

## مدل‌سازی سینتیک انتقال جرم طی فرایند سرخ کردن عمیق ناگت مرغ پوشش داده شده با

## خمیرآبه حاوی صمغ قدومه شهری و ایزوله پروتئین سویا

حامد مهدویان مهر<sup>۱</sup>، آرش کوچکی<sup>۲\*</sup>، محبت محبی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۴/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۲/۲۳

## چکیده

هدف این پژوهش، ارزیابی اثر جایگزینی صمغ قدومه شهری (۵/۱۰ درصد) و ایزوله پروتئین سویا (۲ و ۴ درصد) به‌عنوان بخشی از آرد گندم، بر ویژگی‌های جریان‌ی خمیرآبه، میزان جذب پوشش و پارامترهای سینتیک انتقال جرم ناگت مرغ طی سرخ کردن عمیق، در دماهای ۱۷۰، ۱۵۰ و ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد و دوره‌های زمانی صفر، ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ دقیقه می‌باشد. صمغ قدومه شهری اثر بیشتری بر افزایش ویسکوزیته ظاهری نسبت به ایزوله پروتئین سویا داشت. تمامی نمونه‌ها رفتار غیرنیوتنی، شل‌شونده با برش داشتند ( $n \leq 0.521$ ) و به خوبی با مدل قانون توان برازش شدند ( $R^2 \geq 0.994$ ). جذب پوشش بر سطح ماده غذایی بطور معنی‌داری تحت تاثیر ثابت قوام خمیرآبه قرار داشت. بیشترین مقادیر سرعت دفع رطوبت و ضریب نفوذ مؤثر برای ناگت‌های پوشش‌دار شده با خمیرآبه شاهد، بدست آمد. ضریب نفوذ مؤثر با افزودن ایزوله پروتئین سویا و صمغ قدومه شهری به ترتیب  $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  و  $3/55 - 5/46 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  با ضریب تبیین  $0.95 - 0.85$  و  $5/32 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  تا  $3/38 - 5/32 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  با ضریب تبیین  $0.93 - 0.88$  کاهش یافت. دامنه انرژی فعال‌سازی برای حذف رطوبت و جذب روغن نمونه شاهد بین  $10/79 \text{ (kJ/mol)}$  و  $7/91 \text{ (kJ/mol)}$ ، در نمونه‌هایی پوشش‌دار شده حاوی ایزوله پروتئین سویا بین  $13/37 - 17/64 \text{ (KJ/mol)}$  و  $5/90 - 9/18 \text{ (KJ/mol)}$  و در نمونه‌های حاوی صمغ قدومه شهری به ترتیب بین  $11/9 - 14/7 \text{ (kJ/mol)}$  و  $7/56 - 10/30 \text{ (KJ/mol)}$  به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: انتقال جرم، سرخ کردن عمیق، ایزوله پروتئین سویا، صمغ قدومه شهری، ناگت مرغ.

## مقدمه

از دیدگاه تغذیه‌ای و سلامت می‌باشد (Salvador *et al.* 2005) و به‌عنوان یک فاکتور مهم و مؤثر بر کیفیت تغذیه‌ای و حسی محصول در نظر گرفته می‌شود (DehghanNasiri *et al.* 2011; 2012 Soorgi *et al.*). نتایج مطالعات نشان می‌دهد که میزان روغن جذب شده، خود تحت تاثیر عوامل مختلفی نظیر دمای روغن، زمان سرخ کردن، محتوای رطوبتی و مواد تشکیل دهنده ماده غذایی، سطح محصول، نسبت وزن ماده غذایی به حجم روغن سرخ‌کردنی، پیش تیمارها، نوع روغن و ترکیب شیمیایی آن، نسبت سطح محصول به حجم آن و فشار محیط می‌باشد (Moreira *et al.* 1999; 2004 Rimac-Brcnicet *al.*; 2005 Salvadore *et al.*).

براین اساس، تاکنون راهکارهای متفاوتی جهت تولید فرآورده‌های غذایی با کیفیت بالا و محتوای روغن کاهش یافته پیشنهاد شده است، که از آن جمله می‌توان به تغییر روش سرخ کردن، اصلاح محیط سرخ کردن و ویژگی‌های ماده غذایی، استفاده درست از دما و زمان سرخ کردن، پیش سرخ کردن، و نیز پوشش‌ها و فیلم‌های خوراکی اشاره کرد (Mellema 2003; Ziaifar *et al.* 2008).

سرخ کردن عمیق فرایند غوطه‌ور سازی ماده غذایی در روغن داغ، با هدف دستیابی به ترکیبی از زمان پخت کوتاه و ایجاد ویژگی‌های منحصر به فرد در محصول می‌باشد (Saguy and Dana 2006). در طی فرایند سرخ کردن به علت وقوع پدیده انتقال همزمان جرم و حرارت، بخشی از آب محصول توسط حرارت تبخیر شده و در نتیجه جایگزینی آن با روغن از طریق پدیده جذب می‌شود (1999 Moreira *et al.*). از سوی دیگر، انتقال سریع حرارت و اختلاف زیاد درجه حرارت ما بین سطح ماده غذایی و روغن از طریق اثرگذاری بر ساختار فیزیکوشیمیایی مواد، منجر به دستیابی به ویژگی‌های خاص بافتی و حسی در محصول می‌گردد (Fizman, Salvador, 2003; Dogan *et al.*, 2005; Adedeji *et al.*, 2009). محتوای بالای روغن جذب شده در حین سرخ کردن مشکل عمده فرآورده‌های سرخ‌کردنی

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی دکتری، دانشیار و استاد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی.

\* - نویسنده مسئول: (Email: koocheki@um.ac.ir)

پوشش دهی و کاهش بیشتر جذب روغن، و اثرگذاری فرمولاسیون بر سینتیک جذب روغن و دفع رطوبت در محصولات غذایی مورد مطالعه قرار گرفته اند.

صمغ دانه قدومه شهری، با نام علمی *Lepidium perfoliatum* حاوی ۸۸/۲۳ درصد کربوهیدرات و ۴/۶ درصد پروتئین بوده که در محیط آبی به موجب ظرفیت بالای جذب آب و حلالیت کم خود، باعث پایداری سیستم کلوئیدی و افزایش ویسکوزیته محیط می شود (Koocheki *et al.*, ۲۰۰۹; Koochekiet *al.*, ۲۰۱۳). با توجه به ویژگی گرانروی ساز صمغ به نظر می رسد، استفاده از آن در فرمول خمیرآبه بتواند منجر به کاهش جذب روغن و افزایش کیفیت ناگت مرغ شود.

ایزوله پروتئین سویا از دسته پروتئین های با قدرت آب دوستی بالا بوده که به علت خواص عملکردی آن، به ویژه توانایی تشکیل و تثبیت امولسیون، تمایل به جذب رطوبت و حفظ آب در محصول نهایی، کنترل جذب روغن، توانایی تشکیل فیلم و تاثیرگذاری بر روی بافت، کنترل رنگ (قهوه ای شدن و بلانچینگ) و هوادهی تحقیقات گسترده ای بر روی آن صورت پذیرفته است (Wolf & ۱۹۷۵, Cowan,). نتایج تحقیقات در خصوص استفاده از ایزوله پروتئین سویا در فرآورده های سرخ کردنی نشان داده است که این پروتئین نسبت به پروتئین های آب پنیر و تخم مرغ دارای خواص کاربردی بهتر جهت استفاده در سیستم های خمیرآبه می باشد (Doganet *al.*, ۲۰۰۵ b).

اگرچه تاکنون، تحقیقات گسترده ای بر روی عملکرد صمغ های تجاری و پروتئین های نظیر گلوتن و آب پنیر در بهبود خصوصیات خمیرآبه و کیفیت محصولات سرخ کردنی انجام گرفته است. با این حال، اطلاعات کمی در خصوص عملکرد صمغ های بومی بر خصوصیات رئولوژیکی خمیرآبه و خصوصیات کیفی ناگت مرغ در دسترس می باشد. از این رو هدف از انجام این پژوهش، بررسی اثر جایگزینی نسبت های مختلف صمغ قدومه شهری و ایزوله پروتئین سویا بر ویژگی های رئولوژیکی خمیرآبه، جذب پوشش، دفع رطوبت و جذب روغن، و نیز سینتیک انتقال جرم ناگت های مرغ سرخ شده به روش عمیق می باشد. نتایج این پژوهش می تواند به منظور بهینه سازی و کنترل فرایند سرخ کردن عمیق محصولات سرخ کردنی بکار رود.

## مواد و روش ها

### آماده سازی نمونه ها

مواد اولیه ی شامل گوشت سینه مرغ، آرد گندم (رطوبت ۱۳/۶ درصد، پروتئین ۱۰/۶ درصد، چربی ۱/۴ درصد) از شرکت آرد فریمان، مواد طعم دهنده، روغن آفتابگردان (شرکت نینا، ایران)، و دانه قدومه شهری از فروشگاه های محلی تهیه گردید. آرد سوخاری از شرکت

در بین این روش ها، استفاده از پوشش های خوراکی با سیستم خمیرآبه، به دلیل افزایش پذیرش کلی محصول از جانب مصرف کننده، بهبود ارزش تغذیه ای، کاهش جذب چربی، بهبود رنگ و نیز ایجاد بافتی دلپذیر جایگاه ویژه ای در تولید محصولات سرخ کردنی پیدا نموده است (Fizman & Salvador, ۲۰۰۳). بطوری که، ناگت مرغ با بافت و طعمی دلپذیر خود به عنوان یکی از پر مصرف ترین محصولات سرخ کردنی پوشش داده شده در سراسر جهان می باشد (Soorgi *et al.*, ۲۰۱۲).

