

تأثیر آنزیم‌بری و هیدروکلوئیدهای خوراکی روی کاهش جذب روغن طی سرخ کردن سیب‌زمینی قطعه شده

سجاد علیزاده زیناب^۱، جلال دهقان نیا^{۲*} و محمود صوتی خیابانی^۲
۱. دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز
۲. استادیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

(تاریخ دریافت: ۹۲/۴/۲۰، تاریخ پذیرش: ۹۲/۶/۱۹)

چکیده

هدف از این تحقیق، بررسی تأثیر پیش تیمارهای آنزیم‌بری و هیدروکلوئیدهای خوراکی بر میزان جذب روغن و همچنین مدل‌سازی جذب روغن طی فرآیند سرخ کردن عمیق سیب‌زمینی قطعه‌شده بود. در این پژوهش، برای پیش تیمار آنزیم‌بری از دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ و ۳ دقیقه و برای پیش تیمار هیدروکلوئیدهای خوراکی از کربوکسی متیل سلولز با غلظت ۰/۳ درصد و پکتین با غلظت‌های ۱ و ۳ درصد استفاده شد. سپس، قطعات سیب‌زمینی در دماها و زمان‌های مختلف سرخ شدند. هیدروکلوئیدهای کربوکسی متیل سلولز و پکتین در هر دو غلظت، باعث کاهش جذب روغن شدند؛ ولی اعمال پیش تیمار آنزیم‌بری به مدت ۱ و ۳ دقیقه باعث افزایش جذب روغن شد. همچنین، تلفیق این پیش تیمارها نیز جذب روغن را کاهش داد. در این مطالعه، از دو مدل موجود در کارهای تحقیقاتی قبلی و چهار مدل پیشنهادی برای برازش داده‌ها استفاده شد. مدل‌های به دست آمده دارای بیش‌ترین مقدار R^2 و کم‌ترین مقدار RMSE بودند. همچنین، با استفاده از تجزیه و تحلیل رگرسیون چندمتغیره، ضرایب ثابت مدل‌های جذب روغن وابسته به شرایط مختلف فرآیند، با پارامترهای آماری مناسب به دست آمدند.

واژه‌های کلیدی: سیب‌زمینی قطعه‌شده، جذب روغن، سرخ کردن، مدل‌سازی، آنزیم‌بری، هیدروکلوئیدهای خوراکی

۱- مقدمه

یکی دیگر از روش های بهبود بخشیدن به شرایط انتقال جرم و خصوصیات فیزیکی مواد سرخ شده، استفاده از پوشش های خوراکی می باشد. پلی ساکاریدها، پروتئین ها و لیپیدها می توانند به عنوان پوشش های خوراکی به کار روند [۹]. از آنجایی که ساختمان میکروسکوپی پوسته سیب زمینی، اصلیت ترین فاکتور تعیین کننده جذب روغن می باشد، استفاده از پوشش های خوراکی در سطح سیب زمینی های در حال سرخ شدن، منافذ سطح سیب زمینی را مسدود کرده و مانع از خروج زیاد رطوبت به بیرون و در نتیجه ورود روغن به داخل محصول می شوند [۵]. پوشش های خوراکی به خصوص آنهایی که ساختار هیدروفیلی دارند (پوشش های کربوهیدراتی)، یک مانع خوب در برابر نفوذ روغن ها و چربی ها هستند. پوشش های پروتئینی نیز مانعی در برابر نفوذ روغن محسوب می شوند. پکتین و کربوکسی متیل سلولوز به دلیل این که ساختار هیدروفیلی دارند، مانع جذب روغن در سیب زمینی های در حال سرخ شدن می شوند و از طرفی باعث خروج آسان رطوبت از سیب زمینی می گردند. در تحقیقی، تأثیر پیش تیمارهای آنزیم بری و پوشش خوراکی و همچنین تأثیر دمای روغن بر سینتیک توزیع و جذب روغن در ساختار چیپس های سیب زمینی در فرآیند سرخ شدن و نیز در سرد شدن بعد از فرآیند، مورد مطالعه قرار گرفت. برای سرخ کردن قطعات سیب زمینی از دماهای ۱۲۰، ۱۴۰، ۱۶۰ و ۱۸۰ درجه سانتی گراد و از پیش تیمارهای: (۱) آنزیم بری با آب ۸۵ درجه سانتی گراد به مدت ۳/۵ دقیقه، (۲) آنزیم بری و سپس غوطه ور کردن در محلول نمک ۲۰ گرم بر لیتر به مدت ۵ دقیقه، (۳) آنزیم بری و سپس پوشش دهی با محلول هیدروکسی پروپیل سلولوز ۲۶ گرم بر لیتر به مدت ۲۰ دقیقه، استفاده شد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که چیپس های سیب زمینی پیش تیمار شده با آنزیم بری و آب نمک، و آنزیم بری و پوشش خوراکی جذب روغن را کاهش می دهند [۲].

در تحقیقی دیگر، تأثیر پیش تیمارهای آنزیم بری و پوشش های خوراکی در جذب روغن چیپس های موز طی سرخ شدن مورد مطالعه قرار گرفت [۱۰]. در این تحقیق، از دمای ۱۵۰ درجه سانتی گراد به مدت ۵ دقیقه برای فرآیند سرخ کردن استفاده شد. طبق نتایج، نمونه های شاهد (آنزیم بری و پوشش دهی نشده) بیش ترین مقدار جذب روغن را از خود نشان دادند (۴۰ درصد)؛ ولی در نمونه هایی

سیب زمینی گیاهی است از خانواده سولاناسه (Solanaceae) با نام علمی سولانوم توبروزوم (Solanum Tuberosum) که به عنوان یک غذای سالم و تجاری در سطح جهانی مصرف فراوانی دارد [۱]. این ماده غذایی چهارمین محصول مهم کشاورزی بعد از گندم، ذرت و برنج می باشد [۲].

سرخ کردن یکی از قدیمی ترین روش های فرآوری سیب زمینی است که اساس آن غوطه وری قطعات سیب زمینی در روغن داغ است [۳]. این فرآیند، تأثیرات مطلوبی روی عطر و طعم و خواص حسی محصول دارد ولی جذب روغن بالا از معایب اصلی آن محسوب می شود [۴ و ۵]. برای کاهش جذب روغن و بهبود بخشیدن به خصوصیات کیفی و فیزیکی سیب زمینی های سرخ شده از پیش تیمارهایی مانند آنزیم بری، خشک کردن، آبیگری اسمزی، مایکروویو، اولتراسوند و پوشش های خوراکی استفاده می شود.

استفاده از پیش تیمار آنزیم بری با محلول کلسیم کلرید، باعث فعال شدن آنزیم پکتین متیل استراز شده و پیوند متیل با گروه کربوکسیل شکسته می شود و گروه کربوکسیل با یون های کلسیم پیوند داده و باعث استحکام بافت و کاهش تخلخل و در نتیجه کاهش جذب روغن حین فرآیند سرخ شدن می شود [۶ و ۷]. همچنین، آنزیم بری باعث ژلاتینه شدن نشاسته سطحی سیب زمینی شده، در نتیجه مانع از جذب بیش تر روغن می گردد [۷]. در مطالعه ای، سینتیک جذب و توزیع روغن در ساختار قطعات سیب زمینی طی سرخ کردن در سه دمای مختلف با استفاده از پیش تیمار آنزیم بری، مورد بررسی قرار گرفت. آنزیم بری در آب داغ با دمای ۸۵ درجه سانتی گراد به مدت ۳/۵ دقیقه انجام شد و سپس قطعات سیب زمینی در سه دمای ۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ درجه سانتی گراد تا رسیدن به رطوبت نهایی ۱/۸ درصد سرخ شدند. در این آزمایش ها، مقدار روغن جذب شده طی سرخ کردن، در چهار فاصله زمانی اندازه گیری شد. بر خلاف انتظار، سیب زمینی های آنزیم بری شده، روغن بیشتری را نسبت به نمونه های شاهد جذب کردند که این امر به تغییرات ساختاری میکروسکوپی در بافت سیب زمینی ارتباط داده شد. همچنین، نتایج نشان داد که بالاترین دمای سرخ کردن، منجر به کمترین میزان جذب روغن می شود [۸].

که ابتدا با محلول ۰/۵ درصد کلسیم کلرید آنزیم‌بری شده و سپس با آلزینات یک درصد پوشش داده شدند، مقدار جذب روغن به ۳۸ درصد کاهش یافت. همچنین، در نمونه‌هایی که پس از آنزیم‌بری با محلول کلسیم کلرید ۰/۵ درصد، با پکتین یک درصد نیز پوشش داده شدند، مقدار جذب روغن به کمترین مقدار خود رسید (۲۳ درصد). از این رو، مشاهده شد که پکتین، بیشترین تأثیر را در کاهش جذب روغن چپس‌های موز سرخ‌شده دارد.

