

# مطالعه آزمایشگاهی خشک کردن کف پوشی گوشت میگو و ارزیابی مدل های خشک کردن لایه نازک آن

شبنم حمزه<sup>۱</sup>، علی معتمدزادگان<sup>۲</sup>، سید احمد شهیدی<sup>۳\*</sup>، محمد احمدی<sup>۴</sup>،  
جو مک رگینستین<sup>۵</sup>

- ۱- دانشجوی دکترا، گروه بهداشت مواد غذایی، واحد آیت ... آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران.
  - ۲- دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
  - ۳- دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، واحد آیت ... آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران
  - ۴- استادیار، گروه بهداشت مواد غذایی، واحد آیت ... آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران.
  - ۵- استاد، گروه علوم مواد غذایی، دانشگاه کرنل، ایتاکا، آمریکا.
- (تاریخ دریافت: ۹۷/۰۷/۲۱ تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۱/۰۱)

## چکیده

خشک کردن کف پوشی فرایندی است که در آن مواد غذایی مایع به وسیله ترکیب گاز به داخل آن ها به کف پایدار تبدیل شده، سپس در دمای نسبتاً پایین خشک می شوند. در این پژوهش، اثر دمای خشک کردن (۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی گراد) و ضخامت (۴ و ۸ میلی متر) بر سینتیک خشک کردن کف پوشی میگو بررسی شد. سینتیک خشک کردن با ۱۲ مدل تجربی و بر اساس چهار شاخص آماری شامل ضریب تبیین ( $R^2$ )، مجموع مربعات خطا (SSE)، مربع کای ( $\chi^2$ ) و ریشه متوسط خطای داده ها (RMSE) با هم مقایسه شدند. تغییرات رنگ نیز طی فرایندهای تغلیظ بررسی شد. تغییرات کل رنگ جهت تخمین میزان تخریب رنگ بکار گرفته شد. مدل های سینتیکی مرتبه صفر، مرتبه یکو مرکب برای بیان تغییر در پارامترهای رنگ مورد استفاده قرار گرفتند. طبق نتایج به دست آمده بهترین مدل جهت برازش داده های خشک کردن هوای داغ، مدل میدلی بود. این مدل ها دارای بالاترین ضریب تبیین و کمترین مجذور میانگین مربعات خطا، کایمربع و مجموع مربعات خطا، نسبت به سایر مدل ها بودند. نتایج نشان داد که تغییر در مقدار تغییرات کلی رنگ از سینتیک مدل مرکب پیروی می کند. این مدل بیان می کند که تشکیل رنگ و نابودی رنگ دانه در حین فرایند خشک کردن کف پوشی میگو اتفاق می افتند.

کلید واژگان: خشک کردن کف پوشی، رنگ، سینتیک، میگو

\* مسئول مکاتبات: sashahidy@yahoo.com

## ۱- مقدمه

به‌طور سنتی مصرف آبزیان در کشور ایران عمدتاً محدود به فیله تازه ماهی بوده است این در حالی است که ده‌ها نوع محصول غذایی می‌تواند به‌طور مستقیم و غیرمستقیم از آبزیان تولید شود. از این میان می‌توان تولید کنسرو، پودر ماهی، ماهی‌دودی و خشک، سس ماهی، برگر ماهی و غیره را نام برد. بدیهی است گسترش تنوع فرآورده‌های دریایی و ایجاد امکان استفاده از آنها در فرمولاسیون سایر فرآورده‌های غذایی این فرصت را می‌دهد تا بتوان با گسترش تنوع در تولید محصولاتی سازگار با ذائقه عامه مردم تولید و مصرف سرانه آن را افزایش داد [۱].

میگو یکی از مغذی‌ترین غذاهای دریایی و منبع غنی از ویتامین و املاح است. تلاش برای تنوع بخشی به فرآورده‌های میگو و تولید محصولات با ارزش افزوده به عنوان سیاست راهبردی واحدهای فراوری میگو تلقی می‌شود. این محصولات باید راحت مصرف شده، کیفیت و ارزش تغذیه‌ای مناسب داشته باشند، ضمن اینکه از نظر ویژگی‌های حسی برای مصرف‌کننده جذاب باشند. از جمله این فرآورده‌ها می‌توان به میگوی منجمد، کنسرو میگو، میگوی خشک، پودر میگو، میگوی شور، فرآورده‌های تخمیری (ترشی میگو و سس میگو) و نیز فرآورده‌های ترکیبی نظیر برگر میگو، کوفته میگو و ناگت میگو اشاره کرد [۲].

یکی از متداول‌ترین و قدیمی‌ترین روش‌های نگهداری مواد غذایی، فرایند خشک کردن یا آب زدایی است. هدف از خشک کردن مواد غذایی، ذخیره سازی طولانی مدت مواد غذایی، حداقل کردن نیازهای انبارداری و بسته بندی و کاهش هزینه های حمل و نقل می باشد. روش های زیادی برای خشک کردن محصولات دریایی وجود دارد، اما درعین حال کیفیت محصولات خشک شده و کارایی فرایند خشک کردن دارای اهمیت می باشند. درجه حرارت، زمان و فعالیت آبی در حین فرایند خشک کردن بر روی کیفیت محصول نهایی تأثیر می گذارد [۳]. بسیاری از غذاهای خشک شده قبل از مصرف باز آب پوشی می شوند. ساختار، میزان تخلخل، چگالی و اندازه ذره یک ماده غذایی خشک شده، در حلالیت آن در آب یا باز آبپوشی نقش مهمی را ایفا می کنند. عواملی مانند پف کردن، خلأ، کف کردن، دمای سطح، انجام فرایند در دمای پایین، تجمع و به هم چسبندگی ذرات و پوشش سطحی بر ساختار،

چگالی و باز آب پوشی غذا تأثیر می گذارد. برای به دست آوردن محصولاتی با کیفیت بالاتر، همچنین کاهش زمان خشک کردن، روش‌هایی مانند خشک کردن پفی تحت خلأ، خشک کردن پاششی کفی و خشک کردن کف پوشی توسعه یافته‌اند. کف کردن مواد مایع و نیمه مایع از زمان‌های قدیم به‌عنوان یک روش مؤثر در کاهش زمان خشک کردن و افزایش کیفیت محصول شناخته شده است [۴]. خشک کردن کف پوشی فرایندی است که مایعات غذایی به کف پایدار تبدیل شده و سپس خشک می‌شوند. برتری فرایند خشک کردن کف پوشی شامل: سادگی، سرعت خشک شدن سریع در دماهای پایین، ارزان تر در مقایسه با خشک کردن مواد غیر کفی، حفظ کیفیت تغذیه‌ای و حسی می‌باشد. از دیگر مزایای این روش می‌توان به مناسب بودن برای همه انواع مواد غذایی مایع و نیمه مایع، مواد حساس به حرارت، چسبنده و ویسکوز اشاره کرد. همچنین در محصول تولید شده با این روش به دلیل حداقل صدمه حرارتی به محصول هیچ طعم سوختگی وجود ندارد. سرعت خشک کردن بالا به دلیل افزایش سطح مواد توسط ترکیب هوا/ گاز و تشکیل ساختار متخلخل می‌باشد که کیفیت بالا و خصوصیات فوری به محصولات خشک شده می‌دهد. پودرهای خشک شده به راحتی جذب آب کرده، بازسازی می‌شوند و به‌عنوان استارتر در تولید محصولاتی همچون چاشنی غذا، سوپ، پودر سس، اسنک، دسر، غذای کودک و ... مورد استفاده قرار گیرند [۳ و ۵]. نکته اساسی برای خشک کردن به روش کف پوشی، ایجاد یک کف پایدار در طی فرایند آماده سازی و خشک کردن محصول می‌باشد. برای گوشت میگو که پروتئین‌های آن قابلیت احتباس هوا و تشکیل کف را طی هم زدن دارند، استفاده از یک پایدارکننده مناسب اهمیت زیادی دارد. پایدارکننده‌ها با ایجاد شبکه‌ای سه بعدی و حبس سیالات مانع از جریان شده و سیستم سوسپانسیون کلوئیدی را پایدار می‌سازند [۶].