خمیرآبه در صنعت مواد سرخ کردنی به عنوان مایعی ویسکوز متشکل از آب و آرد با سایر اجزاء جزئی (طعم دهنده ها، پروتئین ها، صمغ ها و مواد حجم دهنده) شناخته شده، که ماده غذایی قبل از سرخ کردن در آن غوطه ور می شود (Dehghan Nasiri *et al.*, ۲۰۱۱). خصوصیات جریان خمیرآبه نقش مهمی در موفقیت فرایند پوشش دهی داشته و بر ویژگی های کیفی و کمی محصول از جمله میزان جذب خمیرآبه، ظاهر، بافت، تخلخل و میزان بازدهی محصول نهایی مؤثر می باشد (Sahin & Sumn, ۲۰۰۹). به طوری که، استفاده از خمیرآبه غیر ویسکوز، منجر به ایجاد پوششی متخلخل شده و جذب بیشتر روغن را موجب می گردد. در حالی که، ویسکوزیته بالای خمیرآبه ایجاد لایه ای ضخیم بر سطح محصول نموده، و منجر به عدم پخت کافی محصول با تردی نامناسب و پوسته ای ناهموار می گردد، که در نهایت جذب بیشتر روغن را به همراه دارد (Fizman & Salvador, ۲۰۰۳). بنابراین، بررسی خصوصیات جریان خمیرآبه، جهت ارزیابی همبستگی میان ویسکوزیته خمیرآبه با میزان جذب پوشش، و نیز ارتباط این خصوصیات با ویژگی های کیفی محصول نهایی بسیار مهم می باشد. ترکیبات تشکیل دهنده، غلظت هر ترکیب و نیز نسبت آب به ماده خشک مهمترین فاکتورهای مؤثر بر خصوصیات جریان خمیرآبه می باشند (Ngadi, Xue & ۲۰۰۶; Salvador, Fizman & ۲۰۰۳).

پروتئین ها و صمغ ها به لحاظ ویژگی های عملکردی خاص خود، از اهمیت خاصی در میان ترکیبات افزودنی به فرمولاسیون خمیرآبه برخوردار می باشند. به طوری که تاکنون، فرمولاسیون های مختلفی از صمغ ها و پروتئین ها، به عنوان مثال، اختلاط یا جایگزینی آرد گندم با آرد سویا و آرد ذرت (Dehghan Nasiri *et al.*, ۲۰۱۱)، صمغ کربوکسی متیل سلولز و HPMC (Chen *et al.*, ۲۰۰۸)، صمغ هیدروکسی پروپیل متیل سلولز، گوار، زانتان و صمغ عربی (Baixauli *et al.*, ۲۰۰۳)، دکسترین و تخم مرغ (Sahin *et al.*, ۲۰۰۵)، ایزوله پروتئین سویا (Dogan *et al.*, ۲۰۰۵)، صمغ متیل سلولز، و پیش تیمار شده با مایکروویو (Soorgiet *al.*, ۲۰۱۲)، در جهت

1 Batter

2 Batter pickup

### جذب خمیرآبه<sup>۴</sup>

اندازه‌گیری فاکتور جذب پوشش به‌عنوان شاخصی از میزان چسبندگی و ویسکوزیته خمیر با استفاده از رابطه ذیل محاسبه شد (Akdeniz et al., 2006).

$$\text{جذب پوشش} = (W_b - W_n) / W_n \times 100 \quad (1)$$

که  $W_n$ ، وزن نمونه قبل از پوشش دهی و  $W_b$ ، وزن نمونه پس از پوشش دهی می‌باشد.

### اندازه‌گیری محتوای رطوبت و روغن

اندازه‌گیری محتوای رطوبت نمونه‌های سرخ شده مطابق با استاندارد (۱۹۸۶) AACC، با استفاده از آون (Memmert، ۱۵۴۱۰۰- Beschickung-loading, Model ۸۰۰۰) در دمای  $105^\circ\text{C}$  به مدت ۲۴ ساعت انجام گرفت. محتوای رطوبت بر مبنای وزن خشک محاسبه گردید.

تعیین محتوای روغن با استفاده از استاندارد (۱۹۹۰) AOAC، انجام گرفت. نمونه‌های خشک شده‌ی مورد استفاده برای اندازه‌گیری رطوبت، ابتدا با استفاده از آسیاب (ناسیونال، K039131) آسیاب شده، سپس ۲-۴ گرم از نمونه‌های خشک و آسیاب شده در کارتوش قرار گرفت. استخراج روغن با استفاده از هگزان و با استفاده از سوکسله در طی سیرکولاسیون ۶ ساعت حلال انجام گرفت. بعد از استخراج، کارتوش‌ها به مدت یک ساعت جهت حذف حلال و رطوبت در آون  $105^\circ\text{C}$  قرار گرفتند. محتوای روغن نیز بر مبنای وزن خشک محاسبه گردید.

### مدل‌سازی سینتیک انتقال جرم

واکنش‌های فیزیکوشیمیایی محصولات غذایی در حین فرآوری با سرعت و شدت خاصی انجام می‌پذیرد، که بر کیفیت ماده غذایی مؤثر است (Krokida et al., 2001). مدل‌سازی سینتیک با روش‌های معتبر عددی ابزاری مناسب برای توصیف کمی این تغییرات و شدت آن در حین فرایند می‌باشد، که می‌تواند نقش مهمی در شناخت و ارزیابی شرایط فرایند، جهت تولید محصولی با کیفیت بهتر و هزینه کمتر در اختیار ما قرار دهد (Soorgi et al., 2012). افت رطوبت و جذب چربی دو پدیده اصلی انتقال جرم در طی سرخ کردن عمیق هستند (et al., Ngadi 2006).

### بررسی سینتیک دفع رطوبت در حین فرآیند سرخ کردن

محتوای رطوبت ماده غذایی از مهمترین عوامل مؤثر در جذب روغن و کیفیت محصولات سرخ‌شده می‌باشد، که عموماً به صورت

نوین بریانک مشهد، حلال هگزان از شرکت دکتر مجللی<sup>۱</sup> و ایزوله پروتئین سویا (۹۲٪ پروتئین بر پایه وزن خشک) از شرکت FSL (Food Specialties' LTD, CHINA) خریداری شد به‌منظور آماده‌سازی خمیرآبه، مواد خشک (آرد گندم ۹۴، ۹۵، ۹۶، ۹۶/۵ درصد، نمک ۱/۵ درصد، مواد حجم‌دهنده ۰/۵ درصد و ایزوله پروتئین سویا ۲ و ۴ درصد)، یا صمغ قدومه شهری در غلظت‌های (۰/۵ و ۱ درصد) با استفاده از همزن دستی (کاتومو- ژاپن مدل BH-HA۳۲۲۰) در سرعت ۱۲۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۳۰ ثانیه مخلوط شد. در تمام فرمول‌ها پروتئین و صمغ جایگزین آرد شده و نسبت ماده خشک به آب ۳:۵ (وزنی/وزنی) در نظر گرفته شد. مخلوطی از گوشت سینه مرغ (۸۸ درصد)، پیاز (۱۰ درصد)، فلفل (۰/۵ درصد) و نمک (۱/۵ درصد)، به‌عنوان بخش گوشتی ناگت مرغ در ابعاد  $11 \pm 0.2 \times 4.5 \times 2.1$  (سانتی‌متر)، با استفاده از یک قالب استیل برش داده شد. نمونه‌های آماده شده در خمیرآبه با دماهای  $25^\circ\text{C}$  به مدت ۳۰ ثانیه غوطه‌ور گردید و به مدت ۳۰ ثانیه جهت طی شدن مرحله چکاندن خمیرآبه اضافی و حذف خطای آزمون به صورت عمودی نگه داشته شد. سپس، نمونه‌ها توسط پودر سوخاری پوشانده شد.

### سرخ کردن عمیق

سرخ کردن نمونه‌ها پوشش داده شده در یک سرخ‌کن برقی سوزکی ژاپن (مدل ZDF- ۸۸۰) با حجم ۲/۵ لیتر حاوی روغن آفتابگردان نینا، در ۵ دوره زمانی بین صفر تا ۵ دقیقه در سه دمای  $150^\circ\text{C}$ ،  $170^\circ\text{C}$  و  $190^\circ\text{C}$  صورت پذیرفت. روغن پیش از شروع فرایند، به مدت یک ساعت در دماهای مذکور نگهداری و در هر بار تعداد ۶ نمونه در سرخ‌کن قرار داده شد. روغن سطحی نمونه‌ها بلافاصله بعد از خروج از سرخ‌کن توسط دستمال کاغذی حذف و تا دمای محیط سرد شد.

### بررسی رفتار جریانی خمیرآبه

رفتار جریان خمیرآبه با استفاده از ویسکومتر چرخشی بوهلین<sup>۲</sup> در دمای  $25^\circ\text{C}$  بررسی شد. اسپیندل‌های<sup>۳</sup> مناسب (C14, C25, C30) با توجه به ویسکوزیته‌ی ظاهری نمونه‌ها انتخاب گردید. درجه‌ی برشی به‌صورت خطی از ۱۴ تا  $400 \text{ s}^{-1}$  افزایش یافت. رفتار جریانی خمیرآبه بر اساس برآزش داده‌ها (درجه برش - تنش برشی) با مدل قانون توان توسط نرم افزار Slidewritte نسخه ۷ مورد بررسی قرار گرفت.

1 Dr. Mojallali

2 Bohlin Model Visco 88, Bohlin Instruments, UK

3 Spindles

ثابت سرعت افت رطوبت (k) بر اساس رابطه (۵) با استفاده از نرم افزار MATLAB (b ۲۰۱۰)، به دست آمد.

### بررسی سینتیک جذب روغن در فرایند سرخ کردن

جهت توصیف سینتیک جذب روغن در ناگت های سرخ شده، از دو مدل پیشنهادی توسط Moyano and Pedreschi (۲۰۰۶) و Krokida et al. (۲۰۰۱)، معادلات ۶ و ۷ استفاده شد.

مدل اول، مدل تجربی سرعت جذب روغن Moyano and Pedreschi (۲۰۰۶)

$$O = \frac{O_{eq}kt}{1+kt} \quad (۵)$$

مدل دوم، مدل سینتیکی مرتبه اول توسط Krokida et al. (2001).

$$FC = C_0[1 - \exp(-kt)] \quad (۶)$$

که در معادلات FC و O میزان روغن بر پایه وزن خشک، C<sub>0</sub> و O<sub>eq</sub> میزان روغن تعادلی و kt سرعت انتشار روغن می باشد. روغن تعادلی (O<sub>eq</sub>) به عنوان بیشینه روغنی شناخته شده که نمونه طی سرخ کردن (در زمان بی نهایت) می تواند جذب کند.

