



## آنالیز انتقال حرارت و جرم طی فرآیند سرخ کردن هوای داغ و سرخ کردن عمیق میگو

بهاره معروف پور<sup>۱</sup>، امان محمد ضیائی فر<sup>۲\*</sup>، محمد قربانی<sup>۳</sup>، حسن صباغی<sup>۴</sup>، سعید یلقی<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

<sup>۲\*</sup> استاد گروه مهندسی صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

<sup>۳</sup> استاد گروه شیمی مواد غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

<sup>۴</sup> استادیار گروه علوم و مهندسی مواد غذایی، دانشکده کشاورزی و دامپروری، مجتمع آموزش عالی تربت جام، خراسان رضوی، ایران

<sup>۵</sup> استادیار گروه شیلات، مرکز تحقیقات شیلات استان گلستان، گرگان، ایران

### چکیده

### اطلاعات مقاله

در این پژوهش پدیده‌های انتقال طی سرخ کردن با هوای داغ و سرخ کردن عمیق بررسی شد. عملیات سرخ کردن با هوای داغ (HAF) و سرخ کردن عمیق (DFF) در دمای °C ۱۶۰ به مدت ۱۵ دقیقه برای قطعات استوانه‌ای میگو انجام گرفت. تغییرات دمای مرکزی محصول طی سرخ کردن با استفاده از ترموکوپل نوع T متصل به دستگاه ثبت داده در رایانه ثبت گردید. محتوی رطوبت و روغن نمونه‌ها در هر زمان از فرایند اندازه‌گیری شد. پارامترهای انتقال حرارت و جرم با استفاده از نمودارهای نسبت‌های دمایی و غلظت بدون بعد و معادلات تجربی برآورد شد. نتایج نشان داد که پارامترهای انتقال جرم و حرارت طی سرخ کردن با هوای داغ کمتر از روش سرخ کردن عمیق هستند. در سرخ کردن عمیق عدد بایوت و ضریب نفوذ موثر بالاتر از روش سرخ کردن هوای داغ بود. ثابت سینتیکی کاهش رطوبت در محصول در روش سرخ کردن عمیق بیشتر بود.

### تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۹/۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۲/۲۳

### کلمات کلیدی:

میگو،

سرخ کردن هوای داغ،

انتقال جرم،

انتقال حرارت

DOI: 10.22034/FSCT.22.161.86.

\* مسئول مکاتبات:

ziaiifar@gau.ac.ir

## ۱-مقدمه

میگو به همراه ماهی قزل آلا<sup>۱</sup> مهم ترین محصولات تجاری ماهی در دنیا هستند. غذاهای دریایی<sup>۲</sup> مانند میگو، رژیم غذایی اصلی در بسیاری از کشورها هستند و در حال حاضر تقاضا برای این محصولات به عنوان منبع عالی اسیدهای چرب چند غیر اشباع<sup>۳</sup> تحت عنوان امگا<sup>۴</sup> و سایر اسیدهای چرب در حال افزایش است. سرانه مصرف سالیانه میگو در ایالات متحده به طور مداوم در حال افزایش است. صنعت میگو در کشورهای اقیانوس اطلس جنوبی و حوزه خلیج بسیار اهمیت دارد و از مهمترین گونه ها برای تولید غذاهای دریایی است [۱]. میگوها متعلق به خانواده خرچنگ<sup>۵</sup> هستند و از مهم ترین غذاهای دریایی از نظر اقتصادی در سراسر جهان در نظر گرفته می شوند. از نظر تغذیه ای پروتئین میگو زیست دسترسی<sup>۶</sup> بالایی دارد، زیرا به راحتی نسبت به پروتئین های منابع مختلف هضم<sup>۷</sup> می شود [۲]. میگو منبع غنی از ویتامین ب-۱۲، سلنیوم، اسیدهای چرب غیر اشباع امگا-۳ و استاکسانتین است که مشخص شده است که حمایت آنتی اکسیدانی برای سیستم عصبی<sup>۸</sup> و سیستم اسکلتی عضلانی<sup>۹</sup> فراهم می نمایند. به علاوه، برخی مطالعات نشان داده است که موجب کاهش خطر احتمال ابتلا به سرطان روده<sup>۱۰</sup> با جذب آستاکسانتین و کاهش احتمال خطر برخی مشکلات مرتبط با دیابت می گردد [۳].

میگو معمولاً به شکل منجمد یا آبزدایی شده ذخیره می گردد [۴]. میگو با روش های مختلفی مانند بخاردهی و جوشاندن نیز فرآوری می شود و راندمان فرآوری و کیفیت نهایی آن بستگی به نوع و شرایط فرآیند دارد [۵]. انواع روش های پخت ماهی و میگو به صورت کبابی<sup>۱۱</sup>، پروارنده<sup>۱۲</sup>، سرخ شده و پخته شده از نظر تاثیر بر ترکیبات فلزات

سنگین و مواد معدنی بررسی شده است. مشخص شده است که تغییر در روش های پخت بهترین راه حل برای کاهش فلزات سنگین خطرناک و افزایش جذب مواد مغذی مفید است [۶]. میگوها منابع کاروتنوئیدها - ایزوپرنوئیدها<sup>۱۳</sup> هستند. پخت میگو موجب کاهش تعداد میکروارگانیسم ها، تغییرات خصوصیات کیفی، تاثیر بر خواص حسی، فیزیکی، حرارتی و بافت (محتوی رطوبت، دانسیته، هدایت حرارتی، تغییرات حجم، چروکیدگی و غیره) و باعث افت بازدهی تولید (به عنوان یک عامل اقتصادی مهم ناشی از تغییرات در محتوی رطوبت) می گردد. در واقع طی فرآوری حرارتی، پروتئین های میگو دچار دناتوراسیون می شوند و توانایی نگهداری آب خود را از دست می دهند که این امر می تواند موجب کاهش بازدهی تولید و تغییرات ابعادی شود. کاهش بار میکروبی و افت بازدهی تولید دو معیار مهم در به کارگیری برنامه ریزی مناسب پخت برای میگو است. زمان های پخت کوتاه و دماهای بالا محصول بهتری را از نظر ایمنی و سرعت بازدهی تولید و خواص حسی فراهم می نماید. پیش بینی کشندگی برای میکروارگانیسم ها و افت بازدهی تولید در ترکیب های دما-زمان مختلف، اطلاعات مناسبی را جهت یک رویکرد آگاهانه در رابطه با بهینه سازی فرآیند پخت ایجاد می کند. این تغییرات با تاریخچه دمایی محصول و توزیع دمایی آن مرتبط هستند. تمام این موارد ممکن است با استفاده از مدل های ریاضی توسعه یافته برای کمک به صنعت در بهینه سازی فرآوری حرارتی میگو و افزایش کیفیت، تخمین زده شوند و ساده سازی گردند [۷].

- 8- Nervous system
- 9 -Musculoskeletal system
- 10 -Colon cancer
- 11 -Grilled
- 12- Curried
- 13- Carotenoids-isoprenoids

- 1- Salmon
- 2- Seafood
- 3- Polyunsaturated fatty acids
- 4- Omega
- 5- Crustacean
- 6 -Bioavailability
- 7 -Digestibility

به دلیل اهمیت کنترل جذب روغن در محصولات سرخ‌شده، استراتژی‌های زیادی مانند فشار پایین [۸]، حرارت‌دهی ماکروویو [۹]، حرارت‌دهی هوای داغ یا پیش تیمارهای مختلف مانند بلانچینگ، پوشش‌دهی، انجماد [۱۰] یا پیش خشک‌کردن [۱۱] با هدف کاهش مقدار جذب روغن، کاهش مدت زمان فرایند، طولانی‌شدن ماندگاری ماده اولیه و آماده‌سازی فراوده برای عرضه به صنایع غذایی، رستوران‌ها یا منازل پیشنهاد شده است. اصلاحات فرآیند می‌توانند تا حد زیادی از خطرات تهدید کننده سلامت و افت کیفیت محصول نهایی پیشگیری کند. در سال‌های اخیر سرخ‌کردن با هوای داغ<sup>۱۴</sup> به عنوان یک فرآیند جایگزین سرخ‌کردن عمیق<sup>۱۵</sup> معرفی شده است. تجهیزات سرخ‌کردن با هوای داغ در بازار موجود و در حال تکامل است [۱۲]. در این روش، محصول با قطرات روغن پخش شده در هوای داغ در تماس مستقیم قرار می‌گیرد و از این طریق، محصول آب‌زدایی شده و پوسته به تدریج روی محصول سرخ شده ظاهر می‌گردد [۱۳]. افزودن روغن می‌تواند قبل یا طی فرایند با پوشش اندک روی سطح ماده غذایی با هدف ایجاد طعم، بافت و ظاهر مطلوب محصولات سرخ‌شده انجام گیرد [۱۴]. سرخ‌کن‌های با هوای داغ، انتقال حرارتی یکنواخت بین هوا و محصول در حال سرخ‌شدن را فراهم می‌کنند [۱۵] که در نتیجه تغییرات کیفی در سراسر محصول به صورت یکنواخت صورت می‌گیرد [۱۴]. در سرخ‌کردن با هوای داغ در نهایت ماده غذایی سرخ‌شده با مقدار روغن بسیار پایین و سطح رطوبتی مشابه با سرخ‌کردن عمیق بدست می‌آید [۱۳]. در روش سرخ‌کردن با هوای داغ محصول از تمامی جهات در یک زمان حرارت داده می‌شود و در بیشتر موارد نیاز به افزودن روغن نیست [۱۲]. محصول سرخ شده توسط هوای داغ، ۸۰٪ روغن کمتری در مقایسه با سرخ‌کردن عمیق دارد [۱۶] و ذخیره ۷۰٪ انرژی و کاهش انتشار پساب‌های ناشی از سرخ‌کردن را به دنبال دارد [۱۷].