از طرف دیگر، برای بهینه‌سازی و بهبود شرایط فرآیند سرخ کردن به مدل‌های ریاضی توصیف‌کننده این سیستم‌ها نیاز می‌باشد [۱۱]. به عنوان مثال، مدل‌سازی جذب روغن، روابط بین متغیرهای میزان روغن و زمان را نشان می‌دهد. این مدل‌ها قادر به پیش‌بینی جذب روغن در زمان‌های مختلف طی فرآیند سرخ کردن می‌باشند. هدف از این تحقیق، مدل‌سازی جذب روغن در حین سرخ کردن قطعات سیب‌زمینی پیش‌تیمارشده با آنزیم‌بری و پوشش خوراکی و بررسی تأثیر این پیش‌تیمارها روی میزان جذب روغن بود.

۲- مواد و روش‌ها

سیب‌زمینی‌های مورد استفاده، از بازار محلی تهیه و قبل از سرخ شدن در سردخانه بالای صفر درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. روغن مایع

مخصوص سرخ‌کردنی که مخلوطی از روغنهای آفتابگردان، سویا و پنبه‌دانه بود، برای سرخ کردن قطعات سیب‌زمینی به کار برده شد. همچنین، برای پوشش دادن نمونه‌ها از پکتین (ساخت شرکت فلوکا) و کربوکسی متیل سلولز (سیگما ساخت آمریکا) استفاده شد.

۲-۱- تجهیزات

در این تحقیق، از یک سرخ‌کن خانگی (Mulinex مدل F430.R با ظرفیت ۲/۲ لیتر روغن، ساخت فرانسه مجهز به سیستم تنظیم دما در محدوده ۱۵۰ تا ۱۹۰ °C) و از یک حمام آب گرم مجهز به سنسور تنظیم دما (بن ماری مدل WM22 ساخت شرکت فن آزما گستر) استفاده شد.

۲-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها

سیب‌زمینی‌ها بعد از شستشو، پوست‌گیری شده و با استفاده از یک کاتر دستی به قطعاتی با ابعاد $4 \times 1/2 \times 1/2$ cm (ارتفاع، عرض و طول)، برش داده شدند. سپس، با استفاده از آب مقطر، نشاسته سطحی آنها گرفته شده و بعد از آن، آب اضافی سیب‌زمینی‌ها با استفاده از کاغذ رطوبت‌گیر گرفته شد. در نهایت، نمونه‌ها برحسب انجام نوع پیش‌تیمار، به چند دسته تقسیم شدند (جدول ۱):

جدول (۱) علائم اختصاری مورد استفاده برای تیمارهای مختلف

| علامت اختصاری | تیمار | ردیف |
|---------------|---|------|
| Control | شاهد | ۱ |
| P1 | پکتین ۱ درصد | ۲ |
| P3 | پکتین ۳ درصد | ۳ |
| CMC | کربوکسی متیل سلولز ۰/۳ درصد | ۴ |
| B1 | آنزیم‌بری به مدت ۱ دقیقه | ۵ |
| B3 | آنزیم‌بری به مدت ۳ دقیقه | ۶ |
| B1, CMC, P1 | آنزیم‌بری به مدت ۱ دقیقه، کربوکسی متیل سلولز ۰/۳ درصد، پکتین ۱ درصد | ۷ |
| B1, CMC, P3 | آنزیم‌بری به مدت ۱ دقیقه، کربوکسی متیل سلولز ۰/۳ درصد، پکتین ۳ درصد | ۸ |
| B3, CMC, P1 | آنزیم‌بری به مدت ۳ دقیقه، کربوکسی متیل سلولز ۰/۳ درصد، پکتین ۱ درصد | ۹ |
| B3, CMC, P3 | آنزیم‌بری به مدت ۳ دقیقه، کربوکسی متیل سلولز ۰/۳ درصد، پکتین ۳ درصد | ۱۰ |

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

۲-۵- محتوای رطوبت
محتوای رطوبت نمونه‌ها، از طریق خشک کردن آنها در آون کنوکسیون در دمای $105 \pm 1^\circ\text{C}$ ، تا رسیدن به وزن ثابت انجام شد [۱۳] و بر حسب گرم رطوبت بر گرم ماده خشک بدون روغن گزارش شد.

۲ و ۳: نمونه‌هایی که جهت انجام آنزیم‌بری، در حمام آب گرم در دمای 80°C درجه سانتی‌گراد و زمان‌های ۱ و ۳ دقیقه به طور مجزا قرار گرفتند.

۴: نمونه‌هایی که به منظور پوشش دادن در محلول کربوکسی متیل سلولز ۰/۳ به مدت ۵ ثانیه غوطه‌ور شدند.

۲-۶- میزان چروکیدگی

برای اندازه‌گیری چروکیدگی، در مرحله اول، حجم ظاهری اولیه و نهایی نمونه‌ها، قبل و پس از سرخ‌شدن، با بکارگیری تکنیک جابجایی حلال (تولون) با استفاده از پیکنومتر شیشه‌ای و مطابق رابطه زیر محاسبه گردید:

۵ و ۶: نمونه‌هایی که جهت پوشش‌دهی در محلول پکتین ۱ و ۳ درصد به مدت ۵ ثانیه به طور مجزا قرار گرفتند.

۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲: نمونه‌هایی که جهت انجام پیش‌تیمارهای آنزیم‌بری و پوشش‌های خوراکی به صورت تلفیقی، ابتدا در حمام آب گرم در دمای 80°C درجه سانتی‌گراد و زمان‌های ۱ و ۳ دقیقه به طور مجزا قرار گرفتند و سپس در محلول کربوکسی متیل سلولز ۰/۳ به مدت ۵ ثانیه غوطه‌ور شدند و در نهایت جهت پوشش‌دهی در محلول پکتین ۱ و ۳ درصد به مدت ۵ ثانیه به طور مجزا قرار گرفتند.

$$V = \frac{M + M_1 - M_2}{\rho} \quad (1)$$

V: حجم ظاهری اولیه یا سرخ‌شده (cm^3)

M: وزن نمونه (gr)

M_1 : وزن پیکنومتر خالی و حلال (gr)

M_2 : وزن پیکنومتر حاوی نمونه و حلال (gr)

ρ : دانسیته تولون (kg/m^3)

در مرحله بعد، با استفاده از حجم ظاهری حاصل از رابطه (۱)، میزان چروکیدگی نمونه‌های سرخ‌شده از رابطه زیر محاسبه شد [۱۴]:

$$S_{(t)} = \frac{V_0 - V_t}{V_0} \quad (2)$$

$S_{(t)}$: درصد چروکیدگی

V_0 : حجم ظاهری نمونه تازه (cm^3)

$V_{(t)}$: حجم ظاهری نمونه پس از سرخ‌شدن (cm^3)

۲-۷- دانسیته ظاهری:

بعد از محاسبه حجم ظاهری نمونه‌ها با استفاده از رابطه (۱)، از نسبت وزن به حجم نمونه سرخ‌شده، مقادیر دانسیته ظاهری به صورت گرم بر سانتیمتر مکعب گزارش شد [۱۴]:

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (3)$$

ρ : دانسیته ظاهری محصول (g/cm^3)

۲-۳- شرایط سرخ کردن

در هر آزمایش، پس از آماده‌سازی نمونه‌ها بر اساس جدول ۱، ابتدا سرخ‌کن با ۱/۵ لیتر روغن پر شد و بعد از تنظیم دما و زمان سرخ کردن مورد نظر، سرخ‌کن بر روی حالت اتوماتیک قرار داده شد؛ به طوری که پس از رسیدن دمای سرخ‌کن به دمای مورد نظر، نمونه‌های سیب‌زمینی به میزان ۱۲۰ - ۱۰۰ گرم در داخل سبد مشبک سرخ‌کن قرار داده شدند و سپس سبد حاوی نمونه‌ها به طور اتوماتیک در روغن غوطه‌ور شد. پس از سرخ‌شدن نمونه‌ها به مدت زمان موردنظر، نمونه‌ها از سرخ‌کن بیرون آورده شده و روغن اضافی آنها توسط یک کاغذ جاذب گرفته شد و بلافاصله آنالیزهای مربوطه بر روی آنها انجام گرفت. تمامی آزمایشات با ۲ تکرار انجام شدند و داده‌های گزارش شده، میانگین داده‌های آزمایشی هستند.

