

## بررسی سینتیکی دانسیته ظاهری قطعات سیب زمینی پیش تیمار شده با اولتراسوند و پوشش خوراکی طی فرآیند سرخ کردن عمیق

جلال دهقان نیا<sup>۱\*</sup>، طاووس رونقی<sup>۲</sup>، بابک قنبرزاده<sup>۳</sup>

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

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

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

(تاریخ دریافت: ۹۵/۱۲/۲۲ تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۱/۱۴)

### چکیده

تخلخل مواد غذایی طی فرآیند سرخ کردن در اثر خروج آب گسترش یافته و این پدیده، کاهش دانسیته ظاهری و افزایش جذب روغن را در پی خواهد داشت. بنابراین، با توجه به ارتباط بین دانسیته ظاهری، تخلخل و جذب روغن، بررسی دانسیته ظاهری اهمیت ویژه‌ای دارد. هدف این پژوهش، بررسی تغییرات دانسیته ظاهری و مدل‌سازی آن طی سرخ کردن قطعات سیب زمینی پیش تیمار شده با غلظت ۰/۱ و ۰/۲٪ کربوکسی متیل سلولز و اولتراسوند با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۱۵ دقیقه بود. قطعات سیب زمینی با اندازه‌های ۱/۲×۱/۲×۴ سانتی‌متر برش داده شدند و بعد از انجام پیش تیمارهای مربوطه در سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱، ۲، ۳ و ۴ دقیقه سرخ شدند. پیش تیمار پوشش خوراکی در هر دو غلظت باعث افزایش دانسیته ظاهری شد و این افزایش از لحاظ آماری نسبت به نمونه‌های شاهد در سطح ۰/۵٪ معنی‌دار نبود؛ ولی اولتراسوند با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز باعث کاهش معنی‌دار این شاخص نسبت به نمونه‌های شاهد در سطح ۰/۵٪ شد. به دلیل فقدان مدل تجربی مناسب در منابع جهت مدل‌سازی دانسیته ظاهری، در این مطالعه از تعدادی مدل تجربی پیشنهادی استفاده گردید. میانگین ضریب همبستگی بین نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از این مدل‌ها بالا بود.

**کلید واژگان:** سرخ کردن عمیق، مدل‌سازی، اولتراسوند، پوشش خوراکی، دانسیته ظاهری

\* مسئول مکاتبات: j\_dehghannya@tabrizu.ac.ir

## ۱- مقدمه

کاهش رطوبت طی سرخ کردن مواد غذایی، منجر به تغییر در شکل، تخلخل و دانسیته می‌شود و به عنوان یک عامل محدود کننده در برابر انتقال جرم و حرارت به حساب می‌آید و در نهایت کیفیت محصول نهایی را کاهش می‌دهد [۱، ۲]. به همین دلیل، محاسبه تغییرات دانسیته ظاهری محصول اهمیت ویژه‌ای دارد. پائول و میتال [۳] گزارش کردند که یک ماده خام اولیه با دانسیته بالاتر، به دلیل رابطه بین دانسیته و محتوای رطوبت اولیه، جذب روغن کمتری خواهد داشت. در پژوهشی که ضیایی فر و همکاران [۴] با هدف بررسی تأثیر دما و زمان سرخ کردن بر روی دانسیته ظاهری قطعات سیب‌زمینی انجام دادند، مشخص شد که با افزایش دما، به دلیل افزایش سرعت دفع آب، دانسیته ظاهری کاهش می‌یابد. همچنین، با پیشرفت زمان فرآیند، دانسیته ظاهری نمونه‌ها به دلیل دفع آب در نتیجه جذب روغن کاهش یافت.

هر عامل یا پیش‌تیماری که بتواند فاکتورهای مؤثر بر دانسیته ظاهری محصول سرخ‌شده مثل دما و زمان فرآیند، میزان دفع رطوبت و جذب روغن را تحت تأثیر قرار دهد، کیفیت محصول نهایی را تعیین خواهد کرد [۵]. به‌عنوان مثال، پوشش‌های خوراکی مثل کربوکسی متیل سلولز شدیداً هیدروفیلک بوده و در دماهای بالای ۶۰ درجه سانتیگراد در اثر ژلاتینیزاسیون دمایی، در مراحل اولیه سرخ کردن یک لایه محافظ روی نمونه غذایی تشکیل می‌دهند [۶]. این لایه محافظ به دلیل کاهش دمای مرکزی نمونه و ضریب انتقال حرارت، منجر به کاهش دفع رطوبت [۷] و به دنبال آن کاهش تخلخل و افزایش دانسیته ظاهری می‌شود.

علاوه بر پیش‌تیمار مذکور، استفاده از امواج اولتراسوند<sup>۱</sup> در فرآیندهای صنایع غذایی با هدف بهبود کیفیت مواد غذایی مورد توجه قرار گرفته است [۸، ۹]. امواج اولتراسوند، با ایجاد انقباض و انبساط‌های پی‌درپی در ماده غذایی باعث تشکیل کانالهای میکروسکوپی و سهولت خروج آب از داخل محصول طی خشک‌کردن می‌شود [۱۰، ۱۱]. بنابراین، به دلیل افزایش سرعت انتشار مولکولهای آب در حین آبیگری و آسیب کمتر به لوله‌های موئین، اولتراسوند باعث بهبود ویژگی‌های کیفی محصول می‌گردد [۱۰]. انتظار می‌رود با توجه به شباهت فرآیند سرخ کردن با خشک کردن از نظر انتقال جرم [۱۲] استفاده از

امواج اولتراسوند در فرآیند سرخ کردن، نتایج مشابه با خشک کردن در پی داشته باشد.

