انتقال جرم و کاهش ضریب انتشار سطحی می‌شود [۲۹].



شکل ۱ محتوای روغن قطعات سیب‌زمینی سرخ‌شده (نمونه شاهد، Control) به عنوان تابعی از زمان (الف) و محتوای رطوبت (ب) طی فرآیند سرخ کردن عمیق در دماهای مختلف

بررسی تأثیر نمونه‌های پیش‌تیمارشده با فراصوت (فرکانس‌های ۲۸ و ۴۰ kHz) و آبیگری اسمزی (با محلول‌های ۲ و ۴ درصد نمک) و سرخ‌شده در دمای ۱۵۰°C بر میزان جذب روغن در زمان‌های یکسان، نشان می‌دهد که نمونه‌های پیش‌تیمارشده با آبیگری اسمزی در محلول ۴٪ دارای کمترین محتوای روغن در تمامی زمان‌های فرآیند می‌باشند (شکل ۲ الف). بین محتوای روغن نمونه‌های شاهد با نمونه‌های پیش‌تیمارشده با امواج فراصوت و همچنین بین محتوای روغن نمونه‌های پیش‌تیمارشده در دو فرکانس ۲۸ و ۴۰ kHz در زمان‌های یکسان، اختلاف معنی‌داری مشاهده

نشد. همچنین، آبیگری اسمزی با هر دو محلول ۲ و ۴ درصد نمک، تأثیر معنی‌داری روی کاهش محتوای روغن سیب‌زمینی‌های سرخ‌شده در مقایسه با نمونه‌های شاهد داشت ($P < 0.05$) ولی اختلاف معنی‌داری میان دو پیش‌تیمارش فوق مشاهده نگردید [۱۰، ۱۱، ۲۱]. کاهش معنی‌دار میزان جذب روغن در اثر استفاده از پیش‌تیمارش آبیگری اسمزی، ناشی از کاهش محتوای رطوبت اولیه نمونه‌ها و تا حدی ژلاتینه شدن مولکول‌های نشاسته در نمونه‌ها پس از سرخ شدن می‌باشد [۳۰]. عامل دیگری که ممکن است باعث کاهش میزان جذب

روغن، اختلاف معنی‌داری با نمونه‌های شاهد داشتند. روند تغییرات محتوای روغن در شکل ۲ (ت) در مقایسه با نمونه‌های شاهد، مشابه روند تغییرات در شکل ۲ (ب) (دمای 170°C) بود. تأثیر پیش‌ تیمارهای تلفیقی در دمای 170°C نیز روی میزان جذب روغن معنی‌دار بود.

هم‌چنین، در مقایسه پیش‌ تیمارها با نمونه‌های شاهد دیده شد که نمونه‌های پیش‌ تیمار شده با فراصوت در فرکانس kHz ۴۰ در تمامی زمان‌های فرآیند که در دمای 190°C سرخ شده‌اند، بیشترین محتوای روغن را دارا می‌باشند (شکل ۲ ث). پیش‌ تیمار فراصوت با فرکانس kHz ۲۸ در زمان‌های ۱ و ۲ دقیقه میزان جذب روغن را کاهش داده ولی با ادامه فرآیند سرخ‌کردن افزایش محتوای روغن در این نمونه‌ها مشاهده می‌شود. اثر پیش‌ تیمار فراصوت (در هر دو فرکانس) در این دما در زمان‌های یکسان معنی‌دار نبود. سایر پیش‌ تیمارهای آورده‌ شده در قسمت‌های ث و ج شکل ۲ دارای روند تغییرات محتوای روغن مشابه آنچه در دماهای ۱۵۰ و 170°C مشاهده شد، می‌باشند. هم‌چنین، لازم به ذکر است که محتوای روغن این نمونه‌ها دارای اختلاف معنی‌داری با نمونه‌های شاهد می‌باشند.