۲-۴- محتوای روغن

سنجش میزان روغن نمونه‌های سرخ‌شده با استفاده از دستگاه سوکسله و از طریق استخراج به وسیله حلال پترولیوم اتر اندازه‌گیری شد [۱۲] و بر حسب گرم روغن بر گرم ماده خشک بدون روغن گزارش گردید.

M: جرم محصول (g)

V: حجم ظاهری محصول (cm³)

نوع و غلظت پوشش‌های خوراکی و دمای سرخ کردن) بودند. در این مورد نیز، مبنای انتخاب مدل، ضریب همبستگی بالای مدل‌ها بود.

۲-۸- مدل‌سازی ریاضی جذب روغن

در این مطالعه میزان جذب روغن نمونه‌های سیب‌زمینی طی فرآیند سرخ کردن عمیق بر حسب چهار پارامتر زمان، محتوای رطوبتی، میزان چروکیدگی و دانسیته ظاهری مدل‌سازی شد. 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، میزان چروکیدگی و دانسیته ظاهری پیشنهاد گردید (جدول ۵). برای تعیین بهترین مدل از دو معیار ضریب همبستگی (R²) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد. از این رو مدل‌هایی که دارای بیش‌ترین مقدار R² و کم‌ترین میزان RMSE بودند، به عنوان بهترین مدل انتخاب شدند. پارامترهای مربوط به این مدل‌ها، از طریق برازش داده‌های حاصل از آزمایش با استفاده از نرم‌افزار MATLAB (Version 7.12.06.635, R2012a) به دست آمدند. به منظور به دست آوردن ضرایب ثابت مدل‌ها نیز، تجزیه و تحلیل رگرسیون چند متغیره با استفاده از نرم‌افزار EXCEL (2007) صورت گرفت. این ضرایب، وابسته به شرایط فرآیند (زمان پیش تیمار آنزیم‌بری،

۲-۹- آنالیز آماری

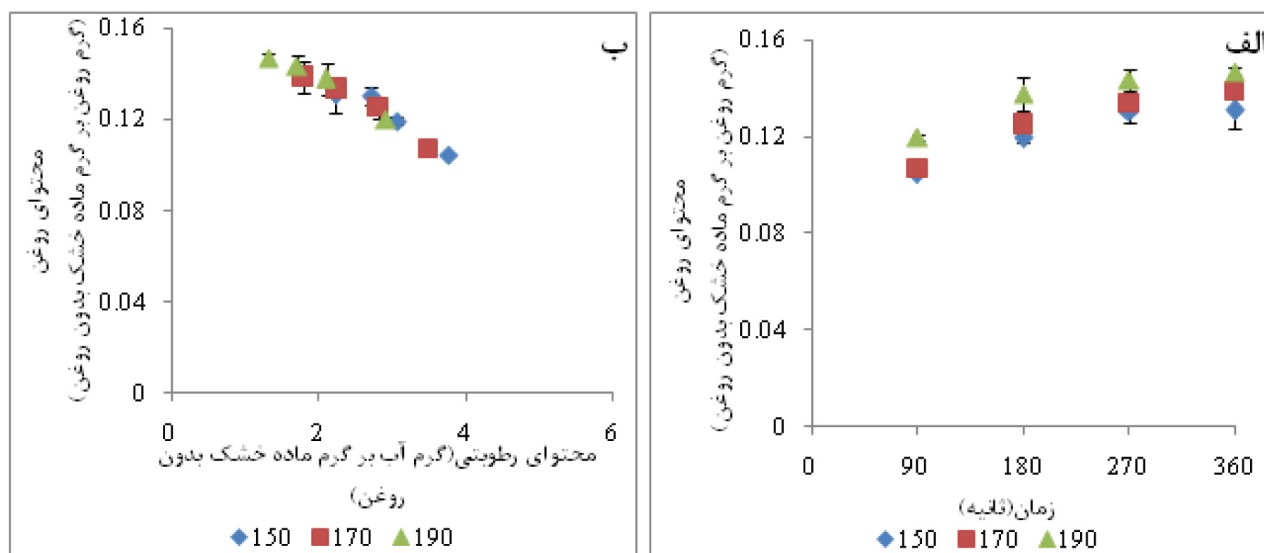
در این مطالعه، ۱۰ تیمار نشان داده شده در جدول (۱)، در سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد و چهار زمان ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ ثانیه در دو تکرار (۲×۴×۳×۱۰) سرخ شدند. تجزیه و تحلیل داده‌ها بر اساس آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی، با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.1 انجام شد. همچنین، برای انجام مقایسه میانگین برای تمام داده‌های گزارش شده در این تحقیق، از آزمون بونفرونی [۱۵] در سطح احتمال ۰.۰۵ (P<۰/۰۵) استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

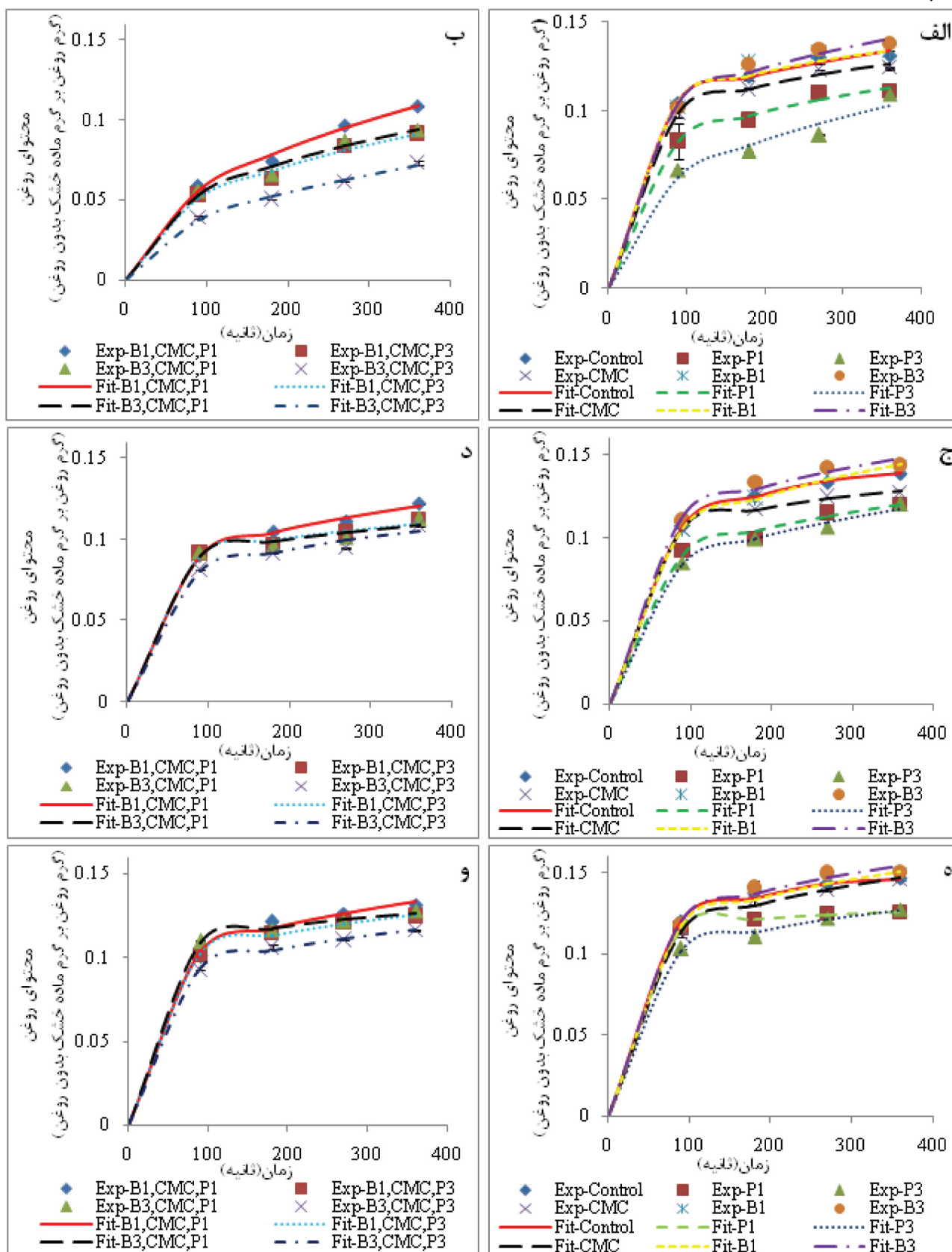
۳-۱- جذب روغن

با افزایش زمان در تمامی دماها، میزان جذب روغن در نمونه‌های شاهد افزایش یافت (شکل ۱-الف). همچنین، آهنگ تغییرات محتوای روغن با گذشت زمان کاهش پیدا کرد و به مقدار تعادلی محتوای روغن نزدیک شد. در بررسی اثر دما بر جذب روغن، هنگامی که محتوای روغن به صورت تابعی از زمان سرخ کردن در نظر گرفته شد، مشخص