ثابت سرعت جذب روغن (K)، به متغیرهای اصلی فرایند مانند نوع و درجه حرارت روغن، نوع و ابعاد محصول، پیش تیمارها و شرایط سرخ کردن وابسته است. ثابت k با افزایش دما و سطح انرژی میکروویو، آنزیم بری و خشک کردن قبل از سرخ کردن عمیق افزایش می یابد (Soorgi et al., ۲۰۱۲; Adedeji et al., ۲۰۰۹). ثابت سرعت جذب روغن (k) و میزان روغن تعادلی (O<sub>eq</sub>) با استفاده از رابطه های (۶ و ۷)، با بکارگیری نرم افزار MATLAB نسخه ۲۰۱۰b، به دست آمد.

### انرژی فعال سازی

دما مهمترین عامل خارجی تاثیرگذار بر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت (D<sub>eff</sub>) و ثابت جذب روغن (K) می باشد. اثر دما بر این دو شاخص با معادله آرنیوس نشان داده می شود (Soorgi et al., ۲۰۱۲; Adedeji et al., ۲۰۰۹). بررسی اثر درجه حرارت بر سینتیک تغییرات از مدل آرنیوس مطابق رابطه ی ۷ محاسبه شد.

$$D_{eff} = D_0 * \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (۷)$$

که در این معادلات، ضریب نفوذ مؤثر D<sub>eff</sub> (m<sup>2</sup>/s)، E<sub>a</sub> انرژی فعال سازی (KJ/mol)، R ثابت جهانی گازها (KJ/mol.k) و T دمای مطلق بر حسب کلون است. انرژی فعال سازی نیز، از طریق رسم منحنی ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و محتوای روغن تعادلی نسبت به 1/T (°K) برای نمونه ها با استفاده از نرم افزار Excel نسخه ۲۰۰۷ بدست آمد (Soorgi et al., ۲۰۱۲; Adedeji et al., ۲۰۰۹).

کسری از مقدار رطوبت بر واحد جرم محصول بیان می گردد. مهمترین عوامل مؤثر بر محتوای رطوبت ماده غذایی سرخ شده، دمای روغن و مدت زمان سرخ کردن می باشد. به طوری که، کاهش رطوبت ماده غذایی در حین سرخ کردن به صورت نمایی با گذشت زمان تا رسیدن به مقدار تعادلی ادامه می یابد (Barrufet, ۱۹۹۸; Moreira & Barrufet, ۱۹۹۸). دمای بالاتر روغن، ضریب انتشار و سرعت از دست رفتن رطوبت را افزایش می دهد (Sahin & Sumn, ۲۰۰۹). با این حال، بیان پدیده انتقال رطوبت در فرایند سرخ کردن به دلیل شرکت داشتن مکانیسم های مختلف و پیچیده توصیفی، نظیر مکانیسم نفوذ مولکولی، حرکت رطوبت در لوله های موئین، نفوذ روغن در خلل و فرج ماده جامد، نفوذ بخار در منافذ حاوی هوا و جریان هیدرودینامیکی بسیار دشوار می باشد. از این رو، به منظور ایجاد الگوی ساده ای از انتقال جرم در طی سرخ کردن و داشتن هماهنگی مناسب بین داده های تجربی و ارزش های محاسبه شده از قانون دوم انتشار فیک استفاده می گردد (Adedeji et al., ۲۰۰۹; Dehghan Nasiriet al., ۲۰۱۱).

$$\frac{\partial m}{\partial t} = D_{eff} V^2 m \quad (۲)$$

که در این رابطه m محتوای رطوبت (Kg/Kg, db)، t زمان (s) و D<sub>eff</sub> ضریب نفوذ مؤثر (m<sup>2</sup>/s) می باشد.

با فرض ناچیز بودن میزان رطوبت تعادلی (m<sub>e</sub>) و انتقال رطوبت از هر دو طرف محصول، از حل دیفرانسیل جزئی معادله فوق توسط (Crank, ۱۹۷۵)، برای تیغه نامحدود می توان استفاده کرد (معادله ۳).

$$MR = \frac{m - m_e}{m_o - m_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp[-(2n+1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff} t}{L^2}]$$

که MR نسبت رطوبت (بدون بعد)، M متوسط میزان رطوبت بر مبنای وزن خشک (Kg/Kg, db)، در زمان t (s) و M<sub>0</sub> رطوبت اولیه بر حسب وزن خشک (kg/Kg, db)، m<sub>e</sub> میزان رطوبت تعادلی، t زمان سرخ کردن (s)، L نصف ضخامت تیغه (m)، D<sub>eff</sub> ضریب نفوذ مؤثر (m<sup>2</sup>/s) می باشد (Dehghan Nasiriet al., ۲۰۱۱; Adedeji et al., ۲۰۰۹).

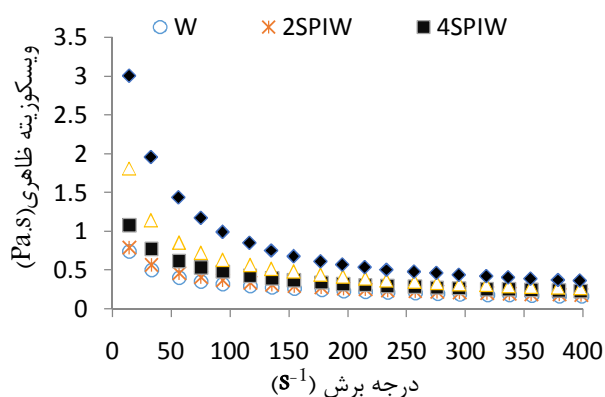
که در آن k ثابت سرعت انتشار رطوبت بوده و رابطه آن با ضریب نفوذ به صورت زیر می باشد:

$$D_{eff} = \frac{4kL^2}{\pi^2} \quad (۴)$$

ضریب نفوذ مؤثر رطوبت تحت تاثیر نوع محصول، نوع روغن، دما و تیمارهای پیش از سرخ کردن می باشد.

جهت بررسی سینتیک دفع رطوبت، ابتدا نسبت رطوبت MR (Mc/Mo) با استفاده از داده های تجربی برای تمام نمونه ها محاسبه و سینتیک افت رطوبت از رابطه ی (۴) بدست آمد. مقادیر ضریب نفوذ مؤثر (D<sub>eff</sub>) با رسم Ln(M<sub>r</sub>) در برابر زمان، با توجه به شیب خط یا

آب شد (Koocheki *et al.*, ۲۰۰۹). نتایج مشابهی در خصوص افزایش ضریب قوام در اثر افزودن صمغ‌های گوار و زانتان (۱۹۹۲) (Hsia *et al.*,) و متیل سلولز (Sanz ۲۰۰۸, *et al.*) گزارش شده است. از نظر آماری جایگزینی ۲ درصد ایزوله پروتئین سویا، اثر معنی داری بر ضریب قوام آن نداشت (جدول ۱) با این حال، جایگزینی ایزوله پروتئین سویا در سطح ۴ درصد باعث افزایش ضریب قوام سیستم خمیرآبه، به دلیل توانایی بالای پروتئین‌های سویادر جذب آب شد (Dogan *et al.*, ۲۰۰۵b) ( $p < 0.05$ ).



شکل ۱- تغییرات ویسکوزیته‌ی ظاهری فرمول‌های مختلف خمیرآبه در درجه برش‌های  $s^{-1}$  ۱۴-۴۰۰

جدول ۱- اثر فرمول‌های مختلف خمیرآبه بر پارامترهای قانون توان و جذب پوشش (0.5LPSGW)

فرمول خمیرآبه	n	k (Pa.s)	ضریب تبیین	جذب پوشش (%)
W	$0.521 \pm 0.013^c$	$2/959 \pm 0.013^a$	۰/۹۹۵	$18/82 \pm 2/15^a$
۲SPIW	$0.510 \pm 0.006^c$	$3/342 \pm 0.006^a$	۰/۹۹۴	$19/89 \pm 2/47^a$
۴SPIW	$0.511 \pm 0.007^c$	$4/427 \pm 0.007^b$	۰/۹۹۶	$21/69 \pm 0.73^a$
۰/۵LPSGW	$0.405 \pm 0.004^b$	$9/473 \pm 0.004^c$	۰/۹۹۶	$34/68 \pm 1/68^b$
۱LPSGW	$0.316 \pm 0.003^a$	$21/496 \pm 0.002^d$	۰/۹۹۷	$42/33 \pm 1/27^c$

شاخص رفتار جریان برای تمامی فرمول‌های خمیرآبه کم‌تر از یک بود. این امر نشان‌دهنده‌ی رفتار غیرنیوتنی رقیق‌شونده با برش در خمیرآبه است (Koocheki *et al.*, ۲۰۰۹). جایگزینی صمغ قدومه شهری منجر به کاهش معنی دار شاخص رفتار جریان (n)، یا به عبارت دیگر گسترش رفتار رقیق‌شوندگی با برش خمیرآبه شد ( $p < 0.05$ ). صمغ قدومه شهری در محلول‌های آبی دارای خاصیت شبه پلاستیک بوده است (Koocheki *et al.*, ۲۰۱۳). افزایش خاصیت شبه پلاستیک صمغ قدومه شهری در سیستم خمیرآبه را می‌توان به جهت‌گیری ماکرومولکول‌های صمغ قدومه شهری در جهت برش و

## تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

آزمون فاکتوریل و طرح کاملاً تصادفی جهت بررسی اثر غلظت‌های مختلف صمغ (۰/۵ و ۱ درصد) و پروتئین (۲ و ۴ درصد)، دمای سرخ کردن (۱۵۰، ۱۷۰، ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد) و زمان‌های سرخ کردن (۵ و ۴، ۳، ۲، ۱) بر ویژگی‌های کیفی ناگت‌های سرخ‌شده مورد استفاده قرار گرفت. با مشاهده‌ی معنی‌دار بودن اثر تیمارها در سطح ۹۵ درصد، مقایسه‌ی میانگین با استفاده از آزمون دانکن انجام شد. برای آنالیز داده‌ها از نرم افزار آماری SPSS نسخه ۲۰ استفاده گردید. کلیه‌ی آزمون‌ها حداقل با ۳ تکرار انجام شد.

