

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_dehghannya@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 پژوهش‌گران 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 برآزش

هم‌چنین بررسی تأثیر این پیش‌تیمارها بر روی میزان جذب روغن بود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد: مواد خام مورد استفاده در این پژوهش، سیب‌زمینی و روغن سرخ‌کردنی بود. سیب‌زمینی‌های خریداری‌شده از بازار محلی در سردخانه تاریک نگهداری شدند. روغن سرخ‌کردنی مورد استفاده مخلوطی از روغن‌های آفتابگردان، سویا و پنبه دانه بود. برای آماده‌سازی نمونه‌ها، ابتدا سیب‌زمینی‌ها شسته شده و پس از پوست‌گیری، 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 برش‌داده‌شده به منظور حذف نشاسته سطحی با آب مقطر شستشو داده شدند و آب اضافی سطحی نیز توسط یک کاغذ خشک‌کن گرفته شد.

۲-۲- پیش‌تیمارها: نمونه‌ها بر حسب نوع پیش‌تیمار انجام‌شده، به گروه‌های زیر تقسیم شدند (جدول ۱):

جذب روغن از دو مدل تجربی بهره گرفته شد. نتایج نشان داد که در برش‌های شاهد با کاهش دما از 180°C به 120°C جذب روغن تقریباً ۳۲٪ افزایش می‌یابد. در برش‌های آنزیم‌بری‌شده و آنزیم‌بری- خشک‌شده و سپس سرخ‌شده، دمای سرخ‌کردن تأثیر معنی‌داری بر جذب روغن نداشت. دو مدل مورد استفاده در این بررسی به خوبی مقادیر جذب روغن را برازش کردند. از طرف دیگر، برخی ویژگی‌های فیزیکی برش‌های سیب‌زمینی پیش‌تیمارشده با محلول اسمزی و آنزیم‌بری، مثل محتوای رطوبت، محتوای روغن، بافت و رنگ حین سرخ‌کردن در 120°C ، 140°C و 180°C مورد بررسی قرار گرفته شده است [۲۱]. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که با کاهش دمای سرخ‌کردن، جذب روغن تا ۲۰٪ افزایش می‌یابد. غوطه‌ورکردن چیپس‌های آنزیم‌بری‌شده در محلول نمک، جذب روغن را حدود ۷٪ کاهش داد و موجب تولید چیپس‌های با رنگ روشن‌تر در مقایسه با نمونه‌های شاهد گردید. هم‌چنین، تردی نمونه‌های آنزیم‌بری‌شده و غوطه‌ورشده در نمک‌طعام پس از سرخ‌شدن در دماهای بیان‌شده افزایش یافت.

هدف از این پژوهش، بررسی جذب روغن در قطعات سیب‌زمینی پیش‌تیمارشده با فراصوت و آبگیری اسمزی و

جدول ۱ علائم اختصاری مورد استفاده برای تیمارهای مختلف

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

۱: نمونه‌های شاهد

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

۴ و ۵: نمونه‌های آبگیری اسمزی‌شده 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: نمونه‌های حاصل از تلفیق پیش‌تیمارهای فراصوت و آبگیری اسمزی، که ابتدا در دستگاه حمام فراصوت در معرض فرکانس‌های ۲۸ و ۴۰ kHz به مدت زمان ۱۵ دقیقه قرار گرفته و سپس با استفاده از محلول‌های نمک در دو غلظت ۲ و ۴ درصد وزنی/وزنی در دمای 40°C به مدت زمان ۳ ساعت تحت آبگیری 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 سیب‌زمینی سرخ‌شده 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 فعال‌سازی: برای محاسبه انرژی فعال‌سازی 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 فعال‌سازی (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 فعال‌سازی به دست آمد [۲۴].

۲-۴-۶- ارزیابی حسی: ارزیابی حسی بر روی نمونه‌های سیب‌زمینی سرخ‌شده در دمای 190°C به مدت ۴ دقیقه برای تمام پیش‌تیمارهای نشان‌داده‌شده در جدول ۱، توسط ۱۰ ارزیاب انجام شد. نمونه‌های سرخ‌شده پس از اختصاص کد به شکل تصادفی در میان ارزیاب‌ها توزیع گردید. ویژگی‌های 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 بیان‌شده)

۲-۴-۵- مدل‌سازی ریاضی: در این پژوهش، میزان جذب روغن نمونه‌های سیب‌زمینی طی فرآیند سرخ کردن عمیق برحسب چهار پارامتر زمان، محتوای رطوبت، میزان چروکیدگی و دانسیته ظاهری مدل‌سازی شد. مدل‌های پیشنهادی از طریق برازش داده‌های حاصل از آزمایش با استفاده از نرم‌افزار

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 ، 170 و 190°C و به مدت زمان‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ دقیقه انجام گردید. سرخ‌کن با ۲ لیتر روغن سرخ‌کردنی 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. روغن سطحی نمونه‌های سرخ‌شده بلافاصله پس از خروج از سرخ‌کن با کاغذ خشک‌کن گرفته شد. پس از هر ۲ ساعت سرخ کردن، روغن داخل دستگاه تعویض می‌گردید. تمام آزمایش‌ها حداقل ۲ بار تکرار گردید و مقادیر گزارش‌شده میانگین داده‌های حاصل از آزمایش‌ها می‌باشند.