1. Bonferroni



شکل (۱) محتوای روغن قطعات سیب‌زمینی سرخ‌شده (نمونه شاهد) به صورت تابعی از زمان (الف) و محتوای رطوبتی (ب) طی سرخ کردن عمیق در دماهای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد



شکل (۲) تغییرات محتوای روغن حاصل از آزمایش (Exp) و برازش شده (Fit) با مدل ۲ (جدول ۲)، طی فرآیند سرخ کردن عمیق قطعات سیب‌زمینی با گذشت زمان، در دماهای ۱۵°C (الف، ب)، ۱۷°C (ج، د) و ۱۹°C (ه، و) در پیش‌تیمارهای مختلف بر اساس جدول (۱)

شکل ۲- (ج، د) و (ه، و)، محتوای تغییرات روغن را در نمونه‌های پیش تیمار شده به صورت مجزا و تلفیقی و سپس سرخ شده به ترتیب در دماهای ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. طبق نتایج به دست آمده، روند کاهش یا افزایش محتوای روغن در نمونه‌های پیش تیمار شده و سپس سرخ شده در دماهای ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد مشابه نتایج به دست آمده در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد؛ با این تفاوت که جذب روغن در نمونه‌های سرخ شده در ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد کمتر از ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد بود. همچنین معنی‌دار بودن یا نبودن کاهش یا افزایش جذب روغن نسبت به نمونه‌های شاهد در دماهای ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد مشابه نتایج بدست آمده در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد بود.

۳-۲- مدل سازی جذب روغن

مدل‌های ارایه شده در جدول (۲) به خوبی قادر به برازش داده‌های آزمایشی بودند (جدول ۳). مطابق جدول (۳) مدل‌های به دست آمده با داشتن R^2 بالا و RMSE پایین، می‌توانند مدل‌های پیشنهادی مناسبی جهت کاربرد در شرایط زمانی مختلف و همچنین برای تیمارهای متفاوت طی فرآیند سرخ کردن عمیق در دماهای به کار رفته در این تحقیق باشند. مدل‌های شماره ۵ و ۶ توسط دیگر محققان برای برازش داده‌های آزمایشی محتوای روغن در قطعات سیب‌زمینی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۶، ۶]. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که این دو مدل به خوبی داده‌های آزمایشی حاصل از این تحقیق را نیز برازش می‌کنند. در مرحله بعد، با هدف به دست آوردن رابطه بین ضرایب مدل‌ها و شرایط فرآیند سرخ کردن (زمان آنزیم‌بری، غلظت و نوع پوشش‌های خوراکی و دمای سرخ کردن)، تجزیه و تحلیل رگرسیونی چند متغیره بر روی ضرایب تمامی مدل‌های مربوطه انجام گرفت. جدول (۴) مدل‌های بدست آمده از این طریق را نشان می‌دهد. مدل‌سازی میزان جذب روغن در قطعات سیب‌زمینی پیش تیمار شده با آنزیم‌بری و پوشش‌های خوراکی بر حسب پارامترهای محتوای رطوبتی بدون بعد، میزان چروکیدگی و دانسیته ظاهری نیز در جدول (۵) نشان داده شده است. مقادیر R^2 و RMSE آورده شده در جدول (۶) برای این مدل‌ها نشان می‌دهد که این مدل‌ها داده‌های آزمایشی را به خوبی برازش نموده‌اند.

گردید که دماهای بالای سرخ کردن، باعث کاهش معنی‌دار جذب روغن می‌شود [۲، ۳، ۱۶]. همچنین، کاهش محتوای رطوبتی با گذشت زمان منجر به افزایش میزان جذب روغن در نمونه‌های شاهد گردید (شکل ۱- ب) [۶، ۱۴].

شکل (۲- الف)، تغییرات محتوای روغن را با گذشت زمان در نمونه‌های شاهد، پیش تیمار شده با آنزیم‌بری ۱ و ۳ دقیقه، کربوکسی متیل سلولز ۰/۳ درصد و پکتین ۱ و ۳ درصد و سرخ شده در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و زمان‌های ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ ثانیه نشان می‌دهد. میزان جذب روغن با افزایش زمان سرخ کردن در همه نمونه‌های فوق افزایش یافت. بررسی تأثیر پیش تیمارها روی میزان جذب روغن در زمان‌های یکسان، نشان می‌دهد که نمونه‌های پیش تیمار شده با پکتین ۳ درصد دارای کمترین محتوای روغن در تمامی زمان‌های فرآیند می‌باشند. پوشش‌دهی نمونه‌ها با هر دو غلظت پکتین، باعث کاهش جذب روغن به صورت معنی‌دار شد ولی پوشش دادن با کربوکسی متیل سلولز، میزان جذب روغن را به صورت غیرمعنی‌دار کاهش داد (داده‌ها نشان داده نشده‌اند). پوشش‌های به کار رفته، در دماهای سرخ کردن، فیلم هیدروفیلی در اطراف نمونه‌ها تشکیل می‌دهند که این فیلم مانع ورود روغن به داخل نمونه‌های سرخ شده می‌شود. این نتیجه، مطابق با یافته‌های سایر محققین می‌باشد [۴، ۵، ۹، ۱۰، ۲۱-۱۷]. این در حالی است که نمونه‌های پیش تیمار شده با آنزیم‌بری به مدت ۱ و ۳ دقیقه، جذب روغن را افزایش داد ولی این افزایش از لحاظ آماری معنی‌دار نبود. این مسئله می‌تواند به دلیل ایجاد تغییرات میکروسکوپی در بافت سیب‌زمینی باشد [۸]. این نتیجه نیز مطابق با نتایج حاصل از تحقیقات دیگر پژوهشگران می‌باشد [۲، ۳، ۸].

شکل (۲- ب)، تغییرات محتوای روغن را در نمونه‌های پیش تیمار شده به صورت تلفیقی و سپس سرخ شده در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. نمونه‌های آنزیم‌بری شده به مدت ۳ دقیقه و سپس پوشش‌دهی شده با کربوکسی متیل سلولز ۰/۳ درصد و پکتین ۳ درصد (B^3 , CMC, P^3)، دارای کمترین میزان جذب روغن نسبت به سایر پیش تیمارهای تلفیقی بود. لازم به ذکر است که تمام این پیش تیمارهای تلفیقی جذب روغن نمونه‌های سرخ شده را نسبت به نمونه‌های شاهد به صورت معنی‌داری کاهش دادند (داده‌ها نشان داده نشده‌اند).

جدول (۲) مدل‌های ریاضی مورد استفاده برای بررسی تغییرات محتوای روغن قطعات سیب‌زمینی با گذشت زمان طی فرآیند سرخ کردن

| شماره | مدل ریاضی | مرجع |
|-------|---------------------------|-----------------------------|
| ۱ | $O = \frac{a.t}{t+b}$ | پیشنهادی |
| ۲ | $O = a.t^b$ | پیشنهادی |
| ۳ | $O = \frac{1+t}{a.t+b}$ | پیشنهادی |
| ۴ | $O = \exp(-a.t^b)$ | پیشنهادی |
| ۵ | $O = \frac{a.b.t}{1+b.t}$ | مویانو و پدرسچی (۲۰۰۱) |
| ۶ | $O = a.(1 - \exp(-b.t))$ | کروکیدا و همکاران (۲۰۰۱) |