## نتایج و بحث

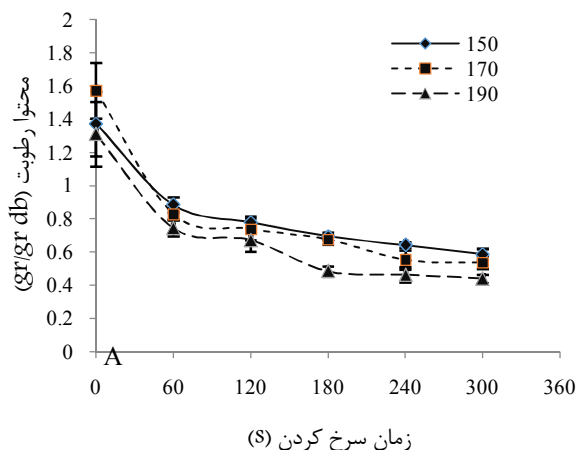
### ویژگی‌های رئولوژیکی خمیرآبه

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، ویسکوزیته‌ی ظاهری فرمول‌های مختلف خمیرآبه با افزایش درجه برش کاهش یافت. این رفتار بیانگر رفتار غیرنیوتنی می‌باشد، که می‌توان آن را به مرتب شدن ماکرومولکول‌های خمیرآبه در راستای تنش برشی و در نتیجه کاهش مقاومت ساختار یا اصطلاحاً بین مولکولی مرتبط دانست (Koocheki *et al.*, ۲۰۱۲). آب آزاد نقش مهمی در ویسکوزیته‌ی ظاهری دارد و ویسکوزیته‌ی ظاهری بالاتر، نشان دهنده میزان آب آزاد کمتر است (Soorgi *et al.*, ۲۰۱۲). Xue & Ngadi, ۲۰۰۶ جایگزینی صمغ قدومه شهری (LPSG) و افزایش سطح آن، منجر به افزایش چشم‌گیر ویسکوزیته ظاهری شد (شکل ۱). این افزایش ویسکوزیته را می‌توان به ساختار پلی‌ساکاریدی صمغ قدومه شهری مرتبط دانست. تعداد زیاد گروه‌های هیدروکسیل و اثر هیدرودینامیکی متقابل بین گروه‌های قطبی و آبگریز در ساختار بیوپلیمری صمغ، موجب به دام انداختن بخش اعظمی از آب آزاد خمیرآبه و در نتیجه باعث افزایش ویسکوزیته آن می‌گردد (Koocheki *et al.*, ۲۰۰۹).

جایگزینی ایزوله پروتئین سویا (SPI) و افزایش سطح آن نیز منجر به افزایش ویسکوزیته‌ی ظاهری نسبت به خمیرآبه شاهد شد (شکل ۱). افزایش ویسکوزیته‌ی ظاهری نمونه‌های حاوی ایزوله پروتئین سویا را می‌توان به بالا بودن میزان جذب آب و حلالیت بیشتر پروتئین‌های سویا نسبت داد (Singhet ۱۹۹۶, Dogan *et al.*, ۲۰۰۵b).

مقادیر ضریب قوام و شاخص رفتار جریان خمیرآبه بر اساس مدل قانون توان در جدول ۱ نشان داده شده است. جایگزینی صمغ باعث افزایش ضریب قوام خمیرآبه به دلیل ظرفیت بالای صمغ در نگهداری

1 *Lepidium perfoliatum* seed gum  
2 Soy proteins isolate



شکل ۲- اثر دما و زمان سرخ کردن بر محتوای رطوبت ناگت‌های مرغ پوشش داده شده با خمیرآبه حاوی ۲ درصد ایزوله پروتئین سویا

جایگزینی صمغ قدومه شهری به فرمول خمیرآبه موجب افزایش معنی دار محتوای رطوبت ناگت‌های مرغ سرخ شده گردید ( $p < 0.05$ ). افزایش درصد جایگزینی صمغ به ۰/۵ و ۱ درصد نیز، به ترتیب موجب افزایش ۳۱ و ۳۵ درصدی در محتوای رطوبت نمونه ها در دمای ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد طی پنج دقیقه فرایند سرخ کردن شد (جدول ۲). این امر ممکن است ناشی از ظرفیت بالای اتصال با آب صمغ قدومه شهری و مقاومت آن در برابر خروج رطوبت محصول باشد. نتایج بدست آمده با گزارش آک دینز و همکاران (۲۰۰۶) و کیم و یاو (۲۰۰۶) در خصوص افزایش محتوای رطوبت در نمونه‌های پوشش داده شده با خمیرآبه حاوی صمغ‌های زانتان، گوار، هیدروکسی پروپیل متیل سلولوز، و ترکیبی از صمغ گوار و زانتان در فرایند سرخ کردن به روش عمیق مطابقت داشت.

جایگزینی ۲ و ۴ درصدی ایزوله پروتئین سویا باعث افزایش ۷ تا ۱۲ درصدی محتوای رطوبت در دقیقه پنجم فرایند سرخ کردن در دمای ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به نمونه شاهد شد (جدول ۲). این افزایش نسبی محتوای رطوبت را می‌توان ناشی از ظرفیت بالای پروتئین‌های سویا برای اتصال با آب و قابلیت تشکیل فیلم این پروتئین‌ها در طی فرایند حرارتی دانست. نتایج مشابهی توسط دهقان نصیری و همکاران (۲۰۱۱) و دگان و همکاران (۲۰۰۵a) در خصوص افزایش محتوای رطوبت ناگت‌های پوشش داده شده با خمیرآبه حاوی آرد سویا و ایزوله پروتئین سویا گزارش گردیده است.

شکل ۳ روند تغییرات محتوای روغن محصول را با گذشت زمان در دماهای مختلف را نشان می‌دهد. در تمامی نمونه‌ها، دردقایق ابتدایی فرایند، جذب روغن به شدت افزایش یافت و پس از آن ثابت باقی ماند. روند مشابهی توسط (۲۰۰۹) Troncoso & Pedreschi و (۲۰۰۷) Duranet et al. و (۲۰۰۹) Adedeji et al. گزارش

توانایی آن در همراه نمودن سایر ترکیبات خمیرآبه با خود مرتبط دانست. نتایج مشابهی در خصوص عملکرد صمغ هیدروکسی پروپیل متیل سلولوز در خمیرآبه آرد برنج (Amboon et al., ۲۰۱۰) و صمغ زانتان در مخلوط نشاسته ذرت (Kim & Yoo, ۲۰۰۶) گزارش شده است. افزودن ایزوله پروتئین سویا به فرمول خمیرآبه اثر معنی‌داری بر شاخص رفتار جریان نمونه‌ها نشان نداد ( $p < 0.05$ ).

### جذب پوشش (خمیرآبه)

فرمول خمیرآبه تاثیر معنی‌داری بر شاخص جذب پوشش داشت ( $p < 0.05$ ). همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، بیشترین میزان جذب خمیرآبه مرتبط به نمونه‌های پوشش‌دار شده با فرمول حاوی غلظت بالای صمغ می‌باشد. ضریب قوام بالای این فرمول، احتمالاً در مرحله چکانیدن، مقاومت به جریان بالاتری را ایجاد می‌نماید که در نتیجه لایه‌ی ضخیم‌تری از پوشش بر سطح محصول باقی می‌ماند. چن و همکاران (۲۰۰۸) و دگان و همکاران (۲۰۰۵a)، نیز رابطه‌ی مستقیم بین ویسکوزیته‌ی ظاهری و میزان جذب خمیرآبه گزارش نموده‌اند.

### محتوای رطوبت و روغن ناگت‌های مرغ سرخ شده

دفع رطوبت و جذب روغن دو فرایند اصلی انتقال جرم طی سرخ کردن عمیق مواد غذایی محسوب می‌شوند. سرعت این فرایندها بطور مستقیم تابع دما و زمان سرخ کردن می‌باشد (Nagdi et al., ۲۰۰۷). همانطور که انتظار می‌رفت، افزایش زمان سرخ کردن باعث کاهش محتوای رطوبت ناگت‌های مرغ گردید. روند کاهش محتوای رطوبت تمامی نمونه‌ها در دقیقه اول فرایند سریع‌تر بود که این امر ناشی از حذف رطوبت از سطح نمونه‌ها می‌باشد (شکل ۲). روند دفع رطوبت مشابهی توسط Nagdi et al. (۲۰۰۷)، Soorgiet et al. (۲۰۱۲) و Adedeji et al. (۲۰۰۹) طی فرایند سرخ کردن عمیق گزارش شده است. افزایش دما باعث افزایش افت رطوبت در نمونه‌ها گردید (شکل ۲). این نتایج با گزارش (۲۰۰۱) Krokida et al. در خصوص خللال‌های سیب‌زمینی سرخ‌شده، مطابقت داشت. همان‌طور که جدول ۲، مشاهده می‌شود، بالاترین میزان افت رطوبت مربوط به نمونه‌های پوشش‌دار شده با فرمول شاهد می‌باشد. خمیرآبه شاهد پائین‌ترین میزان ویسکوزیته‌ی ظاهری و جذب پوشش را نیز در مقایسه با سایر فرمول‌های خمیرآبه دارا بوده است (جدول ۱). این امر را می‌توان به پائین بودن ظرفیت اتصال آب در خمیرآبه مرتبط دانست، بطوری که، افزایش میزان آب آزاد در خمیرآبه منجر به کاهش جذب پوشش و تسهیل فرایند تبخیر طی سرخ کردن می‌گردد (Akdeniz et al., ۲۰۰۶).

شده است.