۲-۴-۴- آزمایش‌ها

۲-۴-۱- محتوای رطوبت: محتوای رطوبت متوسط سیب‌زمینی‌های سرخ‌شده 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 اندازه‌گیری گردید. محتوای رطوبت نمونه‌ها بر حسب گرم آب بر گرم ماده خشک بدون روغن گزارش شد.

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

۲-۴-۳- میزان چروکیدگی: میزان چروکیدگی نمونه‌های سرخ‌شده 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 نمونه‌ها با به‌کارگیری تکنیک جابجایی حلال با استفاده از حلال تولوئن به کمک یک پیکنومتر شیشه‌ای، اندازه‌گیری و با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید [۲۳]:

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

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.

MATLAB (Version 7.12.0.635, R2011a) به دست آمد. ۶ مدل تجربی برای بررسی میزان جذب روغن قطعات سیب‌زمینی 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

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	$O = a\rho^2 + b\rho + c$	تحقیق حاضر

۳- نتایج و بحث

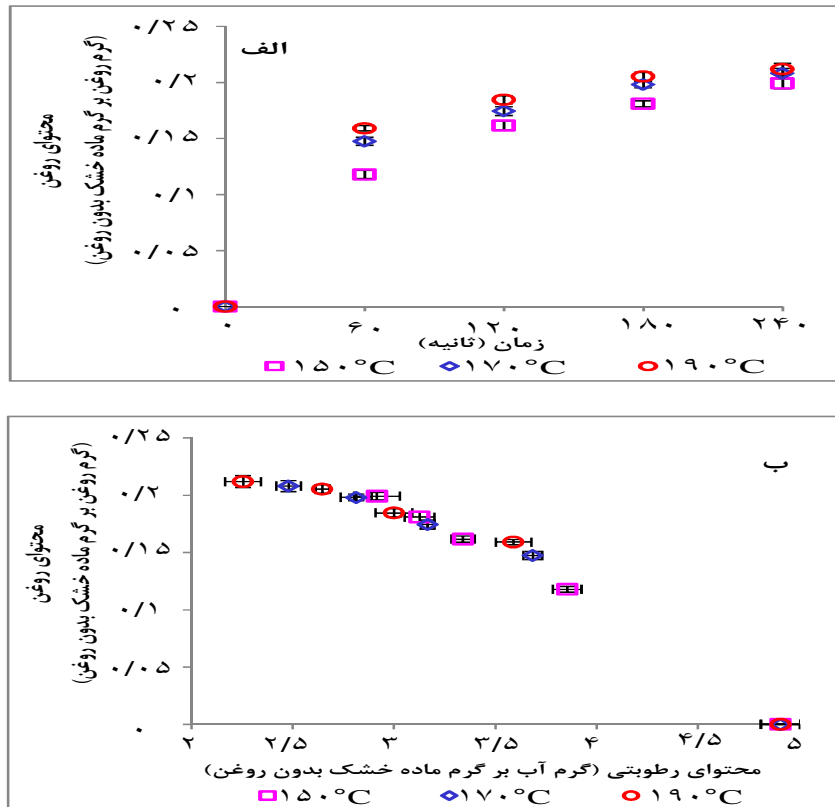
۳-۱- جذب روغن: با افزایش زمان در تمامی دماها میزان جذب روغن افزایش یافت (شکل ۱ الف). هم‌چنین، آهنگ تغییرات محتوای روغن با گذشت زمان کاهش و به مقدار تعادلی محتوای روغن نزدیک شد. از نقطه نظر تأثیر دما بر میزان جذب روغن، با افزایش دما در زمان‌های یکسان، محتوای روغن نمونه‌ها به‌طور غیرمعنی‌دار ($P > 0/05$) 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.

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].

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



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

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 پیش‌ تیمار فوق مشاهده نگردید [۱۰، ۱۱، ۲۱]. کاهش معنی‌دار میزان جذب روغن در اثر استفاده از پیش‌ تیمار 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

بررسی تأثیر نمونه‌های پیش‌ تیمار شده با فراصوت (فرکانس‌های ۲۸ و ۴۰ kHz) و آبیگری اسمزی (با محلول‌های ۲ و ۴ درصد نمک) و سرخ‌شده در دمای 150°C بر میزان جذب روغن در زمان‌های یکسان، نشان می‌دهد که نمونه‌های پیش‌ تیمار شده 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 پیش‌ تیمار شده با امواج فراصوت و همچنین بین محتوای روغن نمونه‌های پیش‌ تیمار شده در دو فرکانس ۲۸ و ۴۰ kHz در زمان‌های یکسان، اختلاف معنی‌داری مشاهده

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 150°C) بود. تأثیر پیش‌تیمارهای تلفیقی در دمای 170°C نیز روی میزان جذب روغن معنی‌دار بود.

هم‌چنین، در مقایسه پیش‌تیمارها با نمونه‌های شاهد دیده شد که نمونه‌های پیش‌تیمار 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). پیش‌تیمار 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 پیش‌تیمار فراصوت (در هر دو فرکانس) در این دما در زمان‌های یکسان معنی‌دار نبود. سایر پیش‌تیمارهای آورده شده در قسمت‌های ث و ج شکل ۲ دارای روند تغییرات محتوای روغن مشابه آنچه در دماهای 150°C و 170°C مشاهده شد، می‌باشند. هم‌چنین، لازم به ذکر است که محتوای روغن این نمونه‌ها دارای اختلاف معنی‌داری با نمونه‌های شاهد می‌باشند.