مدل‌سازی دانسیته ظاهری، با هدف درک بهتر روند تغییرات و کنترل آن، روابط بین دانسیته ظاهری را با متغیرهایی مانند زمان و دمای فرآیند نشان می‌دهد. این مدل‌ها قادر به پیش‌بینی میزان تغییر این شاخص طی فرآیند سرخ کردن می‌باشند و با استفاده از آنها، ترکیبی از مناسب‌ترین زمان و دما برای دستیابی به محصول مورد نظر با کیفیت مناسب به دست می‌آید [۵، ۹]. بر اساس منابع در دسترس، تاکنون در هیچ پژوهشی، اثر امواج اولتراسوند و پوشش خوراکی کربوکسی متیل سلولز به صورت همزمان بر میزان دانسیته ظاهری طی فرآیند سرخ کردن محصول بررسی نشده و مدل تجربی مناسب برای این فاکتور با در نظر گرفتن تأثیر متقابل این پیش‌تیمارها پیشنهاد نشده است. بنابراین، این پژوهش با هدف مطالعه تأثیر پیش‌تیمارهای اولتراسوند و پوشش خوراکی کربوکسی متیل سلولز روی تغییرات دانسیته ظاهری و مدل‌سازی آن بر اساس مدل‌های تجربی پیشنهادی بر حسب زمان، محتوای رطوبتی، میزان جذب روغن و چروکیدگی صورت گرفت.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مواد

مواد خام مورد استفاده در این پژوهش، سیب‌زمینی و روغن مایع بود. سیب‌زمینی از بازار محلی خریداری و قبل از انجام آزمایشات در سردخانه بالای صفر نگهداری شد و روغن مورد استفاده نیز، روغن مایع مخصوص سرخ‌کردنی (مخلوطی از روغن‌های آفتابگردان، سویا و پنبه‌دانه) بود. همچنین، برای پوشش دادن نمونه‌ها از کربوکسی متیل سلولز (سانروس، ساخت ژاپن) استفاده شد.

### ۲-۲- تجهیزات

در این پژوهش از سرخ‌کن خانگی (مولینکس، مدل F430.R با ظرفیت ۲/۲ لیتر روغن، ساخت فرانسه، مجهز به سیستم تنظیم دما در محدوده ۱۵۰ تا ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد، دارای محفظه ضدزنگ و سبد جداشونده)، آون کنوکسیون (مدل BM120، ۱۲۰ لیتری، ساخت ایران، شرکت فن آزما گستر، هوشمند و مجهز به فن سیرکولاسیون هوا) جهت اندازه‌گیری مقدار رطوبت نمونه‌ها و حمام اولتراسوند (مدل USD - 4R،

1. Ultrasound

۲ و ۳: نمونه‌هایی که به منظور پوشش دادن، در محلول‌های ۰/۱ و ۰/۲٪ تهیه شده از کربوکسی‌متیل سلولز، به مدت ۵ ثانیه به‌طور مجزا غوطه‌ور شدند.

۴: نمونه‌هایی که جهت انجام اولتراسونیکاسیون، در حمام اولتراسوند در معرض فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۱۵ دقیقه قرار گرفتند.

۵ و ۶: نمونه‌هایی که جهت انجام پیش‌ تیمار تلفیقی از اولتراسوند و پوشش خوراکی، ابتدا در حمام اولتراسوند با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۱۵ دقیقه قرار گرفتند و سپس به‌طور مجزا در محلول‌های ۰/۱ و ۰/۲٪ از پوشش خوراکی به مدت ۵ ثانیه غوطه‌ور شدند.

ساخت ژاپن، مجهز به سیستم تنظیم فرکانس و زمان فرآیند) برای اولتراسونیکاسیون استفاده شد.

## ۲-۳- آماده‌سازی نمونه‌ها

پس از شستشو و پوست‌گیری سیب‌زمینی، برای تهیه نمونه‌ها با ابعاد ۴×۲×۱/۲ سانتی‌متر، از یک کاتر دستی استفاده شد. سپس نمونه‌ها، جهت حذف نشاسته سطحی با آب مقطر شستشو داده شدند و رطوبت اضافی با کاغذ خشک‌کن گرفته شد. در مرحله بعد نمونه‌های پیش‌ تیمار شده به‌صورت زیر تهیه شدند (جدول ۱):

۱: نمونه‌های شاهد که بلافاصله در دماها و زمان‌های مورد نظر سرخ شدند.

Table 1 Different treatments and their abbreviations

Number	Pretreatment	Symbol
1	Control	Control
2	Coating with 0.1% carboxymethyl cellulose	0.1CMC
3	Coating with 0.2% carboxymethyl cellulose	0.2CMC
4	Ultrasound with frequency of 40kHz	U
5	Ultrasound with frequency of 40kHz - Coating with 0.1% carboxymethyl cellulose	U-0.1CMC
6	Ultrasound with frequency of 40kHz - Coating with 0.2% carboxymethyl cellulose	U-0.2CMC

## ۲-۵- اندازه‌گیری محتوای رطوبتی

محتوای رطوبتی، با خشک‌کردن نمونه‌ها در آون کنوکسیونی با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت اندازه‌گیری شد [۱۳] و بر حسب گرم رطوبت بر گرم ماده خشک بدون روغن گزارش گردید.

## ۲-۶- اندازه‌گیری محتوای روغن

محتوای روغن نمونه‌های سرخ‌شده با استخراج روغن آنها توسط حلال پترولیوم اتر در دستگاه سوکسله اندازه‌گیری گردید [۱۴] و بر حسب گرم روغن بر گرم ماده خشک بدون روغن گزارش شد.