ساختارهای خمیرآبه، باعث کاهش جذب روغن و بهبود حفظ رطوبت در نمونه‌ها گردید. نتایج تحقیق (Moreira et al., ۱۹۹۹) و Soorgi et al. (۲۰۱۲) نشان می‌دهد که تشکیل ژل حرارتی و اتصالات عرضی در صمغ‌ها در طی فرایند سرخ کردن باعث تشکیل تعداد کمتری منافذ بزرگ با فشار مویبگی کم در اطراف محصول پوشش داده می‌شود، که این امر موجب ورود مقادیر کم روغن به منافذ می‌گردد. (Akdeniz et al., ۲۰۰۶) همچنین بیان داشتند که ظرفیت اتصال با آب بالا و اثر صمغ‌ها بر افزایش ویسکوزیته خمیرآبه در کنترل جذب روغن موثر است.

با این حال، افزایش غلظت صمغ از ۰/۵ به ۱ درصد با افزایش محتوای روغن همراه بود (جدول ۳). اگرچه این روند معنی‌دار نیست، با این حال به نظر می‌رسد که بالا بودن رطوبت سطحی در نمونه‌های پوشش داده شده با خمیرآبه حاوی ۱ درصد صمغ، منجر به تاخیر در زمان تشکیل پوسته و ایجاد نفوذپذیری و تخلخل بیشتر در آن می‌شود. به طوری که (Moreira et al., ۱۹۹۹) نیز در این خصوص بیان داشتند که تشکیل دیرتر پوسته در دماهای پائین‌تر، می‌تواند موجب ایجاد پوسته‌ای متخلخل با نفوذپذیری بالاتر گردد.

افزودن ایزوله پروتئین سویا و افزایش درصد جایگزینی آن باعث کاهش محتوای روغن شد (جدول ۳)، این امر می‌تواند ناشی از قابلیت تشکیل فیلم پروتئین‌های سویا، ظرفیت اتصال با آب بالاتر آن و در نتیجه ویسکوزیته‌ی بالاتر و دفع پائین‌تر رطوبت در نمونه‌های پوشش داده شده باشد. (Dehghan Nasiri et al., ۲۰۱۱)؛ Dogan et al. (۲۰۰۵b)، نیز کاهشی را در جذب روغن نمونه‌های حاوی پروتئین سویا گزارش کرده‌اند.

### سینتیک دفع رطوبت طی فرایند سرخ کردن

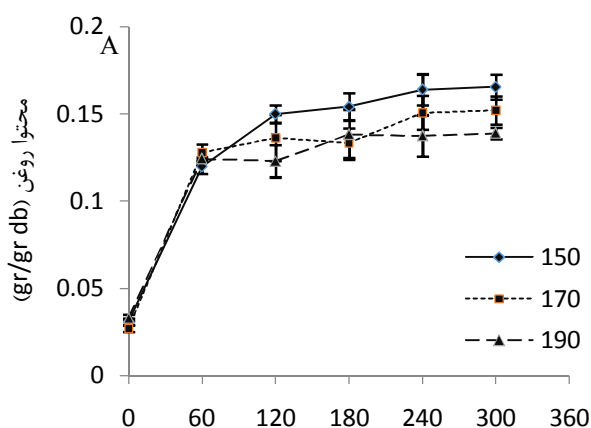
پارامترهای مختلف مدل دفع رطوبت ناگت‌های مرغ در جدول ۲ نشان داده شده است. فرمول سیستم خمیرآبه اثر معنی‌داری بر سرعت دفع رطوبت (k) و ضریب نفوذ مؤثر ( $D_{eff}$ ) داشت ( $p < 0.05$ ). افزایش دما همچنین منجر به افزایش سرعت دفع رطوبت و ضریب نفوذ مؤثر آن با شدت یافتن فعل و انفعالات شیمیایی گردید. نتایج مشابهی توسط محققان در خصوص اثر فرمول و دما بر سرعت دفع رطوبت و ضریب نفوذ مؤثر گزارش شده است (Dehghan Nasiri et al., ۲۰۱۱)؛ Soorgi et al., ۲۰۱۲؛ Ngadi et al., ۲۰۰۹).

بیشترین مقادیر سرعت دفع رطوبت و ضریب نفوذ مؤثر در دماهای مورد آزمایش برای ناگت‌های پوشش‌دار شده با خمیرآبه شاهد به ترتیب در دامنه  $(S) 4 \times 10^{-3} - 4 \times 10^{-3}$  و  $(m^2/s) 1.6 \times 10^{-8} - 1.6 \times 10^{-8}$ ، با ضریب تبیین  $0.90 - 0.82$  بدست آمد.

نتایج بدست آمده کمتر از مقادیر گزارشی توسط Soorgi et al. (۲۰۱۱) برای ناگت‌های مرغ پوشش داده شده با

جذب سریع روغن در لحظات ابتدایی سرخ کردن را می‌توان به حذف رطوبت سطحی نمونه‌ها نسبت داد. بطوری که در ابتدای فرایند سرخ کردن، دفع سریع رطوبت از سطح و افزایش تخلخل در پوسته، موجب سهولت بیشتر در جذب روغن می‌شود. با گذشت زمان سرخ کردن، با رسیدن به سطح روغن تعادلی ( $O_{eq}$ )، بخش اعظمی از تخلخل ایجاد شده در پوسته از روغن اشباع شده و سرعت جذب روغن کاهش می‌یابد (Moreira et al., ۱۹۹۹).

افزایش درجه حرارت سرخ کردن در تمامی نمونه‌ها باعث کاهش جذب روغن در محصول نهایی شد (شکل ۳). کاهش جذب روغن در دمای بالاتر، با وجود شدت فعل و انفعالات بیشتر را می‌توان به تغییرات بافتی و تشکیل سریع‌تر پوسته در سطح محصول که به‌عنوان مانعی فیزیکی بین ماده‌ی غذایی و روغن اطراف عمل می‌کند مرتبط دانست. (Ngadi et al., ۲۰۰۹)؛ (Saguy, ۲۰۰۶)؛ (Dehghan Nasiri, Troncoso, and Pedreschi, ۲۰۰۹)؛ (Soorgi et al., ۲۰۱۲) به نتایج مشابهی به ترتیب در خلال سیب زمینی، ناگت میگو و مرغ دست یافتند.



زمان سرخ کردن (S)

شکل ۳- اثر دما و زمان سرخ کردن بر محتوای روغن ناگت‌های مرغ پوشش داده شده با ۰/۵ درصد صمغ قدومه شهری

جذب روغن و دفع رطوبت در نمونه‌های پوشش‌دار شده با خمیرآبه شاهد به‌طور معنی‌داری بیشتر از سایر نمونه‌ها بود (جدول ۳ و ۲). به‌طور کلی جذب روغن بیشتر، در نمونه‌های با محتوای رطوبت پایین‌تر (نمونه‌هایی که طی سرخ کردن رطوبت بیشتری را از دست داده‌اند) مشاهده شد. این نتایج رابطه‌ی بین میزان حذف رطوبت و جذب روغن را تایید می‌کند. نتایج مشابهی توسط بسیاری از محققان گزارش شده است (Salvador et al., ۲۰۰۵؛ Mellema, ۲۰۰۳). استفاده از صمغ قدومه شهری در فرمول خمیرآبه به دلیل توانایی بالا در ایجاد پیوند هیدروژنی قوی با مولکول‌های آب و سایر ریز

بیشتر از مقدار روغن تعادلی ( $O_{eq}$ )، حاصل از برآزش داده‌ها با معادله ۷ بود (جدول ۳). به عبارت دیگر، اگرچه در هر دو معادله میزان روغن در زمان صفر بسیار ناچیز بوده است، با این حال، داده‌های تجربی با منحنی معادله ۷ تنها در بازه‌های زمان کوتاه سرخ کردن به درستی برآزش شده و در زمان‌های طولانی‌تر، مدل‌سازی روندی مستقل از زمان را در مدل نشان می‌دهد. نتایج مشابهی توسط (۲۰۰۶) Troncoso and Pedreschi و (۲۰۰۹) Moyano and Pedreschi در ناتوانی معادله ۷، جهت برآزش داده‌های تجربی فرایند سرخ کردن عمیق گزارش شده است.

همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، سرعت جذب روغن و میزان روغن تعادلی ( $O_{eq}$ ) به عنوان فاکتورهای مهم در مدل‌سازی فرایند سرخ کردن با افزایش دما به ترتیب افزایش و کاهش نشان دادند. کاهش  $O_{eq}$ ، تاییدکننده کاهش میزان جذب روغن با افزایش دما می‌باشد. (۲۰۰۶) Moyano and Pedreschi و (۲۰۰۷) Duran *et al.* نیز به نتیجه مشابهی در خصوص اثر افزایش دما بر مقادیر روغن تعادلی دست یافتند.

سرعت جذب روغن ( $k_0$ ) نمونه‌های شاهد ( $w$ )، نسبت به سایر نمونه‌ها بیشتر بود. افزودن صمغ قدومه شهری به فرمول خمیرآبه موجب کاهش ضریب جذب روغن در نمونه‌های پوشش داده شده نسبت به نمونه شاهد گردید. این امر با توجه به میزان حذف رطوبت کمتر در این نمونه‌ها در طی سرخ کردن و خصوصیت ممانعت‌کنندگی صمغ از طریق ایجاد پیوندهای عرضی با سایر ترکیبات فرمول خمیرآبه قابل توجیه است (Dehghan Nasiri *et al.*, ۲۰۱۱). با این حال، افزایش غلظت صمغ به ۱ درصد باعث افزایش ضریب جذب روغن شد. این امر، همان‌طور که پیش از این بیان شد می‌تواند به علت نقص در ایجاد ژل حرارتی و تشکیل دیر تر پوسته در غلظت‌های بالای صمغ باشد. زمانی و همکاران (۱۳۹۲)، نتایج مشابهی را در غلظت ۱ درصد صمغ زانتان نسبت به غلظت ۰/۵ درصد آن برای پوشش‌دهی خلال‌های سیب زمینی گزارش کردند.

افزودن ایزوله پروتئین سویا به فرمول خمیرآبه موجب کاهش سرعت جذب روغن با توجه به توانایی پروتئین‌های سویا در ایجاد لایه فیلم مقاوم به انتقال جرم در طی دناتوراسیون حرارتی و در نتیجه کاهش دفع رطوبت و جذب روغن گردید (Dogan *et al.*, ۲۰۰۵)؛ (Dehghan Nasiri *et al.*, ۲۰۱۱)؛ انصاری فر و همکاران، (۱۳۹۰).