14 - Hot air frying

بنابراین، در مجموع سرخ‌کن‌های هوای داغ به عنوان یک تکنولوژی فرآوری گرمایشی جایگزین برای سرخ‌کردن مواد غذایی و یک روش پخت سالم‌تر در نظر گرفته می‌شوند و بایستی از جنبه‌های حسی محصول نیز تحقیق گردد [۱۸]. مطالعه مقایسه روش سرخ‌کردن عمیق و هوای داغ در رابطه با محصولات مختلف اهمیت دارد؛ زیرا پذیرش فرایند سرخ‌کردن با هوای داغ به خواص ارگانولپتیکی محصول نهایی (ظاهر، تردی، طعم، طعم دهانی چرب، رنگ، آروما و پذیرش کلی) و شباهت کیفی آن به فرایند سرخ‌کردن عمیق بستگی دارد [۱۵]. مصرف‌کنندگان به محتوی چربی بسیار توجه دارند و محتوی بالای چربی پذیرش محصول را کاهش می‌دهد [۱۹]. پارامترهای کیفی عمده موثر بر پذیرش محصولات سرخ‌شده شامل محتوی روغن و بافت است. بافت و محتوی چربی تحت تاثیر فرآوردهایی مانند بلانچینگ، خشک‌کردن با هوای داغ، پیش تیمارهای اسمزی، پوشش‌دهی (هیدروکلوئیدها و مشتقات نشاسته) و شرایط فرایند سرخ‌کردن (دما، زمان) قرار می‌گیرد. با وجود اهمیت کنترل فرایند سرخ‌کردن و بهبود کیفیت محصول میگو، فرآوری این محصول دریایی با روش سرخ‌کردن به میزان خیلی کمی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است و تاکنون در زمینه فرآوری میگو با روش سرخ‌کردن هوای داغ و مقایسه آن با روش سرخ‌کردن عمیق پژوهشی انجام نشده است. همچنین مطالعات انتقال حرارت و جرم، خواص فیزیکی و شیمیایی و مدل‌سازی‌های غیر خطی در رابطه با محصول میگو و فرایند سرخ‌کردن به روش هوای داغ کمتر مورد توجه قرار گرفته است یا تاکنون بررسی نشده است. با توجه به نقش مهم فرآوردهای غذایی در سلامت محصول نهایی، افزایش آگاهی در مورد جزئیات فرآیندی مانند سرخ کردن عمیق و سرخ‌کردن با هوای داغ موجب بهبود کنترل شرایط این فرآیند و در نتیجه کاهش مضرات ناشی از تجزیه ترکیبات مختلف بر سلامتی انسان در اثر مصرف میگو می‌شود. در تکنولوژی نوین به صورت سرخ‌کردن با هوای داغ، در نهایت ماده غذایی

15- Deep fat frying

سرخ شده با مقدار روغن بسیار پایین و سطح رطوبتی مشابه با سرخ کردن عمیق بدست می آید. در این پژوهش پدیده های انتقال، تغییرات کیفی میگو و ارزیابی حسی آن طی سرخ کردن با هوای داغ بررسی شد.

## ۲- مواد و روش ها

### ۲-۱- آماده سازی میگو

میگوهای تازه و هم اندازه (میگوی پاسفید<sup>۱۶</sup>) از پرورش میگوی گرگان در شمال ایران (شهرک صنعتی بندر ترکمن، شرکت شیل آبری گلستان) خریداری شدند و در کیسه هایی از جنس پلی اتیلن در داخل فریزر در دمای انجماد قرار گرفتند. جهت آماده سازی نمونه ها، میگوها در دمای اتاق به مدت ۱۰ دقیقه قرار گرفتند. میگوها ابتدا شسته شدند و به صورت قطعاتی تقریباً استوانه ای با قطر برابر با ۹ میلی متر و ارتفاع ۱۵ میلی متر جداسازی و آماده شدند.

### ۲-۲- عملیات سرخ کردن میگو

عملیات سرخ کردن میگو با دو روش سرخ کردن هوای داغ (HAF) و سرخ کردن عمیق (DFF) انجام گرفت:

#### ۲-۲-۱- عملیات سرخ کردن با هوای داغ

عملیات سرخ کردن با هوای داغ برای میگو پس از توزین اولیه و ثبت وزن آن توسط ترازوی آزمایشگاهی با دقت ۰/۰۰۰۱ (Sartorius GCA803S)، با پاشش ۰/۰۱ گرم روغن روی قطعات میگو در دمای ۱۶۰ درجه سانتی گراد در یک سرخ کن هوای داغ (Geepas-Gaf2708) طی مدت ۱۵ دقیقه انجام گرفت. ماکزیمم سرعت هوای داغ برابر با ۶/۵ متر بر ثانیه بود که با دستگاه بادسنج (hot wire anemometer TES 1341) اندازه گیری شد.

نمونه ها با فاصله زمانی سه دقیقه از سرخ کن خارج شدند. پس از اتمام فرآیند سرخ کردن، نمونه حدود ۲ دقیقه روی کاغذ جاذب قرار گرفت تا روغن سطحی آن خارج شود. سپس میگوی سرخ شده توزین شد و برای اندازه گیری رطوبت آن گذاری شد. با هدف فراهم سازی شرایط معین در بررسی فرآیند، ترکیب شیمیایی و مقطع عرضی برای هر میگو یکسان فرض شد.

### ۲-۲-۲- عملیات سرخ کردن عمیق

مطابق مویانو و پدرسچی (۲۰۰۶)، پس از توزین میگو و ثبت وزن اولیه آن، فرآیند سرخ کردن عمیق در یک سرخ کن (Moulinex Olea Plus) حاوی یک لیتر روغن آفتابگردان اوپلا و مجهز شده به کنترل کننده دما دارای ترموکوپل نوع K در دمای ۱۶۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱۵ دقیقه انجام شد [۱۰]. فاصله زمانی میزان حرارت دهی نمونه ها در این روش ۱، ۲، ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ دقیقه بود.

### ۲-۳- تجزیه و تحلیل انتقال جرم طی سرخ کردن

به منظور بررسی پدیده های انتقال جرم طی سرخ کردن میگو به روش عمیق و هوای داغ مراحل ذیل انجام گرفت:

#### ۲-۳-۱- اندازه گیری محتوی رطوبت محصول

ظروف فلزی مخصوص خشک کردن در آون (Memmert UFP500) با دمای ۱۲۰°C به مدت ۲۰ دقیقه قرار گرفت و پس از دسیکاتور گذاری و توزین، وزن ثابت ظروف فلزی بدست آمد. نمونه های سرخ شده مطابق دستورالعمل مخصوص اندازه گیری رطوبت نمونه های چرب، توزین شده و به مدت ۱۶ ساعت در دمای ۱۰۳ درجه سانتی گراد توسط آون همرفتی جهت رسیدن به وزن ثابت خشک شدند (AOAC, 1995). بعد از خشک شدن، ظرف حاوی نمونه بوسیله گیره فلزی به دسیکاتور منتقل شده و پس از

بالن پس از استخراج و  $m$  وزن نمونه خشک بدون روغن بر حسب گرم می باشد.