## ۲-۷- اندازه‌گیری 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 اندازه‌گیری گردید:

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

V: حجم ظاهری اولیه یا سرخ شده (cm<sup>3</sup>)

## ۲-۴- شرایط سرخ کردن

برای سرخ‌کردن سیب‌زمینی‌ها از سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱، ۲، ۳ و ۴ دقیقه استفاده شد. جهت سرخ‌کردن نمونه‌های تهیه شده (جدول ۱)، ابتدا سرخ‌کن تا خط نشانه پر از روغن شد و بعد از تنظیم دما و زمان سرخ‌کردن موردنظر، سرخ‌کن بر روی حالت اتوماتیک قرار داده شد. سپس حدود ۴۰-۵۰ گرم نمونه (۷-۸ قطعه) داخل سبد مشبک سرخ‌کن قرار داده شد و با رسیدن دمای سرخ‌کن به دمای موردنظر، سبد حاوی نمونه‌ها به‌طور اتوماتیک داخل روغن غوطه‌ور گردید. پس از سرخ‌شدن به مدت زمان موردنظر، سبد حاوی نمونه‌ها به‌طور خودکار از سرخ‌کن بیرون آمده و با آژیر سرخ‌کن، نمونه‌ها از سرخ‌کن بیرون آورده شدند و سپس روغن اضافی آنها توسط یک کاغذ جاذب گرفته شد و بلافاصله آنالیزهای مربوطه بر روی آنها انجام شد. روغن مورد استفاده پس از هر هشت بار فرآیند سرخ‌کردن تعویض شد. تمامی آزمایشات با دو تکرار انجام گردید و داده‌های گزارش شده، میانگین داده‌های آزمایشی هستند.

SAS انجام شد. برای مقایسه میانگین از آزمون بونفرونی<sup>۲</sup> ( $P < 0.05$ ) استفاده شد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- تغییرات دانسیته ظاهری

میزان دانسیته ظاهری با افزایش زمان سرخ‌کردن در سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد، کاهش یافت (شکل ۱-الف). در دقایق اولیه سرخ کردن، دانسیته ظاهری تغییرات کمتری داشت؛ زیرا همزمان با دفع رطوبت، به دلیل وقوع پدیده چروکیدگی، کاهش حجم نیز رخ داده و نسبت جرم به حجم (دانسیته ظاهری)، کاهش کمتری دارد. با پیشرفت فرآیند، چروکیدگی کمتر شده، ولی به دلیل ادامه داشتن خروج آب، دانسیته ظاهری شروع به کاهش می‌نماید [۴]. این یافته‌ها با نتایج حاصل از پژوهش‌م‌ث و همکاران [۱۵] که کاهش دانسیته ظاهری با پیشرفت زمان را به از دست دادن آب، توسعه حفرات حاوی هوا و جذب روغن نسبت دادند، همخوانی دارد. در بررسی تأثیر دما بر روی دانسیته ظاهری، در منحنی دانسیته ظاهری به صورت تابعی از زمان (شکل ۱-a)، مشاهده می‌شود که دماهای بالای سرخ کردن، تأثیر منفی روی دانسیته ظاهری داشته و باعث کاهش این شاخص در زمان‌های یکسان از فرآیند می‌گردد. در دماهای بالا به دلیل تسریع انتقال جرم و توسعه تخلخل حاصل از این پدیده، دانسیته ظاهری کاهش می‌یابد؛ ولی طی مرحله سرد کردن، به دلیل پر شدن سوراخ‌های بوجود آمده با روغن، دانسیته ظاهری افزایش می‌یابد [۴]. نتایج مشابهی توسط م‌ث و همکاران [۱۵] و همچنین، تایوو و بیک [۱۶] گزارش شده است.

مطابق شکل ۱-b، دانسیته ظاهری با میزان دفع رطوبت ارتباط مستقیم دارد و با کاهش محتوای رطوبتی نمونه‌های شاهد، دانسیته ظاهری در هر سه دما کاهش پیدا کرد. این یافته در تطابق با یافته‌های حاصل از مطالعات تایوو و بیک [۱۶]، کروکیدا و همکاران [۱۷] و کاواس و موریرا [۱۸] به ترتیب روی سیب‌زمینی شیرین، سیب‌زمینی سرخ شده و چیپس تورتیلا در فرآیند سرخ کردن می‌باشد. روند تغییرات دانسیته بر حسب محتوای رطوبتی در پیش‌تیمارهای دیگر نیز به همین صورت بود (داده‌ها نشان داده نشده‌اند).

M: وزن نمونه (gr)

M<sub>1</sub>: وزن پیکنومتر خالی و حلال (gr)

M<sub>2</sub>: وزن پیکنومتر حاوی نمونه و حلال (gr)

p: دانسیته تولون (kg/m<sup>3</sup>)

در مرحله بعد، با استفاده از حجم ظاهری حاصل از رابطه ۱، میزان چروکیدگی نمونه‌های سرخ‌شده از رابطه زیر محاسبه شد [۴]:

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

S<sub>(t)</sub>: درصد چروکیدگی

V<sub>0</sub>: حجم ظاهری نمونه تازه (cm<sup>3</sup>)

V<sub>(t)</sub>: حجم ظاهری نمونه پس از سرخ‌شدن (cm<sup>3</sup>)

#### ۲-۸- اندازه‌گیری دانسیته ظاهری

از نسبت وزن به حجم نمونه سرخ شده، مقادیر دانسیته ظاهری به صورت گرم بر سانتی‌متر مکعب گزارش شد [۴]:

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

p: دانسیته ظاهری محصول (g/cm<sup>3</sup>)

M: جرم محصول (g)