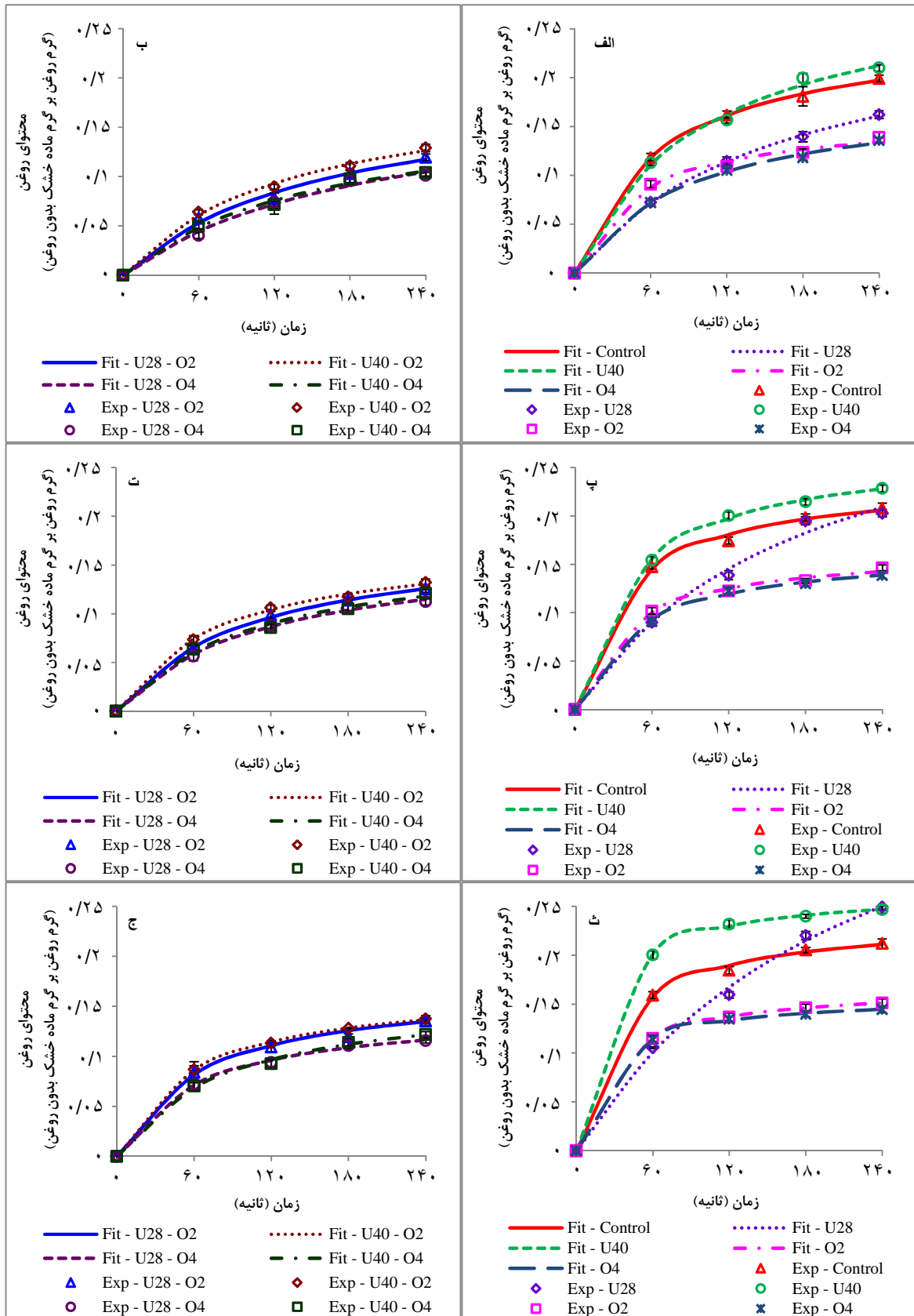
۳-۲- مدل‌سازی جذب روغن: میزان جذب

روغن در قطعات سیب‌زمینی پیش‌تیمار 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 پیش‌تیمارهای مختلف نشان می‌دهد.

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

از طرفی، تمام پیش‌تیمارهای 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 پیش‌تیمار شده با فراصوت (۲۸ و kHz ۴۰) و آبیگری اسمزی در محلول نمک ۴٪ مشاهده شد ولی از نظر آماری اختلاف معنی‌داری در میان پیش‌تیمارهای تلفیقی مشاهده نگردید. دلیل کاهش بیشتر میزان جذب روغن در اثر تلفیق دو پیش‌تیمار فراصوت و آبیگری اسمزی را می‌توان به ایجاد کانال‌های میکروسکوپی طی انجام پیش‌تیمار فراصوت نسبت داد [۷، ۳۱] که به نوبه خود باعث سهولت خروج آب از ماده غذایی طی پیش‌تیمار اسمزی و کاهش بیشتر محتوای رطوبت اولیه نمونه‌ها می‌شود. علاوه بر این، تأثیر هم‌زمان فرآیند اسمز نیز دلیل دیگری در کاهش محتوای روغن نمونه‌ها می‌باشد.