$$W_{oil} = \frac{W_1 - W_2}{m} \quad (2)$$

### ۲-۳-۳- تخمین پارامترهای انتقال جرم

داده های مربوط به تغییرات رطوبت-زمان برای میگو طی سرخ کردن برای تخمین پارامترهای انتقال جرم مانند عدد بایوت، ضریب انتقال جرم و نفوذ رطوبت همانند کار یلدریز و همکاران (۲۰۰۷) و صباغی و همکاران (۲۰۱۷) استفاده شد [۲۰، ۳۲]. میگو به صورت استوانه نامحدود در نظر گرفته شد. رابطه ۳، غلظت را به عنوان تابعی از زمان و موقعیت برای یک استوانه نامحدود بدست می دهد. در معادلات فوق  $C(x, t)$  محتوی رطوبت محصول در هر نقطه و در هر زمان بر حسب گرم آب بر گرم ماده خشک  $(g/g)$  و  $C_i$ ،  $(db)$ ، محتوی رطوبت اولیه محصول  $(g/g, db)$ ،  $C_\infty$  محتوی رطوبت تعادلی محصول (رطوبت محصول در زمان بی نهایت) یا رطوبت بستر فرآیند است که می تواند صفر در نظر گرفته شود.  $L$  بُعد مشخصه برابر با نصف شعاع استوانه میگو بر حسب متر،  $D$  ضریب نفوذ موثر  $(m^2/s)$ ،  $k_c$  ضریب انتقال جرم  $(m/s)$ ،  $\mu$  ریشه تابع غیر تجربی برای تیغه نامحدود و  $t$  زمان بر حسب ثانیه می باشد. رابطه (۷) مربوط به تغییرات غلظت متوسط رطوبت در استوانه نامحدود است. در رابطه (۴) عبارت  $\bar{C}(t)$  میزان متوسط رطوبت محصول در زمان  $t$  بر حسب ماده خشک  $(g/g, db)$  می باشد. با در نظر گرفتن قانون انطباق<sup>۱۷</sup> یا قانون مجموع<sup>۱۸</sup>، رابطه (۵) برای دو بُعد میگو بدست می آید. با رسم منحنی لگاریتم طبیعی تغییرات غلظت در برابر زمان و بدست آوردن عرض از مبدا خط حاصل با استفاده از رابطه (۶)، مقدار  $\mu_1$  و سپس با استفاده از شیب آن مقدار ضریب نفوذ موثر  $(D)$  محاسبه شد. عدد بدون بُعد بیوت انتقال جرم

سرد شدن توزین گردید. با استفاده از رابطه (۱) میزان رطوبت نمونه بر مبنای وزن خشک بدون روغن محاسبه شد. آزمایش در سه تکرار انجام شد. در این رابطه،  $M$  جرم نسبی رطوبت بر مبنای وزن خشک بدون روغن  $(g/g, db)$ ،  $W_0$  وزن ثابت ظرف فلزی،  $W_1$  وزن ظرف به همراه نمونه قبل از خشک کردن،  $W_2$  وزن ظرف به همراه نمونه بعد از خشک کردن و  $W_{oil}$  وزن روغن جذب شده بر حسب ماده خشک (بعد از انجام آزمایش سوکسله) همگی بر حسب گرم می باشند.

(۱)

$$M = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_0 - W_{oil}}$$

### ۲-۳-۲- اندازه گیری محتوی روغن محصول در سرخ کردن عمیق

اندازه گیری محتوی روغن طی زمان برای میگوی سرخ شده با روش عمیق انجام گرفت. نمونه های خشک حاصل از اندازه گیری رطوبت برای اندازه گیری روغن به روش سوکسله توسط دستگاه سوکسله (Peco PSU-500) استفاده شدند (AOAC 2000). میگوی سرخ شده و خشک شده روی کاغذ صافی توزین شد و بعد از بستن کاغذ بوسیله دسته هاون چینی کاملاً خرد شد. بالن های سوکسله به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۱۲۰ درجه سانتی گراد در آون و سپس در دسیکاتور قرار گرفتند تا به وزن ثابت برسند. پس از اتصال دستگاه سوکسله به صورت سه تایی برای سه تکرار نمونه مربوط به هر تکرار در اکستراکتور دستگاه قرار گرفت. استخراج بوسیله حلال پترولیوم اتر به مدت ۶ ساعت انجام شد و جرم نسبی روغن بر حسب ماده خشک بدون روغن مطابق رابطه (۲) محاسبه شد. در این رابطه،  $W_{oil}$  میزان روغن جذب شده بر حسب ماده خشک بدون روغن  $(g/g, db)$ ،  $W_1$  وزن ثابت اولیه بالن،  $W_2$  وزن نهایی

( $Bi_m$ ) و ضریب انتقال جرم ( $k_c$ ) نیز با استفاده از رابطه (۷) محاسبه شد.

$$\frac{C(x,t) - C_\infty}{C_i - C_\infty} = \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n} \times \cos \left( \mu_n \frac{x}{L} \right) \exp \left( -\mu_n^2 \frac{Dt}{L^2} \right) \quad (۳)$$

$$\frac{\bar{C}(t) - C_\infty}{C_i - C_\infty} = \frac{2 \sin^2 \mu_1}{\mu_1 [\mu_1 + \sin \mu_1 \cos \mu_1]} \exp \left( -\mu_1^2 \frac{Dt}{L^2} \right) \quad (۴)$$

$$\ln \left( \frac{\bar{C}(t) - C_\infty}{C_i - C_\infty} \right) = 2 \ln E - 2 \mu_1^2 \frac{Dt}{L^2} \quad (۵)$$

$$E = \frac{2 \sin^2 \mu_1}{\mu_1 [\mu_1 + \sin \mu_1 \cos \mu_1]} \quad (۶)$$

$$Bi_m = \mu_1 \tan \mu_1 = \frac{k_c L}{D} \quad (۷)$$

## ۲-۳-۴- بررسی سنتیک کاهش آب

## ۲-۴-۴- بررسی انتقال حرارت در حین سرخ کردن

### ۲-۴-۱- ثبت تغییرات دمای محصول

به منظور مطالعه حرارتی فرآیند سرخ کردن از روش مستقیم با قرار دادن ترموکوپل در داخل محصول استفاده شد. بدین منظور یک ترموکوپل نوع T در مرکز محصول قرار گرفت و سپس محصول در سرخ‌کن هوای داغ و سرخ‌کن عمیق که در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد که دمای آن بوسیله ترموکترلر مجهز به ترموکوپل نوع K ثابت نگه داشته می‌شود، سرخ شد. تغییرات دمای مرکز محصول در مدت ۱۵ دقیقه با فاصله زمانی ۱ ثانیه بوسیله دیتالاگر ۲۰ (Model TC-08 "RS-232" Pico technology) و نرم‌افزار پیکولاگ ۲۱ در کامپیوتر ثبت شد. این آزمایش در سه تکرار انجام گرفت. نمودارهای حاصل از میانگین دمای ثبت شده مرکزی مورد بررسی قرار گرفت.

تغییرات رطوبت میگو طی سرخ کردن از یک تابع نمایی کاهشی پیروی می‌کند. معادله کلی جریان خروج آب از محصول طی سرخ کردن به صورت رابطه (۸) است [۲۱، ۲۲]:

در این معادله  $K_m$  نرخ ویژه<sup>۱۹</sup> یا ثابت سنتیک کاهش آب محصول برحسب (۱/s) است که به خصوصیات هندسی و ترکیب اولیه محصول و شرایط فرآیند وابسته است.  $m_t$  و  $m_\infty$  به ترتیب رطوبت محصول در زمان  $t$  و زمان بی‌نهایت (g/g, db) می‌باشد. با رسم  $\ln(m_t/m_\infty)$  در برابر زمان و بدست آوردن شیب خط حاصل،  $K_m$  برای دماهای مختلف آزمایش برآورد شد.

$$\ln \left( \frac{m_t - m_\infty}{m_i - m_\infty} \right) = -K_m t \quad (۸)$$

21- PicoLog software

19- Specific rate

20- Data logger

## ۲-۴-۲- محاسبه ویژگی‌های حرارتی میگو

مطابق حنان حمید و همکاران (2018)، ضریب انتقال حرارت هدایتی ( $k$ ) و ظرفیت گرمایی ویژه ( $c_p$ ) میگو به عنوان تابعی از پنج ترکیب مختلف نمونه (رطوبت، پروتئین، چربی، خاکستر و کربوهیدرات) به ترتیب با استفاده از رابطه (۹) و رابطه (۱۰) تخمین زده شد و تغییرات آن با زمان فرایند بررسی گردید [۲۳]. اندازه‌گیری پروتئین با استفاده از روش کجلدال، توسط دستگاه کجلتک (Behr InKjel 625P) و با در نظر گرفتن ضریب تبدیل 6/25 انجام شد (AOAC, 1996). مقدار خاکستر با استفاده از کوره الکتریکی (Nabertherm B510) و در دمای ۵۵۰ درجه