جدول (۳) پارامترهای آماری حاصل از مدل‌های ۱-۶ جدول ۲، برای تیمارها و دماهای مختلف طی فرآیند سرخ کردن عمیق

| دما °C | | | | | | مدل ۱ |
|--------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|-----------|
| ۱۹۰ | | ۱۷۰ | | ۱۵۰ | | تیمار |
| RMSE | R ² | RMSE | R ² | RMSE | R ² | |
| ۰/۰۰۲ | ۰/۹۹۹۲ | ۰/۰۰۰۹ | ۰/۹۹۹۸ | ۰/۰۰۱۷ | ۰/۹۹۹۲ | Control |
| ۰/۰۰۰۴ | ۰/۹۹۹۹ | ۰/۰۰۴۵ | ۰/۹۹۳۷ | ۰/۰۰۳۱ | ۰/۹۹۶۴ | P1 |
| ۰/۰۰۳۶ | ۰/۹۹۶۵ | ۰/۰۰۴۲ | ۰/۹۹۴ | ۰/۰۰۰۸ | ۰/۹۷۱۴ | P3 |
| ۰/۰۰۰۸ | ۰/۹۹۹۹ | ۰/۰۰۱ | ۰/۹۹۷ | ۰/۰۰۱۶ | ۰/۹۹۹۲ | CMC |
| ۰/۰۰۱۸ | ۰/۹۹۹۴ | ۰/۰۰۱۷ | ۰/۹۹۹۴ | ۰/۰۰۱۲ | ۰/۹۹۹۷ | B1 |
| ۰/۰۰۰۹ | ۰/۹۹۹۸ | ۰/۰۰۱۵ | ۰/۹۹۹۵ | ۰/۰۰۰۳ | ۰/۹۹۷۹ | B3 |
| ۰/۰۰۱۲ | ۰/۹۹۹۶ | ۰/۰۰۳۱ | ۰/۹۹۷ | ۰/۰۰۴۳ | ۰/۹۹۲۳ | B1,CMC,P1 |
| ۰/۰۰۰۴ | ۰/۹۹۹۹ | ۰/۰۰۰۴ | ۰/۹۹۴۲ | ۰/۰۰۴۹ | ۰/۹۸۵۹ | B1,CMC,P3 |
| ۰/۰۰۲۳ | ۰/۹۹۸۶ | ۰/۰۰۴۵ | ۰/۹۹۲۷ | ۰/۰۰۴۸ | ۰/۹۸۷۱ | B3,CMC,P1 |
| ۰/۰۰۰۱ | ۰/۹۹۹۶ | ۰/۰۰۴۶ | ۰/۹۹۱۳ | ۰/۰۰۰۳ | ۰/۹۹۰۹ | B3,CMC,P3 |

| دما °C | | | | | | مدل ۲ |
|--------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|-----------|
| ۱۹۰ | | ۱۷۰ | | ۱۵۰ | | تیمار |
| RMSE | R ² | RMSE | R ² | RMSE | R ² | |
| ۰/۰۰۱۱ | ۰/۹۹۹۸ | ۰/۰۰۱۶ | ۰/۹۹۹۴ | ۰/۰۰۲۴ | ۰/۹۹۸۵ | Control |
| ۰/۰۰۰۷ | ۰/۹۹۹۹ | ۰/۰۰۲۹ | ۰/۹۹۷۳ | ۰/۰۰۲۷ | ۰/۹۹۷۳ | P1 |
| ۰/۰۰۲۱ | ۰/۹۹۸۸ | ۰/۰۰۲۵ | ۰/۹۹۷۸ | ۰/۰۰۵۹ | ۰/۹۸۴ | P3 |
| ۰/۰۰۲۳ | ۰/۹۹۸۹ | ۰/۰۰۱۱ | ۰/۹۹۹۶ | ۰/۰۰۲۲ | ۰/۹۹۸۶ | CMC |
| ۰/۰۰۰۴ | ۰/۹۹۶۹ | ۰/۰۰۳۹ | ۰/۹۹۶۸ | ۰/۰۰۳۶ | ۰/۹۹۷۱ | B1 |
| ۰/۰۰۲۹ | ۰/۹۹۸۳ | ۰/۰۰۱۵ | ۰/۹۹۹۵ | ۰/۰۰۵۲ | ۰/۹۹۳۷ | B3 |
| ۰/۰۰۲۸ | ۰/۹۹۸ | ۰/۰۰۱۷ | ۰/۹۹۹۱ | ۰/۰۰۲۶ | ۰/۹۹۷۱ | B1,CMC,P1 |
| ۰/۰۰۱۱ | ۰/۹۹۹۶ | ۰/۰۰۲۶ | ۰/۹۹۷۵ | ۰/۰۰۳۴ | ۰/۹۹۲۹ | B1,CMC,P3 |
| ۰/۰۰۱۱ | ۰/۹۹۹۷ | ۰/۰۰۳۳ | ۰/۹۹۶۱ | ۰/۰۰۳۶ | ۰/۹۹۲۹ | B3,CMC,P1 |
| ۰/۰۰۱۳ | ۰/۹۹۹۵ | ۰/۰۰۳۳ | ۰/۹۹۵۴ | ۰/۰۰۱۵ | ۰/۹۹۷۷ | B3,CMC,P3 |

| دمای °C | | | | | | مدل ۳ |
|---------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|-----------|
| ۱۹۰ | | ۱۷۰ | | ۱۵۰ | | |
| RMSE | R ² | RMSE | R ² | RMSE | R ² | تیمار |
| ۰/۰۰۵۷ | ۰/۹۹۳۸ | ۰/۰۰۳۳ | ۰/۹۹۷۶ | ۰/۰۰۲۸ | ۰/۹۹۸ | Control |
| ۰/۰۰۴۷ | ۰/۹۹۴۴ | ۰/۰۰۴۷ | ۰/۹۹۲۸ | ۰/۰۰۳۶ | ۰/۹۹۵۳ | P1 |
| ۰/۰۰۴۳ | ۰/۹۹۹۵ | ۰/۰۰۴۵ | ۰/۹۹۳۳ | ۰/۰۰۰۸ | ۰/۹۷۱ | P3 |
| ۰/۰۰۲۴ | ۰/۹۹۸۸ | ۰/۰۰۲۸ | ۰/۹۹۷۹ | ۰/۰۰۲۶ | ۰/۹۹۸۱ | CMC |
| ۰/۰۰۳۰ | ۰/۹۹۸۳ | ۰/۰۰۲۷ | ۰/۹۹۸۴ | ۰/۰۰۲۲ | ۰/۹۹۸۹ | B1 |
| ۰/۰۰۲۶ | ۰/۹۹۸۷ | ۰/۰۰۲۹ | ۰/۹۹۸۱ | ۰/۰۰۳۶ | ۰/۹۹۶۹ | B3 |
| ۰/۰۰۲۷ | ۰/۹۹۸۱ | ۰/۰۰۳۴ | ۰/۹۹۶۲ | ۰/۰۰۴۳ | ۰/۹۹۲۱ | B1,CMC,P1 |
| ۰/۰۰۲۴ | ۰/۹۹۸۳ | ۰/۰۰۵۲ | ۰/۹۹۰۳ | ۰/۰۰۵۰ | ۰/۹۸۵۳ | B1,CMC,P3 |
| ۰/۰۰۴۱ | ۰/۹۹۵۶ | ۰/۰۰۵۰ | ۰/۹۹۰۷ | ۰/۰۰۴۹ | ۰/۹۸۶۸ | B3,CMC,P1 |
| ۰/۰۰۲۸ | ۰/۹۹۷۴ | ۰/۰۰۴۸ | ۰/۹۹۰۴ | ۰/۰۰۷۵ | ۰/۹۴۵۱ | B3,CMC,P3 |

| دمای °C | | | | | | مدل ۴ |
|---------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|-----------|
| ۱۹۰ | | ۱۷۰ | | ۱۵۰ | | |
| RMSE | R ² | RMSE | R ² | RMSE | R ² | تیمار |
| ۰/۰۰۱۱ | ۰/۹۹۹۸ | ۰/۰۰۱۵ | ۰/۹۹۹۵ | ۰/۰۰۲۳ | ۰/۹۹۸۷ | Control |
| ۰/۰۰۰۶ | ۰/۹۹۹۹ | ۰/۰۰۳۱ | ۰/۹۹۹۷ | ۰/۰۰۲۷ | ۰/۹۹۷۳ | P1 |
| ۰/۰۰۲۲ | ۰/۹۹۸۶ | ۰/۰۰۲۷ | ۰/۹۹۷۴ | ۰/۰۰۶۴ | ۰/۹۸۱۵ | P3 |
| ۰/۰۰۲۱ | ۰/۹۹۹۱ | ۰/۰۰۱۰ | ۰/۹۹۹۷ | ۰/۰۰۲۰ | ۰/۹۹۸۸ | CMC |
| ۰/۰۰۳۸ | ۰/۹۹۷۳ | ۰/۰۰۳۶ | ۰/۹۹۷۲ | ۰/۰۰۳۲ | ۰/۹۹۷۶ | B1 |
| ۰/۰۰۲۷ | ۰/۹۹۸۵ | ۰/۰۰۱۲ | ۰/۹۹۹۷ | ۰/۰۰۴۹ | ۰/۹۹۴۳ | B3 |
| ۰/۰۰۲۶ | ۰/۹۹۸۲ | ۰/۰۰۱۸ | ۰/۹۹۹ | ۰/۰۰۳۱ | ۰/۹۹۵۹ | B1,CMC,P1 |
| ۰/۰۰۱۰ | ۰/۹۹۹۷ | ۰/۰۰۲۷ | ۰/۹۹۷۳ | ۰/۰۰۳۸ | ۰/۹۹۱۵ | B1,CMC,P3 |
| ۰/۰۰۱۱ | ۰/۹۹۹۶ | ۰/۰۰۳۳ | ۰/۹۹۵۸ | ۰/۰۰۳۸ | ۰/۹۹۱۸ | B3,CMC,P1 |
| ۰/۰۰۱۲ | ۰/۹۹۹۵ | ۰/۰۰۳۴ | ۰/۹۹۵۱ | ۰/۰۰۲۰ | ۰/۹۹۶۲ | B3,CMC,P3 |