مقایسه اثر پیش‌تیمارها روی میزان جذب روغن در دمای 170°C و در زمان‌های یکسان نشان داد که پیش‌تیمار فراصوت در فرکانس kHz ۴۰ باعث افزایش میزان جذب روغن نسبت به نمونه‌های شاهد می‌شود؛ در حالی‌که در نمونه‌های پیش‌تیمار 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 پیش‌تیمار 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 پیش‌تیمار 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 پیش‌تیمار 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، ۶ و جدول ۲، برای تیمارها و دماهای مختلف

دما (°C)												مدل ۱
۱۹۰				۱۷۰				۱۵۰				
RMSE	R ²	b	a	RMSE	R ²	b	a	RMSE	R ²	b	a	
۰/۰۰۳۲	۰/۹۹	۳۰/۹	۰/۲۳۸	۰/۰۰۴۰	۰/۹۹	۳۹/۶	۰/۲۴۰	۰/۰۰۱۸	۰/۹۹	۷۰	۰/۲۵۵	پیش تیمار Control
۰/۰۰۶۱	۰/۹۹	۲۳۶/۲	۰/۴۹۶	۰/۰۰۸۹	۰/۹۹	۱۸۸/۷	۰/۳۷۳	۰/۰۰۱۳	۰/۹۹	۱۶۹/۶	۰/۲۷۴	U28
۰/۰۰۱۴	۰/۹۹	۱۹/۸	۰/۲۶۷	۰/۰۰۲۱	۰/۹۹	۴۴/۳	۰/۲۷۰	۰/۰۰۵۶	۰/۹۹	۱۰۶/۴	۰/۳۰۶	U40
۰/۰۰۰۲	۱	۲۸/۱	۰/۱۶۹	۰/۰۰۳۳	۰/۹۹	۳۹/۷	۰/۱۶۶	۰/۰۰۴۶	۰/۹۹	۵۱/۸	۰/۱۶۳	O2
۰/۰۰۱۲	۰/۹۹	۲۳/۲	۰/۱۵۸	۰/۰۰۲۳	۰/۹۹	۴۷/۵	۰/۱۶۶	۰/۰۰۲۶	۰/۹۹	۹۶/۶	۰/۱۸۷	O4
۰/۰۰۴۹	۰/۹۹	۶۶/۷	۰/۱۷۲	۰/۰۰۱۶	۰/۹۹	۱۰۶/۸	۰/۱۸۱	۰/۰۰۴۱	۰/۹۹	۱۶۲/۷	۰/۱۹۷	U28 – O2
۰/۰۰۰۹	۰/۹۹	۵۸/۶	۰/۱۷۰	۰/۰۰۲۳	۰/۹۹	۸۲/۶	۰/۱۷۵	۰/۰۰۳۳	۰/۹۹	۱۳۵	۰/۱۹۷	U40 – O2
۰/۰۰۱۷	۰/۹۹	۶۴/۲	۰/۱۴۷	۰/۰۰۲۳	۰/۹۹	۱۱۴/۹	۰/۱۶۹	۰/۰۰۴۲	۰/۹۹	۱۹۹/۳	۰/۱۹۲	U28 – O4
۰/۰۰۲۷	۰/۹۹	۸۴/۳	۰/۱۶۴	۰/۰۰۳۴	۰/۹۹	۱۱۱/۶	۰/۱۷۳	۰/۰۰۳۶	۰/۹۹	۱۵۷/۶	۰/۱۷۵	U40 – O4

دما (°C)												مدل ۲
۱۹۰				۱۷۰				۱۵۰				
RMSE	R ²	b	a	RMSE	R ²	b	a	RMSE	R ²	b	a	
۰/۰۱۵۶	۰/۹۷	-۵/۷۱	-۰/۰۰۵۷	۰/۰۱۴۶	۰/۹۷	-۵/۸۱	-۰/۰۰۵۳	۰/۰۰۸۵	۰/۹۹	-۶/۰۴	-۰/۰۰۴۵	پیش تیمار Control
۰/۰۰۶۹	۰/۹۹	-۶/۲۷	-۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۷۹	۰/۹۹	-۶/۳۵	-۰/۰۰۲۹	۰/۰۰۳۳	۰/۹۹	-۶/۵۸	-۰/۰۰۳۰	U28
۰/۰۱۸۶	۰/۹۷	-۵/۴۳	-۰/۰۰۶۳	۰/۰۱۱۵	۰/۹۸	-۵/۷۲	-۰/۰۰۵۳	۰/۰۰۷۴	۰/۹۹	-۶/۱۲	-۰/۰۰۳۸	U40
۰/۰۱۰۱	۰/۹۸	-۶/۰۰	-۰/۰۰۵۸	۰/۰۱۱۰	۰/۹۷	-۶/۱۸	-۰/۰۰۵۳	۰/۰۱۰۰	۰/۹۷	-۶/۳۵	-۰/۰۰۴۸	O2
۰/۰۱۰۲	۰/۹۷	-۵/۹۹	-۰/۰۰۶۱	۰/۰۰۶۰	۰/۹۹	-۶/۲۳	-۰/۰۰۵۲	۰/۰۰۵۵	۰/۹۹	-۶/۵۵	-۰/۰۰۳۹	O4
۰/۰۰۹۶	۰/۹۷	-۶/۴۲	-۰/۰۰۴۴	۰/۰۰۲۳	۰/۹۹	-۶/۶۳	-۰/۰۰۳۸	۰/۰۰۵۵	۰/۹۸	-۶/۹۰	-۰/۰۰۲۹	U28 – O2
۰/۰۰۶۶	۰/۹۸	-۶/۳۴	-۰/۰۰۴۸	۰/۰۰۵۲	۰/۹۹	-۶/۵۱	-۰/۰۰۴۲	۰/۰۰۵۶	۰/۹۹	-۶/۷۵	-۰/۰۰۳۳	U40 – O2
۰/۰۰۵۱	۰/۹۹	-۶/۵۳	-۰/۰۰۴۶	۰/۰۰۰۸	۰/۹۹	-۶/۷۵	-۰/۰۰۳۸	۰/۰۰۲۹	۰/۹۹	-۷/۰۴	-۰/۰۰۲۹	U28 – O4
۰/۰۰۵۵	۰/۹۹	-۶/۶۰	-۰/۰۰۴۱	۰/۰۰۶۰	۰/۹۸	-۶/۷۵	-۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۳۸	۰/۹۹	-۶/۹۷	-۰/۰۰۳۱	U40 – O4