سانتی‌گراد تعیین شد (AOAC, 1996). تمام اندازه‌گیری‌ها در سه تکرار انجام گرفت و نتایج بر مبنای وزن مرطوب گزارش گردید. در معادلات فوق،  $x_w$  مقدار رطوبت محصول بر حسب گرم ماده مرطوب ( $g/g, wb$ )،  $x_{pr}$  مقدار پروتئین محصول بر حسب گرم ماده مرطوب ( $g/g, wb$ )،  $x_f$  مقدار چربی محصول بر حسب گرم ماده مرطوب ( $g/g, wb$ )،  $x_c$  مقدار کربوهیدرات محصول بر حسب گرم ماده مرطوب ( $g/g, wb$ )،  $x_{ash}$  مقدار خاکستر محصول بر حسب گرم ماده مرطوب ( $g/g, wb$ )،  $k$  ضریب انتقال حرارت هدایتی بر حسب ( $W/m.K$ ) و  $C_p$  ظرفیت گرمایی ویژه بر حسب ( $J/kg.K$ ) است. نفوذ حرارتی ( $m^2/s$ ) میگو با استفاده از معادله (۱۱) محاسبه شد.

$$k = 0.58x_w + 0.155x_{pr} + 0.16x_f + 0.25x_c + 0.135x_{ash} \quad (9)$$

$$C_p = 4187x_w + 1549x_{pr} + 1675x_f + 1424x_c + 837x_{ash} \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (11)$$

طبیعی کسر دمایی انجام نشده در برابر زمان فرآیند، شیب بخش خطی منحنی برابر با  $-2\mu_1^2 \frac{at}{L^2}$  خواهد بود [۳۲]. با توجه به اینکه نفوذ حرارتی  $\alpha$  و نصف شعاع میگو مشخص است،  $\mu_1$  قابل محاسبه خواهد بود. در نهایت عدد بدون بُعد بایوت انتقال حرارت و ضریب انتقال حرارت جابجایی با استفاده از رابطه ۱۵ قابل تخمین است. در این معادلات  $T(r, t)$  دمای محصول در هر نقطه و در هر زمان،  $T_i$  دمای اولیه محصول،  $T_\infty$  دمای بستر فرآیند بر حسب  $^\circ C$ ،  $L$  نصف شعاع استوانه میگو بر حسب متر،  $\alpha$  ضریب نفوذ حرارتی ( $m^2/s$ )،  $h$  ضریب انتقال حرارت جابجایی ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )،  $\mu$  ریشه تابع غیر تجربی برای استوانه نامحدود و  $t$  زمان بر حسب ثانیه می‌باشد.

## ۲-۴-۳- تخمین ضریب انتقال حرارت جابجایی با دمای مرکزی

ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی با حل معادلات برای هدایت حرارت یک بُعدی در مختصات کارتزین مطابق رابطه (۱۲) برآورد شد.

شکل هندسی محصول به صورت یک استوانه محدود می‌تواند حاصل برخورد یک صفحه نامحدود با استوانه نامحدود فرض شود. در این حالت کسر دمایی انجام نشده در حالت محدود از حاصل ضرب کسر دمایی دو هندسه نامحدود مطابق رابطه ۱۳ بدست می‌آید. با توجه به رابطه ۱۴، مطابق صباغی و همکاران (۲۰۱۷) با رسم لگاریتم

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad 0 \leq x \leq L \quad \text{for } t > 0 \quad (12)$$

$$\left( \frac{T(r, z, t) - T_\infty}{T_i - T_\infty} \right)_{\text{finite plate}} = \left( \frac{T(r, t) - T_\infty}{T_i - T_\infty} \right)_{\text{infinite cylinder}} \times \left( \frac{T(z, t) - T_\infty}{T_i - T_\infty} \right)_{\text{infinite plate}} \quad (13)$$

$$\ln \left( \frac{T(r, z, t) - T_\infty}{T_i - T_\infty} \right) = \ln A - 2\mu_1^2 \frac{\alpha t}{L^2} \quad (14)$$

$$Bi_h = \mu_1 \tan \mu_1 = \frac{hL}{k} \quad (15)$$

در شکل (۱) تغییرات محتوی رطوبت میگو در حین سرخ کردن با هوای داغ و سرخ کردن عمیق به همراه انحراف معیار داده‌های آزمایشی به عنوان تابعی از زمان فرآیند نشان داده شده است. با شروع فرآیند سرخ کردن هوای داغ، نرخ کاهش رطوبت محصول تا زمانی که رطوبت سطحی کاملاً خشک نشده باشد افزایش می‌یابد و با کاهش رطوبت محصول به تدریج تغییرات رطوبتی به میزان ثابت می‌رسد. همان طور که انتظار می‌رود، پس از رسیدن دمای میگو به دمای جوش آب، تبخیر آب صورت می‌گیرد که در دماهای بالای سرخ کردن هوای داغ سریع‌تر اتفاق می‌افتد و شدت آن در ۳ دقیقه ابتدایی فرآیند بیشتر است که به دلیل تبخیر ناگهانی آب آزاد سطحی<sup>۲۳</sup> محصول و اختلاف دمای بین سیال و نقطه جوش آب می‌باشد. در حین سرخ کردن هوای داغ، اختلاف فشار بخار جزئی بین محصول و هوای داغ باعث تبخیر آب می‌شود. این اختلاف فشار جزئی مسلماً در ابتدای فرآیند بیشتر می‌باشد. این مشاهدات با نتایج بسیاری از محققین سازگاری دارد [۱۰، ۲۲، ۲۵، ۲۶، ۲۷]. همان طور که مشخص است، شدت تغییرات رطوبت محصول طی سرخ کردن عمیق به گونه‌ای است که بعد از گذشت ۱ دقیقه از فرآیند، محتوی رطوبت محصول به حدود ۲ گرم بر گرم ماده خشک می‌رسد. شدت افت رطوبت میگو در تماس با روغن داغ در روش عمیق به نحوی است که پس از گذشت ۹ دقیقه از فرآیند،

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- نتایج بررسی میزان ترکیبات شیمیایی میگو

##### ویژگی‌های حرارتی میگو

نتایج بررسی میزان آب، پروتئین، چربی، خاکستر، ماده خشک و کربوهیدرات میگوی پاسبید در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج با داده‌های (1996) USDA<sup>22</sup> مطابقت دارد.

**Table 1.** Amount of shrimp chemical compounds

| Chemical compounds | Amount (unit)         |
|--------------------|-----------------------|
| Protein            | 12.25(%) <sup>*</sup> |
| Fat                | 1(%) <sup>*</sup>     |
| Ash                | 1.75 (%) <sup>*</sup> |
| Moisture           | 85 (%)                |
| Dry matter         | 15 (%) <sup>*</sup>   |
| Carbohydrate       | negligible            |

<sup>\*</sup>Based on wet weight

#### ۳-۲- نتایج بررسی انتقال جرم در حین سرخ کردن

##### هوای داغ

#### ۳-۲-۱- تغییرات رطوبت محصول در حین سرخ کردن

##### هوای داغ

موئینگی و گرادیان فشار اتفاق می افتد و زمانی که به نقطه جوش آب می رسد، تبخیر توسط انتشار مولکولی صورت می گیرد [۲۸]. کاستا و همکاران (۱۹۹۹) بیان کردند که طی سرخ کردن، نرخ کاهش آب تا تکمیل خشک شدن سطحی محصول به طور افزایشی است و سپس با افزایش زمان کاهش می یابد [۲۹]. فارکاس و هابارد (۲۰۰۰) و صباغی و همکاران (۲۰۱۵) بیان کردند که حداکثر نرخ کاهش رطوبت در زمان های ابتدایی فرآیند سرخ کردن است [۳۰، ۳۱].

محتوی رطوبت محصول به حدود صفر می رسد در حالی که در روش هوای داغ این حالت مشاهده نشد. پن و همکاران (۲۰۱۵) روند مشابهی را در کاهش رطوبت میگو طی سرخ کردن تحت خلاء مشاهده کردند که با افزایش دما، شدت اثر دست رفتن آب طی زمان بیشتر شد [۲۷]. یانگ و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه ای که روی سرخ کردن میگو داشتند، بیان نمودند که بعد از سرخ کردن میزان رطوبت میگو تحت تاثیر بستر سرخ کردن متغیر است. مکانیسم انتقال رطوبت میگو از قسمت مرکزی به سمت بیرون توسط فشار

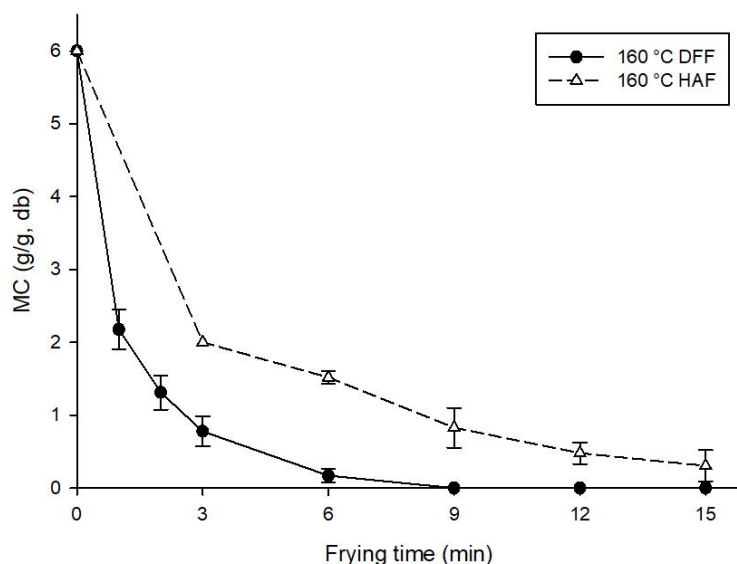


Fig 1. Moisture content during deep fat frying (DFF) and hot air frying (HAF)