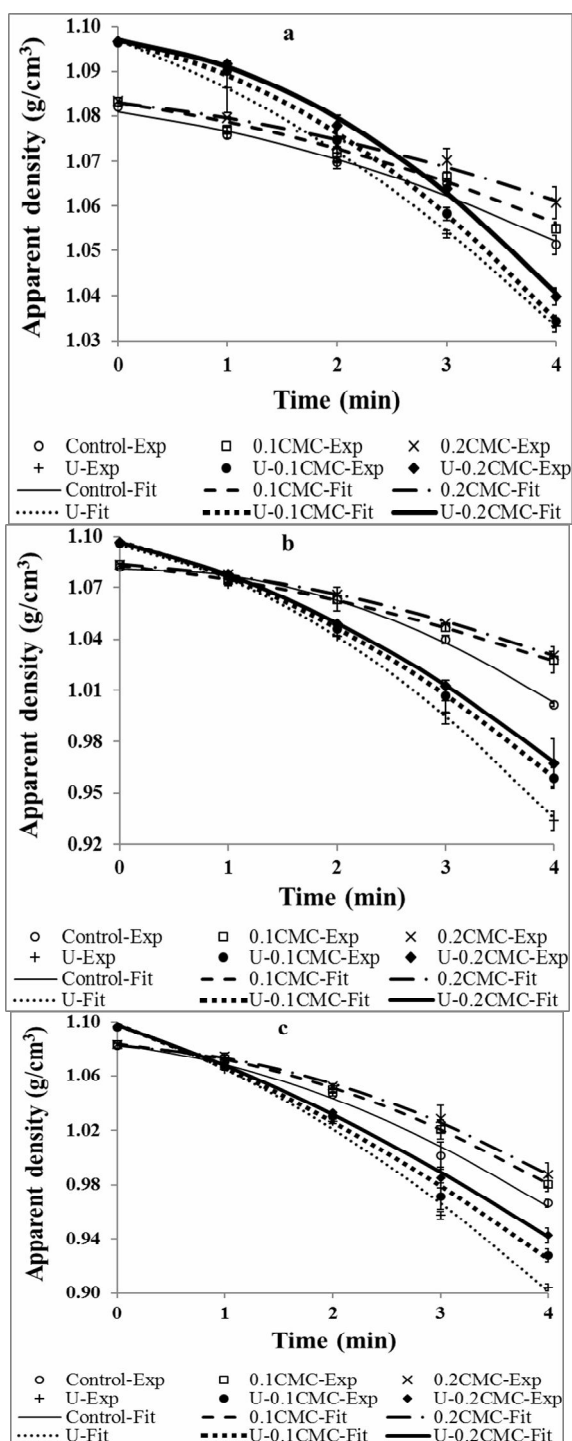
V: حجم ظاهری محصول (cm<sup>3</sup>)

#### ۲-۹- مدل‌سازی دانسیته ظاهری

مدل‌سازی دانسیته ظاهری طی فرآیند سرخ‌کردن عمیق به صورت تابعی از زمان، دفع آب، جذب روغن و چروکیدگی صورت گرفت. مدل‌های پیشنهادی از طریق برازش داده‌های حاصل از آزمایش با استفاده از نرم‌افزار MATLAB (Version 7.12.635, R) به دست آمد. ارزیابی مدل‌ها نیز با استفاده از دو معیار ضریب همبستگی (R<sup>2</sup>) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) انجام شد؛ به این صورت که مدل‌های دارای R<sup>2</sup> بالاتر و RMSE پایین‌تر به عنوان مدل پیشنهادی انتخاب گردیدند.

#### ۲-۱۰- تجزیه و تحلیل آماری

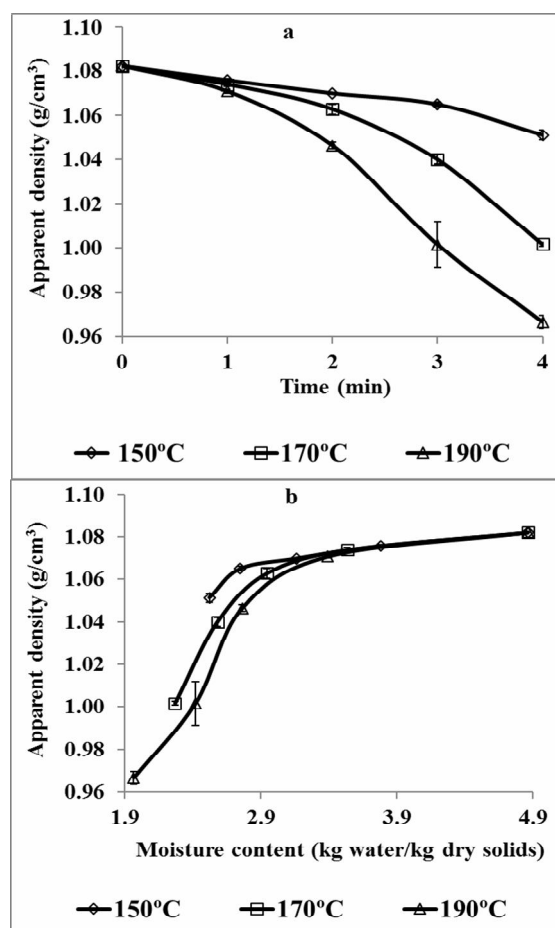
۶ تیمار (جدول ۱) در سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد و ۴ زمان ۱، ۲، ۳ و ۴ دقیقه در دو تکرار (۱۴۴=۲×۴×۳×۶) سرخ شدند. تجزیه و تحلیل داده‌ها بر اساس آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کامل تصادفی توسط نرم‌افزار



**Fig 2** Apparent density variations of potato strips during frying based on experimental (Exp) and predicted (Fit) data (model 1, Table 3) for various treatments based on Table 1 at 150°C (a), 170°C (b) and 190°C (c)

با توجه به اینکه تلفیق دو پیش تیمار پوشش خوراکی و اولتراسوند باعث کاهش دانسیته ظاهری نسبت به نمونه‌های شاهد کربوکسی متیل سلولوز در اثر ژلاتینیزاسیون دمایی در مراحل اولیه سرخ کردن، یک لایه محافظ روی ماده غذایی تشکیل داده و این لایه محافظ به دلیل کاهش دمای مرکزی

منحنی‌های تغییرات دانسیته ظاهری به صورت تابعی از زمان در تیمارهای مختلف، در دقیقه اول فرایند تغییرات زیادی نداشته ولی با نزدیک شدن به مراحل انتهایی فرآیند، حالت نزولی پیدا می‌کنند (شکل ۲). مطابق این شکل، با افزایش زمان سرخ کردن، دانسیته ظاهری در تمامی پیش تیمارها کاهش پیدا کرد. نمونه‌های پیش تیمار شده با کربوکسی متیل سلولوز ۰/۲٪ در مقایسه با سایر پیش تیمارها بیشترین دانسیته ظاهری را در زمان‌های سرخ کردن یکسان در هر سه دما از خود نشان دادند. کمترین میزان دانسیته ظاهری نیز مربوط به پیش تیمار اولتراسوند بود و بعد از آن به ترتیب پیش تیمار اولتراسوند-پوشش خوراکی ۰/۱٪، اولتراسوند-پوشش خوراکی ۰/۲٪، شاهد و پوشش خوراکی ۰/۱٪ کمترین دانسیته ظاهری را داشتند.