دما (°C)												مدل ۳
۱۹۰				۱۷۰				۱۵۰				
RMSE	R ²	b	a	RMSE	R ²	b	a	RMSE	R ²	b	a	
۰/۰۰۲۵	۰/۹۹	۰/۲۱۲	۰/۰۶۷	۰/۰۰۲۲	۰/۹۹	۰/۲۵۴	۰/۰۵۲	۰/۰۰۳۹	۰/۹۹	۰/۳۶۴	۰/۰۲۷	پیش تیمار Control
۰/۰۰۶۰	۰/۹۹	۰/۶۳۲	۰/۰۰۷	۰/۰۱۰۸	۰/۹۸	۰/۵۸۶	۰/۰۰۸	۰/۰۰۲۷	۰/۹۹	۰/۵۶۲	۰/۰۰۷	U28
۰/۰۰۴۴	۰/۹۹	۰/۱۴۷	۰/۱۱۱	۰/۰۰۵۸	۰/۹۹	۰/۲۷۱	۰/۰۵۲	۰/۰۰۶۹	۰/۹	۰/۴۵۴	۰/۰۱۷	U40
۰/۰۰۲۵	۰/۹۹	۰/۱۹۵	۰/۰۵۲	۰/۰۰۱۳	۰/۹۹	۰/۲۵۶	۰/۰۳۵	۰/۰۰۱۸	۰/۹۹	۰/۳۰۷	۰/۰۲۵	O2
۰/۰۰۳۰	۰/۹۹	۰/۱۶۷	۰/۰۵۸	۰/۰۰۴۶	۰/۹۹	۰/۲۸۳	۰/۰۲۹	۰/۰۰۳۱	۰/۹۹۹۷۴	۰/۴۳۶	۰/۰۱۲	O4
۰/۰۰۳۱	۰/۹۹	۰/۳۵۷	۰/۰۱۹	۰/۰۰۴۲	۰/۹۹	۰/۴۵۷	۰/۰۱۰	۰/۰۰۲۱	۰/۹۹	۰/۵۴۹	۰/۰۰۵	U28 – O2
۰/۰۰۲۰	۰/۹۹	۰/۳۲۷	۰/۰۲۳	۰/۰۰۳۶	۰/۹۹	۰/۴۰۰	۰/۰۱۴	۰/۰۰۰۶۲	۰/۹۹	۰/۵۰۹	۰/۰۰۷	U40 – O2
۰/۰۰۲۶	۰/۹۹	۰/۳۴۵	۰/۰۱۷	۰/۰۰۴۷	۰/۹۹	۰/۴۷۳	۰/۰۰۸	۰/۰۰۶۱	۰/۹۸	۰/۶۰۵	۰/۰۰۳	U28 – O4
۰/۰۰۲۴	۰/۹۹	۰/۴۰۴	۰/۰۱۳	۰/۰۰۰۹	۰/۹۹	۰/۴۶۶	۰/۰۰۹	۰/۰۰۴۰	۰/۹۹	۰/۵۴۳	۰/۰۰۵	U40 – O4