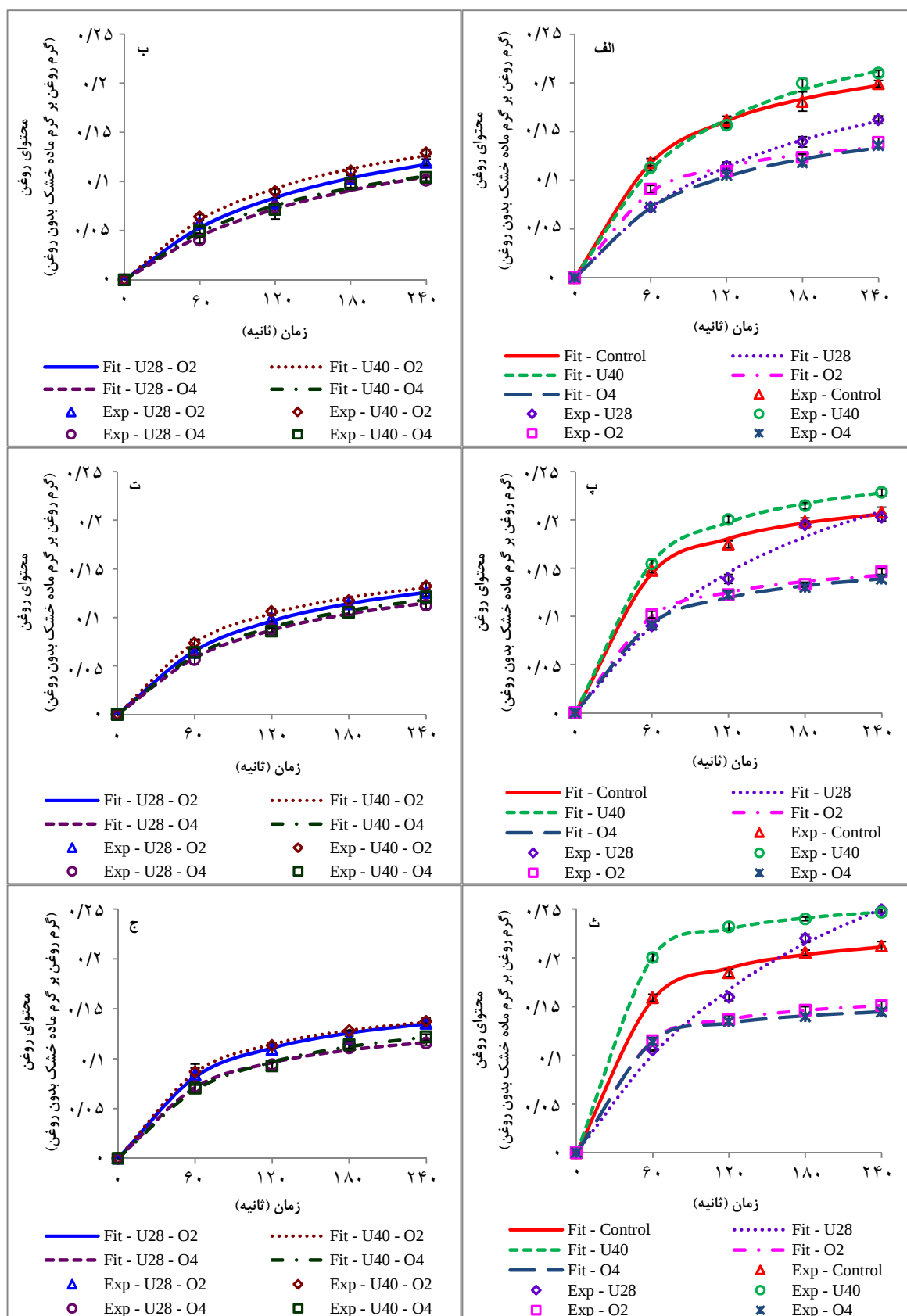
۳-۲- مدل‌سازی جذب روغن: میزان جذب

روغن در قطعات سیب‌زمینی پیش‌ تیمار شده با فراصوت و آبیگری اسمزی با استفاده از روابط ۱ تا ۶ جدول ۲ با گذشت زمان مدل‌سازی شد. مدل‌های پیشنهادی ۱ تا ۴ با داشتن R^2 بالا و RMSE پایین به خوبی توانستند داده‌های آزمایشی را برازش نمایند (جدول ۴). مدل ۱ در زمان‌های کم، رفتار تقریباً خطی وابسته به زمان دارد ولی در زمان‌های طولانی مستقل از زمان می‌باشد؛ یعنی به محتوای روغن تعادلی می‌رسد. مدل‌های ۲، ۳ و ۴ نیز دارای رفتار تقریباً خطی وابسته به زمان در زمان‌های ابتدایی فرآیند می‌باشند. مدل‌های شماره ۵ و ۶ توسط پژوهش‌گران مختلف [۱۰، ۲۰] برای برازش داده‌های آزمایشی محتوای روغن در برش‌های سیب‌زمینی مورد استفاده قرار گرفت. در این پژوهش نیز، این دو مدل به خوبی توانستند داده‌های آزمایشی را برازش نمایند (جدول ۴). شکل ۲ برازش داده‌های حاصل از آزمایش را با مدل شماره ۵ [۲۰] در شرایط مختلف دما و زمان و پیش‌ تیمارهای مختلف نشان می‌دهد.

روغن در نمونه‌های پیش‌ تیمار شده با آبیگری اسمزی شود، نفوذ ماده جامد در شبکه ساختاری نمونه‌ها می‌باشد [۱۰].

از طرفی، تمام پیش‌ تیمارهای تلفیقی با فراصوت (فرکانس‌های ۲۸ و kHz ۴۰) و آبیگری اسمزی (با محلول ۲ و ۴ درصد) منجر به کاهش معنی‌دار محتوای روغن نمونه‌های سرخ‌شده نسبت به نمونه‌های شاهد در زمان‌های یکسان شدند (شکل ۲ ب). بیشترین کاهش در میزان جذب روغن در نمونه‌های پیش‌ تیمار شده با فراصوت (۲۸ و kHz ۴۰) و آبیگری اسمزی در محلول نمک ۴٪ مشاهده شد ولی از نظر آماری اختلاف معنی‌داری در میان پیش‌ تیمارهای تلفیقی مشاهده نگردید. دلیل کاهش بیشتر میزان جذب روغن در اثر تلفیق دو پیش‌ تیمار فراصوت و آبیگری اسمزی را می‌توان به ایجاد کانال‌های میکروسکوپی طی انجام پیش‌ تیمار فراصوت نسبت داد [۷، ۳۱] که به نوبه خود باعث سهولت خروج آب از ماده غذایی طی پیش‌ تیمار اسمزی و کاهش بیشتر محتوای رطوبت اولیه نمونه‌ها می‌شود. علاوه براین، تأثیر هم‌زمان فرآیند اسمز نیز دلیل دیگری در کاهش محتوای روغن نمونه‌ها می‌باشد.

مقایسه اثر پیش‌ تیمارها روی میزان جذب روغن در دمای 170°C و در زمان‌های یکسان نشان داد که پیش‌ تیمار فراصوت در فرکانس kHz ۴۰ باعث افزایش میزان جذب روغن نسبت به نمونه‌های شاهد می‌شود؛ در حالی‌که در نمونه‌های پیش‌ تیمار شده با فراصوت در فرکانس kHz ۲۸، کاهش محتوای روغن نسبت به نمونه‌های شاهد دیده شد (شکل ۲ پ)، ولی این اختلاف از نظر آماری معنی‌دار نبود. کاهش میزان جذب روغن در نمونه‌های پیش‌ تیمار شده با فراصوت در فرکانس kHz ۲۸ را می‌توان به شکل‌گیری کانال‌های میکروسکوپی در ساختار نمونه‌ها نسبت داد که با افزایش شدت خروج رطوبت و ایجاد فشار بخار بالا در اطراف ماده غذایی مانع ورود روغن به داخل این نمونه‌ها طی سرخ‌کردن می‌گردد. در فرکانس‌های حدود kHz ۲۵، انرژی امواج فراصوت توسط محیط واسطه گرفته می‌شود و در نتیجه عمق نفوذ امواج فراصوت در ساختار ماده غذایی جامد کاهش می‌یابد [۸]. بنابراین، استفاده از پیش‌ تیمار فراصوت در فرکانس kHz ۴۰، احتمالاً باعث آسیب به بافت در سطح نمونه‌ها می‌گردد و منجر به افزایش محتوای روغن در این نمونه‌ها می‌شود. هم‌چنین، نمونه‌های پیش‌ تیمار شده با آبیگری اسمزی در محلول ۴ و ۲ درصد نمک به ترتیب با کمترین میزان محتوای



شکل ۲ تغییرات محتوای روغن حاصل از آزمایش (Exp) و برازش شده (Fit) با مدل ۵ 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 بر اساس جدول ۱

جدول ۴ پارامترهای آماری حاصل از مدل‌های ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ جدول ۲، برای تیمارها و دماهای مختلف

مدل ۱											
دما (°C)											
۱۵۰				۱۷۰				۱۹۰			
پیش تیمار	a	b	R ²	RMSE	a	b	R ²	RMSE	a	b	R ²
Control	۰/۲۵۵	۷۰	۰/۹۹	۰/۰۰۱۸	۰/۲۴۰	۳۹/۶	۰/۹۹	۰/۰۰۴۰	۰/۲۳۸	۳۰/۹	۰/۹۹
U28	۰/۲۷۴	۱۶۹/۶	۰/۹۹	۰/۰۰۱۳	۰/۳۷۳	۱۸۸/۷	۰/۹۹	۰/۰۰۸۹	۰/۴۹۶	۲۳۶/۲	۰/۹۹
U40	۰/۳۰۶	۱۰۶/۴	۰/۹۹	۰/۰۰۵۶	۰/۲۷۰	۴۴/۳	۰/۹۹	۰/۰۰۲۱	۰/۲۶۷	۱۹/۸	۰/۹۹
O2	۰/۱۶۳	۵۱/۸	۰/۹۹	۰/۰۰۴۶	۰/۱۶۶	۳۹/۷	۰/۹۹	۰/۰۰۳۳	۰/۱۶۹	۲۸/۱	۱
O4	۰/۱۸۷	۹۶/۶	۰/۹۹	۰/۰۰۲۶	۰/۱۶۶	۴۷/۵	۰/۹۹	۰/۰۰۲۳	۰/۱۵۸	۲۳/۲	۰/۹۹
U28 – O2	۰/۱۹۷	۱۶۲/۷	۰/۹۹	۰/۰۰۴۱	۰/۱۸۱	۱۰۶/۸	۰/۹۹	۰/۰۰۱۶	۰/۱۷۲	۶۶/۷	۰/۹۹
U40 – O2	۰/۱۹۷	۱۳۵	۰/۹۹	۰/۰۰۳۳	۰/۱۷۵	۸۲/۶	۰/۹۹	۰/۰۰۲۳	۰/۱۷۰	۵۸/۶	۰/۹۹
U28 – O4	۰/۱۹۲	۱۹۹/۳	۰/۹۹	۰/۰۰۴۲	۰/۱۶۹	۱۱۴/۹	۰/۹۹	۰/۰۰۲۳	۰/۱۴۷	۶۴/۲	۰/۹۹
U40 – O4	۰/۱۷۵	۱۵۷/۶	۰/۹۹	۰/۰۰۳۶	۰/۱۷۳	۱۱۱/۶	۰/۹۹	۰/۰۰۳۴	۰/۱۶۴	۸۴/۳	۰/۹۹