**Fig 1** Apparent density variations of control potato strips during frying at 150, 170 and 190°C as a function of frying time (a) and moisture content (b) استفاده از پوشش خوراکی به عنوان پیش تیمار در فرآیند سرخ کردن قطعات سیب زمینی، به دلیل کاهش میزان دفع آب [۶] و ارتباط مستقیم دانسیته ظاهری و رطوبت، میزان دانسیته ظاهری را افزایش می‌دهد.

## ۲-۳- مدل‌سازی دانسیته ظاهری

جدول ۳، مدل‌سازی دانسیته ظاهری را نشان می‌دهد که در آنها دانسیته ظاهری به صورت تابعی از زمان (مدل‌های ۶-۱)، محتوای رطوبتی بدون بعد (مدل ۷)، جذب روغن (مدل ۸) و چروکیدگی (مدل ۹) مدل‌سازی شده است. به دلیل عدم وجود مدل‌های تجربی مشابه در کارهای پژوهشی قبلی، تمامی مدل‌های به کار رفته، مدل‌های پیشنهادی در پژوهش حاضر می‌باشند. جدول ۴، شاخص‌های آماری حاصل از برازش داده‌های آزمایشی با مدل‌های ۹-۱ را نشان می‌دهد. تمامی مدل‌های پیشنهادی با داشتن شاخص‌های آماری مناسب ( $R^2$  بالا و RMSE پایین)، داده‌های آزمایشی را به خوبی برازش نمودند.

نمونه و ضریب انتقال حرارت، منجر به کاهش دفع رطوبت و افزایش دانسیته ظاهری می‌شود [۷]. کاهش دانسیته ظاهری توسط اولتراسوند را نیز می‌توان به شکل‌گیری کانال‌های ریز میکروسکوپی و ایجاد حالت اسفنجی که سهولت خروج رطوبت و ایجاد تخلخل بیشتر را در پی دارد، نسبت داد [۱۱،۱۰].

شده است، می‌توان استنباط نمود که پیش‌تیمار اولتراسوند نسبت به پیش‌تیمار پوشش خوراکی، تأثیر بیشتری بر دانسیته ظاهری داشته است. جدول ۲، مقایسه میانگین تغییرات دانسیته ظاهری را به ترتیب برای ۴ زمان (۱، ۲، ۳ و ۴ دقیقه)، ۳ دما (۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد)، ۲ غلظت کربوکسی متیل سلولز و ۱ فرکانس اولتراسوند نشان می‌دهد.

**Table 2** Mean comparison of apparent density as a function of a: frying time; b: frying temperature; c: CMC concentration and d: ultrasound frequency

a:				
Frying time (min)	1	2	3	4
Apparent density ( $\text{g/cm}^3$ )*	1.0763 <sup>a</sup>	1.0559 <sup>b</sup>	1.0275 <sup>c</sup>	0.9946 <sup>d</sup>

\*Different letters in the same row indicate a significant difference (P<0.05)

b:			
Frying temperature (°C)	150	170	190
Apparent density ( $\text{g/cm}^3$ )*	1.0663 <sup>a</sup>	1.0356 <sup>b</sup>	1.0138 <sup>c</sup>

\*Different letters in the same row indicate a significant difference (P < 0.05)

c:			
CMC concentration (%)	0 (control)	0.1	0.2
Apparent density ( $\text{g/cm}^3$ )*	1.0320 <sup>a</sup>	1.0395 <sup>a</sup>	1.0442 <sup>a</sup>

\*Different letters in the same row indicate a significant difference (P < 0.05)

d:		
Ultrasound frequency (kHz)	0 (control)	40
Apparent density ( $\text{g/cm}^3$ )*	1.0496 <sup>a</sup>	1.0276 <sup>b</sup>

\*Different letters in the same row indicate a significant difference (P < 0.05)

**Table 3** Apparent density ( $\rho$ ) modeling of potato strips during frying as a function of time (t), dimensionless moisture content ( $M_t$ ), oil content (Y) and shrinkage (S)

No.	Models	Reference
1	$\rho = at^2 + bt + c$	Current study
2	$\rho = a \exp(-bt) + c$	=
3	$\rho = a \exp(bt^c)$	=
4	$\rho = a + \exp(bt^2)^t$	=
5	$\rho = a / \exp(bt^2)$	=
6	$\rho = a / (b + t)$	=
7	$\rho = (abM_t) / (1 + bM_t)$	=
8	$\rho = aY^2 + bY + c$	=
9	$\rho = a \exp(bS^c)$	=

**Table 4** Statistical parameters of models 1-9 in Table 3 for different treatments and temperatures during frying

Model 1	Temperature (°C)														
	150					170					190				
	Treatment	a*	b*	c	R <sup>2</sup>	RMSE	a*	b*	c	R <sup>2</sup>	RMSE	a*	b*	c	R <sup>2</sup>
Control	-0.9	-3.3	1.1	0.98	0.00226	-5.1	1.1	1.1	0.99	0.00284	-4.9	-10.6	1.08	0.99	0.00601
0.1CMC	-0.8	-3.5	1.1	0.99	0.00170	-1.9	-6.4	1.1	0.99	0.00032	-4.7	-6.9	1.08	0.99	0.00088
0.2CMC	-0.7	-2.7	1.1	0.99	0.00134	-2.2	-4.4	1.1	0.99	0.00097	-4.7	-4.8	1.08	0.99	0.00240
U	-1.7	-8.9	1.1	0.99	0.00048	-6.6	-13.5	1.1	0.99	0.00309	-5.3	-27.9	1.10	0.99	0.00778
U-0.1CMC	-2.6	-5.2	1.1	0.99	0.00131	-4.6	-15.9	1.1	1	0.00043	-3.6	-28.7	1.10	0.99	0.00665
U-0.2CMC	-2.7	-3.2	1.1	0.99	0.00152	-4.3	-15.1	1.1	0.99	0.00055	-2.9	-27.2	1.10	0.99	0.00343