مطابق جدول (۲) برای پارامترهای انتقال جرم با نتایج یلدیز و همکاران (۲۰۰۷) مطابقت دارد ولی آنها برای تغییرات عدد بایوت شکل منظمی را بیان نکردند [۲۰]. با کاهش نرخ از دست رفتن رطوبت محصول، ضریب انتقال جرم به طور منظم کاهش یافت. ضریب نفوذ موثر در روش سرخ کردن عمیق بیشتر از سرخ کردن هوای داغ بود. صباغی و همکاران (۲۰۱۷) بیان کردند که با افزایش دمای بستر فرآیند عدد بایوت، ضریب انتقال جرم و نفوذ موثر رطوبت به طور معنی داری افزایش می یابد [۳۲].

### ۳-۲-۲- پارامترهای انتقال جرم

شکل (۲) نمودار تغییرات میانگین غلظت بدون بعد را در برابر زمان سرخ کردن به روش هوای داغ و عمیق را نشان می دهد. از این نمودار برای محاسبه پارامترهای انتقال جرم (عدد بایوت، ضریب انتقال جرم و نفوذ موثر رطوبت) استفاده شد. همان طور که مشاهده می شود، شدت از دست رفتن آب میگو در روش سرخ کردن عمیق از روش سرخ کردن هوای داغ بیشتر بوده است. تغییرات بدست آمده

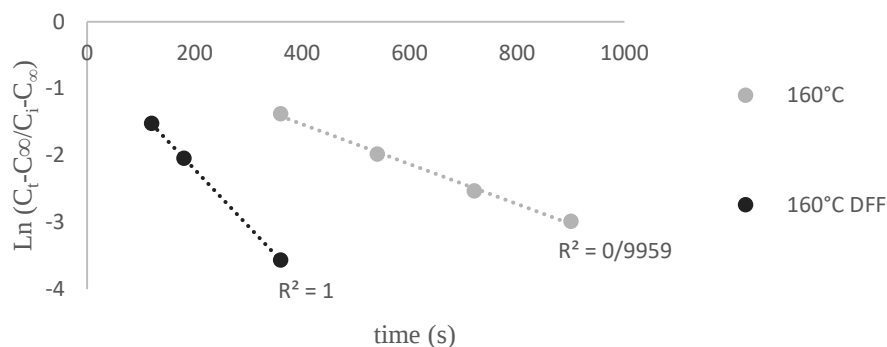


Fig 2. Mean concentration over time during deep fat frying (DFF) and hot air frying (HAF)

Table ۲. Mass transfer parameters for deep fat frying (DFF) and hot air frying (HAF)

| Effective penetration coefficient ( $D \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ) | Mass transfer coefficient ( $K_c \times 10^{-5} \text{ m/s}$ ) | Biot number ( $B_{im}$ ) | Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) |
|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------------|
| ۲/۸۲                                                                          | ۰/۶۹                                                           | ۳/۵۵                     | HAF ۱۶۰                            |
| ۹/۱۹                                                                          | ۱/۴۵                                                           | ۵/۵۵                     | DFF ۱۶۰                            |

روش سرخ کردن عمیق برابر با  $0.0098 \pm 0.0020 \text{ s}^{-1}$  محاسبه

شد که مقدار آن بالاتر از مقادیر هوای داغ بود.

همان طور که مشخص است در سرخ کردن عمیق در دمای  $160^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی گراد ثابت سینتیکی کاهش آب از سرخ کردن با هوای داغ به طور معنی داری بیشتر بود. محبی و همکاران (۲۰۱۱) بیان کردند که محتوی رطوبت نهایی محصول با افزایش دمای فرآیند سرخ کردن کاهش می یابد و با افزایش زمان سرخ کردن نرخ کاهش آب محدود می شود [۳۳]. دنباس و همکاران (۲۰۰۳) نیز بیان کردند که با افزایش دمای فرآیند، ثابت سینتیک کاهش آب افزایش یافت [۱۱]. رومانی و همکاران (۲۰۰۸) نیز حدود سه دقیقه پس از شروع فرآیند نرخ کاهش آب را با روند کاهشی و تقریباً ثابت گزارش کردند [۳۴].

### ۳-۲-۳- سنتیک خروج آب از محصول

در شکل (۳) برای برازش مدل سینتیکی روی لگاریتم طبیعی رطوبت بدون بُعد عرض از مبدا صفر در نظر گرفته شد. تغییرات رطوبت محصول در طی سرخ کردن از یک تابع نمایی کاهشی پیروی می کند. مدل سینتیک کاهش رطوبت در طی سرخ کردن توسط کروکید و همکاران (۲۰۰۱a) به صورت یک تابع به دست آمد [۲۲]. با محاسبه شیب خطوط برازش شده روی داده های لگاریتم طبیعی رطوبت بدون بُعد، مقدار ثابت سینتیک کاهش آب ( $K_m$ ) برای روش سرخ کردن هوای داغ در دمای  $160^{\circ}\text{C}$  برابر  $0.0033 \pm 0.0007 \text{ s}^{-1}$  بدست آمد. همچنین مقدار ثابت سینتیک کاهش آب برای

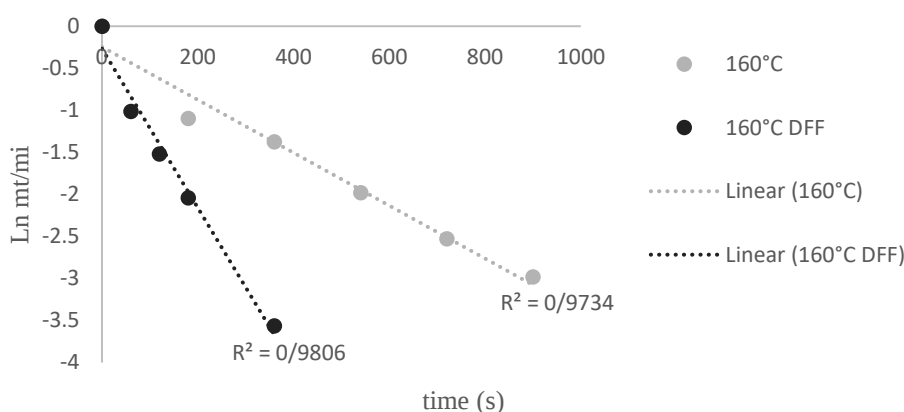


Fig 3. The natural logarithm of dimensionless moisture over time

عمقی کمتر می شود. جذب روغن زمانی که منافذ کوچکتر و شعاع کمتری داشته باشند، عمیق تر است که علت آن افزایش فشار موئینگی می باشد. پس از گذشت ۹ دقیقه از فرآیند و خشک شدن کامل محصول به علت فقدان بخار آب، جذب روغن هنگامی که محصول در داخل روغن قرار داشت، صورت گرفت. با توجه به ارتباط خطی بین ثابت های سینتیک کاهش آب و جذب روغن، اعمال پیش تیمارهایی مانند خشک کردن با کاهش ثابت سینتیک کاهش رطوبت و کاهش تخلخل<sup>۲۴</sup> محصول، می تواند جذب روغن را محدود نماید. فارکاس و همکاران (۱۹۹۶) بیان کردند که تا زمانی که دمای مرکزی محصول حدود ۱۰۰ درجه سانتی گراد ثابت باقی می ماند، نرخ مهاجرت روغن به داخل محصول ناچیز است. به عبارت دیگر تا زمانی که تبخیر شدت داشته باشد، خروج بخار آب از ورود روغن به داخل ساختار و منافذ محصول جلوگیری می کند و نرخ مهاجرت روغن به داخل محصول تقریباً متوقف می شود زیرا این دو جریان انتقال جرم در جهت مخالف هم اتفاق می افتند و با توجه به خصوصیات خیس شوندگی و آبدوستی<sup>۲۵</sup>، محصول به آسانی به روغن آغشته نخواهد شد [۳۵].