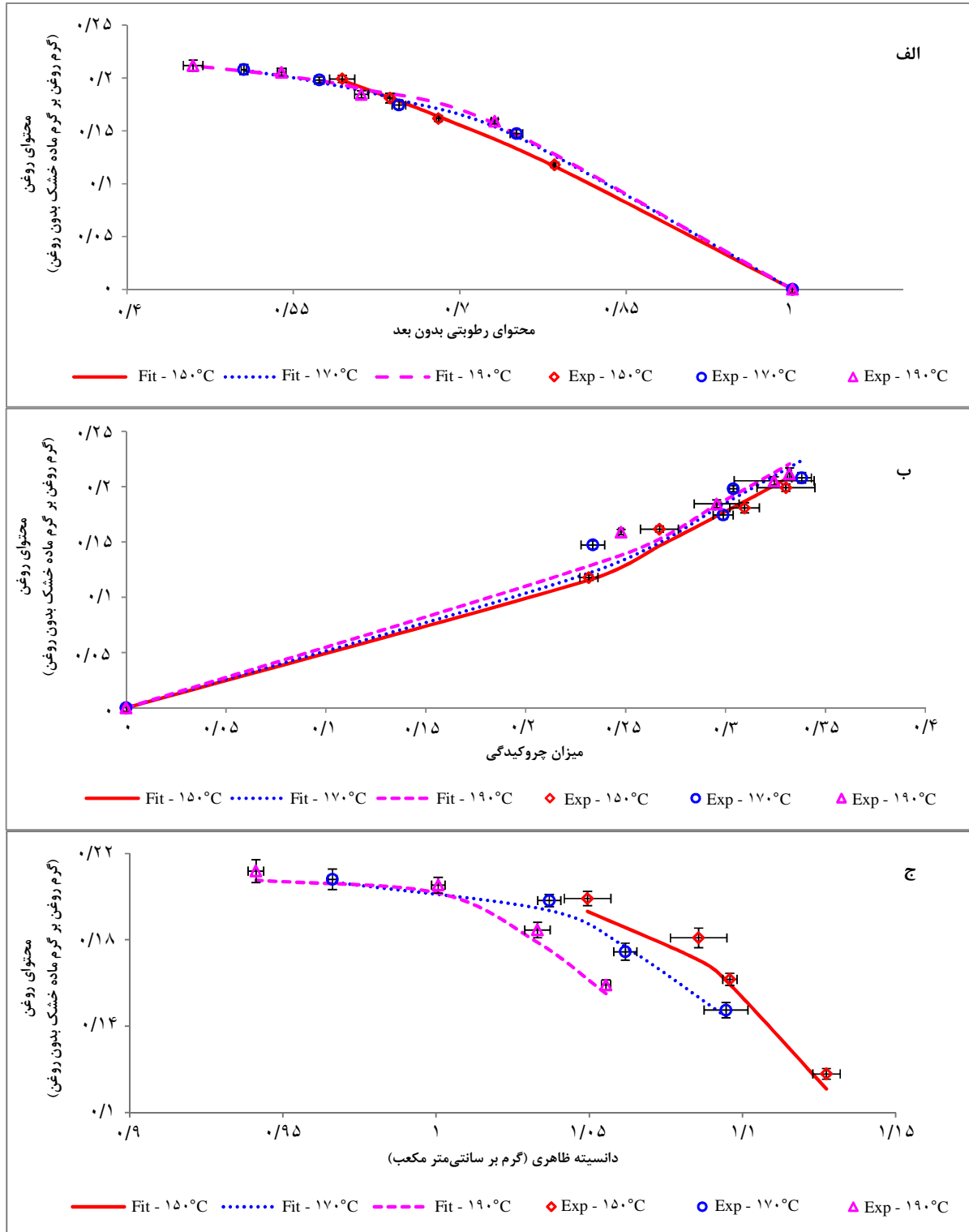
دما (°C)												مدل ۴
۱۹۰				۱۷۰				۱۵۰				
RMSE	R ²	b	a	RMSE	R ²	b	a	RMSE	R ²	b	a	
۰/۰۰۲۳	۰/۹۹	-۰/۱۲۶	۳/۰۸۱	۰/۰۰۲۱	۰/۹۹	-۰/۱۴۶	۳/۰۵۱	۰/۰۰۲۷	۰/۹۹	-۰/۱۹۹	۴/۷۹۵	Control
۰/۰۰۶۴	۰/۹۹	-۰/۳۶۱	۱۰/۰۶۰	۰/۰۰۹۳	۰/۹۹	-۰/۳۱۲	۸/۶۲۸	۰/۰۰۱۱	۰/۹۹	-۰/۲۶۲	۷/۶۶۵	U28
۰/۰۰۴۰	۰/۹۹	-۰/۰۹۹	۲/۳۹۶	۰/۰۰۴۸	۰/۹۹	-۰/۱۶۶	۳/۶۵۵	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}	
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}	
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

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 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)).

شکل ۳ تغییرات محتوای روغن حاصل از آزمایش (Exp) و برازش شده (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