### انرژی فعال‌سازی

وابستگی به دما برای ضرایب نفوذ رطوبت و روغن با استفاده از برآزش داده‌ها با معادله ۸، بدست آمد. انرژی فعال‌سازی برای حذف رطوبت و جذب روغن نمونه شاهد ( $w$ ) به ترتیب بین (kJ/mol) ۱۰/۷۹ و (kJ/mol) ۷/۹۱- و در نمونه‌هایی حاوی ایزوله پروتئین سویا

آردگندم در محدوده دمایی و روغن یکسان بود. اختلاف ایجاد شده را می‌توان به نوع آرد و حجم روغن مورد استفاده نسبت داد. همچنین ضخامت نمونه‌ها و پوسته ایجاد شده نیز فاکتور کلیدی در تعیین سرعت دفع رطوبت و ضریب نفوذ مؤثر می‌باشد (Fernando *et al.*, ۲۰۱۱).

استفاده از صمغ قدومه شهری در فرمول خمیرآبه اثر معنی‌داری بر سرعت دفع رطوبت و ضریب نفوذ مؤثر داشت (جدول ۴-۲). جایگزینی ۵/۰ درصد صمغ قدومه شهری باعث کاهش سرعت دفع رطوبت و ضریب نفوذ گردید. این امر می‌تواند ناشی از ظرفیت اتصال با آب بالای صمغ باشد که منجر به کاهش میزان آب آزاد در سیستم می‌گردد. تشکیل ژل حرارتی، به عنوان یک مانع در مقابل خروج رطوبت عمل می‌کند و از تبخیر در هنگام فرایند سرخ کردن جلوگیری می‌نماید (Soorgi *et al.*, ۲۰۱۲). افزایش درصد جایگزینی صمغ قدومه شهری اثر نامطلوبی بر سرعت دفع رطوبت و ضریب نفوذ مؤثر در ناگت‌های مرغ داشت (جدول ۲). افزایش سرعت دفع رطوبت و ضریب نفوذ مؤثر آن در نمونه‌های پوشش داده شده با خمیرآبه حاوی غلظت ۱ درصد صمغ قدومه شهری می‌تواند به علت عدم تشکیل ژل حرارتی مناسب در غلظت‌های بالای صمغ بوده که موجب تضعیف خصوصیات ممانعت‌کنندگی پوسته در برابر خروج رطوبت می‌گردد. نتایج مشابهی توسط زمانی و همکاران (۱۳۹۲) در خصوص اثر افزایش غلظت صمغ زانتان بر افزایش سرعت دفع رطوبت و ضریب نفوذ مؤثر در خلال‌های سیب زمینی پوشش داده شده گزارش شده است.

افزودن ایزوله پروتئین سویا به فرمول پوشش باعث کاهش سرعت دفع رطوبت و ضریب نفوذ مؤثر در نمونه‌ها شد. مقادیر سرعت دفع رطوبت و ضریب نفوذ مؤثر به ترتیب  $(s) \times 10^{-3}$  ۲/۴۳-۳/۷۴ و  $(m^2/s) \times 10^{-8}$  ۳/۵۵-۵/۴۶ با ضریب تبیین ۰/۸۵ و ۰/۹۵ درصد بدست آمد. نتایج بدست آمده در خصوص عملکرد ایزوله پروتئین سویا با گزارشات Dehghan Nasiri و همکاران (۲۰۱۱) برای آرد سویا و انصاری فر و همکاران (۱۳۹۱) در طی بررسی اثر پروتئین‌های سفیده تخم مرغ مطابقت دارد. توانایی بالای پروتئین‌های سویا در ایجاد شبکه فیلم مانند سه‌بعدی از طریق ایجاد پیوندهای کوالانسی قوی باعث ایجاد یک سد قوی در مقابل خروج رطوبت و تبخیر در حین فرایند سرخ کردن می‌شود.

### سینتیک جذب روغن طی فرایند سرخ کردن

ثابت سرعت جذب روغن و میزان روغن تعادلی با استفاده از برآزش داده‌های تجربی با مدل‌های ۶ و ۷ انجام شد. اگرچه هر دو معادله توانایی برآزش مناسبی با ضریب تبیین بالا داشتند (جدول ۳)، اما مقادیر بدست آمده برای محتوای روغن در تمامی نمونه‌های



پوسته‌ای متراکم‌تر در سطح محصول شده که باعث کاهش جذب روغن می‌گردد. همچنین، *Soorgi et al.* (۲۰۱۲) نشان دادند که بالا بودن میزان انرژی جهت ایجاد ژل حرارتی متیل سلولوز، موجب افزایش انرژی فعال‌سازی می‌شود.

بین  $(KJ/mol) 13/37 - 17/64$  و  $(KJ/mol) 5/90 - 9/18$ ، در نمونه‌های حاوی صمغ قدومه شهری بین  $(kJ/mol) 14/7 - 11/9$  و  $(KJ/mol) 7/56 - 10/30$  بدست آمد. مقادیر منفی انرژی فعال‌سازی جذب روغن، روند نزولی نفوذ روغن را با افزایش دما نشان می‌دهد (*Adedeji et al.*, ۲۰۰۹). افزایش دما منجر به تشکیل

جدول ۲- محتوی رطوبت و پارامترهای سینتیکی  $k$  و  $D_{eff}$  در ناگت‌های مرغ سرخ‌شده در دماهای ۱۵۰ تا ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد

محتوی رطوبت $\times 10^{-2}$ (Kg/Kg db)	$R^2$	$D_{eff} \times 10^{-8}$ ( $m^2/s$ )	$K \times 10^{-3}$ (s)	فرمول خمیرابه W
$0.563 \pm 0.022^{Ab}$	0.82	$4.734 \pm 0.120^{Da}$	$Da \cdot 0.82 \pm 3/242$	۱۵۰
$0.481 \pm 0.038^{Aba}$	0.84	$5.839 \pm 0.728^{Bab}$	$3/998 \pm 0.498^{Bab}$	۱۷۰
$0.409 \pm 0.034^{Aa}$	0.90	$6.163 \pm 0.165^{Bb}$	$4/220 \pm 0.113^{Bb}$	۱۹۰
<b>2SPIW</b>				
$0.587 \pm 0.033^{Ab}$	0.85	$3.712 \pm 0.142^{ABa}$	$2/542 \pm 0.097^{ABa}$	۱۵۰
$0.487 \pm 0.034^{Aba}$	0.84	$5.037 \pm 0.437^{Ab}$	$3/449 \pm 0.299^{Ab}$	۱۷۰
$0.439 \pm 0.024^{Aa}$	0.95	$5.466 \pm 0.272^{ABb}$	$3/742 \pm 0.187^{Ab}$	۱۹۰
<b>4SPIW</b>				
$0.709 \pm 0.034^{ABb}$	0.95	$3.554 \pm 0.205^{ABa}$	$2/434 \pm 0.140^{ABa}$	۱۵۰
$0.538 \pm 0.029^{ABa}$	0.92	$4.183 \pm 0.087^{ABab}$	$2/865 \pm 0.060^{ABab}$	۱۷۰
$0.466 \pm 0.028^{ABa}$	0.91	$5.182 \pm 0.573^{Ab}$	$3/548 \pm 0.392^{ABb}$	۱۹۰
<b>0.5LPSGW</b>				
$0.703 \pm 0.040^{Bb}$	0.90	$3.381 \pm 0.234^{Aa}$	$2/316 \pm 0.160^{Aa}$	۱۵۰
$0.646 \pm 0.043^{BCab}$	0.93	$3.957 \pm 0.129^{Aa}$	$2/710 \pm 0.088^{Aa}$	۱۷۰
$0.549 \pm 0.039^{BCa}$	0.88	$4.782 \pm 0.323^{Ab}$	$3/274 \pm 0.221^{Ab}$	۱۹۰
<b>1LPSGW</b>				
$0.800 \pm 0.050^{Cb}$	0.93	$4.050 \pm 0.251^{Ca}$	$2/774 \pm 0.171^{Ca}$	۱۵۰
$0.735 \pm 0.079^{Cab}$	0.92	$4.355 \pm 0.285^{Aa}$	$2/982 \pm 0.195^{Aa}$	۱۷۰
$0.624 \pm 0.044^{Ca}$	0.91	$5.329 \pm 0.030^{ABb}$	$3/532 \pm 0.144^{ABb}$	۱۹۰

دلیل شدت یافتن واکنش‌های فیزیکوشیمیایی این ضریب افزایش می‌یابد. همچنین کاهش مقدار روغن تعادلی (Oeq) تأییدکننده کاهش میزان جذب روغن با افزایش دما می‌باشد. میزان ضریب نفوذ در نمونه‌های پوشش‌دار شده با خمیرابه حاوی ایزوله پروتئین سویا و صمغ قدومه شهری کمتر از نمونه شاهد بود، که این امر در نتیجه‌ی توانایی این دسته از ترکیبات در ایجاد سد در مقابل خروج رطوبت و جذب روغن می‌باشد. بر اساس نتایج پارامترهای سرعت دفع رطوبت، سرعت جذب روغن و محتوای نهایی روغن در نمونه‌ها، جایگزینی ۵/۰ درصد صمغ قدومه شهری و ۴ درصد ایزوله پروتئین سویا به‌عنوان بهترین فرمولاسیون جهت کاهش جذب چربی در محصولات سوخاری شده پیشنهاد می‌گردد.