### ۳-۲-۴- جذب روغن میگو در سرخ کردن عمیق

شکل (۴) نتایج تغییرات جذب روغن میگو در طی زمان سرخ کردن را نشان می دهد. تغییرات جذب روغن در سرخ کردن عمیق از یک تابع افزایشی تقریباً خطی پیروی کرده و جذب روغن قابل توجهی در فرآوری سرخ کردن عمیق میگو توسط دو مکانیسم کندانس شدن بخار آب در داخل ماده غذایی و جریان موئینگی مشاهده شد. در زمان های ابتدایی سرخ کردن، بخار آب با فشار داخلی از بافت محصول خارج شده و در نتیجه روغن کمتری جذب محصول گردیده است. با افزایش زمان سرخ کردن و پیشرفت فرایند و انجام تبخیر، خصوصیات آبدوستی به تدریج کاهش یافت و با توجه به خاصیت موئینگی، احتمال ورود و نفوذ روغن به منافذ افزایش یافت. بعد از خروج میگو از بستر حرارتی، در اثر مکش حاصل از افت دما و فشار ناشی از کندانس بخار در منافذ، روغن سطحی چسبیده به محصول به داخل منافذ میگو نفوذ پیدا کرد. همچنین میزان نفوذ روغن به محصول به ویسکوزیته روغن و نحوه اتصال حفرات محصول بستگی دارد. افزایش ویسکوزیته موجب اتصال سطحی روغن و نفوذ

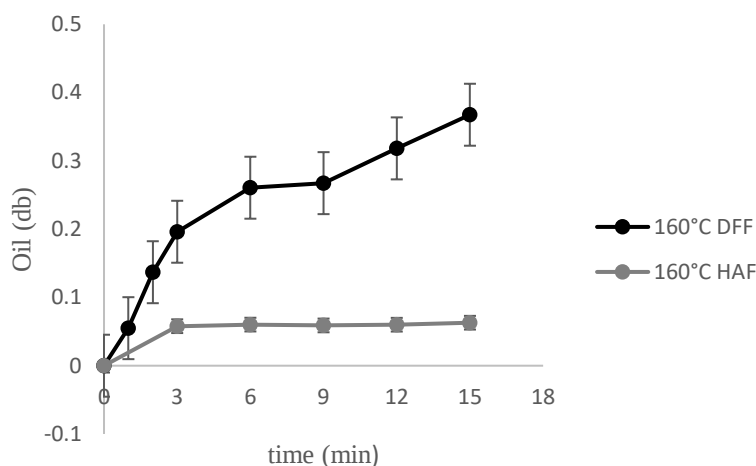


Fig 4. Oil content during deep fat frying (DFF) and hot air frying (HAF) over time

دلیل سرعت انتقال حرارت بالای روغن، زودتر به نقطه جوش آب رسیده و برای مدتی ثابت ماند و در نهایت پس از اتمام آب سطحی و تشکیل پوسته، به دمای روغن نزدیک شد. دمای مرکزی محصول برای سرخ کردن هوای داغ، پس از رسیدن به نقطه جوش آب تا پایان به صورت یکنواخت تقریباً ثابت مانده است. تغییرات دمایی مشاهده شده برای دمای مرکزی محصول در حین سرخ کردن با مشاهدات بسیاری از محققین توافق دارد [۳۱، ۳۲]. فارکاس و همکاران (۱۹۹۶) بیان کردند که در سرخ کردن، انتقال حرارت با وجود دو سینک حرارتی<sup>۲۹</sup> صورت می‌گیرد [۳۵]. اولین سینک حرارتی به صورت حرارت محسوس است که موجب افزایش دمای محصول از دمای اولیه به نقطه جوش آب می‌شود. این سینک حرارتی با پیشرفت فرآیند سرخ کردن و رسیدن دمای مرکزی محصول به نقطه جوش به تدریج محدود می‌شود. دومین سینک حرارتی مربوط به حرارت نهان که تبخیر آب در حدواسط پوسته/هسته را شامل می‌شود، می‌باشد که آب در این نقطه تبدیل به بخار می‌شود و در سرتاسر فرآیند سرخ کردن حفظ می‌گردد. ساهین و همکاران (۱۹۹۹) گزارش کردند هرچه دمای فرآیند بیشتر باشد، طول دوره دمای ثابت (۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) در

### ۳-۳-۳ نتایج بررسی انتقال حرارت در حین سرخ کردن

#### ۳-۳-۳-۱ تغییرات دمای مرکزی میگو حین سرخ کردن

شکل (۵) تغییرات مرکزی میگو طی سرخ کردن هوای داغ و سرخ کردن به روش عمیق نشان می‌دهد. ثبت تغییرات دمایی با استفاده از ترموکوپل انجام گرفت. سنسورهای دما در مقیاس آزمایشگاهی با استفاده از دستگاهی به نام ثبت-کننده دما<sup>۲۶</sup> جهت ثبت تغییرات دمایی طی فرآیند به رایانه متصل گردیدند. ثبت دمای محصول به دو صورت تغییرات با زمان (سینتیک<sup>۲۷</sup>) و تغییرات با مکان داخل محصول (پروفایل<sup>۲۸</sup>) انجام گرفت. در روش سرخ کردن هوای داغ، دمای مرکزی محصول به نقطه جوش آب رسیده و برای مدت زمانی ثابت باقی ماند. با رسیدن دمای مرکزی محصول به حدود نقطه جوش آب، به دلیل افزایش فشار بخار ناشی از تبخیر و حبس حباب‌های بخار در محصول، نقطه جوش آب طبق قوانین ترمودینامیکی افزایش یافت. با کاهش نرخ تبخیر آب و فاز جوشش، نقطه جوش آب کاهش یافت اما به دلیل وجود اجزای محلول، اندکی بیش از ۱۰۰°C باقی ماند. دمای مرکزی محصول در روش سرخ کردن عمیق به

29 -Thermal sink

26- Data logger

27 -Kinetic

28 -Profile

خشک کردن میگو بیان کردند که دمای میگو طی ۱۵ دقیقه ابتدایی خشک کردن با هوای داغ به سرعت افزایش یافت و به دمای بستر نزدیک شد [۴].

منحنی سینتیک دمایی محصول کاهش می یابد و افزایش دمای محصول به سمت دمای روغن سریع تر خواهد بود [۳۶]. این حالت به خصوص برای روش سرخ کردن عمیق در این پژوهش ملاحظه گردید. نگوئن و همکاران (۲۰۱۹) برای

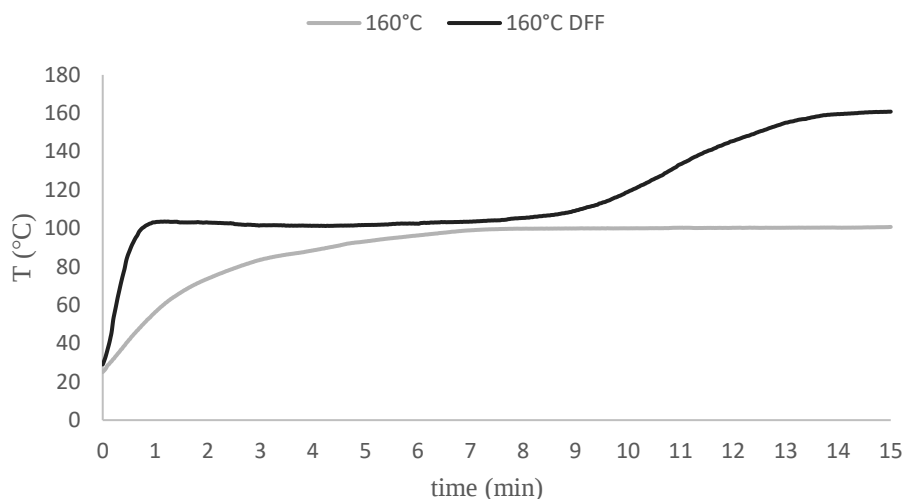


Fig 5. The Central temperature changes during deep fat frying (DFF) and hot air frying (HAF)