مدل ۲											
دما (°C)											
۱۵۰				۱۷۰				۱۹۰			
پیش تیمار	a	b	R ²	RMSE	a	b	R ²	RMSE	a	b	R ²
Control	-۰/۰۰۴۵	-۶/۰۴	۰/۹۹	۰/۰۰۸۵	-۰/۰۰۵۳	-۵/۸۱	۰/۹۷	۰/۰۱۴۶	-۰/۰۰۵۷	-۵/۷۱	۰/۹۷
U28	-۰/۰۰۳۰	-۶/۵۸	۰/۹۹	۰/۰۰۳۳	-۰/۰۰۲۹	-۶/۳۵	۰/۹۹	۰/۰۰۷۹	-۰/۰۰۲۴	-۶/۲۷	۰/۹۹
U40	-۰/۰۰۳۸	-۶/۱۲	۰/۹۹	۰/۰۰۷۴	-۰/۰۰۵۳	-۵/۷۲	۰/۹۸	۰/۰۱۱۵	-۰/۰۰۶۳	-۵/۴۳	۰/۹۷
O2	-۰/۰۰۴۸	-۶/۳۵	۰/۹۷	۰/۰۱۰۰	-۰/۰۰۵۳	-۶/۱۸	۰/۹۷	۰/۰۱۱۰	-۰/۰۰۵۸	-۶/۰۰	۰/۹۸
O4	-۰/۰۰۳۹	-۶/۵۵	۰/۹۹	۰/۰۰۵۵	-۰/۰۰۵۲	-۶/۲۳	۰/۹۹	۰/۰۰۶۰	-۰/۰۰۶۱	-۵/۹۹	۰/۹۷
U28 – O2	-۰/۰۰۲۹	-۶/۹۰	۰/۹۸	۰/۰۰۵۵	-۰/۰۰۳۸	-۶/۶۳	۰/۹۹	۰/۰۰۲۳	-۰/۰۰۴۴	-۶/۴۲	۰/۹۷
U40 – O2	-۰/۰۰۳۳	-۶/۷۵	۰/۹۹	۰/۰۰۵۶	-۰/۰۰۴۲	-۶/۵۱	۰/۹۹	۰/۰۰۵۲	-۰/۰۰۴۸	-۶/۳۴	۰/۹۸
U28 – O4	-۰/۰۰۲۹	-۷/۰۴	۰/۹۹	۰/۰۰۲۹	-۰/۰۰۳۸	-۶/۷۵	۰/۹۹	۰/۰۰۰۸	-۰/۰۰۴۶	-۶/۵۳	۰/۹۹
U40 – O4	-۰/۰۰۳۱	-۶/۹۷	۰/۹۹	۰/۰۰۳۸	-۰/۰۰۳۶	-۶/۷۵	۰/۹۸	۰/۰۰۶۰	-۰/۰۰۴۱	-۶/۶۰	۰/۹۹

مدل ۳											
دما (°C)											
۱۵۰				۱۷۰				۱۹۰			
پیش تیمار	a	b	R ²	RMSE	a	b	R ²	RMSE	a	b	R ²
Control	۰/۰۲۷	۰/۳۶۴	۰/۹۹	۰/۰۰۳۹	۰/۰۵۲	۰/۲۵۴	۰/۹۹	۰/۰۰۲۲	۰/۰۶۷	۰/۲۱۲	۰/۹۹
U28	۰/۰۰۷	۰/۵۶۲	۰/۹۹	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۸	۰/۵۸۶	۰/۹۸	۰/۰۱۰۸	۰/۰۰۷	۰/۶۳۲	۰/۹۹
U40	۰/۰۱۷	۰/۴۵۴	۰/۹	۰/۰۰۶۹	۰/۰۵۲	۰/۲۷۱	۰/۹۹	۰/۰۰۵۸	۰/۱۱۱	۰/۱۴۷	۰/۹۹
O2	۰/۰۲۵	۰/۳۰۷	۰/۹۹	۰/۰۰۱۸	۰/۰۳۵	۰/۲۵۶	۰/۹۹	۰/۰۰۱۳	۰/۰۵۲	۰/۱۹۵	۰/۹۹
O4	۰/۰۱۲	۰/۴۳۶	۰/۹۹۷۴	۰/۰۰۳۱	۰/۰۲۹	۰/۲۸۳	۰/۹۹	۰/۰۰۴۶	۰/۰۵۸	۰/۱۶۷	۰/۹۹
U28 – O2	۰/۰۰۵	۰/۵۴۹	۰/۹۹	۰/۰۰۲۱	۰/۰۱۰	۰/۴۵۷	۰/۹۹	۰/۰۰۴۲	۰/۰۱۹	۰/۳۵۷	۰/۹۹
U40 – O2	۰/۰۰۷	۰/۵۰۹	۰/۹۹	۰/۰۰۰۶۲	۰/۰۱۴	۰/۴۰۰	۰/۹۹	۰/۰۰۳۶	۰/۰۲۳	۰/۳۲۷	۰/۹۹
U28 – O4	۰/۰۰۳	۰/۶۰۵	۰/۹۸	۰/۰۰۶۱	۰/۰۰۸	۰/۴۷۳	۰/۹۹	۰/۰۰۴۷	۰/۰۱۷	۰/۳۴۵	۰/۹۹
U40 – O4	۰/۰۰۵	۰/۵۴۳	۰/۹۹	۰/۰۰۴۰	۰/۰۰۹	۰/۴۶۶	۰/۹۹	۰/۰۰۰۹	۰/۰۱۳	۰/۴۰۴	۰/۹۹