| دما °C | | | | | | مدل ۵ |
|--------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|-----------|
| ۱۹۰ | | ۱۷۰ | | ۱۵۰ | | تیمار |
| RMSE | R ² | RMSE | R ² | RMSE | R ² | |
| ۰/۰۰۲۰ | ۰/۹۹۹۲ | ۰/۰۰۰۹ | ۰/۹۹۹۸ | ۰/۰۰۱۷ | ۰/۹۹۹۲ | Control |
| ۰/۰۰۰۴ | ۰/۹۹۹۹ | ۰/۰۰۴۵ | ۰/۹۹۳۷ | ۰/۰۰۳۱ | ۰/۹۹۶۴ | P1 |
| ۰/۰۰۳۶ | ۰/۹۹۶۵ | ۰/۰۰۴۲ | ۰/۹۹۴ | ۰/۰۰۸۰ | ۰/۹۷۱۴ | P3 |
| ۰/۰۰۰۸ | ۰/۹۹۹۹ | ۰/۰۰۱۰ | ۰/۹۹۹۷ | ۰/۰۰۱۶ | ۰/۹۹۹۲ | CMC |
| ۰/۰۰۱۸ | ۰/۹۹۹۴ | ۰/۰۰۱۷ | ۰/۹۹۹۴ | ۰/۰۰۱۲ | ۰/۹۹۹۷ | B1 |
| ۰/۰۰۰۹ | ۰/۹۹۹۸ | ۰/۰۰۱۵ | ۰/۹۹۹۵ | ۰/۰۰۳۰ | ۰/۹۹۷۹ | B3 |
| ۰/۰۰۱۲ | ۰/۹۹۹۶ | ۰/۰۰۳۱ | ۰/۹۹۷ | ۰/۰۰۴۳ | ۰/۹۹۲۳ | B1,CMC,P1 |
| ۰/۰۰۰۴ | ۰/۹۹۹۹ | ۰/۰۰۴۰ | ۰/۹۹۴۲ | ۰/۰۰۴۹ | ۰/۹۸۵۹ | B1,CMC,P3 |
| ۰/۰۰۲۳ | ۰/۹۹۸۶ | ۰/۰۰۴۵ | ۰/۹۹۲۷ | ۰/۰۰۴۸ | ۰/۹۸۷۱ | B3,CMC,P1 |
| ۰/۰۰۱۰ | ۰/۹۹۹۶ | ۰/۰۰۴۶ | ۰/۹۹۱۳ | ۰/۰۰۳۰ | ۰/۹۹۰۹ | B3,CMC,P3 |

| دما °C | | | | | | مدل ۶ |
|--------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|-----------|
| ۱۹۰ | | ۱۷۰ | | ۱۵۰ | | تیمار |
| RMSE | R ² | RMSE | R ² | RMSE | R ² | |
| ۰/۰۱۳۰ | ۰/۹۹۵۷ | ۰/۰۰۳۲ | ۰/۹۹۹۹ | ۰/۰۱۶۹ | ۰/۹۹۶۳ | Control |
| ۰/۰۲۱۰ | ۰/۹۸۸۰ | ۰/۰۱۷۳ | ۰/۹۹۵۰ | ۰/۰۲۰۷ | ۰/۹۹۴۱ | P1 |
| ۰/۰۱۸۵ | ۰/۹۸۹۹ | ۰/۰۲۱۲ | ۰/۹۹۲۰ | ۰/۰۱۳۵ | ۰/۹۹۷۳ | P3 |
| ۰/۰۱۶۱ | ۰/۹۹۳۳ | ۰/۰۱۸۴ | ۰/۹۹۵۴ | ۰/۰۱۶۴ | ۰/۹۹۶۵ | CMC |
| ۰/۰۱۳۹ | ۰/۹۹۵۰ | ۰/۰۰۸۷ | ۰/۹۹۹۰ | ۰/۰۱۶۴ | ۰/۹۹۶۵ | B1 |
| ۰/۰۱۹۰ | ۰/۹۹۰۳ | ۰/۰۱۵۷ | ۰/۹۹۵۰ | ۰/۰۲۱۸ | ۰/۹۹۳۶ | B3 |
| ۰/۰۱۸۵ | ۰/۹۸۸۶ | ۰/۰۰۵۶ | ۰/۹۹۹۲ | ۰/۰۰۹۰ | ۰/۹۹۸۶ | B1,CMC,P1 |
| ۰/۰۲۶۰ | ۰/۹۷۰۹ | ۰/۰۱۴۴ | ۰/۹۹۳۳ | ۰/۰۰۹۱ | ۰/۹۹۸۲ | B1,CMC,P3 |
| ۰/۰۱۹۵ | ۰/۹۸۵۲ | ۰/۰۰۴۱ | ۰/۹۹۹۵ | ۰/۰۰۱۴ | ۰/۹۹۹۹ | B3,CMC,P1 |
| ۰/۰۰۹۵ | ۰/۹۹۵۰ | ۰/۰۱۰۸ | ۰/۹۹۵۱ | ۰/۰۱۳۴ | ۰/۹۹۵۰ | B3,CMC,P3 |

جدول (۴) مدل‌های نهایی حاصل از انجام تجزیه و تحلیل رگرسیون چند متغیره بر روی ضرایب مدل‌ها به صورت تابعی از دمای سرخ کردن و دیگر پارامترهای مربوطه

| | |
|-------|--|
| R^2 | $O = \frac{a.t}{t+b}$ |
| ۰/۹۸ | $y = a \cdot 0.00246 B - 0.00789 P - 0.2399 CMC + 0.0883 T$ |
| ۰/۹۳ | $y = b - 0.5041 B + 1.3492 P - 15.73 CMC + 0.7124 T - 0.029 T^2$ |
| R^2 | $O = a.t^b$ |
| ۰/۹۳ | $y = a - 0.0249 B - 0.0639 P - 0.1782 CMC - 0.0023 T + 3.28 E - 6 T^2$ |
| ۰/۹۰ | $y = b \cdot 0.1055 B + 0.2356 P + 0.838 CMC + 0.06 T - 3 E - 5 T^2$ |
| R^2 | $O = \frac{1+t}{a.t+b}$ |
| ۰/۹۷ | $y = a \cdot 0.2309 B + 0.7102 P + 1.824 CMC + 0.3584 T$ |
| ۰/۸۷ | $y = b \cdot 17.978 B + 4.0299 P + 32.812 CMC + 1.4631 T - 0.536 T^2$ |
| R^2 | $O = \exp(-a.t^b)$ |
| ۰/۹۶ | $y = a \cdot 0.1089 B + 0.2824 P + 1.2316 CMC + 0.809 T - 0.003 T^2$ |
| ۰/۹۲ | $y = b - 0.036 B - 0.053 P - 0.173 CMC - 0.0235 T - 1.1 E - 5 T^2$ |
| R^2 | $O = \frac{a.b.t}{1+b.t}$ |
| ۰/۹۸ | $y = a \cdot 0.0024 B - 0.00787 P - 0.238 CMC + 0.0883 T$ |
| ۰/۹۴ | $y = b - 0.0051 B - 0.0092 P + 0.107 CMC + 0.00169 T$ |
| R^2 | $O = a.(1 - \exp(-b.t))$ |
| ۰/۹۹ | $y = a - 0.0069 B - 0.0854 P - 0.2913 CMC - 0.00802 T$ |
| ۰/۹۵ | $y = b - 5.3 E - 5 B - 0.0019 P + 0.219 CMC + 0.00106 T$ |

T, CMC, P, B به ترتیب نشان دهنده زمان پیش تیمار آنزیم‌بری، غلظت محلول پکتین، غلظت محلول کربوکسی متیل سلولز و دمای سرخ کردن می‌باشند.