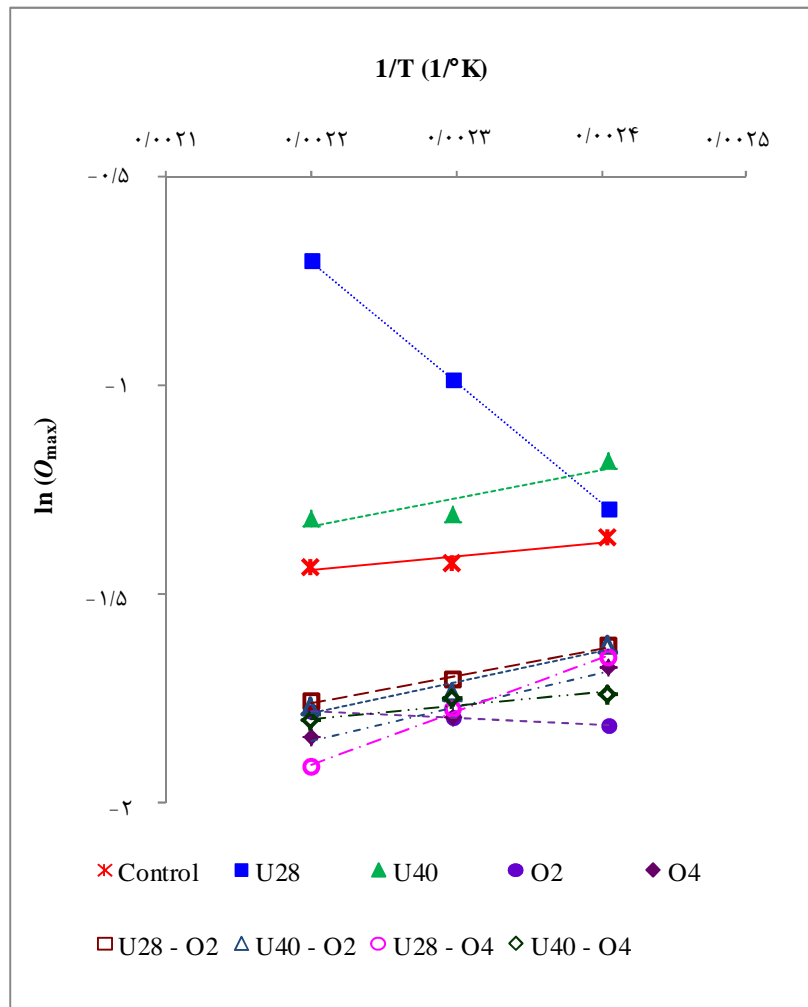
شکل ۳ تغییرات محتوای روغن حاصل از آزمایش (Exp) و برازش شده (Fit) با مدل‌های ۱، ۲ و ۳ بر اساس محتوای رطوبت بدون بعد (الف)، میزان چروکیدگی (ب) و دانسیته ظاهری (پ) در دماهای مختلف در نمونه‌های شاهد

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

مقادیر O_{max} و K_y 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). همان‌گونه 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 سریع‌تر 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 فعال‌سازی 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 فعال‌سازی، بیشترین تغییرات در میزان جذب روغن را در اثر تغییر دما و پیش تیمار آبیگری اسمزی در محلول ۲٪ نمک با داشتن $1470/5 \text{ J/mol}$ انرژی فعال‌سازی، 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 فعال‌سازی و پیش‌فاکتور نمایی مربوط به رابطه آرنیوس (رابطه ۴)

O_0 (g oil/g dry solid oil free)	E_a (J/mol)	R^2	پیش‌تیمار
۰/۱۱۴۱	-۲۸۰۲/۷	۰/۸۵	Control
۰/۰۰۳۸	۲۴۰۹۴/۱	۱	U28
۰/۰۶۰۲	-۵۶۷۲/۳	۰/۸۳	U40
۰/۲۴۶۵	۱۴۷۰/۵	۱	O2
۰/۰۲۷۰	-۶۷۵۴/۵	۰/۹۵	O4
۰/۰۴۰۳	-۵۵۶۴/۹	۰/۹۹	U28 - O2
۰/۰۳۳۷	-۶۱۶۳/۴	۰/۹۱	U40 - O2
۰/۰۰۹۱	-۱۰۶۸۶/۹	۱	U28 - O4
۰/۰۸۵۴	-۲۵۳۶/۶	۰/۸۷	U40 - O4

نشان داد که آبگیری اسمزی و پیش‌تیمارهای تلفیقی به‌طور معنی‌داری موجب بهبود ویژگی‌های حسی این نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌های شاهد می‌گردند. این نتیجه را می‌توان ناشی از تأثیر این پیش‌تیمارها روی بافت، رنگ و طعم قطعات سیب‌زمینی سرخ‌شده دانست.

۴- نتیجه‌گیری

میزان جذب روغن با افزایش دمای سرخ‌کردن از ۱۵۰ تا ۱۹۰°C، در زمان‌های یکسان در تمامی موارد افزایش یافت ولی این افزایش از لحاظ آماری معنی‌دار نبود. پیش‌تیمار فراصوت با فرکانس ۲۸ kHz برخلاف فرکانس ۴۰ kHz، توانست در کاهش جذب روغن قطعات سیب‌زمینی طی سرخ‌کردن عمیق مؤثر واقع شود، هر چند این تأثیر از لحاظ آماری معنی‌دار نبود ($P > 0.05$). استفاده از پیش‌تیمارهای آبگیری اسمزی با هر دو محلول ۲ و ۴ درصد نمک و ترکیب آن‌ها با پیش‌تیمار فراصوت با کاهش محتوای رطوبت اولیه، باعث کاهش محتوای روغن این نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد گردید. هر ۶ مدل تجربی پیشنهادشده به خوبی توانستند داده‌های محتوای روغن نمونه‌های سرخ‌شده را بر حسب زمان با ضریب همبستگی بالا برازش نمایند. هم‌چنین، پیش‌تیمار آبگیری اسمزی و تلفیق آن با پیش‌تیمار فراصوت باعث بهبود ویژگی‌های حسی نمونه‌های سرخ‌شده در مقایسه با نمونه شاهد گردید. در مجموع، می‌توان نتیجه‌گیری نمود که استفاده از پیش‌تیمار فراصوت جهت کاهش میزان جذب روغن در قطعات سیب‌زمینی سرخ‌شده و هم‌چنین، مدل‌های ارائه‌شده در پژوهش حاضر می‌توانند در پژوهش‌های آتی مدنظر قرار گیرند.