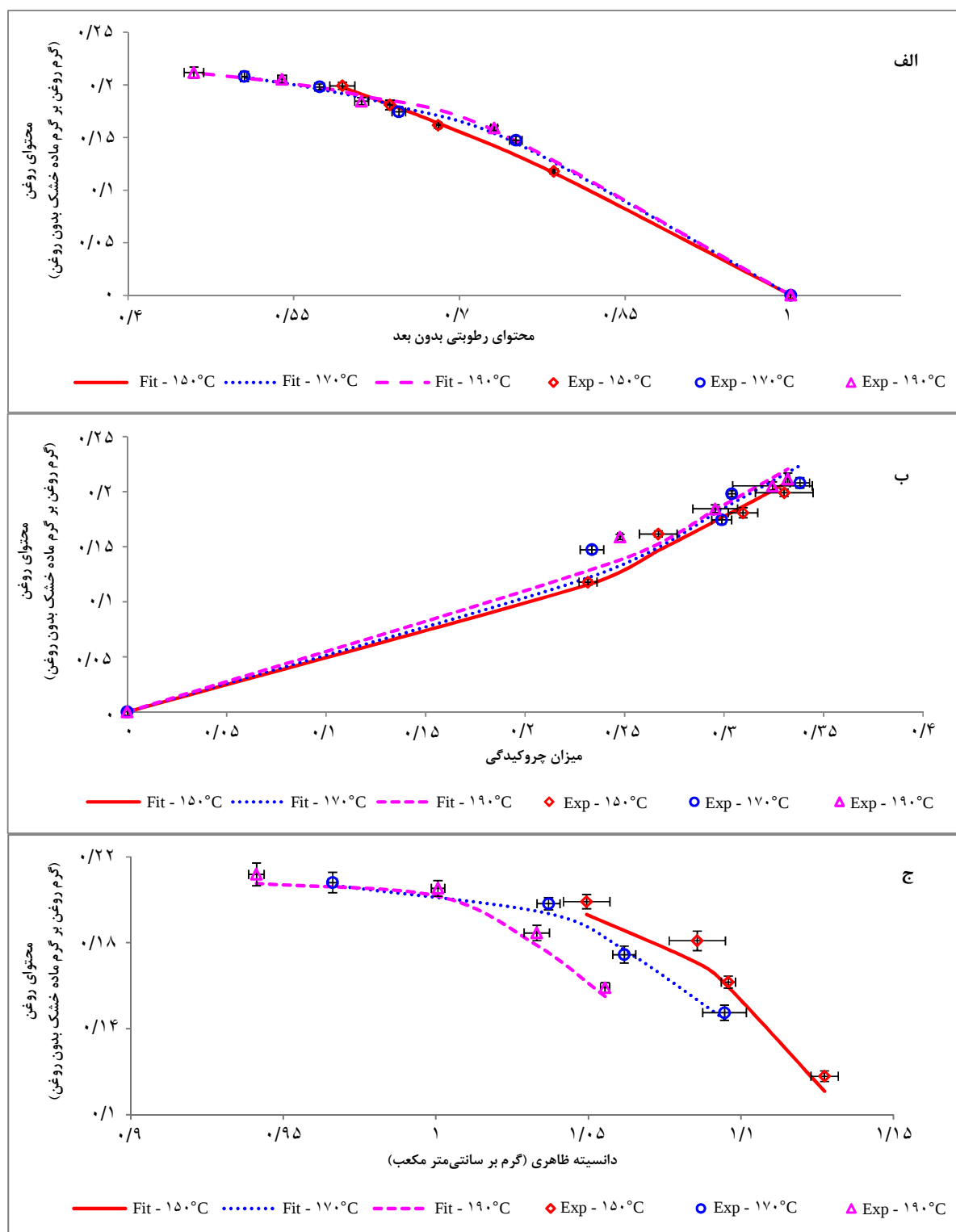
دما (°C)												مدل ۴
۱۹۰				۱۷۰				۱۵۰				
RMSE	R ²	b	a	RMSE	R ²	b	a	RMSE	R ²	b	a	پیش تیمار
۰/۰۰۲۳	۰/۹۹	-۰/۱۲۶	۳/۰۸۱	۰/۰۰۲۱	۰/۹۹	-۰/۱۴۶	۳/۵۰۱	۰/۰۰۲۷	۰/۹۹	-۰/۱۹۹	۴/۷۹۵	Control
۰/۰۰۶۴	۰/۹۹	-۰/۳۶۱	۱۰/۰۶۰	۰/۰۰۹۳	۰/۹۹	-۰/۳۱۲	۸/۶۲۸	۰/۰۰۱۱	۰/۹۹	-۰/۲۶۲	۷/۶۶۵	U28
۰/۰۰۴۰	۰/۹۹	-۰/۰۹۹	۲/۳۹۶	۰/۰۰۴۸	۰/۹۹	-۰/۱۶۶	۳/۶۵۵	۰/۰۰۵۹	۰/۹۹	-۰/۲۵۲	۶/۱۲۴	U40
۰/۰۰۲۲	۰/۹۹	-۰/۰۹۷	۳/۲۰۹	۰/۰۰۱۵	۰/۹۹	-۰/۱۲۱	۳/۷۶۸	۰/۰۰۲۴	۰/۹۹	-۰/۱۳۹	۴/۲۷۸	O2
۰/۰۰۲۸	۰/۹۹	-۰/۰۸۲	۳/۰۲۴	۰/۰۰۴۲	۰/۹۹	-۰/۱۳۳	۴/۰۷۲	۰/۰۰۲۶	۰/۹۹	-۰/۱۹۲	۵/۷۵۱	O4
۰/۰۰۳۴	۰/۹۹	-۰/۱۶۰	۴/۷۹۷	۰/۰۰۳۲	۰/۹۹	-۰/۱۹۷	۶/۰۷۶	۰/۰۰۳۰	۰/۹۹	۰/۲۲۱	۷/۱۹۳	U28 – O2
۰/۰۰۱۳	۰/۹۹	-۰/۱۵۰	۴/۵۰۳	۰/۰۰۳۰	۰/۹۹	-۰/۱۷۷	۵/۳۳۹	۰/۰۰۱۸	۰/۹۹	-۰/۲۱۴	۶/۶۶۵	U40 – O2
۰/۰۰۲۱	۰/۹۹	-۰/۱۴۷	۴/۷۸۶	۰/۰۰۳۸	۰/۹۹	-۰/۱۹۶	۶/۳۱۴	۰/۰۰۴۹	۰/۹۸	-۰/۲۳۷	۸/۲۳۳	U28 – O4
۰/۰۰۲۱	۰/۹۹	-۰/۱۷۲	۵/۳۹۰	۰/۰۰۱۸	۰/۹۹	-۰/۱۹۲	۶/۱۰۹	۰/۰۰۳۷	۰/۹۹	-۰/۲۱۳	۷/۱۹۳	U40 – O4