جدول (۵) مدل‌های ریاضی مورد استفاده برای بررسی تغییرات محتوای روغن قطعات سیب‌زمینی بر حسب محتوای رطوبتی، میزان چروکیدگی و دانسیته ظاهری طی فرآیند سرخ کردن عمیق

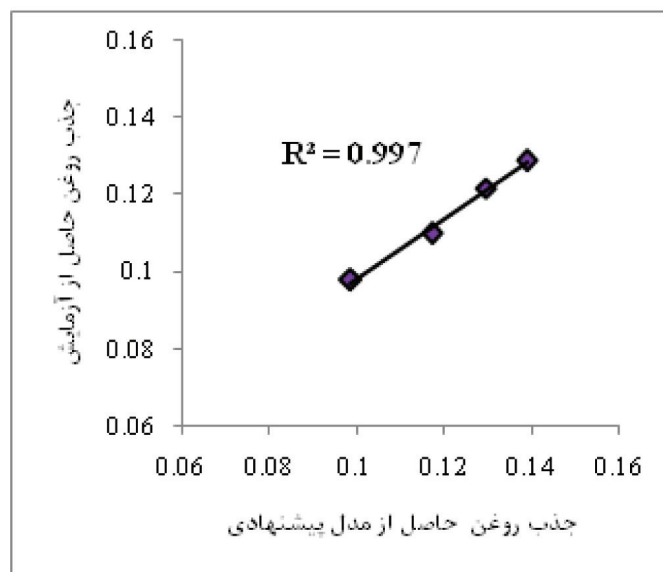
| شماره | مدل ریاضی | مرجع |
|-------|---------------------------|----------|
| ۱ | $O = a \cdot (1 - M_t^b)$ | پیشنهادی |
| ۲ | $O = a \cdot S^b$ | پیشنهادی |
| ۳ | $O = a \cdot \rho^b + c$ | پیشنهادی |

جدول (۶) پارامترهای آماری حاصل از مدل‌های جدول ۵ برای تیمارها و دماهای مختلف طی فرآیند سرخ کردن عمیق

| دما °C | | | | | | مدل ۱ |
|--------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|-----------|
| ۱۹۰ | | ۱۷۰ | | ۱۵۰ | | تیمار |
| RMSE | R ² | RMSE | R ² | RMSE | R ² | |
| ۰/۰۰۳۱ | ۰/۹۹۸۱ | ۰/۰۰۲۲ | ۰/۹۹۸۹ | ۰/۰۰۳۸ | ۰/۹۹۸۳ | Control |
| ۰/۰۰۰۱ | ۰/۹۹۹۹ | ۰/۰۰۳۹ | ۰/۹۹۵۲ | ۰/۰۰۵۲ | ۰/۹۹۰۲ | P1 |
| ۰/۰۰۱۶ | ۰/۹۹۹۳ | ۰/۰۰۳۸ | ۰/۹۹۵۱ | ۰/۰۰۹۲ | ۰/۹۶۲۲ | P3 |
| ۰/۰۰۲۸ | ۰/۹۹۸۴ | ۰/۰۰۱۹ | ۰/۹۹۹ | ۰/۰۰۳۴ | ۰/۹۹۶۷ | CMC |
| ۰/۰۰۱۴ | ۰/۹۹۹۶ | ۰/۰۰۰۶ | ۰/۹۹۹۹ | ۰/۰۰۱۹ | ۰/۹۹۹۱ | B1 |
| ۰/۰۰۱۶ | ۰/۹۹۹۵ | ۰/۰۰۲۵ | ۰/۹۹۸۶ | ۰/۰۰۰۸ | ۰/۹۹۹۸ | B3 |
| ۰/۰۰۵۷ | ۰/۹۹۱۸ | ۰/۰۰۳۴ | ۰/۹۹۶۴ | ۰/۰۰۵۸ | ۰/۹۸۶ | B1,CMC,P1 |
| ۰/۰۰۱۶ | ۰/۹۹۹۳ | ۰/۰۰۴۰ | ۰/۹۹۴۱ | ۰/۰۰۷۱ | ۰/۹۷۰۳ | B1,CMC,P3 |
| ۰/۰۰۲۶ | ۰/۹۹۸۲ | ۰/۰۰۵۰ | ۰/۹۹۰۸ | ۰/۰۰۵۷ | ۰/۹۸۱۷ | B3,CMC,P1 |
| ۰/۰۰۱۵ | ۰/۹۹۹۲ | ۰/۰۰۴۵ | ۰/۹۹۱۵ | ۰/۰۰۳۰ | ۰/۹۹۱۴ | B3,CMC,P3 |

| دمای °C | | | | | | مدل ۲ |
|---------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|-----------|
| ۱۹۰ | | ۱۷۰ | | ۱۵۰ | | تیمار |
| RMSE | R ² | RMSE | R ² | RMSE | R ² | |
| ۰/۰۰۰۱ | ۰/۹۹۹۹ | ۰/۰۰۲۴ | ۰/۹۹۸۷ | ۰/۰۰۴۰ | ۰/۹۹۵۹ | Control |
| ۰/۰۰۱۴ | ۰/۹۹۹۴ | ۰/۰۰۳۹ | ۰/۹۹۵۲ | ۰/۰۰۳۸ | ۰/۹۹۴۷ | P1 |
| ۰/۰۰۳۸ | ۰/۹۹۹۶ | ۰/۰۰۲۶ | ۰/۹۹۷۷ | ۰/۰۰۲۴ | ۰/۹۹۷۳ | P3 |
| ۰/۰۰۴۸ | ۰/۹۹۵۲ | ۰/۰۰۲۳ | ۰/۹۹۸۶ | ۰/۰۰۴۷ | ۰/۹۹۳۷ | CMC |
| ۰/۰۰۴۵ | ۰/۹۹۶۲ | ۰/۰۰۶۷ | ۰/۹۹۰۸ | ۰/۰۰۴۴ | ۰/۹۹۵۵ | B1 |
| ۰/۰۰۱۳ | ۰/۹۹۹۶ | ۰/۰۰۱۹ | ۰/۹۹۹۲ | ۰/۰۰۳۴ | ۰/۹۹۷۲ | B3 |
| ۰/۰۰۷۸ | ۰/۹۸۴۵ | ۰/۰۰۲۸ | ۰/۹۹۷۴ | ۰/۰۰۴۵ | ۰/۹۹۱۴ | B1,CMC,P1 |
| ۰/۰۰۵۲ | ۰/۹۹۲۶ | ۰/۰۰۴۶ | ۰/۹۹۲۳ | ۰/۰۰۵۱ | ۰/۹۸۴۶ | B1,CMC,P3 |
| ۰/۰۰۰۷ | ۰/۹۹۹۹ | ۰/۰۰۲۷ | ۰/۹۹۷۲ | ۰/۰۰۵۹ | ۰/۹۸۰۹ | B3,CMC,P1 |
| ۰/۰۰۳۸ | ۰/۹۹۵۲ | ۰/۰۰۱۲ | ۰/۹۹۹۴ | ۰/۰۰۳۱ | ۰/۹۹۰۶ | B3,CMC,P3 |

| دمای °C | | | | | | مدل ۳ |
|---------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|-----------|
| ۱۹۰ | | ۱۷۰ | | ۱۵۰ | | تیمار |
| RMSE | R ² | RMSE | R ² | RMSE | R ² | |
| ۰/۰۰۴۲ | ۰/۹۹۷۷ | ۰/۰۰۳۷ | ۰/۹۹۷۹ | ۰/۰۰۳۰ | ۰/۹۹۸۵ | Control |
| ۰/۰۰۰۳ | ۰/۹۹۹۹ | ۰/۰۰۵۰ | ۰/۹۹۴۶ | ۰/۰۰۶۵ | ۰/۹۹ | P1 |
| ۰/۰۰۷۳ | ۰/۹۹۰۳ | ۰/۰۰۸۱ | ۰/۹۸۵۲ | ۰/۰۱۴۸ | ۰/۹۳۴۶ | P3 |
| ۰/۰۰۴۸ | ۰/۹۹۶۸ | ۰/۰۰۲۸ | ۰/۹۹۸۶ | ۰/۰۰۳۲ | ۰/۹۹۸۱ | CMC |
| ۰/۰۰۰۶ | ۰/۹۹۹۹ | ۰/۰۰۳۲ | ۰/۹۹۸۶ | ۰/۰۰۵۶ | ۰/۹۹۵۲ | B1 |
| ۰/۰۰۲۱ | ۰/۹۹۹۴ | ۰/۰۰۴۸ | ۰/۹۹۶۶ | ۰/۰۰۲۰ | ۰/۹۹۹۴ | B3 |
| ۰/۰۰۳۷ | ۰/۹۹۷۶ | ۰/۰۰۶۴ | ۰/۹۹۱۳ | ۰/۰۰۶۵ | ۰/۹۸۸۱ | B1,CMC,P1 |
| ۰/۰۰۴۹ | ۰/۹۹۵۶ | ۰/۰۰۶۳ | ۰/۹۹۰۳ | ۰/۰۰۴۸ | ۰/۹۹۰۹ | B1,CMC,P3 |
| ۰/۰۰۵۱ | ۰/۹۹۵۳ | ۰/۰۰۸۰ | ۰/۹۸۴۴ | ۰/۰۱۴۶ | ۰/۹۲۲۳ | B3,CMC,P1 |
| ۰/۰۰۶۵ | ۰/۹۹۰۸ | ۰/۰۰۸۲ | ۰/۹۸۱۹ | ۰/۰۰۴۷ | ۰/۹۸۵۷ | B3,CMC,P3 |