\*×10<sup>-3</sup>

Model 2	Temperature (°C)														
	150					170					190				
	Treatment	a	b*	c	R <sup>2</sup>	RMSE	a	b*	c	R <sup>2</sup>	RMSE	a	b*	c	R <sup>2</sup>
Control	3.45	0.20	-2.40	0.95	0.00350	1.63	1.2	-0.5	0.90	0.01420	5.65	0.53	-4.6	0.96	0.01448
0.1CMC	0.80	0.83	0.28	0.97	0.00279	0.70	2.0	0.4	0.97	0.00539	2.35	1.11	-1.3	0.95	0.01286
0.2CMC	0.04	13.1	1.04	0.92	0.00353	0.65	2.1	0.4	0.96	0.00636	2.03	1.18	-0.9	0.94	0.01319
U	1.02	1.60	0.08	0.98	0.00499	4.83	0.8	-3.7	0.96	0.01827	7.72	0.64	-6.6	0.98	0.01650
U-0.1CMC	0.99	1.59	0.11	0.96	0.00734	31.2	0.1	-3.0	0.93	0.02037	4.36	1.00	-3.2	0.98	0.01215
U-0.2CMC	0.71	2.02	0.39	0.94	0.00776	2.40	1.3	-1.3	0.97	0.01197	2.36	1.70	-1.3	0.99	0.00948

\*×10<sup>-2</sup>

Model 3	Temperature (°C)														
	150					170					190				
	Treatment	a	b*	c	R <sup>2</sup>	RMSE	a	b*	c	R <sup>2</sup>	RMSE	a	b*	c	R <sup>2</sup>
Control	1.08	-3.5	1.46	0.98	0.00255	1.08	-3.3	2.2	0.99	0.00257	1.08	-12.4	1.6	0.99	0.00489
0.1CMC	1.08	-3.6	1.39	0.98	0.00200	1.08	-6.7	1.5	0.99	0.00051	1.08	-9.2	1.7	0.99	0.00099
0.2CMC	1.08	-2.8	1.41	0.99	0.00148	1.08	-5.4	1.6	0.99	0.00039	1.08	-7.5	1.8	0.99	0.00269
U	1.09	-8.7	1.38	0.99	0.00034	1.09	-15	1.7	0.99	0.00528	1.09	-26.4	1.4	0.99	0.00674
U-0.1CMC	1.09	-6.2	1.61	0.99	0.00118	1.09	-16	1.5	0.99	0.00156	1.10	-26.4	1.3	0.99	0.00550
U-0.2CMC	1.09	-4.7	1.74	0.99	0.00161	1.09	-15	1.5	0.99	0.00157	1.10	-25.0	1.3	0.99	0.00213

\*×10<sup>-3</sup>

Model 4	Temperature (°C)												
	150				170				190				
	Treatment	a	b*	R <sup>2</sup>	RMSE	a	b*	R <sup>2</sup>	RMSE	a	b	R <sup>2</sup>	RMSE
Control	0.08	-4.2	0.92	0.00374	0.08	-12.4	0.98	0.00455	0.07	-18.5	0.93	0.01506	
0.1CMC	0.08	-3.9	0.92	0.00359	0.07	-8.19	0.92	0.00709	0.07	-15.9	0.95	0.01057	
0.2CMC	0.08	-3.1	0.92	0.00295	0.08	-7.97	0.94	0.00621	0.07	-14.8	0.96	0.00901	
U	0.09	-9.3	0.91	0.00887	0.08	-25.5	0.95	0.0166	0.07	-31.0	0.91	0.02746	
U-0.1CMC	0.09	-9.3	0.94	0.00709	0.08	-21.2	0.93	0.0170	0.07	-26.4	0.90	0.02636	
U-0.2CMC	0.09	-8.5	0.95	0.00567	0.08	-19.8	0.93	0.0161	0.07	-23.7	0.90	0.02408	

\*×10<sup>-4</sup>

Model 5	Temperature (°C)												
	150				170				190				
	Treatment	a	b*	R <sup>2</sup>	RMSE	a	b*	R <sup>2</sup>	RMSE	a	b	R <sup>2</sup>	RMSE
Control	1.08	1.64	0.96	0.00252	1.08	4.69	0.99	0.00267	1.08	7.19	0.99	0.00655	
0.1CMC	1.08	1.51	0.97	0.00228	1.08	3.19	0.98	0.00317	1.08	6.13	0.99	0.00311	
0.2CMC	1.08	1.22	0.97	0.00178	1.08	3.08	0.99	0.00227	1.08	5.66	0.99	0.00288	
U	1.09	3.59	0.98	0.00443	1.09	9.67	0.99	0.00657	1.08	12.01	0.98	0.01364	
U-0.1CMC	1.09	3.57	0.99	0.00271	1.09	8.16	0.99	0.00732	1.08	10.33	0.97	0.0142	
U-0.2CMC	1.09	3.24	0.99	0.00196	1.09	7.61	0.99	0.00702	1.08	9.26	0.97	0.01305	

\*×10<sup>-3</sup>

Model 6	Temperature (°C)											
	150				170				190			
	Treatment	a	b	R <sup>2</sup>	RMSE	a	b	R <sup>2</sup>	RMSE	a	b	R <sup>2</sup>
Control	157.8	145.70	0.95	0.00288	57.7	52.8	0.90	0.01210	36.1	32.9	0.94	0.01332
0.1CMC	171.1	157.90	0.97	0.00229	80.8	74.3	0.97	0.00446	42.7	39.1	0.94	0.01154
0.2CMC	211.9	195.40	0.96	0.00188	84.8	77.9	0.96	0.00524	46.6	42.6	0.94	0.01159
U	72.0	65.4	0.98	0.00431	26.9	24.3	0.94	0.01778	21.1	19.0	0.96	0.01781
U-0.1CMC	74.2	67.3	0.95	0.00618	31.6	28.6	0.96	0.01243	24.3	22.0	0.97	0.01296
U-0.2CMC	82.4	74.8	0.94	0.00640	33.9	30.7	0.96	0.01142	27.1	24.5	0.98	0.01010