دما (°C)												مدل ۵
۱۹۰				۱۷۰				۱۵۰				
RMSE	R ²	K _y	O _{max}	RMSE	R ²	K _y	O _{max}	RMSE	R ²	K _y	O _{max}	پیش تیمار
۰/۰۰۳۲	۰/۹۹	۰/۰۳۲	۰/۲۳۸	۰/۰۰۴۰	۰/۹۹	۰/۰۲۵	۰/۲۴۰	۰/۰۰۱۸	۰/۹۹	۰/۰۱۴	۰/۲۵۵	Control
۰/۰۰۶۱	۰/۹۹	۰/۰۰۴	۰/۴۹۶	۰/۰۰۸۹	۰/۹۹	۰/۰۰۵	۰/۳۷۳	۰/۰۰۱۳	۰/۹۹	۰/۰۰۵	۰/۲۷۴	U28
۰/۰۰۱۴	۰/۹۹	۰/۰۵۰	۰/۲۶۷	۰/۰۰۲۱	۰/۹۹	۰/۰۲۲	۰/۲۷۰	۰/۰۰۵۶	۰/۹۹	۰/۰۰۹	۰/۳۰۶	U40
۰/۰۰۰۱	۱	۰/۰۳۵	۰/۱۶۹	۰/۰۰۳۳	۰/۹۹	۰/۰۲۵	۰/۱۶۶	۰/۰۰۴۶	۰/۹۹	۰/۰۱۹	۰/۱۶۳	O2
۰/۰۰۱۲	۰/۹۹	۰/۰۴۲	۰/۱۵۸	۰/۰۰۲۳	۰/۹۹	۰/۰۲۱	۰/۱۶۶	۰/۰۰۲۶	۰/۹۹	۰/۰۱۰	۰/۱۸۷	O4
۰/۰۰۴۹	۰/۹۹	۰/۰۱۴	۰/۱۷۲	۰/۰۰۱۶	۰/۹۹	۰/۰۰۹	۰/۱۸۱	۰/۰۰۴۱	۰/۹۹	۰/۰۰۶	۰/۱۹۷	U28 – O2
۰/۰۰۰۹	۰/۹۹	۰/۰۱۷	۰/۱۷۰	۰/۰۰۲۳	۰/۹۹	۰/۰۱۲	۰/۱۷۵	۰/۰۰۳۳	۰/۹۹	۰/۰۰۷	۰/۱۹۷	U40 – O2
۰/۰۰۱۷	۰/۹۹	۰/۰۱۵	۰/۱۴۷	۰/۰۰۲۳	۰/۹۹	۰/۰۰۸	۰/۱۶۹	۰/۰۰۴۲	۰/۹۹	۰/۰۰۵	۰/۱۹۱	U28 – O4
۰/۰۰۲۷	۰/۹۹	۰/۰۱۱	۰/۱۶۴	۰/۰۰۳۴	۰/۹۹	۰/۰۰۸	۰/۱۷۳	۰/۰۰۳۶	۰/۹۹	۰/۰۰۶	۰/۱۷۵	U40 – O4

دما (°C)												مدل ۶
۱۹۰				۱۷۰				۱۵۰				
RMSE	R ²	a	O _{max}	RMSE	R ²	a	O _{max}	RMSE	R ²	a	O _{max}	پیش تیمار
۰/۰۰۶۷	۰/۹۹	۰/۰۲۲۷	۰/۲۰۷	۰/۰۰۷۶	۰/۹۹	۰/۰۱۹	۰/۲۰۴	۰/۰۰۴۳	۰/۹۹	۰/۰۱۴	۰/۲۰۱	Control
۰/۰۰۶۵	۰/۹۹	۰/۰۰۶	۰/۳۲۷	۰/۰۰۸۴	۰/۹۹	۰/۰۰۷	۰/۲۵۲	۰/۰۰۲۳	۰/۹۹	۰/۰۰۷	۰/۱۸۹	U28
۰/۰۰۳۲	۰/۹۹	۰/۰۰۲	۰/۲۴۳	۰/۰۰۳۷	۰/۹۹	۰/۰۱۸	۰/۲۲۶	۰/۰۰۶۲	۰/۹۹	۰/۰۱۰	۰/۲۲۸	U40
۰/۰۰۲۷	۰/۹۹	۰/۰۲۳	۰/۱۴۸	۰/۰۰۵۸	۰/۹۹	۰/۰۱۹	۰/۱۴۱	۰/۰۰۷۰	۰/۹۸	۰/۰۱۶	۰/۱۳۴	O2
۰/۰۰۱۹	۰/۹۹	۰/۰۲۶	۰/۱۴۲	۰/۰۰۱۹	۰/۹۹	۰/۰۱۷	۰/۱۳۸	۰/۰۰۳۸	۰/۹۹	۰/۰۱۱	۰/۱۴۱	O4
۰/۰۰۶۸	۰/۹۸	۰/۰۱۴	۰/۱۳۷	۰/۰۰۱۱	۰/۹۹	۰/۰۱۰	۰/۱۳۴	۰/۰۰۴۹	۰/۹۹	۰/۰۰۷	۰/۱۳۸	U28 – O2
۰/۰۰۳۲	۰/۹۹	۰/۰۱۵	۰/۱۳۷	۰/۰۰۳۲	۰/۹۹	۰/۰۱۲	۰/۱۳۵	۰/۰۰۴۵	۰/۹۹	۰/۰۰۸	۰/۱۴۲	U40 – O2
۰/۰۰۲۹	۰/۹۹	۰/۰۱۴	۰/۱۱۸	۰/۰۰۱۲	۰/۹۹	۰/۰۱۰	۰/۱۲۴	۰/۰۰۳۵	۰/۹۹	۰/۰۰۷	۰/۱۲۷	U28 – O4
۰/۰۰۳۹	۰/۹۹	۰/۰۱۲	۰/۱۲۷	۰/۰۰۰۴	۰/۹۹	۰/۰۱۰	۰/۱۲۸	۰/۰۰۳۷	۰/۹۹	۰/۰۰۸	۰/۱۲۲	U40 – O4

۰/۹۵ و RMSE ۰/۰۰۳۴، ۰/۰۱۷۰ و ۰/۰۰۸۸ (به ترتیب مدل) به خوبی داده‌های آزمایشی را برازش نمودند (جدول ۳ و شکل ۳ (الف، ب و پ)).

مدل‌های میزان جذب روغن در قطعات سیب‌زمینی پیش‌تیمارشده با فراصوت و آبیگری اسمزی بر حسب سه پارامتر محتوای رطوبت بدون بعد (M_t)، میزان چروکیدگی ($S(t)$) و دانسیته ظاهری (ρ)، با میزان R^2 ۰/۹۸۹، ۰/۸۸ و