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر دمای روغن، زمان سرخ‌کردن و فرمول خمیرابه بر خصوصیات رئولوژیکی آن و پارامترهای سینتیکی انتقال جرم طی سرخ‌کردن عمیق ناگت مرغ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که فرمول خمیرابه اثر قابل توجهی بر خصوصیات رئولوژیکی، جذب پوشش و همچنین دفع رطوبت و جذب روغن ناگت‌های مرغ سرخ‌شده داشت. نمونه‌های پوشش‌دار شده با خمیرابه حاوی صمغ قدومه شهری و ایزوله پروتئین سویا منجر به کاهش دفع رطوبت و جذب روغن شدند. با توجه به نتایج بدست‌آمده، دما اثر مثبتی بر روی ضریب نفوذ موثر دارد، به‌طوری که با افزایش دما، به

جدول ۳- پارامترهای سینتیکی سرعت جذب روغن (K) و روغن تعادلی (Oqe) ناگت های مرغ در دماهای ۱۵۰ تا ۱۹۰ درجه سانتی گراد با استفاده از معادلات ۶ و ۷ (انحراف معیار  $\pm$  میانگین).

محتوای روغن $\times 10^{-2}$ (Kg/Kg db)	Oqe $\times 10^{-2}$ (Kg/Kg db)	R <sup>2</sup>	Oqe $\times 10^{-2}$ (Kg/Kg db)	K(s <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>	K(s <sup>-1</sup> )	فرمول خمیرآبه W
۰/۱۹۱±۰/۰۰۳ <sup>Ba</sup>	۱۵۰	۰/۹۰	۰/۲۰۰±۰/۰۰۷ <sup>Aa</sup>	۰/۰۲۰۹±۰/۰۰۰ <sup>Ba</sup>	۰/۹۲	۰/۰۵۳±۰/۰۰۷ <sup>Ba</sup>	۱۵۰
۰/۱۷۹±۰/۰۰۶ <sup>Cb</sup>	۱۷۰	۰/۸۹	۰/۱۸۲±۰/۰۰۰ <sup>Bb</sup>	۰/۰۳۸±۰/۰۰۴ <sup>Ba</sup>	۰/۹۰	۰/۰۸۴±۰/۰۰۶ <sup>Ba</sup>	۱۷۰
۰/۱۶۳±۰/۰۰۴ <sup>Cb</sup>	۱۹۰	۰/۸۷	۰/۱۶۷±۰/۰۰۳ <sup>Dc</sup>	۰/۰۴۷±۰/۰۰۷ <sup>Aa</sup>	۰/۸۸	۰/۱۲۰±۰/۰۰۳ <sup>Aa</sup>	۱۹۰
<b>2SPIW</b>							
۰/۱۸۷±۰/۰۰۶ <sup>Ba</sup>	۱۵۰	۰/۹۴	۰/۱۹۹±۰/۰۰۶ <sup>Aa</sup>	۰/۰۲۴±۰/۰۰۱ <sup>Aa</sup>	۰/۹۳	۰/۰۳۸±۰/۰۰۵ <sup>Aa</sup>	۱۵۰
۰/۱۷۴±۰/۰۰۴ <sup>BCab</sup>	۱۷۰	۰/۹۳	۰/۱۸۱±۰/۰۰۲ <sup>Bb</sup>	۰/۰۳۳±۰/۰۰۲ <sup>ABab</sup>	۰/۹۴	۰/۰۷۲±۰/۰۰۱ <sup>ABb</sup>	۱۷۰
۰/۱۵۵±۰/۰۰۸ <sup>BCb</sup>	۱۹۰	۰/۹۰	۰/۱۵۵±۰/۰۰۲ <sup>Cc</sup>	۰/۰۳۹±۰/۰۰۵ <sup>Ab</sup>	۰/۹۰	۰/۰۹۸±۰/۰۰۷ <sup>Ab</sup>	۱۹۰
<b>4SPIW</b>							
۰/۱۶۸±۰/۰۰۷ <sup>Aa</sup>	۱۵۰	۰/۹۳	۰/۱۸۶±۰/۰۰۷ <sup>Aa</sup>	۰/۰۲۱±۰/۰۰۲ <sup>Aa</sup>	۰/۹۴	۰/۰۳۱±۰/۰۰۵ <sup>Aa</sup>	۱۵۰
۰/۱۵۹±۰/۰۰۷ <sup>ABa</sup>	۱۷۰	۰/۹۶	۰/۱۶۹±۰/۰۰۴ <sup>ABa</sup>	۰/۰۲۹±۰/۰۰۱ <sup>Bb</sup>	۰/۹۶	۰/۰۵۸±۰/۰۰۶ <sup>Ab</sup>	۱۷۰
۰/۱۵۴±۰/۰۰۳ <sup>BCa</sup>	۱۹۰	۰/۹۶	۰/۱۶۱±۰/۰۰۲ <sup>Cb</sup>	۰/۰۳۵±۰/۰۰۰ <sup>Ac</sup>	۰/۹۶	۰/۰۹۱±۰/۰۰۰ <sup>Ac</sup>	۱۹۰
<b>0.5LPSGW</b>							
۰/۱۶۵±۰/۰۰۷ <sup>Aa</sup>	۱۵۰	۰/۹۳	۰/۱۸۴±۰/۰۰۱ <sup>Aa</sup>	۰/۰۲۲±۰/۰۰۱ <sup>Aa</sup>	۰/۹۳	۰/۰۳۳±۰/۰۰۲ <sup>Aa</sup>	۱۵۰
۰/۱۵۲±۰/۰۰۸ <sup>Aab</sup>	۱۷۰	۰/۸۹	۰/۱۶۳±۰/۰۰۸ <sup>Aa</sup>	۰/۰۳۵±۰/۰۰۳ <sup>ABb</sup>	۰/۹۳	۰/۰۷۲±۰/۰۰۷ <sup>ABb</sup>	۱۷۰
۰/۱۳۹±۰/۰۰۳ <sup>Ab</sup>	۱۹۰	۰/۸۶	۰/۱۴۳±۰/۰۰۳ <sup>Ab</sup>	۰/۰۴۰±۰/۰۰۴ <sup>Ab</sup>	۰/۸۷	۰/۰۹۵±۰/۰۰۴ <sup>Ac</sup>	۱۹۰
<b>1LPSGW</b>							
۰/۱۶۴±۰/۰۰۶ <sup>Aa</sup>	۱۵۰	۰/۹۳	۰/۱۷۹±۰/۰۰۱۵ <sup>Aa</sup>	۰/۰۲۴±۰/۰۰۳ <sup>Aa</sup>	۰/۹۳	۰/۰۴۱±۰/۰۰۷ <sup>ABa</sup>	۱۵۰
۰/۱۵۵±۰/۰۰۷ <sup>Ab</sup>	۱۷۰	۰/۹۱	۰/۱۶۳±۰/۰۰۱۲ <sup>ABa</sup>	۰/۰۲۹±۰/۰۰۳ <sup>Aa</sup>	۰/۹۲	۰/۰۵۴±۰/۰۰۶ <sup>Aa</sup>	۱۷۰
۰/۱۴۵±۰/۰۰۶ <sup>ABb</sup>	۱۹۰	۰/۹۰	۰/۱۴۹±۰/۰۰۰ <sup>Aa</sup>	۰/۰۴۴±۰/۰۰۱ <sup>Aa</sup>	۰/۹۱	۰/۱۱۶±۰/۰۰۲ <sup>Ab</sup>	۱۹۰

\* حروف بزرگ نماینگر اثر فرمولاسیون و حروف کوچک اثر درجه حرارت بر شاخص‌ها می باشد.

\* ارقام دارای حروف مشترک در هر ردیف و ستون از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند (p<۰/۰۵).

\* علامت (\*) نشان بالاتر بودن میزان روغن سنجیده شده از میزان روغن تعادلی می باشد

## منابع

- انصاری فر، ا.، محبی، م.، شهیدی، ف. و وریدی، م. ۱۳۹۰، مدل‌سازی انتقال جرم طی سرخ کردن عمیق ناگت پنیر کردی پوشش داده شده با سفیده تخم مرغ. نشریه پژوهش‌های علمی علوم و صنایع غذایی ایران. ۶: ۱۲۶-۱۳۷
- زمانی قلعه شاهی، ع. ۱۳۹۱. ارزیابی اثر صمغ‌های متیل سلولوز و گرانتان بر میزان جذب روغن خلالهای سیب زمینی طیسرخ کردن عمیق. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد.
- AACC, 1986, Moisture Content. In: approved methods of the American association of chemists. AOAC, 1990, Official methods Analysis. Association of official Analytical Chemists, Washington dC.
- Adedeji, A.A., Ngadi, M.O., and Raghavan, G.S.V., 2009, Kinetics of mass transfer in microwave precooked and deep fat fried chicken nuggets. *Journal of Food Engineering*, 91, 146–153.
- Akdeniz, N., Sahin, S., Sumnu, G., 2006, Functionality of batters containing different gums for deep-fat frying of carrot slices. *Journal of Food Engineering*, 75, 522–526.
- Albert, A., Perez-munuera, I., Quiles, A., Salvador, A., Fiszman, S.M., Hernando, I., 2009, Adhesion in fried battered nuggets: performance of different hydrocolloids as pre-dusts using three cooking procedures. *Food Hydrocolloids*, 23,

1443–1448.