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

قطعات سیب‌زمینی شاهد و پیش‌تیمارشده طبق جدول ۱ و سرخ‌شده در دمای ۱۹۰°C به مدت ۴ دقیقه در جدول ۶ آمده است. آبگیری اسمزی با محلول ۴٪ نمک و پیش‌تیمارهای تلفیقی به استثنای پیش‌تیمار فراصوت با فرکانس ۲۸ kHz همراه با آبگیری اسمزی با محلول ۲٪ نمک، تأثیر معنی‌داری روی بهبود بافت نمونه‌ها داشتند. تردی محصول سرخ‌شده با ویژگی الاستیکی ارتباط داده شده است [۳۲]. افزایش تردی نمونه‌های پیش‌تیمارشده با آبگیری اسمزی را به تأثیر این پیش‌تیمار روی کاهش محتوای رطوبت و در نتیجه کاهش ضریب الاستیسیته می‌توان نسبت داد [۳۳]. در ارتباط با رنگ سیب‌زمینی‌های سرخ‌شده، نتایج نشان داد که آبگیری اسمزی و پیش‌تیمارهای تلفیقی توانستند به شکل معنی‌داری موجب کاهش رنگ نمونه‌ها شده و امتیاز بالاتری نسبت به نمونه‌های دیگر توسط ارزیاب‌ها به‌دست آورند [۱۰، ۲۱]. نحوه تأثیر و مکانیسم بهبود رنگ با استفاده از آبگیری اسمزی با محلول نمک نیاز به مطالعات دقیق‌تر دارد [۳۴]. از لحاظ شکل ظاهری، تفاوت معنی‌داری بین نمونه‌های سرخ‌شده شاهد و پیش‌تیمارشده وجود نداشت. در ارتباط با طعم قطعات سیب‌زمینی سرخ‌شده، آبگیری اسمزی و پیش‌تیمارهای تلفیقی توانستند به شکل معنی‌داری موجب بهبود طعم در این نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد گردند. دلیل این امر را می‌توان به جذب ذرات نمک طی آبگیری اسمزی نسبت داد که باعث پسندیده-تر شدن این نمونه‌ها توسط ارزیاب‌ها گردیده است. از لحاظ بو نیز، تفاوت معنی‌داری بین نمونه‌های سرخ‌شده مختلف مشاهده نگردید. در ارتباط با ارزیابی کلی نمونه‌های سرخ‌شده نیز نتایج

جدول ۶ امتیازات ارزیابی‌ها به فاکتورهای مختلف مربوط به قطعات سیب‌زمینی پیش‌تیمارشده (بر اساس جدول ۱) و سرخ‌شده در دمای 190°C به مدت ۴ دقیقه

فاکتورهای مورد استفاده در آزمون ارزیابی حسی						
تیمار	بافت	رنگ	شکل ظاهری	طعم و مزه	بو	ارزیابی کلی
Control	$4/33^b \pm 0/15$	$3/80^b \pm 0/10$	$3/80^a \pm 0/10$	$3/50^b \pm 0/10$	$4/73^a \pm 0/15$	$4/27^b \pm 0/06$
U28	$4/60^{ab} \pm 0/10$	$3/73^b \pm 0/06$	$3/90^a \pm 0/10$	$3/33^b \pm 0/12$	$4/80^a \pm 0/10$	$4/30^b \pm 0/10$
U40	$4/70^{ab} \pm 0/10$	$3/73^b \pm 0/06$	$3/90^a \pm 0/10$	$3/40^b \pm 0/10$	$4/80^a \pm 0/10$	$4/30^b \pm 0/10$
O2	$4/63^{ab} \pm 0/15$	$4/83^a \pm 0/06$	$3/73^a \pm 0/06$	$4/63^a \pm 0/15$	$4/70^a \pm 0/10$	$4/73^a \pm 0/06$
O4	$4/90^a \pm 0/00$	$4/83^a \pm 0/06$	$3/70^a \pm 0/10$	$4/80^a \pm 0/10$	$4/73^a \pm 0/06$	$4/80^a \pm 0/10$
U28 – O2	$4/70^{ab} \pm 0/10$	$4/77^a \pm 0/12$	$3/80^a \pm 0/10$	$4/70^a \pm 0/10$	$4/70^a \pm 0/10$	$4/73^a \pm 0/12$
U40 – O2	$4/73^a \pm 0/06$	$4/73^a \pm 0/06$	$3/73^a \pm 0/12$	$4/70^a \pm 0/10$	$4/73^a \pm 0/12$	$4/73^a \pm 0/15$
U28 – O4	$4/83^a \pm 0/12$	$4/80^a \pm 0/10$	$3/70^a \pm 0/10$	$4/73^a \pm 0/06$	$4/70^a \pm 0/10$	$4/80^a \pm 0/10$
U40 – O4	$4/83^a \pm 0/06$	$4/80^a \pm 0/10$	$3/70^a \pm 0/10$	$4/80^a \pm 0/10$	$4/73^a \pm 0/06$	$4/80^a \pm 0/10$

- حروف لاتین مشابه در یک ستون نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۹۵٪ ($P < 0/05$) 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 Marinou-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] Bungler, 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] Ziaifar, 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 ¹⁴C 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] 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.
- [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