سیستیک خشک کردن مواد غذایی به‌طور گسترده‌ای با استفاده از روش خشک کردن لایه نازک تعیین می‌شود. مدل سازی ریاضی فرآیند خشک کردن و ارائه مناسب ترین شرایط عملیاتی برای طراحی تجهیزات، مهم ترین مزایای تکنولوژی خشک کردن لایه نازک به صورت کف پوشی محسوب می‌شود [۷]. مطالعات بسیاری در مورد سیستیک خشک کردن و مدل سازی ویژگی‌های خشک شدن مواد غذایی مختلف در فرایند خشک کردن

جلوگیری از کلوخه شدن آن از همزن مغناطیسی استفاده شد. محلول حاصل برای مدت ۱۸ ساعت به منظور جذب کامل آب در دمای ۴ سانتی‌گراد یخچال نگهداری شد.

### ۲-۳- تهیه پودر میگو

تهیه پودر میگو به طریق کف‌پوشی و به روش عزیزپور [۲] با اندکی تغییرات انجام شد. در ابتدا خمیر میگو به نسبت مشخص در یک بشر توزین شد. به منظور اضافه کردن مقدار مورد نظر صمغ، محلول صمغی که در روز قبل تهیه شده بود به میزان تعیین شده، به خمیر میگو اضافه گردید و مابقی تا وزن ۱۰۰ گرم آب مقطر ریخته شد. سپس مخلوط جهت همگن شدن به مدت ۳۰ ثانیه با همزن مغناطیسی مخلوط شد. مخلوط مورد نظر با همزن برقی با بیشترین سرعت در دمای محیط به مدت ۴ دقیقه همزده شد.

در مورد اثر ۴ ماده پایدار کننده بومی شامل صمغ دانه‌های قدومه شیرازی، مرو، شاهی و ریحان در مقادیر مختلف، هریک در چهار سطح (۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و درصد) با نسبت‌های متفاوت آب به میگو (۱ به ۲، ۱ به ۴ و ۱ به ۶) برای تولید پودر میگو به روش کف‌پوشی انتخاب شد. غلظت صمغ و نسبت آب به گوشت بر اساس منابع و آزمایش‌های اولیه تعیین گردید. پایدار کننده و نسبت آب به میگو مناسب از این قسمت انتخاب شده و برای انجام مراحل بعدی آزمایش‌ها به کار گرفته شد. با توجه به نتایج آزمون‌های دانسیته و افزایش حجم مشخص شد که کف تولید شده با غلظت ۰/۲۵ درصد صمغ شاهی و نسبت آب به میگو ۴ به ۱ دارای کمترین دانسیته و بیشترین افزایش حجم است. همچنین این میزان صمغ و نسبت آب به میگو پایداری قابل قبولی را برای خشک کردن کف‌پوشی ایجاد کرد که به عنوان فرمول مبنا برای مراحل بعدی آزمایش مورد استفاده قرار گرفت.

سپس تیمار بهینه انتخاب شده و اثر هموژنیزاسیون به روش اولتراسوند در سه زمان (۱، ۲ و ۳ دقیقه) و سه سطح از قدرت هموژنایزر (۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ وات) بر ویژگی‌های کف بررسی شد. با توجه به نتایج آزمون‌های دانسیته و افزایش حجم مشخص شد که استفاده از اولتراسوند به مدت سه دقیقه و قدرت هموژنایزر ۳۰۰ وات کمترین دانسیته و بیشترین افزایش حجم را ایجاد می‌کند. لذا این روش برای مراحل بعدی آزمایش مورد استفاده قرار گرفت.

لایه‌های نازک موجود است. در پژوهش‌های مختلف به ذرت [۸]، انجیر [۹]، سیب طلایی [۱۰]، میوه زرشک [۱۱]، گیلاس [۱۲]، مکعب‌های سیب‌زمینی شیرین [۱۳]، انگور فرنگی [۱۴]، برگه‌های هلو [۱۵]، برش‌های کدو تنبل [۱۶]، بادمجان [۱۷] و آلو [۱۸] پرداخته‌اند. با این حال، تاکنون مطالعات محدودی در زمینه تولید پودر فرآورده‌های دریایی به روش کف‌پوشی و بررسی سینتیک انتقال جرم و همچنین تغییرات رنگ کل طی خشک کردن این محصولات انجام شده است. هدف از انجام این پژوهش تولید کف میگو (*Penaeus indicus*) و پودر آن با استفاده از صمغ‌های بومی، مطالعه سینتیک فرایند خشک کردن در شرایط مختلف دمایی و ضخامت لایه می‌باشد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مواد

مواد اولیه اصلی مورد استفاده در این تحقیق شامل میگوی سفید هندی و صمغ دانه‌های قدومه شیرازی، مرو، شاهی و ریحان بود. میگوی تازه از شرکت در یازاد مازندران خریداری شد. دانه‌های قدومه شیرازی، مرو، شاهی و ریحان از فروشگاه‌های محلی خریداری شد.

### ۲-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها

میگوی سفید هندی بعد از خریداری، سریعاً پاک و منجمد شده و تا زمان استفاده در فریزر نگهداری شد. در هر بار آزمایش، میگوی منجمد بعد از خروج از انجماد در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت، به منظور از بین بردن آلودگی میکروبی و فعالیت آنزیمی به مدت ۴ دقیقه در آب نمک (۲٪ وزنی/حجمی) ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد غوطه‌ور شد (نسبت میگو به محلول نمک در تمام آزمایش‌ها ۱:۲ بود) [۱۹ و ۲۰]. با خارج کردن میگو از آب داغ، نمونه به مدت ۱۰ دقیقه در هوای آزاد سرد شد. میگوهای آنزیم بری شده، توسط دستگاه خردکن خانگی (مدل HB-5503AP، پارس خزر، ایران) خرد شدند تا اینکه به صورت خمیر یکنواخت درآمدند.

صمغ دانه‌های قدومه شیرازی [۲۱]، مرو [۲۲]، شاهی [۲۳] و ریحان [۲۴] استخراج شد. سپس به منظور آب‌گیری صمغ‌ها، نمونه توسط ترازوی دیجیتالی (مدل: AND.EK-300i) با دقت ۰/۰۱ گرم وزن شد و در آب مقطر ریخته شد، به صورتیکه محلول حاصل دارای غلظت ۰/۲٪ (وزنی/وزنی) صمغ بود. برای کنترل و حفظ یکنواختی مخلوط شدن و

رطوبت برحسب زمان برای یک دمای ثابت هوای ورودی به محفظه خشک‌کن رسم می‌شود. منحنی که بدین ترتیب به دست می‌آید منحنی پیشروی خشک‌کردن نامیده می‌شود. در خشک‌کردن لایه‌نازک شکل منحنی را می‌توان با تقریب خوبی به وسیله مدل‌های ریاضی بیان نمود.

در مدل کردن خشک‌کردن به روش همرفتی فرض بر این است که نسبت حجم هوا به حجم محصول بی‌نهایت بزرگ است؛ بنابراین به‌جز نوع و اندازه محصول، محتوی رطوبتی و دمای هوای خشک‌کننده اثر بقیه فاکتورهای مؤثر در نرخ خشک‌کردن ناچیز و قابل‌اغماض می‌باشد. با توجه به تئوری عمومی خشک‌کردن نرخ آب خارج شده از محصول با فاکتورهای همچون اختلاف فشارهای بخار بین هوای خشک‌کننده و سطح مرطوب، مساحت سطح محصول، ضریب انتقال جرم و سرعت هوای خشک‌کننده متناسب است:

$$\frac{d_M}{d_t} = \frac{P_v P_{va}}{(1/K_m A_s) R_0 T_{abs}} = \frac{K_m A_s P_v P_{va}}{R_0 T_{abs}} \quad (1)$$

در این رابطه،  $P_v$  فشار بخار در محصول  $(N.m^{-2})$ ،  $P_{va}$  فشار بخار هوای خشک‌کننده  $(N.m^{-2})$ ،  $A_s$  مساحت سطح محصول  $(m^2)$ ،  $K_m$  ضریب انتقال جرم بخار آب  $(kg.s^{-1}.m^{-2})$ ،  $R_0$  ثابت جهانی گازها  $(J.mol^{-1}.k^{-1})$ ،  $M$  محتوی رطوبتی محصول بر پایه خشک و  $T_{abs}$  دمای مطلق  $(K)$  می‌باشند. عبارت  $A_s(P_v - P_{va})$  نیروی مؤثر خارجی ناشی از شرایط محیطی را نشان می‌دهد درحالی‌که عبارت  $(1/K_m A_s)$  پارامتر مقاومتی محصول می‌باشد. فشار بخار جزئی را می‌توان به صورت رابطه برحسب رطوبت نسبی بیان کرد:

$$\frac{d_M}{d_t} = -AP_s(\phi_F - \phi_K) \quad (2)$$

$P_s$  فشار بخار اشباع در دمای معین هوا بوده و  $\phi_F$  رطوبت نسبی روی سطح جسم،  $\phi_K$  رطوبت نسبی واسطه خشک‌کردن (هوا) و  $t$  زمان برحسب ساعت  $(h)$  می‌باشند. مطابق رابطه ۳، تغییرات مقدار رطوبت در روی تک دمای جذب تقریباً خطی است و می‌توان نوشت:

$$\frac{d_M}{d_t} = -K(M - M_e) \quad (3)$$

با جدا کردن متغیرها و انتگرال‌گیری از زمان در محدوده 0 و  $t$  و محتوی رطوبتی  $(M)$  در محدوده  $M_0$  (رطوبت اولیه محصول) و  $M_e$  (رطوبت تعادلی محصول) به معادله ۴ می‌رسیم:

تیمار منتخب از مراحل قبل (کف تولید شده با غلظت ۰/۲۵ درصد صمغ شاهی و نسبت آب به میگو ۴ به ۱، اولتراسوند به مدت سه دقیقه و قدرت هموژنایزر ۳۰۰ وات) برای خشک کردن در شرایط مختلف و بررسی سینتیک خشک کردن بکار رفت. نمونه‌ها پس از همزدن و تولید کف درون پلیتهای آلومینیومی با ضخامت ۷۰ میکرون، قطر ۹۰ میلی‌متر با ضخامت ۴ و ۸ میلی‌متر ریخته شد و در دمای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به رطوبت ثابت در آن فن‌دار خشک شدند.

به منظور بررسی سینتیک نمونه‌ها حین خشک شدن، نمونه‌ها در فواصل زمانی معین از خشک‌کن خارج شدند و افت وزن آن‌ها توسط ترازوی دیجیتال با دقت  $(\pm 0.01)$  گرم و رنگ آنها توسط پردازش تصویر اندازه‌گیری شد. خشک‌کردن تا زمانی که تغییرات وزن نمونه‌ها در دو تا سه توزین متوالی بسیار کم و تقریباً ثابت می‌شد، ادامه پیدا کرده، پس از آن نمونه‌ها از خشک‌کن خارج شدند.

## ۲-۴- اندازه‌گیری رنگ

بررسی رنگ با استفاده از تکنیک پردازش تصویر انجام شد. تصویرگیری از نمونه‌ها با استفاده از دوربین Canon مدل Power Shot EOS 1000D صورت گرفت. جهت آماده سازی تصاویر برای مراحل بعدی پردازش تصویر، ابتدا تصویر از تصویر پس‌زمینه جداسازی شد. برای انجام اینکار از نرم‌افزار PhotoShop نسخه ۸ استفاده گردید. تصاویر با فرمت PNG و در فضای رنگی RGB ذخیره گردید. با استفاده از پلاگین تبدیل‌کننده فضای رنگی تحت نرم افزار ImageJ نسخه ۱،۰۴ تصاویر به CIE XYZ و سپس به  $L^*a^*b^*$  تبدیل گردید. مطابق کد ارائه شده توسط توسعه دهنده برنامه، برای تبدیل اطلاعات اخذ شده از پیکسل‌ها در فضای رنگی RGB به  $L^*a^*b^*$  از روش دو مرحله‌ای استفاده شد. پس از تبدیل تصویر به فضای رنگی  $L^*a^*b^*$ ، محاسبه میانگین برای هر مؤلفه انجام شد. میانگین معادل میانگین مقادیر مؤلفه رنگی در پیکسل‌های تصویر است [۲۵].

## ۲-۵- مدل سازی سینتیک خشک کردن

در بیشتر پژوهش‌ها، مدل سینتیک خشک‌کردن بر اساس شاخص رطوبت نسبی MR بیان می‌شود که علت آن پیدا کردن مناسب‌ترین مدل خشک شدن و خوش‌فرم کردن داده‌ها است. در طول آزمایش در جریان خشک‌کردن نمودار تغییرات

آماري نظير کمترین مقدار مربع کای ( $X^2$ ) و ریشه میانگین مربعات خطا (MSE) برای تعیین بهترین مدل انتخاب شدند که روابط آن‌ها به صورت معادلات (۶) و (۷) و (۸) و (۹) ارائه شده است:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})}{\sum_{i=1}^n (MR_{pre,i} - \overline{MR}_{pre})} \quad (6)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{n - p} \quad (7)$$

$$RMSE = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - MR_{pre,i}) \right)^{0.5} \quad (8)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^n (MR_{pre,i} - \overline{MR}_{pre})^2 \quad (9)$$

در روابط ۶ تا  $MR_{exp,i}$  مبین آیین نسبت رطوبتی مشاهده شده،  $MR_{pre,i}$  مبین آیین نسبت رطوبتی پیش‌بینی شده،  $n$  تعداد مشاهدات و  $p$  تعداد ثابت‌ها در مدل می‌باشد [۲۶]. به منظور مدل‌سازی سینتیک خشک‌کردن داده‌های آزمایشگاهی از مدل‌های جدول ۱ استفاده گردید. مدل‌سازی توسط نرم‌افزار سیگما پلات انجام شد.

**Table 1.** Mathematical models given by various authors for the drying curves

Model no.	Name	Model equation	References
1.	Newton	$MR = \exp(-kt)$	[27]
2.	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	[28]
3.	Modified Page	$MR = \exp[-(kt)^n]$	[29]
4.	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	[30]
5.	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	[31]
6.	Two-term	$MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$	[32]
7.	Two term exponential	$MR = a \exp(-kt) + \exp(-mt)$	[33]
8.	Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	[34]
9.	Diffusion Approximation	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$	[35]
10.	Midilli	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	[36]
11.	Weibull	$MR = \exp(-(\frac{t}{k})^n)$	[37]
12.	Modified Page equation-II	$MR = \exp(a(\frac{t}{k^2})^n)$	[38]

مدل سینتیکی که با کل فرآیندها سازگاری داشته باشد مشکل است [۳۹]. مراجع زیادی برای سینتیک رنگ مواد غذایی وجود دارد. بیشتر پژوهش‌ها مدل سینتیکی مرتبه صفر (معادله ۱۰) یا مرتبه یک (معادله ۱۱) را برای واکنش‌های سینتیکی گزارش کرده‌اند.

## ۲-۶- سینتیک تغییرات رنگ

پیچیدگی ترکیبات مواد غذایی باعث ایجاد محدوده وسیعی از واکنش‌های قهوه‌ای شدن آنزیمی و غیر آنزیمی در اثر حرارت دادن می‌شود. در نتیجه ارائه یک مکانیسم واکنشی برای توضیح

$$\frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-kt) \quad (4)$$

طرف چپ معادله نسبت رطوبت (MR) را که مشخص‌کننده فرآیند خشک‌کردن است نشان می‌دهد. علامت منفی  $k$  نشان دهنده کاهش محتوی رطوبتی با زمان است که در ابتدای خشک‌کردن بزرگ‌تر بوده و سپس به آهستگی کاهش پیدا می‌کند. هر قدر اثر کاهش  $k$  بیشتر باشد، طول مدت خشک‌کردن طولانی‌تری خواهد بود.

اگرچه نسبت رطوبت به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود، برای خشک‌کردن طولانی مدت  $M_e$  نسبت به  $M_0$  و  $M_t$  به قدری کوچک است که می‌توان از آن صرف‌نظر کرد؛ بنابراین ساده می‌شود. نرخ خشک‌کردن نیز از رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$Drying Rate = \frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \quad (5)$$

نسبت‌های رطوبتی به دست آمده طی آزمایش‌های مختلف به منظور بررسی و انتخاب مناسب‌ترین مدل برای سینتیک خشک‌کردن محصول با دوازده مدل از بین مدل‌های استاندارد ارائه شده در مقالات معتبر دنیا برازش شدند. محاسبه ضریب تبیین  $R^2$  بیشینه یکی از ساده‌ترین ملاک‌ها برای تعیین بهترین مدل است که علاوه بر آن، پارامترهای

$$TCD = \sqrt{(L_0 - L)^2 + (a_0 - a)^2 + (b_0 - b)^2} \quad (13)$$

در اینجا  $L_0$ ،  $a_0$  و  $b_0$  مقادیر مرجع یعنی پارامترهای رنگی نمونه اولیه هستند و  $L$ ،  $a$  و  $b$  مقادیر رنگ در زمان‌های مختلف حین خشک کردن هستند [۴۰].

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- سینتیک خشک کردن

با به دست آوردن نسبت رطوبت در دما و قدرتشک کردن، ضرایب، ثابت‌ها و شاخص‌های آماری برای میگوی خشک شده به روش کف پوشی محاسبه شد. مدل‌های رگرسیونی مختلف بر اساس مقادیر  $R^2$ ، SSE،  $\chi^2$  و RMSE ارزیابی شدند. جداول ۲ تا ۷ ضرایب مدل‌ها و دقت برازش مدل‌ها بر اساس متوسط شاخص‌های آماری را در تیمارهای مختلف نشان می‌دهند. نتایج نشان داد در تمام تیمارها مدل میدلیب افراسنجه‌های آماری بهتر، داده‌های واقعی را مناسب‌تر تفسیر می‌کند و در تیمارهایی که سایر مدل‌ها نیز شاخص آماری مناسب داشتند، نمودار آنها فرایند طبیعی خشک شدن را در مقایسه با داده‌های تجربی به خوبی نشان نمی‌دهد. در تیمارها سایر مدل‌هایی که از نظر شاخص‌های آماری شرایط بهتری داشتند انتخاب و نمودار آنها رسم شد و در نهایت مدلی که شاخص آماری قابل قبول داشت و فرایند طبیعی خشک شدن را بهتر نشان می‌داد؛ انتخاب شد.

$$C = C_0 \pm k_0 * t \quad (10)$$

$$C = C_0 * \exp(\pm k_1 * t) \quad (11)$$

در اینجا (+) و (-) به ترتیب تشکیل و تخریب پارامترهای کیفی را نشان می‌دهند.

از طرف دیگر گاهی اوقات مدل‌های نسبتاً ساده مانند معادلات (۱۰) و (۱۱) با تغییرات رنگ سازگار نیستند؛ بنابراین یک مدل سینتیکی مرکب با تکیه بر این الگو که واکنش‌های تغییر رنگ از دو مرحله تشکیل می‌شوند، توسعه داده شد. مرحله اول تشکیل یک ترکیب پلیمری رنگی که از سینتیک مرتبه صفر پیروی می‌کند و مرحله دوم که تجزیه پلیمرهای رنگی را به ترکیب فاقد رنگ پیشنهاد می‌کند و از سینتیک مرتبه اول پیروی می‌کند. طبق این مدل سینتیکی مرکب، تغییر رنگ می‌تواند به وسیله معادله ۱۲ بیان شود:

$$C = \frac{k_0}{k_1} - \left[ \frac{k_0}{k_1} - C_0 \right] * \exp(\pm k_1 * t) \quad (12)$$

که  $C$  و  $C_0$  به ترتیب پارامتر رنگ در زمان  $t$  و در غلظت اولیه هستند،  $k_0$  ثابت سینتیک مرتبه صفر و  $k_1$  ثابت سینتیک مرتبه اول هستند [۴۰].

یک مدل مفید دیگر، تغییرات رنگ کل (TCD) است که ترکیبی از مقادیر پارامترهای  $L$ ،  $a$  و  $b$  است. این پارامتر رنگی به طور وسیعی برای تشخیص تغییر رنگ مواد غذایی حین فرآیندهای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. TCD به وسیله معادله ۱۳ محاسبه می‌شود.

**Table 2** Results of the model fitting statistics and kinetics parameters of various thin layer drying models at 50°C drying temperature and 4 mm thickness

Name	Model equation	R <sup>2</sup>	SSE	χ <sup>2</sup>	RMSE
Newton	$MR = \exp(-0.022t)$	0.912	0.009404	0.009957	0.096976
Page	$MR = \exp(-0.001t^{1.777})$	0.990	0.002151	0.002278	0.046383
Modified Page	$MR = \exp((-0.022t)^1)$	0.912	0.009404	0.009957	0.096976
Henderson and Pabis	$MR = 1.121 \exp(-0.025t)$	0.932	0.007273	0.0077	0.085279
Logarithmic	$MR = 2.668 \exp(-0.006t) - 1.633$	0.985	0.001625	0.001721	0.04031
Two-term	$MR = 0.592 \exp(-0.025t) + 0.528 \exp(-0.025t)$	0.932	0.007273	0.007701	0.085282
Two term exponential	$MR = 0.121 \exp(-0.025t) + \exp(-0.025t)$	0.932	0.007273	0.0077	0.085279
Wang and Sing	$MR = 1 - 0.014t + 2.537E - 005t^2$	0.984	0.001934	0.002048	0.043982
Diffusion Approximation	$MR = -88.935 \exp(-0.002t) + (1 + 88.935) \exp(-1.071 * 0.002t)$	0.983	0.002222	0.002353	0.047142
Midilli	$MR = 0.955 \exp(-6.934E - 004t^{1.868}) + 4.654E - 4t$	0.994	0.00278	0.002944	0.052728
Weibull	$MR = \exp(-(\frac{t}{45.441})^{1.777})$	0.990	0.001071	0.001134	0.032728
Modified page equation 2	$MR = \exp(-0.009(\frac{t}{(1.805^2)})^{1.777})$	0.990	0.001122	0.001188	0.033496

**Table 3** Results of the model fitting statistics and kinetics parameters of various thin layer drying models at 50°C drying temperature and 8 mm thickness

Name	Model equation	R <sup>2</sup>	SSE	χ <sup>2</sup>	RMSE
Newton	$MR = \exp(-0.009t)$	0.861	0.013403	0.014148	0.115773
Page	$MR = \exp(-7.352E - 5t^{2.034})$	0.974	0.002488	0.002626	0.04988
Modified Page	$MR = \exp((-0.009t)^1)$	0.861	0.013403	0.014148	0.115773
Henderson and Pabis	$MR = 1.125 \exp(-0.01t)$	0.888	0.010649	0.01124	0.103192
Logarithmic	$MR = 4734.38 \exp(-1.309E - 6t) - 4733.324$	0.981	0.001834	0.001936	0.042829
Two-term	$MR = 0.594 \exp(-0.01t) + 0.531 \exp(-0.01t)$	0.888	0.010649	0.01124	0.103192
Two term exponential	$MR = 0.125 \exp(-0.01t) + \exp(-0.01t)$	0.888	0.010649	0.01124	0.103192
Wang and Sing	$MR = 1 - 0.004t - 1.415E - 005t^2$	0.991	0.000855	0.000902	0.029235
Diffusion Approximation	$MR = -8010.022 \exp(-4.195E - 7t) + (1 + 8010.022) \exp(-2.695 * 4.195E - 7t)$	0.972	0.002674	0.002822	0.051708
Midilli	$MR = 0.977 \exp(-1.691E - 005t^{2.113}) - 0.003t$	0.993	0.001382	0.001459	0.037174
Weibull	$MR = \exp(-(\frac{t}{107.639})^{2.034})$	0.974	0.002488	0.002626	0.049879
Modified page equation 2	$MR = \exp(-0.002(\frac{t}{(2.121^2)})^{2.034})$	0.974	0.006453	0.006811	0.08033

**Table 4** Results of the model fitting statistics and kinetics parameters of various thin layer drying models at 60°C drying temperature and 4 mm thickness

Name	Model equation	R <sup>2</sup>	SSE	χ <sup>2</sup>	RMSE
Newton	$MR = \exp(-0.037t)$	0.925	0.008596	0.009312	0.092713
Page	$MR = \exp(-0.003t^{1.718})$	0.986	0.002426	0.002628	0.04925
Modified Page	$MR = \exp((-0.037t)^1)$	0.925	0.008596	0.009312	0.092713
Henderson and Pabis	$MR = 1.104 \exp(-0.041t)$	0.939	0.007009	0.007593	0.083721
Logarithmic	$MR = 1.454 \exp(-0.022t) - 0.401$	0.966	0.003853	0.004174	0.062072
Two-term	$MR = 0.585 \exp(-0.041t) + 0.519 \exp(-0.041t)$	0.939	0.007009	0.007593	0.083721
Two term exponential	$MR = 0.104 \exp(-0.041t) + \exp(-0.041t)$	0.939	0.007009	0.007593	0.083721
Wang and Sing	$MR = 1 - 0.027t + 1.773E - 004t^2$	0.968	0.003732	0.004043	0.06109
Diffusion Approximation	$MR = \exp(-0.031t) + (1 - 1) \exp(-1 * 0.031t)$	0.893	0.01222	0.013239	0.110545
Midilli	$MR = 0.948 \exp(-0.001t^{2.083}) + 8.142E - 4t$	0.989	0.001279	0.001386	0.035762
Weibull	$MR = \exp(-(\frac{t}{27.472})^{1.718})$	0.986	0.001616	0.00175	0.040196
Modified page equation 2	$MR = \exp(-0.017(\frac{t}{(1.604^2)})^{1.718})$	0.986	0.001618	0.001753	0.040222

**Table 5** Results of the model fitting statistics and kinetics parameters of various thin layer drying models at 60°C drying temperature and 8 mm thickness

Name	Model equation	R <sup>2</sup>	SSE	χ <sup>2</sup>	RMSE
Newton	$MR = \exp(-0.012t)$	0.881	0.011753	0.012445	0.108413
Page	$MR = \exp(-2.344E - 4t^{1.930})$	0.985	0.001443	0.001527	0.03798
Modified Page	$MR = \exp((-0.012t)^1)$	0.881	0.011753	0.012445	0.108413
Henderson and Pabis	$MR = 1.129 \exp(-0.014t)$	0.909	0.008975	0.009503	0.094738
Logarithmic	$MR = 3676.78 \exp(-2.327E - 6t) - 3675.733$	0.989	0.001086	0.00115	0.032953
Two-term	$MR = 0.594 \exp(-0.014t) + 0.535 \exp(-0.014t)$	0.909	0.008975	0.009503	0.094738
Two term exponential	$MR = 0.129 \exp(-0.014t) + \exp(-0.014t)$	0.909	0.008975	0.009503	0.094738
Wang and Sing	$MR = 1 - 0.006t - 1.750E - 005t^2$	0.991	0.001527	0.001616	0.039071
Diffusion Approximation	$MR = -8388.356 \exp(-5.907E - 7t) + (1 + 8388.356) \exp(-2.610 * 5.907E - 7t)$	0.983	0.001692	0.001792	0.041139
Midilli	$MR = 0.983 \exp(-2.549E - 004t^{1.774}) - 0.002t$	0.994	0.000831	0.00088	0.028821
Weibull	$MR = \exp(-(\frac{t}{75.964})^{1.930})$	0.985	0.001442	0.001527	0.037979
Modified page equation 2	$MR = \exp(-0.004(\frac{t}{(2.024^2)})^{1.930})$	0.985	0.002337	0.002474	0.048339

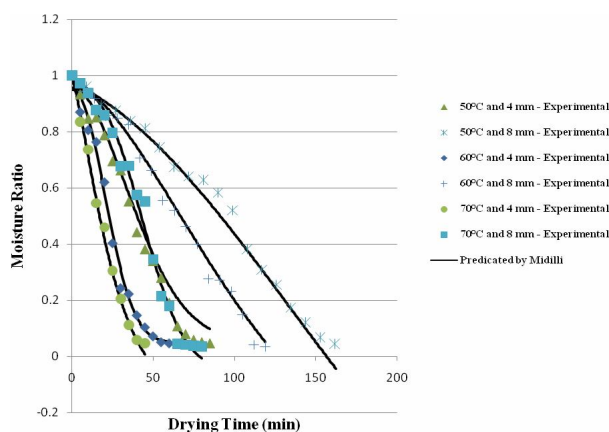
**Table 6** Results of the model fitting statistics and kinetics parameters of various thin layer drying models at 70°C drying temperature and 4 mm thickness

Name	Model equation	R <sup>2</sup>	SSE	χ <sup>2</sup>	RMSE
Newton	$MR = \exp(-0.047t)$	0.958	0.004385	0.004872	0.066218
Page	$MR = \exp(-0.011t^{1.461})$	0.993	0.000705	0.000784	0.026556
Modified Page	$MR = \exp((-0.047t)^1)$	0.958	0.004385	0.004872	0.066218
Henderson and Pabis	$MR = 1.067 \exp(-0.050t)$	0.965	0.003654	0.00406	0.060451
Logarithmic	$MR = 1.525 \exp(-0.024t) - 0.508$	0.993	0.000754	0.000838	0.02746
Two-term	$MR = 0.551 \exp(-0.050t) + 0.516 \exp(-0.050t)$	0.965	0.003654	0.00406	0.060451
Two term exponential	$MR = 0.067 \exp(-0.050t) + \exp(-0.050t)$	0.965	0.003654	0.00406	0.060451
Wang and Sing	$MR = 1 - 0.034t + 2.648E - 004t^2$	0.994	0.000611	0.000679	0.02472
Diffusion Approximation	$MR = -84.241 \exp(-0.013t) + (1 + 84.241) \exp(-1.021 * 0.013t)$	0.993	0.001144	0.001271	0.033822
Midilli	$MR = 0.985 \exp(-0.013t^{1.360}) - 0.002t$	0.996	0.000538	0.000598	0.023189
Weibull	$MR = \exp(-(\frac{t}{21.795})^{1.461})$	0.993	0.000701	0.000779	0.026481
Modified page equation 2	$MR = \exp(-0.033(\frac{t}{(1.457^2)})^{1.461})$	0.993	0.000707	0.000785	0.026581



**Table 7** Results of the model fitting statistics and kinetics parameters of various thin layer drying models at 70°C drying temperature and 8 mm thickness

Name	Model equation	R <sup>2</sup>	SSE	χ <sup>2</sup>	RMSE
Newton	$MR = \exp(-0.020t)$	0.823	0.022281	0.023674	0.14927
Page	$MR = \exp(-5.738E - 5t^{2.518})$	0.981	0.002339	0.002485	0.048366
Modified Page	$MR = \exp((-0.020t)^1)$	0.823	0.022281	0.023674	0.14927
Henderson and Pabis	$MR = 1.177 \exp(-0.024t)$	0.863	0.017222	0.018299	0.131233
Logarithmic	$MR = 4430.95 \exp(-3.211E - 6t) - 4429.862$	0.965	0.004418	0.004694	0.066466
Two-term	$MR = 0.635 \exp(-0.024t) + 0.542 \exp(-0.024t)$	0.863	0.017222	0.018299	0.131233
Two term exponential	$MR = 0.177 \exp(-0.024t) + \exp(-0.024t)$	0.863	0.017222	0.018299	0.131233
Wang and Sing	$MR = 1 - 0.009t - 6.055E - 005t^2$	0.964	0.004508	0.00479	0.067142
Diffusion Approximation	$MR = -8308.444 \exp(-1.648E - 6t) + (1 + 8308.444) \exp(-1.922 * 1.648E - 6t)$	0.948	0.006526	0.006934	0.080785
Midilli	$MR = 0.953 \exp(-2.02E - 5t^{2.746}) - 4.859E - 4t$	0.987	0.001667	0.001771	0.040824
Weibull	$MR = \exp(-t/48.368)^{2.517}$	0.981	0.002339	0.002485	0.048365
Modified page equation 2	$MR = \exp(-0.002(t/(2.083^2))^{2.517})$	0.981	0.00353	0.003751	0.059413

**Fig 1** Variation of the experimental and the predicted moisture ratio by the best fitting model with drying time at different temperature and 4 mm thickness

درباره سیر نزولی خشک کردن، سرعت خشک کردن در دماهای بالاتر و ضخامت کمتر برای نمونه‌های خشک شده بسیار بیشتر از تیمارهای دیگر است در نتیجه زمان مورد نیاز برای کاهش مقدار مساوی رطوبت کمتر از زمان لازم برای این کاهش در دماهای کمتر و ضخامت بیشتر است [۴۲]؛ که می‌توان علت آن را این طور بیان کرد که منحنی خشک کردن در مرحله خشک کردن نزولی شیب تندی به خود می‌گیرد که به دلیل سرعت زیاد خشک کردن در این مرحله است. در طول خشک کردن متداول با هوای گرم در ابتدا رطوبت از سطح جسم خارج شده و آب از داخل محصول

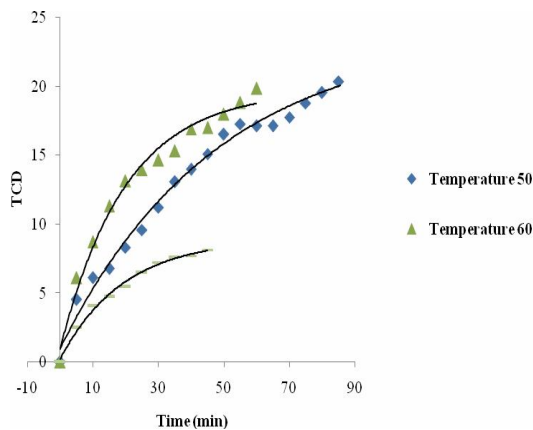
نسبت رطوبت ( $MR$ ) برای توصیف مدل‌های متفاوت خشک شدن ضروری می‌باشد. نسبت رطوبت با مدل‌های مختلف خشک کردن برازش شد و با توجه به پارامترهای آماری مشاهده می‌شود که در تمام دماها و توان‌های آزمایش شده از بین مدل‌های تجربی، مدل میدلی دارای بالاترین مقدار  $R^2$  و کمترین مقادیر  $SSE$ ،  $X^2$  و  $RMSE$  می‌باشد که با نتایج برخی از پژوهشگران مطابقت دارد. نتایج آماری به دست آمده برای خشک کردن کدوی سبز با استفاده از روش هوای داغ نشان می‌دهد که مدل میدلی دارای بالاترین  $R^2$  و کمترین  $X^2$  و  $RMSE$  می‌باشد [۴۱]. بر اساس ضرایب مدل‌های حاصل از مدل‌سازی، فرایند شبیه‌سازی از طریق برازش داده‌های آزمایشگاهی با مدل‌های حاصل انجام شد. نتایج حاصل شده بیانگر این مطالب است که مدل میدلی می‌تواند برای خشک شدن کف‌پوشی میگو در تیمارهای مورد استفاده بهترین گزینه باشد. نتایج مربوط در شکل ۱ آورده شده است.

در این شکل مشاهده می‌شود که مقادیر پیش‌بینی شده نزدیک به داده‌های آزمایشگاهی تغییر می‌کند که این امر مبین انطباق مناسب مقادیر پیش‌بینی شده با داده‌های آزمایشگاهی بوده و مدل میدلی برای بیان روند خشک کردن میگو مناسب است.

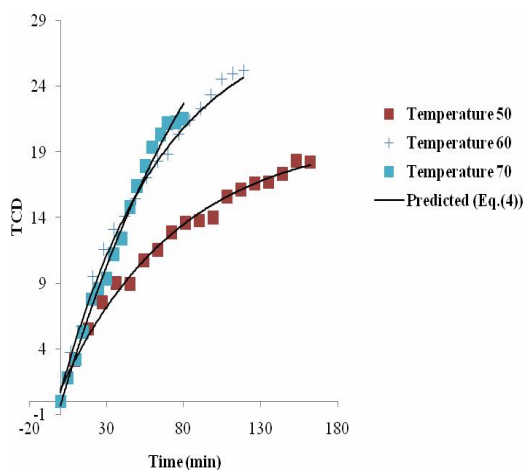
کاهش می‌یابد. نمونه‌ها، بیشتر رطوبت خود را در اوایل فرآیند خشک شدن از دست می‌دهند و در نتیجه زمان زیادی برای از دست دادن رطوبت باقی‌مانده لازم است [۴۵].

### ۳-۲- سینتیک تغییرات رنگ کل

پارامترهای  $L$ ،  $a$  و  $b$  هانتز برای محاسبه تغییرات کلی رنگ طی فرایند خشک کردن کف پوشی میگو مورد استفاده قرار گرفتند که تغییر زیادی در رنگ نمونه‌های خشک شده نسبت به رنگ اولیه مشاهده شد. مقادیر تغییرات کلی رنگ طی فرایندهای خشک کردن کف پوشی با زمان افزایش یافت (شکل ۲ و ۳). مقادیر تغییرات کلی رنگ در زمان نهایی به ترتیب برای دمای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ در ضخامت ۰/۴ برابر ۲۰/۳۷، ۱۹/۸۴ و ۸/۱۳ بود.



**Fig 2** Change in total colour difference value of foam mat dried of shrimp meat produced at various temperatures (Thickness 0.4).



**Fig 3** Change in total colour difference value of foam mat dried shrimp meat produced at various temperatures (Thickness 0.8).

توسط نفوذ به سطح متقل می‌شود و در خشک کردن فرآورده با ضخامت بیشتر، زمان بیشتری برای نفوذ رطوبت از داخل جسم به سطح مورد نیاز است. خشک کردن نمونه‌های موز در هر دو مرحله خشک کردن با هوای داغ و خشک کردن با ماکروویو مرحله آهنگ ثابت خشک کردن مشاهده نگردید و خشک کردن موز به طور کامل در مرحله آهنگ نزولی رخ داد؛ یعنی آهنگ خشک کردن موز به تدریج کاهش می‌یابد که علت آن چروکیدگی بافت موز و بروز پدیده سخت شدن سطحی برش‌های موز است که به دلیل ژلاتینه شدن سریع نشاسته روی سطح برش‌ها اتفاق می‌افتد که خود باعث کاهش آهنگ انتقال رطوبت در مراحل انتهایی فرآیند خشک کردن می‌شود [۴۳].

در مطالعه رهنما و همکاران [۴۴]، منحنی فرآیند خشک شدن براساس نسبت رطوبت در دماهای مختلف برای داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های حاصل از مدل میدلی و همکاران به عنوان بهترین مدل نشان داده شده است. داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های حاصل از مدل بسیار به هم نزدیک بوده به طوری که منحنی حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های حاصل از مدل روی یکدیگر منطبق شدند. در مطالعه دیگر، تحلیل رگرسیونی چند متغیره در محیط نرم افزار متلب انجام شد. بهترین مدلی که می‌توانست سینتیک خشک شدن توت سفید را توصیف کند با توجه به بیشترین مقدار  $R^2$  و کمترین مقادیر  $X^2$  و RMSE انتخاب شد. با مقایسه مقادیر  $R^2$ ،  $X^2$  و RMSE مشخص شد که مدل میدلی بهترین مدل بود که می‌توانست رفتار خشک شدن توت سفید را پیش‌بینی کند [۴۵].

در میان ۱۵ مدل لایه‌نازک برای پیشگویی رفتار خشک کردن ماکروویو انبه مدل میدلی نیمه تجربی برای بیان داده‌های آزمایشی یافت شد. این مدل برای پیشگویی محتوی رطوبت به عنوان کاربرد زمان خشک کردن در تمام قدرت‌های ماکروویو توانست [۴۶] و همچنین در خشک کردن نوعی ماست چکیده با هوای گرم مدل میدلی و همکاران را به عنوان مناسب‌ترین مدل گزارش کردند [۴۷].

با توجه به نتایج به دست آمده، نرخ از دست دادن رطوبت در دماهای بالاتر به مراتب بیشتر می‌باشد و با افزایش ضخامت میزان از دست دادن رطوبت کاهش پیدا می‌کند. در شروع روند خشک کردن، رطوبت اولیه کشک زیاد بوده و آهنگ از دست دادن رطوبت زیاد است. به تدریج گذشت زمان، میزان رطوبت محصول کاهش پیدا کرده و نرخ کاهش رطوبت به طور طبیعی

زمان با مدل‌های سینتیکی مرتبه صفر، مرتبه یک و مرکب و با استفاده از رگرسیون غیرخطی برازش شدند. ضرایب همبستگی و مقادیر اولیه پارامترها برای انتخاب یک مدل که به بهترین شکل داده‌های آزمایشگاهی را توصیف کند تخمین زده شدند. مقادیر پارامترهای تخمینی ناشی از برازش در جدول ۸ نشان داده شده‌اند.

همچنین مقادیر تغییرات کلی رنگ در زمان نهایی به ترتیب برای دمای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ در ضخامت ۰/۸ برابر ۱۸/۲۵، ۲۵/۲۵ و ۲۱/۵۰ بود. این نتایج مشخص می‌کنند هر چه زمان قرار گرفتن نمونه در معرض حرارت بیشتر باشد تغییرات رنگ بیشتری اتفاق می‌افتد. نتیجه چون نمونه‌های با ضخامت بیشتر دیرتر خشک شده‌اند لذا تغییرات رنگ کل در نمونه‌های با ضخامت ۰/۸ بیشتر بوده است. در این مطالعه تغییرات رنگ کلی با

**Table 8** Kinetics parameters of zero-order model (Eq. (10)), first-order model (Eq. (11)) and combined model (Eq. (12)) for TCD values

$C = C_0 \pm k_0 * t$					
Temperature	Thickness	$C_0 \pm SE$	$k_0 \pm SE$	$R^2$	
50	0.4	3.916±0.704	0.213±0.014	0.934	
	0.8	3.998±0.658	0.100±0.007	0.924	
60	0.4	5.264±1.120	0.270±0.032	0.869	
	0.8	4.295±0.815	0.198±0.012	0.947	
70	0.4	1.676±0.508	0.165±0.019	0.903	
	0.8	1.048±0.476	0.286±0.010	0.981	
$C = C_0 * \exp(\pm k_1 * t)$					
Temperature	Thickness	$C_0 \pm SE$	$k_1 \pm SE$	$R^2$	
50	0.4	6.562±0.787	0.015±0.002	0.836	
	0.8	6.283±0.710	0.007±9.326E-004	0.828	
60	0.4	7.451±1.111	0.018±0.003	0.772	
	0.8	7.843±0.957	0.011±0.001	0.848	
70	0.4	2.790±0.548	0.027±0.006	0.790	
	0.8	5.002±0.732	0.020±0.002	0.885	
$C = \frac{k_0}{k_1} - \left[ \frac{k_0}{k_1} - C_0 \right] * \exp(\pm k_1 * t)$					
Temperature	Thickness	$C_0 \pm SE$	$k_0 \pm SE$	$k_1 \pm SE$	$R^2$
50	0.4	0.982±0.494	-0.501±0.037	-0.021±0.003	0.988
	0.8	0.895±0.399	-0.265±0.016	-0.013±0.001	0.990
60	0.4	0.951±0.687	-0.985±0.090	-0.050±0.006	0.983
	0.8	0.664±0.403	-0.443±0.020	-0.015±0.001	0.995
70	0.4	0.208±0.227	-0.464±0.035	-0.052±0.006	0.993
	0.8	-0.328±0.491	-0.401±0.030	-0.009±0.002	0.992

SE: Standard error of estimation,  $R^2$ : Coefficient of determination

را به خوبی تشریح می‌کند؛ بنابراین فقط نمودارهای مربوط به مدل مختلط در شکل‌های ۲ و ۳ نمایش داده شده‌اند. با مقایسه هر دو ثابت در مدل مختلط (جدول ۷) مشاهده می‌شود که مقدار  $k_0$  به طور قابل ملاحظه‌ای بزرگ‌تر از  $k_1$  است که فرض وجود دو مرحله (تشکیل رنگ و تخریب رنگ‌دانه) در مدل مختلط وجود دارد. این مشخص می‌کند که سرعت تشکیل رنگ در همه فرایندها بزرگ‌تر از سرعت تخریب و نابودی رنگ‌دانه است. این نتایج با گزارش موجود Garza و همکاران [۴۸] سازگار بود.

در زمینه روند پارامترهای رنگ در فرایند خشک کردن، ثابت سینتیکی مدل مرتبه صفر ( $k_0$ ) در تمام موارد به لحاظ عددی بزرگ‌تر از ثابت سینتیکی مدل مرتبه ۱ ( $k_1$ ) بود. این مسئله با نتایج Garza و همکاران [۴۸] و Maskan [۴۹] سازگار نیست. آنالیز رگرسیون مشخص کرد که مدل مختلط سینتیکی توصیف بهتری برای داده‌های آزمایشگاهی در مورد پارامترهای تغییرات رنگ کل نسبت به مدل‌های سینتیکی مرتبه صفر و مرتبه یک ارائه می‌کند و این ناشی از ضریب همبستگی خوب و مقدار منطقی  $C_0$  به دست آمده است (جدول ۷). می‌توان مشاهده کرد که مدل سینتیکی مختلط مقادیر تغییرات کلی رنگ

## ۴- نتیجه گیری

نتایج مربوط به نسبت رطوبت محصول نشان‌دهنده افزایش یافتن تغییرات کاهشی محتوی رطوبتی و کاهش یافتن زمان خشک شدن با افزایش دما و کاهش ضخامت است. برای نمونه‌های میگوی خشک‌شده با روش کف‌پوشی، مدل میدلی بهترین مدل برای تمام حالت‌های مورد آزمایش بود. انتخاب این مدل به دلیل مقادیر بالای  $R^2$  و مقادیر پایین  $SSE$ ،  $X^2$  و  $RMSE$  در تمام شرایط آزمایش بود. در زمینه سینتیکی تغییرات رنگ، همانگونه که مشاهده شد ضریب تعیین در مدل مرکب سینتیکی برای هر سه دمای مورد استفاده با ضخامت‌های مختلف از مدل‌های دیگر بالاتر است و لذا مدل مرکب سینتیکی بهتر از مدل‌های سینتیکی مرتبه صفر و مرتبه یک، پارامترهای رنگ آزمایشگاهی را تشریح می‌کند. این مدل بیان می‌کند که تشکیل رنگ و نابودی رنگ‌دانه در حین فرایندهای خشک‌کردن میگو به روش کف‌پوشی اتفاق می‌افتد. این نتایج را می‌توان برای پیش‌بینی تغییر شرایط ماده غذایی در حین فرآوری استفاده کرد و همچنین می‌توان به عنوان یک ابزار کنترل کیفیت برای نظارت بر فرآوری استفاده کرد. مطابق نتایج به دست آمده، خشک کردن کف‌پوشی می‌تواند به طور موفقیت‌آمیزی برای تهیه پودر میگوی خشک شده بکارگرفته شود.

## ۵- منابع

- [5] Bragadottir, M., Reynisson, E., Þórarinsdóttir, K.A. and Arason, S., 2007. Stability of fish powder made from saithe (*Pollachius virens*) as measured by lipid oxidation and functional properties. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 16(1), pp.115-136.
- [6] Behnia, A., Karazhiyan, H., Niazmand, R., Mohammadi Nafchi, A. 2014. Effect of Cress seed gum on rheological and textural properties of low-fat yoghurt, *Journal of Research and Innovation in Food Science and Technology*, 3(3), pp. 255-266.
- [7] Onwude, D.I., Hashim, N., Janius, R.B., Nawi, N.M. and Abdan, K., 2016. Modeling the thin - layer drying of fruits and vegetables: A review. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 15(3), pp.599-618.
- [8] Doymaz, I. and Pala, M., 2003. The thin-layer drying characteristics of corn. *Journal of Food Engineering*, 60(2), pp.125-130.
- [9] Babalis, S.J. and Belessiotis, V.G., 2004. Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. *Journal of Food Engineering*, 65(3), pp.449-458.
- [10] Menges, H. O., & Ertekin, C. 2006. Mathematical modeling of thin layer drying of golden apples. *Journal of Food Engineering*, 77, 119–125.
- [11] Aghbashlo, M., Kianmerhr, H., & Samimi-Akhijahani, H. 2008. Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and consumption during the thin-layer drying of berberis fruit (*Berberidaceae*). *Energy Conversion and Management*, 49, 2865–2871.
- [12] Doymaz, I., & Ismail, O. 2011. Drying characteristics of sweet cherry. *Food and Bioproducts Processing*, 89, 31–38.
- [13] Singh, N. J., & Pandey, K. R. 2012. Convective air drying characteristics of sweet potato cube (*Ipomoea batatas* L.). *Food and Bioproducts Processing*, 90, 317–322.
- [14] Vásquez-Parra, J. E., Ochoa-Martinez, C. I., & Bustos-Parra, M. 2013. Effect of chemical and physical pretreatments on the convective drying of cape gooseberry fruits (*Physalis peruviana*). *Journal of Food Engineering*, 119, 648–654.
- [15] Zhu, A., & Shen, X. 2014. The model and mass transfer characteristics of convection
- [1] Alinejad, M., Motamedzadegan, A., Rezaei, M. 2016. Functional properties and antioxidant activities of protein hydrolysates from whitecheek shark (*Carcharhinus dussumieri*) meat. *Food Science and Technology*. 13(50): 159-169.
- [2] Azizpour, M. 2012. Optimization of Shrimp (*Penaeus indicus*) Powder Production Conditions by using Foam mat Drying Technique. M.Sc. Thesis. Ferdowsi University of Mashhad.
- [3] Hardy, Z. and Jideani, V.A., 2017. Foam-mat drying technology: a review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 57(12), pp.2560-2572.
- [4] Alakali, J.S., Kucha, E.I. and Ariahu, C.C., 2010. Drying characteristics of osmo-foam-mat mango pulp. *Journal of Agriculture, Biotechnology and Ecology*, 3(1), pp.87-98.

- [25] Farajzadeh, F., Motamedzadegan, A., Shahidi, S.A. and Hamzeh, S., 2016. The effect of chitosan-gelatin coating on the quality of shrimp (*Litopenaeus vannamei*) under refrigerated condition. *Food Control*, 67, pp.163-170.
- [26] Aral, S. and Beşe, A.V., 2016. Convective drying of hawthorn fruit (*Crataegus* spp.): effect of experimental parameters on drying kinetics, color, shrinkage, and rehydration capacity. *Food chemistry*, 210, pp.577-584.
- [27] Yaldiz, O., Ertekin, C., and Uzun, H. I. 2001. Mathematical modeling of thin layer drying of sultana grapes. *Energy*, 26: 457-465.
- [28] Kingsly, A.R.P. and Singh, D.B., 2007. Drying kinetics of pomegranate arils. *Journal of Food Engineering*, 79(2), pp.741-744.
- [29] Özdemir, M. and Devres, Y.O., 1999. The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. *Journal of Food Engineering*, 42(4), pp.225-233.
- [30] Zhang, Q. and Litchfield, J.B., 1991. An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer. *Drying Technology*, 9(2), pp.383-395.
- [31] Doymaz, İ. 2008. Convective drying kinetics of strawberry. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 47(5), pp.914-919.
- [32] Lahsasni, S., Kouhila, M., Mahrouz, M. and Jaouhari, J.T., 2004. Drying kinetics of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*). *Journal of Food Engineering*, 61(2), pp.173-179.
- [33] Sharaf-Elden, Y. I., Blaisdell, J. L., & Hamdy, M. Y. (1980). A model for ear corn drying. *Transactions of the ASAE*, 23(5), 1261– 1265, 1271.
- [34] Wang, C.Y. and Singh, R.P., 1978. *A single layer drying equation for rough rice* (No. 78-3001, p. 33). ASAE paper.
- [35] Kassem, A.S., 1998. Comparative studies on thin layer drying models for wheat. In *Proceedings of the 13th International Congress on Agricultural Engineering* (Vol. 6, pp. 2-6).
- [36] Doymaz, I. 2007. Air-drying characteristics of tomatoes. *Journal of Food Engineering*, 78(4), pp.1291-1297.
- [37] Doymaz, I. 2012. Drying of Pomegranate Seeds Using Infrared Radiation. *Food Science and Biotechnology*. 21: 1269-1275.
- [38] Toğrul, İ.T. and Pehlivan, D., 2004. Modelling of thin layer drying kinetics of drying of peach slices. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 72, 347–351.
- [16] Seremet, L., Botez, E., Nistor, O., Andronoium, D. G., & Mocanu, G. 2016. Effect of different drying methods on moisture ratio and rehydration of pumpkin slices. *Food Chemistry*, 195, 104–109.
- [17] Bahmani, A., Jafari, S. M., Shahidi, S.-A. and Dehnad, D. 2016. Mass Transfer Kinetics of Eggplant during Osmotic Dehydration by Neural Networks. *Journal of Food Processing and Preservation*, 40: 815–827.
- [18] Naghizadeh Raesi, S., Ghorbani Hasan-Saraei, A., Maghsoudlou, D. 2017, Thin layer drying of plum fruit using hot air and microwave: Effect of experimental parameters on drying kinetics, *Food processing and production*, Vol. 7, No. 3: 23-36 (in Persian).
- [19] Posomboon, W. 1998. Processing effect on quality of dried shrimp. M. Eng. Thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
- [20] Niamnuy, C., Devahastin, S. and Soponronnarit, S., 2007. Quality changes of shrimp during boiling in salt solution. *Journal of food science*, 72(5), pp.S289-S297.
- [21] Koocheki, A., Mortazavi, S.A., Shahidi, F., RAZAVI, S.M., Kadkhodae, R. and Milani, J.M., 2010. Optimization of mucilage extraction from Qodume shirazi seed (*Alyssum homolocarpum*) using response surface methodology. *Journal of Food Process Engineering*, 33(5), pp.861-882.
- [22] Bostan, A., Razavi, S.M. and Farhoosh, R., 2010. Optimization of hydrocolloid extraction from wild sage seed (*Salvia macrosiphon*) using response surface. *International Journal of Food Properties*, 13(6), pp.1380-1392.
- [23] Karazhiyan, H., Razavi, S.M. and Phillips, G.O., 2011. Extraction optimization of a hydrocolloid extract from cress seed (*Lepidium sativum*) using response surface methodology. *Food Hydrocolloids*, 25(5), pp.915-920.
- [24] Razi, S.M., Motamedzadegan, A., Shahidi, A. and Rashidinejad, A., 2018. The effect of basil seed gum (BSG) on the rheological and physicochemical properties of heat-induced egg albumin gels. *Food Hydrocolloids*, 82, pp.268-277.

- [44] Rahnama, M., KhoshTaghaza, M.H., Ghbadian, B. 2011. Adsorption and desorption equilibrium moisture content and isosteric heat of estamaran date. *Food Science and Technology*. 8 (28): 19-30.
- [45] Khafajeh, H., Banakar, A., Zarein, M., Khoshtaghaza, M. 2014. Investigation of mulberry drying kinetics and moisture Diffusivity under microwave oven. *Food Science and Technology*. 11(45): 143-150.
- [46] Murthy, K., Pandurangapp, T. and Manohar, B., 2012. Microwave drying of mango ginger (*Curcuma amada* Roxb): prediction of drying kinetics by mathematical modelling and artificial neural network. *International journal of food science & technology*, 47(6): 1229-1236.
- [47] Ghaderi, A., Abbasi, S., Hamidi, Z. 2012. Selecting a mathematical model for drying kinetics of yoghurt in a microwave-vacuum dryer, *Journal of Research and Innovation in Food Science and Technology*, 1(2): 139-152.
- [48] Garza, S., Ibarz, A., Pagan, J. and Giner, J., 1999. Non-enzymatic browning in peach puree during heating. *Food research international*, 32(5), pp.335-343.
- [49] Maskan, M., 2001. Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of food engineering*, 48(2), pp.169-175.
- some fruits under open-air sun drying process. *Journal of Food Engineering*, 65(3), pp.413-425.
- [39] Ibarz, A., Pagan, J. and Garza, S., 1999. Kinetic models for colour changes in pear puree during heating at relatively high temperatures. *Journal of Food Engineering*, 39(4), pp.415-422.
- [40] Ghorbani Hasan-Saraei, A., Shahidi, S.-A. Mohebbi, M. and Maaziyan, R. 2016. Modelling Kinetics of Thermal Colour Degradation in Production of Beetroot Juice Concentrate by Various Heating Methods. *Journal of Food Technology and Nutrition*, Volume 13, Issue 2, Page 87-98 (in Persian).
- [41] Meshkani, S. M., PourFalah, Z., Tavakolipour, H., Mohammadi, M., Nahardani, M. 2012. Investigation of thin-layer drying kinetics of zucchini with hot-air convection process. *Innovation in food science and technology*. 4(3): 75-82.
- [42] Dehbooreh, R., & Esmaili, M. 2010. Evaluation of Microwave and Convective Finish Drying Parameters and Drying Effects on Color of Dried Grapes. *Iranian Food Science And Technology Research Journal*, 5(2): 108-122.
- [43] Zirjani I., Tavakolipour, H. 2010. The effect of different pretreatments in drying process of banana using microwave. *Innovation in food science and technology*. 2(1): 53-66.

## Experimental study on foam mat drying of shrimp meat and evaluation of thin-layer drying models

Hamzeh, Sh. <sup>1</sup>, Motamedzadegan, A. <sup>2</sup>, Shahidi, S. A. <sup>3\*</sup>, Ahmadi, M. <sup>4</sup>,  
Regenstein, J. M. <sup>5</sup>

1. Ph.D. Student, Department of Food Hygiene, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran
2. Department of Food Science, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Mazandaran, Iran
3. Department of Food Science and Technology, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran
4. Department of Food Hygiene, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran
5. Department of Food Science, Cornell University, Ithaca, NY, USA

(Received: 2018/10/13 Accepted:2019/01/21)

The foam mat drying is a process in which liquid food is converted into stable foam by combining gas into it, then dried at a relatively low temperature. The effect of drying temperature (50, 60 and 70 °C) and thickness (4 and 8 mm) on foam mat drying kinetics of shrimp under hot-air drying was investigated. The drying curves obtained were processed for drying rates to find the most convenient model among the 12 different expressions proposed by earlier authors. In addition, the various statistical parameters such as:  $R^2$ , reduced chi-square, SSE and root mean square error (RMSE) were used to determine the quality of the fit. The colour change during concentration processes was investigated. Total colour differences parameter was used to estimate the extent of colour loss. The zero-order, first-order and a combined kinetics model were applied to the changes in colour parameters. Based on the results, Midilli model was found to be the best model fitted to the experimental hot air drying data at all temperature levels. These models exhibited the highest value of  $R^2$  and the least RMSE,  $\chi^2$  and SSE comparing to the other models. Results indicated that variation in TCD followed combined kinetics model. This model implied that the colour formation and pigment destruction occurred during foam mat drying process of shrimp.

**Keywords:** Color, Foam mat drying, Kinetics, Shrimp.

---

\* Corresponding Author E-Mail Address; sashahidy@yahoo.com