Model 7	Temperature (°C)											
	150				170				190			
	Treatment	a	b	R <sup>2</sup>	RMSE	a	b	R <sup>2</sup>	RMSE	a	b	R <sup>2</sup>
Control	1.12	7.03	0.91	0.00408	1.17	2.95	0.90	0.01480	1.20	2.23	0.92	0.01620
0.1CMC	1.11	7.32	0.95	0.00279	1.14	4.08	0.95	0.00549	1.18	2.59	0.95	0.01069
0.2CMC	1.11	8.84	0.98	0.00158	1.14	4.20	0.95	0.00559	1.17	2.76	0.96	0.00887
U	1.15	3.74	0.99	0.00193	1.26	1.42	0.95	0.01610	1.26	1.37	0.99	0.00929
U-0.1CMC	1.15	3.75	0.99	0.00257	1.23	1.68	0.98	0.00860	1.23	1.61	0.99	0.00661
U-0.2CMC	1.15	4.13	0.99	0.00259	1.22	1.80	0.99	0.00682	1.21	1.81	0.99	0.00502

Model 8	Temperature (°C)														
	150					170					190				
	Treatment	a	b	c	R <sup>2</sup>	RMSE	a	b	c	R <sup>2</sup>	RMSE	a	b	c	R <sup>2</sup>
Control	-1.7	0.21	1.08	0.90	0.00561	-6.8	1.12	1.1	0.90	0.01450	-7.7	1.35	1.1	0.97	0.01261
0.1CMC	-2.0	0.16	1.08	0.90	0.00477	-5.0	0.56	1.1	0.96	0.00596	-12.5	1.70	1.1	0.94	0.01393
0.2CMC	-3.0	0.13	1.08	0.92	0.00345	-7.2	0.52	1.1	0.97	0.00548	-13.1	1.30	1.1	0.94	0.01331
U	-4.7	0.00	1.09	0.99	0.00131	-15	0.65	1.1	0.99	0.00715	-14.8	0.96	1.1	0.99	0.01324
U-0.1CMC	-13	0.35	1.10	0.97	0.00597	-28	1.21	1.1	0.99	0.00824	-22.1	1.11	1.1	0.99	0.01094
U-0.2CMC	-16	0.52	1.10	0.99	0.00255	-20	0.73	1.1	0.99	0.00845	-20.6	1.07	1.1	0.99	0.00661

Model 9	Temperature (°C)														
	150					170					190				
	Treatment	a	b	c	R <sup>2</sup>	RMSE	a	b	c	R <sup>2</sup>	RMSE	a	b	c	R <sup>2</sup>
Control	1.08	-3.8	4.38	0.95	0.00367	1.08	249	8.1	0.98	0.00644	1.07	12990	11.9	0.97	0.01112
0.1CMC	1.08	-4.2	4.08	0.99	0.00179	1.08	5889	9.8	0.98	0.00487	1.08	916	8.1	0.98	0.00762
0.2CMC	1.08	-31	5.72	0.98	0.00193	1.08	231	6.9	0.96	0.00607	1.08	126	6.1	0.99	0.00438
U	1.10	-105	5.67	0.99	0.00312	1.09	9998	14	0.95	0.01991	1.10	9653	8.6	0.99	0.00883
U-0.1CMC	1.09	-241	7.66	0.99	0.00341	1.09	1094	8.7	0.99	0.00772	1.10	1272	6.8	0.99	0.01010
U-0.2CMC	1.10	-66	5.15	0.99	0.00150	1.09	7034	8.3	0.99	0.00757	1.10	1267	6.8	0.99	0.01010

مدلهایی می توان زمان مناسب برای دستیابی به یک نمونه سرخ شده با میزان دانسیته ظاهری معین و مناسب را محاسبه نموده و نمونه غذایی را تنها تا زمان مورد نظر سرخ کرد. از طرف دیگر، با بدست آوردن چنین مدلهایی، لزوم انجام آزمایشات پرهزینه در شرایط مختلف ذکر شده در فرآیند سرخ کردن کاهش پیدا می کند.

#### ۴- نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که با پیشرفت زمان از ۱ الی ۴ دقیقه، دانسیته ظاهری در تمامی نمونه ها کاهش یافت. همچنین

علاوه بر این، شکل ۲، منحنی های برازش داده های آزمایشی دانسیته ظاهری نمونه های مختلف (بر اساس جدول ۱) سرخ شده در چهار زمان ۱، ۲، ۳ و ۴ دقیقه و سه دمای ۱۵۰، ۱۷۰ و ۱۹۰ درجه سانتی گراد را با مدل ۱ (جدول ۳) نشان می دهد. همان طور که از این شکل و جدول ۴ مشخص است، مدل پیشنهادی ۱، به عنوان یکی از بهترین مدل های پیشنهادی در این پژوهش، به خوبی قادر به برازش داده های آزمایشی می باشد. با استفاده از این مدل ها به راحتی می توان دانسیته ظاهری را با داشتن مقادیر مختلف محتوای رطوبتی بدون بعد، محتوای روغن و چروکیدگی بدست آورد. همچنین، با استفاده از چنین