شکل (۳) برازش داده‌های جذب روغن حاصل از آزمایش با داده‌های حاصل از مدل پیشنهادی (مدل ۲ جدول ۲)

۳-۳- معتبرسازی مدل توسعه یافته پیشنهادی

به منظور معتبرسازی مدل توسعه یافته پیشنهادی، قطعات سیب‌زمینی ابتدا در داخل حمام آب داغ با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ دقیقه آنزیم‌بری شده و بعد در محلول کربوکسی متیل سلولز با غلظت ۰/۳ درصد به مدت ۵ ثانیه قرار گرفته و در نهایت در محلول پکتین با غلظت ۲ درصد به مدت ۵ ثانیه قرار داده شدند. سپس، نمونه‌ها در دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد در چهار زمان ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۶۰ ثانیه سرخ گردیدند. نتایج حاصل از برازش مقادیر جذب روغن آزمایشی با مقادیر جذب روغن پیش‌بینی شده توسط مدل پیشنهادی (جدول ۲)، در شکل (۳) نشان داده شده است. با توجه به شکل، انطباق خوبی بین مقادیر حاصل از مدل و مقادیر حاصل از آزمایش وجود دارد ($R^2=0/997$).

۴- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که با افزایش دمای سرخ‌کردن، میزان جذب روغن در تمامی نمونه‌ها در زمان‌های یکسان، به صورت معنی‌داری افزایش یافت. استفاده از پوشش خوراکی پکتین به عنوان

پیش‌ تیمار در هر دو غلظت ۱ و ۳ درصد میزان جذب روغن را در قطعات سیب‌زمینی سرخ‌شده نسبت به نمونه شاهد کاهش داد و این کاهش از لحاظ آماری معنی‌دار بود. همچنین، پیش‌ تیمار پوشش خوراکی کربوکسی متیل سلولز ۰/۳ درصد میزان جذب روغن را نسبت به نمونه شاهد به صورت غیرمعنی‌داری کاهش داد. اعمال پیش‌ تیمار آنزیم‌بری نیز موجب افزایش غیرمعنی‌دار جذب روغن شد. علاوه بر این، تلفیق این پیش‌ تیمارها موجب کاهش معنی‌دار در میزان جذب روغن نسبت به نمونه‌های شاهد گردید. هر ۶ مدل تجربی استفاده شده به خوبی توانستند داده‌های محتوای روغن نمونه‌های سرخ‌شده را برحسب زمان با ضریب همبستگی بالا برازش نمایند. با استفاده از مدل‌های ارائه شده توسط تجزیه و تحلیل رگرسیون چند متغیره برای تعیین ضرایب مدل‌های جذب روغن به صورت تابعی از زمان آنزیم‌بری، غلظت پوشش‌های خوراکی و دمای سرخ‌کردن، میتوان میزان روغن جذب شده را در هر لحظه پیش‌بینی کرد. در نهایت، مدل‌هایی برای میزان جذب روغن برحسب پارامترهای محتوای رطوبتی، میزان چروکیدگی و دانسیته ظاهری با R^2 بالا و RMSE پایین، پیشنهاد شد.

منابع

- [1] Pedreschi, F., Travisany, X., Reyes, C., Troncoso, E., Pedreschi, R. (2009). Kinetics of extraction of reducing sugar during blanching of potato slices. *J. Food Eng.*, 91(3), 443-447.
- [2] Duran, M., Pedreschi, F., Moyano, P., Troncoso, E. (2007). Oil partition in pre-treated potato slices during frying and cooling. *J. Food Eng.*, 81(1), 257-265.
- [3] Troncoso, E., Pedreschi, F. (2009). Modeling water loss and oil uptake during vacuum frying of pre-treated potato slices. *LWT- Food Sci. Technol.*, 42(6), 1164-1173.
- [4] Sothornvit, R. (2011). Edible coating and post-frying centrifuge step effect on quality of vacuum-fried banana chips. *J. Food Eng.*, 107(34), 319-325.
- [5] Varela, P., Fiszman, S. M. (2011). Hydrocolloids in fried foods, a review. *Food Hydrocolloid.*, 25(8), 1801-1812.
- [6] Pedreschi, F., Moyano, P. (2005). Oil uptake and texture development in fried potato slices. *J. Food Eng.*, 70(4), 557-563.
- [7] Rimac-Brcic, S., Lelas, V., Rade, D., Simundic, B. (2004). Decreasing of oil absorption in potato strips during deep fat frying. *J. Food Eng.*, 64(2), 237-241.
- [8] Pedreschi, F., Claudia, C., Moyano, P., Troncoso, E. (2008). Oil distribution in potato slices during frying. *J. Food Eng.*, 87, 200-212.
- [9] Falguera, V. C., Quintero, J. P., Jimenez, A., Muoz, J. A., Ibarz, A. (2011). Edible films and coatings: Structures, active functions and trends in their use. *Trends Food Sci. Technol.*, 22(6), 292-303.
- [10] Singthong, J., Thongkaew, C. (2009). Using hydrocolloids to decrease oil absorption in banana chips. *LWT- Food Sci. Technol.*, 42(7), 1199-1203.
- [11] Baik, O. D., Mittal, G. S. (2005). Heat and moisture transfer and shrinkage simulation of deep fat tofu frying. *Food Res. Int.*, 38(2), 183-191.
- [12] Association of Official Analytical Chemists (1995). *Official Methods of Analysis* Washington, DC.
- [13] Association of Official Analytical Chemists (1990). *Official Methods of Analysis*. Washington, DC.
- [14] Ziaifar, A. M., Courtois, F., Trystram, G. (2010). Porosity development and its effect on oil uptake during frying process. *J. Food Eng.*, 33(2), 191-212.
- [15] Steel, R. G. D., Torrie, J. H., Dickey, D. A. (1997). *Principles and procedures of statistics: a biometrical approach* New York: McGraw-Hill.
- [16] Krokida, M. K., Oreopoulou, V., Maroulis, Z. B., Marinou-Kouris, D. (2001). Effect of osmotic dehydration pretreatment on quality of french fries. *J. Food Eng.*, 49, 339-345.
- [17] De Grandi Castro Freitas, D., Berbari, S. A. G., Prati, P., Fakhouri, F. M., CollaresQueiroz, F. P., Vicente, E. (2009). Reducing fat uptake in cassava product during deep-fat frying. *J. Food Eng.*, 94, 390-394.
- [18] Garcia, M. A., Ferrero, C., Bértola, N., Martino, M., Zaritzky, N. (2002). Edible coatings from cellulose derivatives to reduce oil uptake in fried products. *Innovat. Food Sci. Emerg. Technol.*, 3(4), 391-397.
- [19] Kim, D. N., Lim, J., Bae, I. Y., Lee, H. G., Lee, S. (2011). Effect of hydrocolloid coatings on the heat transfer and oil uptake during frying of potato strips. *J. Food Eng.*, 102(4), 317-320.
- [20] Suarez, B., Campanone, L. A., Garcia, M. A., Zaritzky, N. E. (2008). Comparison of the deep frying process in coated and uncoated dough systems. *J. Food Eng.*, 84, 383-393.
- [21] Williams, R., Mittal, G. S. (1999). Water and fat transfer properties of polysaccharide films on fried pastry mix. *LWT-Food Sci. Technol.*, 32, 440-445.