- Amboon, W., Tulyathan, V., and Tattiyakul, J., 2010, Effect of hydroxypropyl methylcellulose on rheological properties, coating pickup, and oil content of rice flour-based batters. *Food and Bioprocess technology*, doi 007/s11947-010-0327-3.
- Baixauli, R., Fiszman, S. M., Sanz, T., Salvador, A., 2003, Effect of the addition Dextrin or dried egg on the rheological and textural properties of batters for fried foods. *Food hydrocolloids*, 17, 305-310.
- Chen, C. L., Li, P. Y., Hu, W.Y., Lan, M.H., Chen, M.J., and Chen, H.H., 2008, Using HPMC to improve crust crispness in microwave-reheated battered mackerel nuggets: water barrier effect of hpmc. *Food Hydrocolloids*, 22, 1337–1344.
- Crank, J., 1975, the arithmetics of diffusion, second Ed. Oxford university press, oxford, UK
- Dogan, S.F., Sahin, S., and Sumnu, G., 2005, Effects of soy and rice flour addition on batter rheology
- Dehghan Nasiri, F., Mohebbi, M., Tabatabaee, Y. F., Haddad, M. H. K., 2011, Kinetic modeling of mass transfer during deep fat frying of shrimp nugget prepared without a pre-frying step. *Food and Bioprocess Processing*, 8 9, 241–247
- Dogan, S.F., Sahin, s., and Sumnu, G., 2005, Effect of containing different protein types on the quality of deep-fat-fried chicken nuggets. *European Food Research and Technology*, 220, 502–508.
- Duran, M., Pedreschi, F., Moyano, P., and Troncoso, E., 2007, Oil partition in pre-treated potato slices during frying and cooling. *Journal of Food Engineering*, 81, 257-265.
- Hsia, H.Y., Smith, D.M. and Steffe, J.F., 1992, Rheological properties and adhesion characteristics of flour-based batters for chicken nuggets as affected by three hydrocolloids. *Journal of Food Science*, 57(1), 18- 24.
- Fiszman, S.M., Salvador, A., 2003, Recent developments in coating batters. *Trends in Food Science and Food Technology*, 14 (10), 399–407.
- Fernando, W.J.N., Low, H.C., Ahmad, A.L., 2011, Dependence of the effective diffusion coefficient of moisture with thickness and temperature in convective drying of sliced materials. A study on slices of banana, cassava and pumpkin. *Journal of Food Engineering*, 81, 257-265
- Kim, C. and Yoo, B., 2006, Rheological properties of rice starch–xanthan gum mixtures, *Journal of Food Engineering*, 75(1), 120-128.
- Koocheki, A., Taherian, A., R., Bostan, A., 2009, Response surface methodology for optimization of extraction yield, viscosity, hue and emulsion stability of mucilage extracted from lepidium perfoliatum seeds. *Journal Food Hydrocolloid*, 29, 297–302.
- Koocheki A, Taherian A, R, M.A, Bostan A., 2013, Studies on the steady shear flow behavior and functional properties of lepidium perfoliatum seed gum. *Food research international* 50, 446–456.
- Krokida, M.K., Oreopoulou, V., and Maroulis, Z.B., 2001, Water loss and oil uptake as a function of frying time. *Journal of Food Engineering*, 44, 39-4.
- Moyano, P., and Pedreschi, F., 2006, Kinetics of oil uptake during frying of potato slices: effect of pre-treatments. *Lwt - Food Science and Technology*, 39, 285–291.
- Mellema, M., 2003, A review, Mechanism and reduction of fat uptake in deep-fat fried foods. *Trends in Food Science and Technology*, 14, 364-373.
- Moreira, R.G., Castell-perez, M.E., Barrufet, M.A., 1999, Deep-fat frying, Fundamentals and applications, aspen publishers, inc. maryland, u.s.a.; 1–2.
- Ngadi, M.O., Dirani, K., and Oluka, S., 2006, Mass transfer characteristics of chicken nuggets. *International Journal of Food Engineering*, 2, 1-16.
- Ngadi, M., Li, Y., and Oluka, S., 2007, Quality changes in chicken nuggets fried in oils with different degrees of hydrogenation. *Lwt – Food Science and Technology*, 40, 1784–91.
- Ngadi, M.O., Wang, V., Adedeji, A.A., and Raghavan, G.S.V., 2009, Effect of microwave pretreatment on mass transfer during deep-fat frying of chicken nugget. *Lwt - Food Science and Technology*, 42, 438–440.
- Rimac-brncic, S., Lelas, V., Rade, D., Simundi, B., 2004, Decreasing of oil absorption in potato strips during deep fat frying. *Journal of Food Engineering*, 64, 237–241.
- Salvador, A., Sanz, T., Fiszman, S.M., 2005, Effect of the addition of different ingredients on the characteristics of a batter coating for fried seafood prepared without a pre-frying step. *Food Hydrocolloids*, 19, 703–708.
- Sanz, T., Salvador, A., Fiszman, S.M., 2008, Resistant starch (rs) in battered fried products: functionality and high-fibre benefit. *Food hydrocolloids*, 22, 543–549.
- Sahin, S., Sumnu, G., Altunakar, B., 2005, Effects of batters containing different gum types on the quality of deep-fat fried chicken nuggets. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(14), 2375–2379.
- Sahin, S., and Sumnu, G., 2009, advance in deep-fat frying of foods. Taylor & Francis group. new york.
- Saguy, I.S., Dana, D., 2006, Integrated approach to deep fat frying, Engineering, Nutrition, Health and consumer aspects. *Journal of Food Engineering*, 56, 143–152.

- Soorgi, M., Mohebbi M., Mousavi S. M. & Shahidi F., 2012, the effect of methylcellulose, temperature and microwave pretreatment on kinetic of mass transfer during deep fat frying of chicken nuggets. *Food bioprocess technology*, vol 5, 5, 1521-1530.
- Singh, R., Singh, G., and Chauhan, G.S., 1996, Effect of incorporation of defatted soy flour on the quality of biscuits. *Journal of food science and technology*, 33(4): 355–357.
- 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.
- Xue, J., and Ngadi. M., 2006, Rheological properties of batter systems formulated using different flour combinations. *Journal of Food Engineering*, 77: 334–341.
- Wolf, w. J., Cowan, j. C., 1975, *Soybeans as a food source*. Crc press, inc., Ohio , 34-51

## Kinetic modeling of mass transfer during deep fat frying of chicken nugget coated with batter containing Godume shahri seed gum/ soy protein isolates

H. Mahdavian Mehr<sup>1</sup>, A. Koocheki<sup>2\*</sup>, M. Mohebbi<sup>3</sup>

Received: 2015.07.21

Accepted: 2016.03.13

**Introduction:** Deep fat frying is a cooking method where oil is used as the heat transfer medium, in direct contact with food at a temperature above boiling point of water. The aim of this process is to combine short cooking times with unique characteristics. It also involves heat and mass transfer simultaneously. During frying time, the mass transfer is characterized by the dynamics moisture loss from the food and the fat uptake into the food. There is some experimental evidence showing that water loss and oil absorption are correlated and progress with specific kinetic. In the meantime, oil uptake of product is an important issue, affecting the nutritional and organoleptic qualities of fried foods. However, one problem associated with fried foods is the considerable amount of oil absorbed during the deep frying process. It is affected by oil temperature, frying time, initial water content of food ingredients, product surface area, the ratios of product weight to frying oil volume, pretreatments and many other factors. So far, several approaches have been suggested for decreasing oil uptake during deep frying of fried foods. One way to decrease oil absorption in foods is referred to batter coating. In this regard, the ingredients and flow behavior's properties of batter are the most important parameters to determine the performance of batter coating and reduction of oil uptake in the final product. In the batter formulations, proteins and gums can be used as important and effective components, because they have great water bonding and barrier properties, which has strong impact on reduction of oil uptake during frying. Therefore, the objective of the present study was to assess the effects of replacement of Godume shahri seed gum (0.5 and 1%) or soy protein isolates (2 and 4 %), as part of the wheat flour in batter formulation, on rheology of batter, batter pickup and mass transfer kinetic parameters during deep frying of chicken nuggets.

### Materials and method:

**Raw materials** including fresh chicken breasts, onion, salt, hot pepper, wheat flour, baking powder, and 100% pure sunflower oil were purchased from local markets. SPI (92% protein, w/w, db) were obtained from FSL Co. The batter formulations consisted of wheat flour, salt (1.5% w/w, db), baking powder (0.5% w/w, db), SPI (2 and 4% w/v, db) and Godume shahri seed gum (0.5 and 1%). For all samples, water/dry mix proportion had always been 5:3.

Rheological properties of the batters were carried out using a Bohlin rotational Viscometer. For each test, shear rate increased from 0 to 300 s<sup>-1</sup>. The flow behavior index (n) and consistency coefficient (k) values were computed by fitting the power law model.

The chicken nuggets, containing a mixture of chicken breast meat (88%), onions (10 %), Pepper (0.5%) and salt (1.5 %) were prepared in slab shapes using a manually operated cutting device. The dimensions of the chicken nuggets were about 4.5 cm (length) × 2.6 cm (width) × 1.1 cm (thickness) (±0.2 cm). Batter pickups (%) were calculated by the weight difference between the chicken nuggets after coating to the weight of chicken nuggets before coating.

Deep frying was performed in programmable deep fat fryer contained 1.5 L refined sunflower oil. Samples were placed in a wire basket and then submerged for the required times of zero, 1, 2, 3, 4 and 5 minutes at 150 °C, 170 °C, and 190 °C. Oil and moisture content of the chicken nuggets were determined by standard techniques. For modeling moisture and oil transfer phenomena in fried chicken nuggets, Fick's law of diffusion and a first order kinetic model were used respectively.

**Results and Discussion:** Results showed that Godume shahri seed gum had more effect on apparent viscosity compared with soy protein isolates. Polysaccharidic structure of Godume shahri seed gum prepares high number of hydroxyl groups. Hydrodynamic interactions between polar and hydrophobic groups trap most of the free water and consequently increase batter viscosity. All batters showed shear thinning behaviour (n≥0.529). The

1, 2 and 3. MSc student, Associate Professor and Professor Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran  
(\*Corresponding Author Email: koocheki@um.ac.ir)

power law model was adequately suitable to describe the flow behavior of the batters ( $R^2 \geq 0.994$ ). Coating uptake at the surface of nuggets was significantly affected by the batter consistency. The consistency index for batter containing gum was high and therefore the coating uptake was higher for these samples. The maximum moisture loss rate and the effective diffusion coefficient obtained for chicken nuggets coated with only batter. Addition of soy protein isolates and Godume shahri seed gum to batter formulation, decreased the  $D_{eff}$  to  $3.55-5.46 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  and  $3.38-5.32 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ , respectively. This can be attributed to the effect of different batter formulations and special functions of gum and protein. The activation energy to remove moisture and oil absorption were 10.79 (kJ/mol) and -7.91 (kJ/mol) for the control sample, 13.37-17.64 (kJ/mol) and -5.90 to -9.18 (kJ/mol) for soy protein isolates and 11.9-14.7 (kJ/mol) and -7.56 to -10.30 (kJ/mol) for Godume shahri seed gum, respectively.

**Keywords:** Mass transfer; Deep frying; Godume shahri seed gum; Soy protein isolates; Chicken nugget.