- Science & Emerging Technologies*, 3(4), 391-397.
- [7] Kim, D. N., Lim, J., Bae, I. Y., Lee, H. G., & S., L. (2011). Effect of hydrocolloid coatings on the heat transfer and oil uptake during frying of potato strips. *Journal of Food Engineering*, 102, 317-320.
- [8] Fernandes, F. A. N., & Rodrigues, S. (2007). Use of ultrasound as pretreatment for drying of fruits: Dehydration of banana. *Journal of Food Engineering*, 82, 261-267.
- [9] Dehghannya, J., Gorbani, R., & Ghanbarzadeh, B. (2016). Determination of bulk density of Mirabelle plum during hot air drying as influenced by ultrasound-osmotic pretreatment. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 10(4), 738-745.
- [10] Fernandes, F. A. N., Gallão, M. I., & Rodrigues, S. (2009). Effect of osmosis and ultrasound on pineapple cell tissue structure during dehydration. *Journal of Food Engineering*, 90(2), 186-190.
- [11] Dehghannya, J., Naghavi, E.-A., & Ghanbarzadeh, B. (2016). Frying of potato strips pretreated by ultrasound-assisted air-drying. *Journal of Food Processing and Preservation*, 40(4), 583-592.
- [12] Farid, M., & 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.
- [13] AOAC (1984). The official methods of analysis. Method 28.074 (14th ed.). Association of Official Analytical Chemists, Arlington, VA: AOAC.
- [14] AOAC (1995). The official methods of analysis. Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC, USA.
- [15] Math, R. G., Velu, V., Nagender, A., & Rao, D. G. (2004). Effect of frying conditions on moisture, fat, and density of papad. *Journal of Food Engineering*, 64, 429-434.
- [16] Taiwo, K. A., & 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.
- [17] Krokida, M. K., Oreopoulou, V., Maroulis, Z. B., & Marinos-Kouris, D. (2001). Effect of pre-drying on quality of French fries. *Journal of Food Engineering*, 49, 347-354.
- [18] Kawas, M. L., & Moreira, R. G. (2001). Characterization of product quality attributes of tortilla chips during the frying process. *Journal of Food Engineering*, 47, 97-107.
- با افزایش دمای سرخ کردن از ۱۵۰ تا ۱۹۰ درجه سانتی گراد، در زمان‌های یکسان از فرآیند، میزان دانسیته ظاهری در تمامی نمونه‌های مورد آزمون کاهش یافت. پیش‌تیمار پوشش خوراکی در هر دو غلظت ۰/۱ و ۰/۲٪، میزان دانسیته ظاهری را افزایش داد و این افزایش از لحاظ آماری نسبت به نمونه شاهد در سطح پنج درصد معنی‌دار نبود. پیش‌تیمار اولتراسوند نیز باعث کاهش دانسیته ظاهری شد و این کاهش از لحاظ آماری نسبت به نمونه شاهد معنی‌دار بود. تمامی مدل‌های پیشنهادی، داده‌های آزمایشی دانسیته ظاهری را بر حسب زمان، محتوای رطوبتی بدون بعد، محتوای روغن و چروکیدگی، برای همه پیش‌تیمارهای مورد آزمون با ضریب همبستگی بالا برازش کردند. مدل‌های پیشنهاد شده در این مطالعه، می‌توانند مدل‌های مفیدی جهت استفاده در فرآیند سرخ کردن عمیق در شرایط دمایی و زمانی مختلف باشند و با پیش‌بینی روند تغییرات دانسیته ظاهری طی فرآیند سرخ کردن، به کنترل کیفیت محصول نهایی کمک کنند.

## ۵- منابع

- [1] Krokida, M. K., & Maroulis, Z. B. (1999). Effect of microwave drying on some quality properties of dehydrated products. *Drying Technology*, 17, 449-466.
- [2] Wang, N., & Brennan, J. G. (1995). Changes in structure, density and porosity of potato during dehydration. *Journal of Food Engineering*, 24, 61-76.
- [3] Paul, S., & Mittal, G. S. (1997). Regulating the use of degraded oil/fat in deep-fat/oil food frying. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 37, 635-662.
- [4] Ziaifar, A. M., Courtois, F., & Trystram, G. (2010). Porosity development and its effect on oil uptake during frying process. *Journal of Food Process Engineering*, 33(2), 191-212.
- [5] Naghavi, E.-A., Dehghannya, J., & Ghanbarzadeh, B. (2017). Modeling apparent density of potato strips pretreated with ultrasound and drying during deep-fat frying. *Iranian Journal of Food Science and Technology*, 62(14), 1-15 [In Persian].
- [6] Garcia, M. A., Ferrero, C., Bértola, N., Martino, M., & Zaritzky, N. (2002). Edible coatings from cellulose derivatives to reduce oil uptake in fried products. *Innovative Food*

## Investigating apparent density kinetics of potato strips pretreated with ultrasound and edible coating during deep-fat frying process

Dehghannya, J. <sup>1\*</sup>, Ronaghi, T. <sup>2</sup>, Ghanbarzadeh, B. <sup>3</sup>

1. Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz
2. M. Sc. Graduate, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz
3. Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

(Received: 2017/03/12 Accepted: 2017/04/22)

Porosity of food products during frying process is increased due to moisture removal and this phenomenon, reduces apparent density and increases oil uptake. Therefore, according to the relationship between apparent density, porosity and oil uptake, investigation of the apparent density is important. The aim of this study was to investigate changes of apparent density and its modeling during deep-fat frying of potato strips pretreated with 0.1 and 0.2% carboxy methyl cellulose concentration and 40 kHz ultrasound frequency for 15 minutes. The potato strips were cut into 1.2×1.2×4 cm<sup>3</sup> pieces and after performing the pretreatments, the frying process was done at three different temperatures of 150, 170 and 190°C for 1, 2, 3 and 4 minutes. Edible coating pretreatment in both the concentration led to an increase in apparent density and this increase was not statistically significant compared to control samples ( $P > 0.05$ ). However, 40 kHz ultrasound frequency led to a significant decrease of the parameter in comparison with controls ( $P < 0.05$ ). Due to the lack of appropriate experimental models in the literature for modeling apparent density, a number of empirical models proposed in this study, were used. Average correlation coefficient between experimental and model data was high.

**Keywords:** Deep-fat frying, Modeling, Ultrasound, Edible coating, Apparent density

---

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