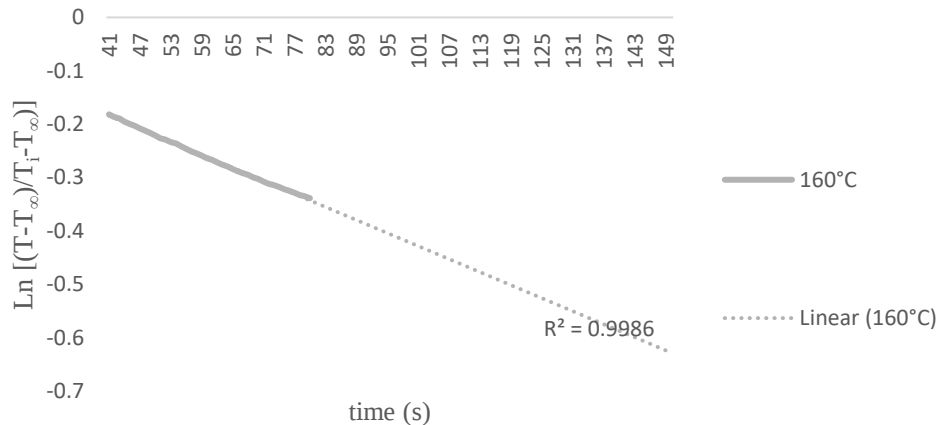
عمیق برای محصول میگو نشان می دهد. ضریب انتقال حرارت جابجایی در روش عمیق از روش هوای داغ بیشتر بود که علت آن، تشکیل حباب های بخار آب، افزایش تلاطم و تجزیه شدن روغن حین سرخ کردن بوده است. ضریب انتقال حرارت جابجایی نقش مهم در تشکیل خصوصیات حسی و قهوه ای شدن محصول دارد. در صورتی که انرژی لازم برای تبخیر رطوبت از محصول ثابت در نظر گرفته شود، می توان گفت با افزایش نرخ کاهش رطوبت مقدار بیشتری از انرژی ورودی به میگو به فرآیند تبخیر اختصاص می یابد. این امر موجب کاهش میزان انرژی در دسترس برای افزایش انرژی داخلی و در نتیجه کاهش ضریب انتقال حرارت جابجایی در دمای کم می شود. این امر با نتیجه کاستا و همکاران (۱۹۹۹)، ساهین و همکاران (۱۹۹۹) و بودزاک و سروگا (۲۰۰۴) موافقت دارد [۲۹، ۳۶، ۳۷] ولی با نتایج یلدیز و همکاران (۲۰۰۷) موافقت ندارد [۲۰]. برای توضیح بالا بودن ضریب انتقال حرارت در روش عمیق کاستا و همکاران (۱۹۹۹) گزارش کردند که در حین سرخ کردن

### ۳-۳-۲- میزان ضریب انتقال حرارت جابجایی با استفاده از دمای مرکزی

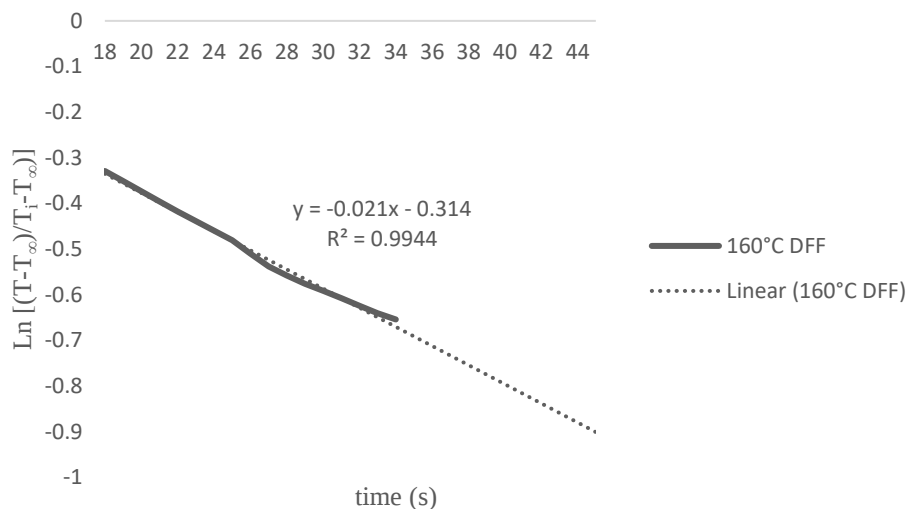
در شکل (۶) بخش خطی لگاریتم طبیعی دمای بدون بُعد در برابر زمان سرخ کردن هوای داغ نشان داده شده است. شکل (۷) همین تغییرات را برای روش سرخ کردن عمیق نشان می دهد. از تغییرات نزولی این نمودارها می توان دید که نرخ حرارت دهی میگو با توجه به دمای مرکزی، با افزایش زمان فرآیند سرخ کردن کاهش می یابد. با استفاده از شیب بخش خطی نمودار لگاریتمی دمای بدون بُعد در برابر زمان مشخص بودن خصوصیات فیزیکی و حرارتی میگو (دانسیته، ضریب هدایت حرارتی، ظرفیت گرمایی ویژه و نفوذ حرارتی به ترتیب برابر ۱۰۸۰ کیلوگرم بر متر مکعب، ۰.۵۱۵۸ ژول بر مول ثانیه کلون، ۳۷۸۰ ژول بر کیلوگرم کلون و  $10^{-7}$  مترمربع بر ثانیه)، عدد بدون بُعد بایوت انتقال حرارت ( $Bi_h$ ) و در نتیجه ضریب انتقال حرارت جابجایی با توجه به دمای مرکزی تخمین زده شد. جدول (۴) نتایج تخمین پارامترهای انتقال حرارت طی سرخ کردن هوای داغ و روش

افزایش ضریب انتقال حرارت می‌گردد [۲۹]. نگوئن و همکاران (۲۰۱۹) مقادیر تقریباً مشابهی را برای ضریب انتقال حرارت طی خشک کردن میگو با هوای داغ مشاهده نمودند [۴].

جوشش هسته‌ای<sup>۳۰</sup> مشاهده می‌شود. یعنی بخارات آب به شکل حباب در سطوح مختلف محصول تشکیل می‌شوند و به سمت قسمت بالایی بستر روغن حرکت می‌کنند. حرکت حباب‌های بخار بعد از تشکیل در سطح، تاثیر زیادی بر تلاطم و آشفته‌گی جریان روغن دارد و جریان متلاطم موجب



**Fig 6.** The natural logarithm of dimensionless temperature against time during HAF



**Fig 7.** The natural logarithm of dimensionless temperature against time during DFF

**Table ۳.** Heat transfer parameters for deep fat frying (DFF) and hot air frying (HAF)

| Displacement heat transfer coefficient (W/m <sup>2</sup> °C) | Biot number (Bi <sub>h</sub> ) | Temperature (°C) |
|--------------------------------------------------------------|--------------------------------|------------------|
|--------------------------------------------------------------|--------------------------------|------------------|

30 -Nucleate boiling

|        |       |                |
|--------|-------|----------------|
| 19/42  | •/084 | <b>HAF ۱۶۰</b> |
| 113/15 | •/493 | <b>DFE ۱۶۰</b> |

حدود صفر می‌رسد در حالی که در نمونه ی سرخ شده با هوای داغ سطح رطوبت صفر در مدت ۱۵ دقیقه مشاهده نشد. محتوی روغن میگو در روش عمیق طی ۱۵ دقیقه فرآوری همواره به صورت تقریباً خطی زیاد شد که نشان‌دهنده جذب روغن بالای این محصول است و روش هوای داغ می‌تواند این جذب روغن را محدود نماید. تغییرات دمای مرکز محصول طی سرخ کردن عمیق بعد از اتمام رطوبت داخلی محصول با سرعت زیادی به سمت دمای روغن میل می‌کند که این امر می‌تواند در صورت عدم کنترل فرآیند منجر به افزایش خطر تجزیه ترکیبات مفید و سلامت بخش میگو و در نتیجه افت تغذیه‌ای آن گردد. در روش هوای داغ تغییرات دمای مرکز محصول به طور کنترل شده‌ای مشاهده شد که می‌تواند منجر به حفظ سلامت محصول گردد.

#### ۵-منابع

- [1] Ajifolokun, O. M., Basson, A. K., Osunsanmi, F. O., & Zharare, G. E. (2018). Effects of drying methods on quality attributes of shrimps. *Journal of Food Processing and Technology*, 10(772): 2.
- [2] AlFaris, N. A., Alshammari, G. M., AlTamimi, J. Z., AlMousa, L. A., Alagal, R. I., AlKehayez, N. M., ... & Yahya, M. A. (2022). Evaluating the effects of different processing methods on the nutritional composition of shrimp and the antioxidant activity of shrimp powder. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(1): 640-649.
- [3] Rajesh, M., & Noorjahan, A. (2021). Comparative studies on antioxidant properties of wild and cultured shrimps. *Journal of Survey in Fisheries Sciences*, 199-208.
- [4] Nguyen, M. P., Ngo, T. T., & Le, T. D. (2019). Experimental and numerical investigation of transport phenomena and kinetics for convective shrimp drying. *Case Studies in Thermal Engineering*, 14: 100465.
- [5] Rostini, I., & Pratama, R. I. (2018). Effect of steaming on physical and chemical characteristics White Shrimp (*Litopenaeus vannamei*) from Indramayu Waters. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 176, No. 1, p. 012046). IOP Publishing.
- [6] Musaiger, A. O., & D Souza, R. (2008). The effects of different methods of cooking on proximate, mineral and heavy metal composition of fish and shrimps consumed in the Arabian Gulf. *Archivos latinoamericanos de nutrición*, 58(1): 103-109.
- [7] Erdoğdu, F., Balaban, M. O., & Otwell, W. S. (2003). Construction of shrimp cooking charts using previously developed mathematical models for heat transfer and yield loss predictions. *Journal of food engineering*, 60(1): 107-110.
- [8] Dueik, V., Robert, P., & Bouchon, P. (2010). Vacuum frying reduces oil uptake and improves the quality parameters of carrot crisps. *Food chemistry*, 119(3): 1143-1149.
- [9] Ngadi, M. O., Wang, Y., Adediji, A. A., & 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(1): 438-440.
- [10] Moyano, P. C., & Pedreschi, F. (2006). Kinetics of oil uptake during frying of potato slices: Effect