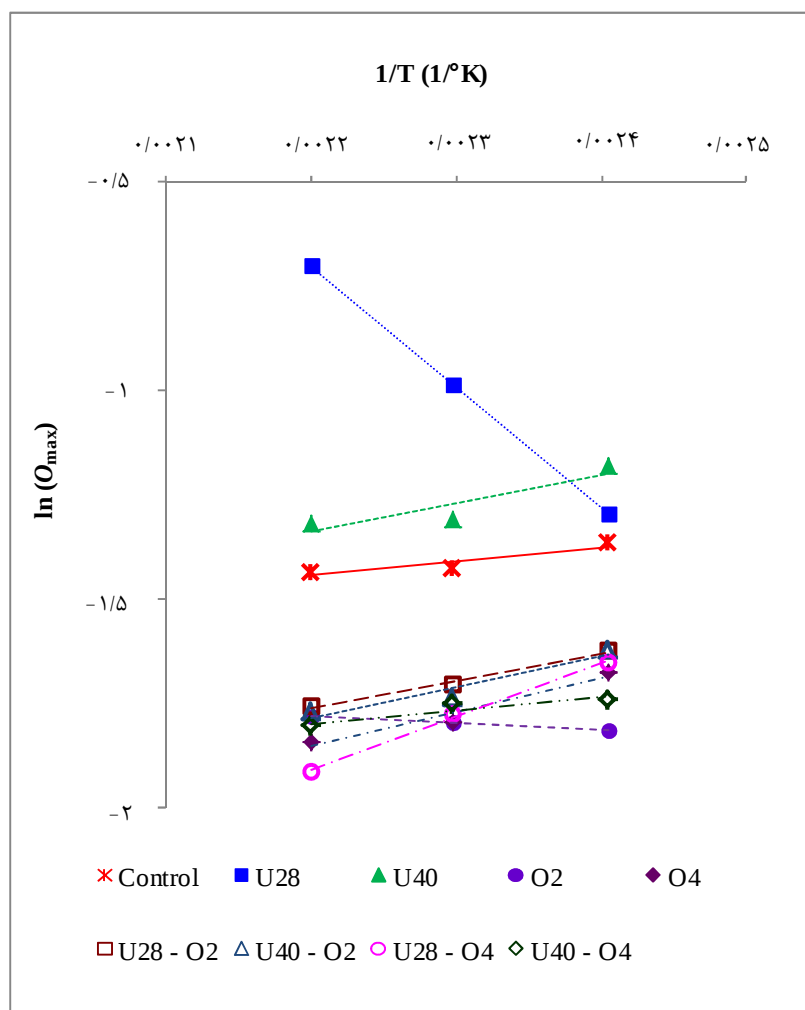
شکل ۳ تغییرات محتوای روغن حاصل از آزمایش (Exp) و برازش‌شده (Fit) با مدل‌های ۱، ۲ و ۳، بر اساس محتوای رطوبت بدون بعد (الف)، میزان چروکیدگی (ب) و دانسیته ظاهری (پ) در دماهای مختلف در نمونه‌های شاهد

۳-۳- تأثیر دما روی $O_{\max}$ و K_y : با توجه به

مقادیر K_y و $O_{\max}$ مربوط به مدل ۵ که در جدول ۴ آمده است، مشاهده می‌شود که در تمامی تیمارها به جز پیش تیمار فراصوت با فرکانس ۲۸ kHz، با افزایش دما، مقدار روغن تعادلی کاهش می‌یابد. این روند با این فرضیه که دماهای سرخ کردن بالا منجر به محتوای روغن تعادلی پایین می‌شود، مطابقت می‌نماید [۲۴]. به استثنای پیش تیمار فراصوت با فرکانس ۲۸ kHz، دماهای بالای سرخ کردن، محتوای روغن تعادلی نمونه‌ها را کاهش داد (شکل ۴). همان گونه که قبلاً نیز توضیح داده شد، با افزایش زمان سرخ کردن به دلیل کاهش محتوای رطوبت و افت فشار بخار، وجود کانال‌های میکروسکوپی در نمونه‌های پیش تیمار شده با فراصوت در فرکانس ۲۸ kHz باعث افزایش میزان جذب روغن و در نهایت محتوای روغن تعادلی بالاتری می‌گردد. افزایش دما به

دلیل بالابردن ضریب انتشار مؤثر رطوبت باعث افت سریع تر فشار بخار می‌شود، به همین دلیل با افزایش دما در این پیش تیمار، محتوای روغن تعادلی افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۴ و مقادیر انرژی فعال سازی محاسبه شده که در جدول ۵ آورده شده است، مشاهده می‌شود که پیش تیمار فراصوت با فرکانس ۲۸ kHz با داشتن $24091/1 \text{ J/mol}$ انرژی فعال سازی، بیشترین تغییرات در میزان جذب روغن را در اثر تغییر دما و پیش تیمار آبگیری اسمزی در محلول ۲٪ نمک با داشتن $1470/5 \text{ J/mol}$ انرژی فعال سازی، کمترین تغییرات در محتوای روغن را نشان می‌دهند.

بدیهی است با به دست آوردن چنین مدل‌هایی (جدول ۲ و ۳)، لزوم انجام آزمایش‌های پرهزینه در شرایط مختلف ذکر شده در فرآیند سرخ کردن، بسیار کاهش پیدا می‌کند و این مسئله، بیانگر اهمیت بالای چنین مدل‌هایی می‌باشد.



شکل ۴ تغییرات محتوای روغن تعادلی در برابر دما در نمونه‌های شاهد و پیش تیمار شده

جدول ۵ مقادیر انرژی فعال سازی و پیش فاکتور نمایی مربوط به رابطه آرنیوس (رابطه ۴)

پیش تیمار	R^2	E_a (J/mol)	O_0 (g oil/g dry solid oil free)
Control	۰/۸۵	-۲۸۰۲/۷	۰/۱۱۴۱
U28	۱	۲۴۰۹۴/۱	۰/۰۳۸
U40	۰/۸۳	-۵۶۷۲/۳	۰/۰۶۰۲
O2	۱	۱۴۷۰/۵	۰/۲۴۶۵
O4	۰/۹۵	-۶۷۵۴/۵	۰/۰۲۷۰
U28 - O2	۰/۹۹	-۵۵۶۴/۹	۰/۰۴۰۳
U40 - O2	۰/۹۱	-۶۱۶۳/۴	۰/۰۳۳۷
U28 - O4	۱	-۱۰۶۸۶/۹	۰/۰۰۹۱
U40 - O4	۰/۸۷	-۲۵۳۶/۶	۰/۰۸۵۴

نشان داد که آبگیری اسمزی و پیش تیمارهای تلفیقی به طور معنی داری موجب بهبود ویژگی های حسی این نمونه ها در مقایسه با نمونه های شاهد می گردند. این نتیجه را می توان ناشی از تأثیر این پیش تیمارها روی بافت، رنگ و طعم قطعات سیب زمینی سرخ شده دانست.

۴- نتیجه گیری

میزان جذب روغن با افزایش دمای سرخ کردن از ۱۵۰ تا ۱۹۰°C، در زمان های یکسان در تمامی موارد افزایش یافت ولی این افزایش از لحاظ آماری معنی دار نبود. پیش تیمار فراصوت با فرکانس ۲۸ kHz برخلاف فرکانس ۴۰ kHz، توانست در کاهش جذب روغن قطعات سیب زمینی طی سرخ کردن عمیق مؤثر واقع شود، هر چند این تأثیر از لحاظ آماری معنی دار نبود ($P > 0.05$). استفاده از پیش تیمارهای آبگیری اسمزی با هر دو محلول ۲ و ۴ درصد نمک و ترکیب آن ها با پیش تیمار فراصوت با کاهش محتوای رطوبت اولیه، باعث کاهش محتوای روغن این نمونه ها نسبت به نمونه شاهد گردید. هر ۶ مدل تجربی پیشنهاد شده به خوبی توانستند داده های محتوای روغن نمونه های سرخ شده را بر حسب زمان با ضریب همبستگی بالا برازش نمایند. هم چنین، پیش تیمار آبگیری اسمزی و تلفیق آن با پیش تیمار فراصوت باعث بهبود ویژگی های حسی نمونه های سرخ شده در مقایسه با نمونه شاهد گردید. در مجموع، می توان نتیجه گیری نمود که استفاده از پیش تیمار فراصوت جهت کاهش میزان جذب روغن در قطعات سیب زمینی سرخ شده و هم چنین، مدل های ارائه شده در پژوهش حاضر می توانند در پژوهش های آتی مدنظر قرار گیرند.

۳-۴- ارزیابی حسی: نتایج حاصل از ارزیابی حسی

قطعات سیب زمینی شاهد و پیش تیمار شده طبق جدول ۱ و سرخ شده در دمای ۱۹۰°C به مدت ۴ دقیقه در جدول ۶ آمده است. آبگیری اسمزی با محلول ۴٪ نمک و پیش تیمارهای تلفیقی به استثنای پیش تیمار فراصوت با فرکانس ۲۸ kHz همراه با آبگیری اسمزی با محلول ۲٪ نمک، تأثیر معنی داری روی بهبود بافت نمونه ها داشتند. تردی محصول سرخ شده با ویژگی الاستیکی ارتباط داده شده است [۳۲]. افزایش تردی نمونه های پیش تیمار شده با آبگیری اسمزی را به تأثیر این پیش تیمار روی کاهش محتوای رطوبت و در نتیجه کاهش ضریب الاستیسیته می توان نسبت داد [۳۳]. در ارتباط با رنگ سیب زمینی های سرخ شده، نتایج نشان داد که آبگیری اسمزی و پیش تیمارهای تلفیقی توانستند به شکل معنی داری موجب کاهش رنگ نمونه ها شده و امتیاز بالاتری نسبت به نمونه های دیگر توسط ارزیاب ها به دست آورند [۱۰، ۲۱]. نحوه تأثیر و مکانیسم بهبود رنگ با استفاده از آبگیری اسمزی با محلول نمک نیاز به مطالعات دقیق تر دارد [۳۴]. از لحاظ شکل ظاهری، تفاوت معنی داری بین نمونه های سرخ شده شاهد و پیش تیمار شده وجود نداشت. در ارتباط با طعم قطعات سیب زمینی سرخ شده، آبگیری اسمزی و پیش تیمارهای تلفیقی توانستند به شکل معنی داری موجب بهبود طعم در این نمونه ها نسبت به نمونه شاهد گردند. دلیل این امر را می توان به جذب ذرات نمک طی آبگیری اسمزی نسبت داد که باعث پسندیده تر شدن این نمونه ها توسط ارزیاب ها گردیده است. از لحاظ بو نیز، تفاوت معنی داری بین نمونه های سرخ شده مختلف مشاهده نگردید. در ارتباط با ارزیابی کلی نمونه های سرخ شده نیز نتایج

جدول ۶ امتیازات ارزیابی‌ها به فاکتورهای مختلف مربوط به قطعات سیب‌زمینی پیش‌تیمارشده (بر اساس جدول ۱) و سرخ‌شده در دمای ۱۹۰°C به مدت ۴ دقیقه

فاکتورهای مورد استفاده در آزمون ارزیابی حسی						تیمار
ارزیابی کلی	بو	طعم و مزه	شکل ظاهری	رنگ	بافت	
۴/۲۷ ^b ± ۰/۰۶	۴/۷۳ ^a ± ۰/۱۵	۳/۵۰ ^b ± ۰/۱۰	۳/۸۰ ^a ± ۰/۱۰	۳/۸۰ ^b ± ۰/۱۰	۴/۳۳ ^b ± ۰/۱۵	Control
۴/۳۰ ^b ± ۰/۱۰	۴/۸۰ ^a ± ۰/۱۰	۳/۳۳ ^b ± ۰/۱۲	۳/۹۰ ^a ± ۰/۱۰	۳/۷۳ ^b ± ۰/۰۶	۴/۶۰ ^{ab} ± ۰/۱۰	U28
۴/۳۰ ^b ± ۰/۱۰	۴/۸۰ ^a ± ۰/۱۰	۳/۴۰ ^b ± ۰/۱۰	۳/۹۰ ^a ± ۰/۱۰	۳/۷۳ ^b ± ۰/۰۶	۴/۷۰ ^{ab} ± ۰/۱۰	U40
۴/۷۳ ^a ± ۰/۰۶	۴/۷۰ ^a ± ۰/۱۰	۴/۶۳ ^a ± ۰/۱۵	۳/۷۳ ^a ± ۰/۰۶	۴/۸۳ ^a ± ۰/۰۶	۴/۶۳ ^{ab} ± ۰/۱۵	O2
۴/۸۰ ^a ± ۰/۱۰	۴/۷۳ ^a ± ۰/۰۶	۴/۸۰ ^a ± ۰/۱۰	۳/۷۰ ^a ± ۰/۱۰	۴/۸۳ ^a ± ۰/۰۶	۴/۹۰ ^a ± ۰/۰۰	O4
۴/۷۳ ^a ± ۰/۱۲	۴/۷۰ ^a ± ۰/۱۰	۴/۷۰ ^a ± ۰/۱۰	۳/۸۰ ^a ± ۰/۱۰	۴/۷۷ ^a ± ۰/۱۲	۴/۷۰ ^{ab} ± ۰/۱۰	U28 – O2
۴/۷۳ ^a ± ۰/۱۵	۴/۷۳ ^a ± ۰/۱۲	۴/۷۰ ^a ± ۰/۱۰	۳/۷۳ ^a ± ۰/۱۲	۴/۷۳ ^a ± ۰/۰۶	۴/۷۳ ^a ± ۰/۰۶	U40 – O2
۴/۸۰ ^a ± ۰/۱۰	۴/۷۰ ^a ± ۰/۱۰	۴/۷۳ ^a ± ۰/۰۶	۳/۷۰ ^a ± ۰/۱۰	۴/۸۰ ^a ± ۰/۱۰	۴/۸۳ ^a ± ۰/۱۲	U28 – O4
۴/۸۰ ^a ± ۰/۱۰	۴/۷۳ ^a ± ۰/۰۶	۴/۸۰ ^a ± ۰/۱۰	۳/۷۰ ^a ± ۰/۱۰	۴/۸۰ ^a ± ۰/۱۰	۴/۸۳ ^a ± ۰/۰۶	U40 – O4

- حروف لاتین مشابه در یک ستون نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۹۵٪ ($P < ۰/۰۵$) می‌باشد.

۵- منابع

- Fernandes, F.A.N. 2010. Ultrasound assisted osmotic dehydration of strawberries: effect of pretreatment time and ultrasonic frequency. *Drying Technology*. 28(2): 294–303.
- [9] 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.
- [10] Krokida, M.K., Oreopoulou, V., Maroulis, Z.B. and Marinos-Kouris, D. 2001a. Effect of osmotic dehydration pretreatment on quality of French fries. *Journal of Food Engineering*. 49(4): 339–345.
- [11] Ikoko, J. and Kuri, V. 2007. Osmotic pretreatment effect on fat intake reduction and eating quality of deep-fried plantain. *Food Chemistry*. 102(2): 523–531.
- [12] Mai Tran, T.T., Dong Chen, X. and Southern, C. 2007. Reducing oil content of fried potato crisps considerably using a 'sweet' pre-treatment technique. *Journal of Food Engineering*. 80, 719–726.
- [13] Gamble, M. H., Rice, P. and Selman, J. D. 1987. Relationship between oil uptake and moisture loss during frying of potato slices from c.v. Record UK Tubers. *International Journal of Food Science and Technology*. 22(3): 233–241.
- [14] Paul, S. and Mittal, G.S. 1997. Regulating the use of degraded oil/fat in deep-fat/oil food frying. *Critical Review on Food Sciences and Nutrition*. 37, 635–662.
- [1] Mir-Bel, J., Oria, R. and Salvador, M.L. 2009. Influence of the vacuum break conditions on oil uptake during potato post-frying cooling. *Journal of Food Engineering*. 95(3): 416–422.
- [2] Garayo, J. and Moriera, R. 2002. Vacuum frying of potatoes chips. *Journal of Food Engineering*. 55, 181–191.
- [3] Bunger, A., Moyano, P. and Rioseco, V. 2003. NaCl soaking treatment for improving the quality of french-fried potatoes. *Food Research International*. 36(2): 161–166.
- [4] Moyano, P.C., Ríoeseo, V.K. and González, P.A. 2002. Kinetics of crust color changes during deep-fat frying of impregnated French fries. *Journal of Food Engineering*. 54(3): 249–255.
- [5] Mellema, M. 2003. Mechanism and reduction of fat uptake in deep-fat fried foods. *Trends in Food Science and Technology*. 14(9): 364–373.
- [6] Fernandes, F.A.N. and Rodrigues, S. 2007. Use of ultrasound as pretreatment for drying of fruits: Dehydration of banana. *Journ of Food Engineering*. 82(2): 261–267.
- [7] 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.
- [8] Garcia-Noguera, J., Oliveiray, F.I.P., Gallao, M.I., Weller, C.L., Rodrigues, S. and

- [25] Steel, R.G.D., Torrie, J.H. and Dickey, D.A. 1996. Principles and procedures of statistics: a biometrical approach. New York: McGraw-Hill.
- [26] Vitrac, O., Dufour, D., Trystram, G. and RaoultWack, A.L. 2002. Character-ization of heat and mass transfer during deep-fat frying and its effect on cassava chip quality. *Journal of Food Engineering*. 53, 161–176.
- [27] Durán, M., Pedreschi, F., Moyano, P.C. and Troncoso, E. 2007. Oil partition in pre-treated potato slices during frying and cooling. *Journal of Food Engineering*. 81(1): 257–265.
- [28] Baumann, B. and Escher, F. 1995. Mass and heat transfer during deepfat frying of potato slices. Rate of drying and oil uptake. *Lebensm.Wiss. Technol.* 28, 395–403.
- [29] Moyano, P. and Berna, F. 2002. Modelling water loss during frying of potato strings: Effect of solute impregnation. *Drying Technol.* 20, 1303–1318.
- [30] Moriera, R.G., Palau, J., Sweat, V.E. and Sun, X. 1995. Thermal and physical properties of tortilla chips as a function of frying time. *J. Food Process. Pres.* 19, 175–189.
- [31] Cárcel, J.A., Benedito, J., Rosselló, C. and Mulet, A. 2007. Influence of ultrasound intensity on mass transfer in apple immersed in a sucrose solution. *Journal of Food Engineering*. 78, 472–479.
- [32] Krokida, M. K., Oreopoulou, V., Maroulis, Z. B. and Marinos-Kouris, D. 2001b. Effect of pre-treatment on viscoelastic behaviour of potato strips. *Journal of Food Engineering*. 50, 11–17.
- [33] 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, 661–668.
- [34] Santis, N., Mendoza, F., Moyano, P.C., Pedreschi, F. and Dejmek, P. 2007. Soaking in a NaCl solution produce paler potato chips. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*. 40(2): 307-312
- [15] Ziaiifar, A.M., 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(8): 1410-1423.
- [16] Saguy, I.S., Gremaud, E., Gloria, H. and Turesky, R.J. 1997. Distribution and quantification of oil uptake in French fries utilizing a radiolabeled ^{14}C palmitic acid. *J. Agric. Food Chem.* 45, 4286–4289.
- [17] Pinthus, E.J., Weinberg, P. and Saguy, I.S. 1995. Oil uptake in deep fat frying as affected by porosity. *J. Food Sci.* 60, 767–769.
- [18] Moriera, R.G. and Barrufet, M.A. 1998. A new approach to describe oil absorption in fried foods: A simulation study. *J. Food Eng.* 35, 1–22.
- [19] Baik, O.D., and Mittal, G.S. 2005. Heat and moisture transfer and shrinkage simulation of deep fat tofu frying. *Food Research International*. 38(2): 183–191.
- [20] Moyano, P.C. and Pedreschi, F. 2006. Kinetics of oil uptake during frying of potato slices: effect of pre-treatments. *LWT-Food Science and Technology*. 39(3): 285–291.
- [21] Pedreschi, F., Moyano, P., Santis, N. and Pedreschi, R. 2007. Physical properties of pre-treated potato chips. *Journal of Food Engineering*. 79(4): 1474–1482.
- [22] AOAC, 1994. Association of official analytical chemists. *Official Methods of Analysis*, AOAC Method. 945.16, Arlington, VA.
- [23] Ziaiifar, 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.
- [24] Troncoso, E. and Pedreschi, F. 2009. Modeling water loss and oil uptake during vacuum frying of pre-treated potato slices. *Lwt - Food Science and Technology*, 42, 1164-1173.

Investigation of oil uptake during potato strips deep-fat frying pretreated with ultrasound and osmotic dehydration

Abedpour, L .¹, Dehghannya, J.^{2*}

1. M. Sc. Graduate, 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

(Received: 92/10/23 Accepted: 93/4/8)

By changing consumers' tendency to use low-fat healthy food products, reducing oil content in fried foods by maintaining sensory quality is inevitable. In this study, ultrasound pretreatment at two frequencies of 20 and 40 kHz for 15 minutes as well as osmotic dehydration pretreatment using 2 and 4% salt solution concentration for 3 hours applied on the potato pieces and then deep-fat frying was performed at 150, 170 and 190°C for 60, 120, 180 and 240 seconds. The effect of the pretreatments on oil uptake and sensory characteristics were analyzed. To optimize and improve process equipment and frying conditions, oil uptake in potato pieces pretreated with ultrasound and osmotic dehydration was also investigated. Oil uptake in the fried potato pieces was significantly decreased ($P < 0.05$) using osmotic dehydration pretreatment. The use of ultrasound together with osmotic dehydration, led to further reduction in oil uptake compared to the other samples. Proposed experimental models in this study fitted well with experimental data. In addition, osmotic dehydration and its combination with ultrasound pretreatment improved sensory characteristics of the fried potato slices.

Keywords: Deep-fat frying, Ultrasound, Osmotic dehydration, Oil uptake

* Corresponding Author E-Mail Address: J_dehghannya@tabrizu.ac.ir