- of pre-treatments. *LWT-Food Science and Technology*, 39(3): 285-291.
- [11] Debnath, S., Bhat, K. K., & Rastogi, N. K. (2003). Effect of pre-drying on kinetics of moisture loss and oil uptake during deep fat frying of chickpea flour-based snack food. *LWT-Food Science and Technology*, 36(1): 91-98.
- [12] Zaghi, A. N., Barbalho, S. M., Guiguer, E. L., & Otoboni, A. M. (2019). Frying process: From conventional to air frying technology. *Food Reviews International*, 35(8): 763-777.
- [13] Andrés, A., Argüelles, Á., Castelló, M. L., & Heredia, A. (2013). Mass transfer and volume changes in French fries during air frying. *Food and Bioprocess Technology*, 6: 1917-1924.
- [14] Teruel, M. D. R., Gordon, M., Linares, M. B., Garrido, M. D., Ahromrit, A., & Niranjana, K. (2015). A comparative study of the characteristics of french fries produced by deep fat frying and air frying. *Journal of Food Science*, 80(2): E349-E358.
- [15] Santos, C. S., Cunha, S. C., & Casal, S. (2017). Deep or air frying? A comparative study with different vegetable oils. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 119(6): 1600375.
- [16] Heredia, A., Castelló, M. L., Argüelles, A., & Andrés, A. (2014). Evolution of mechanical and optical properties of French fries obtained by hot air-frying. *LWT-Food Science and Technology*, 57(2): 755-760.
- [17] Giovanelli, G., Torri, L., Sinelli, N., & Buratti, S. (2017). Comparative study of physico-chemical and sensory characteristics of French fries prepared from frozen potatoes using different cooking systems. *European Food Research and Technology*, 243(9): 1619-1631.
- [18] Ferreira, F. S., Sampaio, G. R., Keller, L. M., Sawaya, A. C., Chávez, D. W., Torres, E. A., & Saldanha, T. (2017). Impact of air frying on cholesterol and fatty acids oxidation in sardines: Protective effects of aromatic herbs. *Journal of food science*, 82(12): 2823-2831.
- [19] Tajner-Czopek, A., Figiel, A., & Carbonell-Barrachina, A. A. (2008). Effects of potato strip size and pre-drying method on French fries quality. *European Food Research and Technology*, 227: 757-766.
- [20] Yıldız, A., Palazoğlu, T. K., & Erdoğan, F. (2007). Determination of heat and mass transfer parameters during frying of potato slices. *Journal of food engineering*, 79(1): 11-17.
- [21] Krokida, M. K., Oreopoulou, V., & Maroulis, Z. B. (2000b). Water Loss and Oil Uptake as a Function of Frying Time. *Journal of Food Engineering*, 44: 39-46.
- [22] Krokida, M. K., Oreopoulou, V., Maroulis, Z. B., & Marinou-Kouris, D. (2001a). Effects of osmotic dehydration pretreatment on quality of French fries. *Journal of Food Engineering*, 49: 339-345.
- [23] Hamid, H. H., Mitchell, M., Jahangiri, A., & Thiel, D. V. (2018). Experimental validation of new empirical models of the thermal properties of food products for safe shipping. *Heat and Mass Transfer*, 54: 1247-1256.
- [24] USDA. (2005). USDA national nutrient database for standard reference.
- [25] Durán, M., Pedreschi, F., Moyano, P., & Troncoso, E. (2007). Oil partition in pre-treated potato slices during frying and cooling. *Journal of food Engineering*, 81(1): 257-265.
- [26] Ziaifar, A. M., Courtois, F., & Trystram, G. (2010). Porosity development and its effect on oil uptake during frying process. *Journal of Food Process Engineering*, 33(2): 191-212.
- [27] Pan, G., Ji, H., Liu, S., & He, X. (2015). Vacuum frying of breaded shrimps. *LWT-Food Science and Technology*, 62(1): 734-739.
- [28] Yang, D., Wu, G., Lu, Y., Li, P., Qi, X., Zhang, H., ... & Jin, Q. (2021). Comparative analysis of the effects of novel electric field frying and conventional frying on the quality of frying oil and oil absorption of fried shrimps. *Food Control*, 128: 108195.
- [29] Costa, R. M., Oliveira, F. A., Delaney, O., & Gekas, V. (1999). Analysis of the heat transfer coefficient during potato frying. *Journal of Food Engineering*, 39(3): 293-299.
- [30] Farkas, B. E., & Hubbard, L. J. (2000). Analysis of convective heat transfer during immersion frying. *Drying Technology*, 18(6): 1269-1285.
- [31] Sabbaghi, H., Ziaifar, A. M., Sadeghi Mahoonak, A., Kashani-Nejad, M., & Mirzaee, H. (2015). Estimation of convective heat transfer coefficient as function of the water loss rate during frying process. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 11(4): 473-484.
- [32] Sabbaghi, H., Ziaifar, A. M., & Kashani-Nejad, M. (2017). Analysis of heat and mass transfer during frying process of potato strips. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 13(2): 379-392.
- [33] Mohebbi, M., Akbarzadeh-T, M. R., Shahidi, F.,

- Moussavi, M., & Ghoddusi, H. B. (2009). Computer vision systems (CVS) for moisture content estimation in dehydrated shrimp. *Computers and electronics in agriculture*, 69(2): 128-134.
- [34] Romani, S., Bacchiocca, M., Rocculi, P., & Dalla Rosa, M. (2008). Effect of frying time on acrylamide content and quality aspects of French fries. *European Food Research and Technology*, 226: 555-560.
- [35] Farkas, B. E., Singh, R. P., & Rumsey, T. R. (1996). Modeling heat and mass transfer in immersion frying. II, model solution and verification. *Journal of Food Engineering*, 29(2): 227-248.
- [36] Sahin, S. E. R. P. I. L., Sastry, S. K., & Bayindirli, L. (1999). Heat transfer during frying of potato slices. *LWT-food science and technology*, 32(1): 19-24.
- [37] Budžaki, S., & Šeruga, B. (2005). Determination of convective heat transfer coefficient during frying of potato dough. *Journal of Food Engineering*, 66(3): 307-314.



## Scientific Research

## Analysis of heat and mass transfer during hot air frying and deep frying of shrimp

Bahareh Maroufpour<sup>1</sup>, Aman Mohammad Ziaifar<sup>\*2</sup>, Mohammad Ghorbani<sup>3</sup>, Hassan Sabbaghi<sup>4</sup>, Saeed Yalghi<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. student of food industry science and engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

<sup>2\*</sup> Professor, Department of Food Industry Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran (corresponding author)

<sup>3</sup> Professor, Department of Food Chemistry, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

<sup>4</sup> Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture and Animal Science, University of Torbat-e Jam, Razavi Khorasan Province, Iran

<sup>5</sup> Assistant Professor of Fisheries Department, Golestan Province Fisheries Research Center, Gorgan, Iran

| ARTICLE INFO                                                                                      | ABSTRACT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Article History:</b></p> <p>Received: 2023/11/29</p> <p>Accepted: 2024/5/12</p>             | <p>In this research, transfer phenomena during hot air frying and deep frying were investigated. Hot air frying (HAF) and deep frying (DFF) were carried out at 160 °C for 15 minutes for shrimp cylindrical pieces. Temperature variations at the product's core were recorded using a T-type thermocouple equipped Data Logger and PicoLog software on a computer. Moisture content and oil of the product were determined. Heat and mass transfer parameters estimate by using the logarithmic plot of dimensionless temperature against time and empirical equations. Results showed that Mass and heat transfer parameters during hot air frying were lower than deep frying method. In deep frying, the Biot number and the effective diffusion coefficient were higher than the hot air frying method. The kinetic constant of moisture reduction in the product was higher in the deep frying method.</p> |
| <p><b>Keywords:</b></p> <p>Shrimp,<br/>Hot air frying,<br/>Mass transfer,<br/>Heat transfer.</p>  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <p><b>DOI:</b> 10.22034/FSCT.22.161.86.</p> <p>*Corresponding Author E-<br/>ziaifar@gau.ac.ir</p> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |