

بهینه‌سازی شرایط سرخ کردن فیله‌های مرغ با استفاده از هوای داغ به روش سطح پاسخ

فاطمه کشاورزبان^a، حبیب اله میرزایی^{b*}، محمود سلطانی فیروز^c، علیرضا صادقی ماهونک^d،
مجید خانعلی^e، حسینعلی تاش شمس آبادی^f

^a دانشجوی دکتری دانشکده علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

^b دانشیار دانشکده علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

^c استادیار گروه مهندسی ماشینهای کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

^d استاد دانشکده علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

^e دانشیار گروه مهندسی ماشینهای کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

^f دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۲۷

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۳۰

DOI: 10.30495/jftn.2023.74830.11272

۹۷

چکیده

مقدمه: گوشت مرغ یکی از منابع مهم و سالم غنی از پروتئین در رژیم غذایی است بنابراین نحوه تهیه و طبخ آن به دلیل مصرف بالای آن مورد توجه قرار می‌گیرد. فرآیند سرخ کردن از رایج ترین عملیات واحد در صنایع غذایی است، بدین منظور تلاش هایی برای دستیابی به محصولات با محتوی کم روغن انجام شده است. سرخ کردن با هوای داغ یک روش جدید سرخ کردن است که در این روش محصولات از طریق تماس مستقیم با هوای داغ و قطرات روغن در محفظه سرخ کن مورد فرآوری قرار می‌گیرند.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، از دستگاه سرخ کن با هوای داغ جهت فرآوری فیله‌های مرغ استفاده گردید. روش سطح پاسخ برای مدل‌سازی و به دست آوردن شرایط بهینه فرآیند سرخ کردن با هوای داغ استفاده شد. تاثیر پارامترهای فرآیندی (دما ۱۶۰-۱۸۰-۲۰۰ درجه سلسیوس، زمان ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه و سرعت جریان هوا ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ متر بر ثانیه) بر ویژگی‌های محصول نهایی (میزان رطوبت، میزان محتوی چربی، رنگ، تردی و ارزیابی حسی) به منظور دستیابی به شرایط بهینه فرآیند مورد ارزیابی قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج به دست آمده نشان دادند که محتوی رطوبت، تردی بافت محصول و تغییرات رنگ محصول متاثر از دما و مدت زمان فرآیند سرخ کردن با هوای داغ بودند و با افزایش مقدار این پارامترها افزایش یافتند. متغیرهای سرعت جریان هوا، دما و زمان فرآیند سرخ کردن با هوای داغ بر روی محتوی چربی در فیله‌های مرغ سرخ شده اثر معنی‌دار و روند افزایشی داشتند ($p \leq 0.05$).

نتیجه‌گیری: بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌ها، شرایط بهینه سرخ کردن با هوای داغ دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس، سرعت دمنده هوا ۱/۵ متر بر ثانیه و زمان ۲۲/۸۷ دقیقه تعیین گردید.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی فرآیند، روش سطح پاسخ، سرخ کردن با هوای داغ، فیله مرغ

مقدمه

مرغ و گوشت از محبوب‌ترین محصولات غذایی هستند که در تعداد زیادی از کشورها به دلیل طعم مطلوب و بافت منحصر به فرد مصرف می‌شوند (Kowalska *et al.*, 2023). با توجه به مضرات گوشت قرمز و قیمت بالای آن، مصرف گوشت سفید توصیه می‌گردد. گوشت سفید دارای کلسترول نسبتاً پایین‌تری نسبت به گوشت قرمز است و برای بیماران قلبی و عروقی و کلیوی قابل استفاده و برای حفاظت از سیستم عصبی بدن مفید است (Kurp *et al.*, 2022). مصرف بالای گوشت سفید و مهمتر از آن تغییرات نامطلوب حاصل از نوع، روش و مدت زمان نامناسب حرارت دهی، سبب توجه ویژه به نحوه تهیه و طبخ آن با هدف تولید محصول نهایی با حداکثر مقبولیت شده است (Kowalska *et al.*, 2023). سرخ کردن به عنوان یک عملیات واحد مهم و پرکاربرد در صنایع غذایی، رستوران‌ها و منازل دارای روش‌های گوناگون نظیر؛ روش غوطه‌وری در روغن، سرخ کردن در خلاء، سرخ کردن با هوای داغ به همراه قطرات روغن و تفت دادن سطحی در روغن است. از مهمترین دلایل محبوبیت روش سرخ کردن غوطه‌وری در روغن به عنوان یکی از مهمترین روش‌های انتقال حرارت به داخل غذا عبارتند از: پوست ترد و خشک، بافت درونی لطیف و نرم، طعم و بوی خاص و مطلوب، روش ارزان و سرعت بالای انتقال همزمان حرارت و جرم است (Michalak-Majewska *et al.*, 2018). از طرفی زبان‌های سرخ کردن عمیق نیز در خور توجه است. از جمله اینکه محتوی چربی بالایی دارد و در بعضی موارد یک سوم وزن کل محصول را شامل می‌شود؛ ساختار و پایداری روغن به کار رفته تغییر می‌کند؛ همچنین میزان اسید چرب ترانس در روغن‌های چند بار مصرف شده افزایش می‌یابد. محصولات سرخ شده در روغن لذیذ هستند، اما در عین حال مشکلات عمده‌ای برای سلامت مصرف‌کنندگان از جمله مشکلات مربوط به کالری و کلسترول بالا و بیماری قلبی و عروقی ایجاد می‌کنند. همچنین قرار گرفتن روغن در معرض دمای بالا و هوای اتمسفر میزان اکسیداسیون را تشدید کرده و مواد سمی تولید می‌کند. از طرفی عمر نگهداری ماده غذایی سرخ شده به علت اکسیداسیون روغن کاهش می‌یابد. محصولات غذایی سرخ شده نیاز به فرآیندهای صنعتی سازگار و مناسب دارند (Rabeller *et*

بهبودسازی شرایط سرخ کردن فیله‌های مرغ با استفاده از هوای داغ به روش سطح پاسخ

2019). تمایل بازار برای مصرف غذاهای سالم‌تر انگیزه‌ای برای توسعه روش‌های جایگزین برای تولید محصولی سالم‌تر با محتوی روغن کمتر و بافت و طعم مطلوب است. امروزه این امکان وجود دارد که تجهیزاتی برای تولید محصول با روغن کم، همانند سرخ کن‌های با هوای داغ طراحی گردد، لیکن در این زمینه پژوهش‌های کمی وجود دارد که مکانیسم انتقال حرارت و سینتیک جرمی را توصیف کند (Rabeller & Fevissa, 2018). فرآیندهای انتقال جرم و حرارت عامل اصلی تغییرات فیزیکی- شیمیایی است که طی سرخ کردن در ماده غذایی رخ می‌دهد. سرخ کردن محصولات غذایی با هوای داغ یک روش جدید است که محصولات از طریق تماس مستقیم با هوای داغ و قطرات روغن در محفظه سرخ کن قرار می‌گیرند. روغن استفاده شده در این فرآیند قطعاً از روغن استفاده شده در روش سرخ کردن عمیق کمتر است. در ابتدای فرآیند سرخ کردن تنها آب آزاد محصول بخار می‌شود، اما مرز تبخیر آب بعنوان سطح خشک کردن به تدریج به سمت داخل محصول حرکت می‌کند. طی سرخ کردن انتقال جرم و حرارت به طور همزمان اتفاق می‌افتد. ضریب انتقال حرارت از مهمترین پارامترها برای حفظ کیفیت محصول سرخ شده است، بنابراین اندازه‌گیری آن نقش مهمی در فهم پیچیدگی‌های فرآیند سرخ کردن دارد (Yu *et al.*, 2021). پژوهش‌هایی برای بررسی تفاوت‌های ارگانولپتیکی و بافتی محصولات فرآوری شده با سرخ کردن به روش عمیق و سرخ کردن با هوای داغ طی سال‌های اخیر صورت گرفته است. در یکی از این پژوهش‌ها مقایسه خصوصیات فیزیکی-شیمیایی و طعم ناگت مرغ در هنگام سرخ شدن در هوای داغ و سرخ شدن عمیق مورد بررسی قرار گرفت. ناگت مرغ به ابعاد ۱×۳×۵ سانتیمتر مکعب و حدود ۲۰ تا ۲۵ گرم در دمای ۱۸- درجه سلسیوس قبل از سرخ کردن نگهداری شدند. سپس عملیات سرخ کردن عمیق با روغن پالم در دمای ۱۸۰ درجه سلسیوس به مدت ۹ دقیقه و با هوای داغ به مدت ۱۸ دقیقه انجام شد. نتایج نشان دادند سرخ کردن با هوای داغ روش سالم‌تری برای تولید ناگت مرغ سوخاری بود که می‌تواند تخریب اکسیداتیو چربی‌ها را کاهش دهد (Ngadi *et al.*, 2007). در مطالعه‌ای دیگر تأثیر روش‌های مختلف پخت و پز (سرخ کردن عمیق، پخت با فر، سرخ کردن با

محتوی چربی، رنگ، بافت) و تعیین شرایط بهینه فرایند سرخ کردن به روش سطح پاسخ است.

مواد و روش‌ها

- تهیه و آماده سازی فیله مرغ

برای انجام این مطالعه فیله مرغ گوشتی موجود در بازار با وزن ۲۰۰۰-۱۸۰۰ گرم و کشتار روز تهیه شد و سپس نمونه‌ها به صورت قطعات به طول ۱۰ سانتیمتر، عرض ۵ سانتیمتر و ضخامت ۱/۵ سانتیمتر و وزن تقریبی ۱۰۰ گرم آماده شدند و تا شروع آزمایشات در فریزر نگهداری شدند. فیله‌های مرغ قبل از شروع هر آزمایش جهت رسیدن به دمای محیط و یخ زدایی به مدت ۶۰ دقیقه از فریزر خارج و شستشو داده شدند و بر روی توری‌هایی قرار داده شدند تا آب اضافی آن خارج گردد. فیله‌های مرغ پس از توزین تحت فرآیند سرخ کردن با هوای داغ قرار گرفتند.

- فرآیند سرخ کردن با هوای داغ

فرآیند سرخ کردن در سرخ کن هوای داغ خانگی Sergio (مدل SAF162، ایتالیا) و مجهز به سیستم کنترل کننده دمای PID با ترموکوپل نوع K، در دماهایی ۱۶۰، ۱۸۰ و ۲۰۰ درجه سلسیوس، با سه سرعت جریان هوای ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ متر بر ثانیه در ۳ سطح زمانی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه (بر اساس آزمون و خطا و با استفاده از آزمون‌های اولیه شرایط مناسب برای سرخ کردن انتخاب گردید) انجام شد. پس از بستن درب سرخ کن از دمنده‌های هوا جهت تامین هوای مورد نیاز در فرآیند سرخ کردن استفاده شد. پس از رسیدن به دمای مورد نظر، ترموکوپل‌ها به سطح و مرکز هندسی فیله مرغ متصل شده و ترموکوپل سوم جهت ثبت دمای داخل سرخ کن به همراه فیله مرغ وارد سرخ کن شده و فرآیند سرخ کردن با هوای داغ آغاز گردید. بعد از گذشت زمان لازم، درب سرخ کن را باز کرده و نمونه‌ها مورد آزمون‌های مورد نظر قرار گرفت. ثبت تغییرات دمایی مرکز و سطح محصول توسط ترموکوپل نوع K با فاصله زمانی ۱ ثانیه به وسیله دستگاه ثبت داده مبتنی بر نرم افزار آردینو در سه تکرار انجام شد. بر اساس آزمون‌های اولیه، ۳ گرم روغن به ازای یک کیلوگرم فیله مرغ، برای آغشته‌سازی نمونه‌ها تعیین گردید. بنابراین فیله‌های مرغ با وزن تقریباً یکسان در هر آزمون، آماده و به میزان نسبت

هوا، و پخت با فر به دنبال سرخ کردن کم عمق) بر روی ویژگی‌های کیفی کتلت گوشت مرغ با ترکیبات متفاوت (شاهد، T1 (کتلت گوشت مرغ با ۳۰٪ امولسیون گوشت) و T2 (با ۳٪ آرد گندم بدون سبوس)) بر روی ویژگی‌های مختلف فیزیکی-شیمیایی، رنگی و بافتی و صفات کیفی حسی بررسی شد. به طور کلی پخت با فر به دنبال سرخ کردن کم عمق برای تهیه کتلت گوشت مرغ مطلوب بود (Singh et al., 2015). در پژوهش شیکر (Shaker, 2015)، خلال سیب‌زمینی در دستگاه‌های سرخ کن با هوای داغ در دمای ۱۸۰ درجه سلسیوس برای ۴۰ دقیقه و فرآیند سرخ کردن عمیق در همین دما و زمان، با فاصله هر ۶ دقیقه سرخ شدند. نتایج نشان دادند میزان رطوبت و جذب روغن در سیب زمینی سرخ شده از طریق سرخ کردن با هوای داغ، به طور معنی‌داری کمتر از سیب زمینی سرخ شده در سرخ کردن عمیق بود. روند تغییرات در برخی خواص فیزیکی - شیمیایی مانند اسیدهای چرب آزاد و ارزش پراکسید روغن استخراج شده از سیب زمینی سرخ شده در سرخ کردن عمیق، به طور معنی‌داری بالاتر از روش سرخ کردن با هوا بود و همین‌طور تفاوت معنی‌داری در برتری ویژگی‌های ارگانولپتیک به روش هوای داغ مشاهده شد. در پژوهش دیگر خواص مکانیکی و نوری سیب‌زمینی سرخ شده با هوای داغ بررسی گردیده است. صرف نظر از روش سرخ کردن، پارامترهای کروماتیک a^* و b^* افزایش یافته است. به سبب شدت واکنش‌های مایلارد در سرخ کردن عمیق، افزایش در پارامتر a^* به طور معنی‌داری بیشتر بود و این نشان‌دهنده میزان آکريل امید بیشتر در این روش می‌باشد. در تجزیه و تحلیل بافت نیز ژلاتینه‌شدن ناشسته و تشکیل پوسته در سرخ کردن عمیق در روغن نسبت به سرخ کردن در هوا سریع‌تر رخ داد. سینتیک تغییرات مکانیکی و بافتی در سرخ کردن با هوای داغ در مقایسه با روش عمیق کمتر است (Andres et al., 2014). با توجه به مطالعه پژوهش‌های انجام شده، بررسی شرایط سرخ کردن فیله‌های مرغ با استفاده از هوای داغ و اثر این روش بر کیفیت محصول لازم و ضروری به نظر می‌رسد.

هدف از این مطالعه بررسی اثرات متغیرهای فرآیندی سرخ کردن با هوای داغ (دما، سرعت جریان هوا، زمان) بر روی ویژگی‌های فیله مرغ سرخ شده (میزان رطوبت،

تعریف شده، فرآیند آغشته سازی به روغن به شکل یکسان برای تمامی نمونه‌های مورد آزمون انجام گرفت.

اندازه‌گیری رطوبت

در این تحقیق برای تعیین میزان رطوبت فیله مرغ سرخ شده، از استاندارد AACC شماره A ۴۴-۱۵ استفاده شد (AACC, 1986). به این ترتیب که حدود ۱۸ گرم از نمونه توزین و در آون در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شد و به منظور رسیدن ظرف حاوی نمونه به وزن ثابت در دسیکاتور قرار گرفت تا کاملاً سرد شود. میزان رطوبت نمونه‌ها طبق رابطه (۱) محاسبه شد.

$$\text{رابطه (۱)} = \frac{\text{وزن ثانویه نمونه (گرم)} - \text{وزن اولیه نمونه (گرم)}}{\text{وزن اولیه نمونه (گرم)}} \times 100 = \text{درصد رطوبت}$$

اندازه‌گیری محتوی چربی

برای اندازه‌گیری میزان چربی در فیله‌های مرغ سرخ شده، از روش سوکسله و حلال هگزان طبق استاندارد AOAC شماره 49-BC3 استفاده شد (AOAC, 1997). در این روش ۳ گرم از نمونه خشک شده و فاقد رطوبت توزین شده و داخل کارتوش گذاشته شد و سپس در قسمت استخراج کننده سوکسله قرار داده شد و به مدت ۸ ساعت، روغن نمونه توسط حلال استخراج شد و درصد روغن نمونه بر اساس رابطه (۲) محاسبه شد.

$$\text{رابطه (۲)} = \frac{\text{وزن نمونه (گرم)}}{\text{وزن روغن باقیمانده در بالن (گرم)}} \times 100 = \text{درصد چربی}$$

بررسی تغییرات بافتی و تردی محصول

تردی بافت با استفاده از دستگاه آزمون کشش و فشار (مدل STM-5، سنتام، ایران) با نوک دایره ای شکل و قطر ۴ میلی‌متر و طول ۲۰ میلی‌متر، سرعت نفوذ ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه و فرورفتگی ۱۰ میلی‌متر و با نیروسنج ۲۰ کیلوگرم نیرو با روش آزمون فشار (compression test) اندازه‌گیری شد. نمونه‌های فیله مرغ روی سطح فلزی به قطر ۲۰ سانتی‌متر قرار داده شدند و بیشینه نیروی لازم برای سوراخ کردن نمونه ثبت گردید (Braeckman *et al.*, 2009).

اندازه‌گیری رنگ

تغییرات رنگ در نمونه‌های فراوری شده توسط دستگاه هانتربل (هانتربل، آمریکا) بررسی شد (Garayo & Moreira, 2002). سه شاخص رنگی نمونه‌ها شامل L^* ، a^* ، b^* اندازه‌گیری شدند. a^* رنگ قرمز-سبز، b^* رنگ زرد-آبی و L^* روشنایی را نشان می‌دهد.

ارزیابی حسی

ارزیابی حسی توسط ۱۰ ارزیاب آموزش دیده انجام و از مقیاس هدونیک ۵ امتیازی استفاده شد. نمونه‌ها از لحاظ فاکتورهایی از جمله بافت، رنگ، بو، احساس دهانی، پذیرش کلی ارزیابی شدند. به هر یک از فاکتورهای اشاره شده امتیازی از ۱ تا ۵ اختصاص داده شد. نحوه امتیازدهی بر این اساس بود که عدد ۵ نشان دهنده بالاترین امتیاز و عدد ۱ نشان دهنده پایین‌ترین امتیاز بود (Serdaroglu *et al.*, 2007). نتایج حاصل از انجام ارزیابی حسی بر روی نمونه‌های فیله مرغ سرخ شده با هوای داغ، با نرم‌افزار Minitab تحلیل شد.

تجزیه و تحلیل آماری

به منظور انجام تجزیه و تحلیل آماری نتایج به دست آمده از آزمون‌ها، از نرم‌افزار Design Expert نسخه ۱۰ و برای تعیین شرایط بهینه فراوری فیله مرغ سرخ شده از روش آماری سطح پاسخ استفاده شد. متغیرهای مستقل در این آزمون سه عامل دما، سرعت دمنده هوا و زمان است که با انجام پیش آزمون سطوح بالا و پایین آنها تعیین گردید و در مجموع ۲۰ آزمایش هر کدام در سه تکرار برای این متغیرها انجام شد. سطوح متغیرهای مستقل به صورت حقیقی و کد شده در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- سطوح متغیرهای مستقل فرآیند سرخ کردن با هوای داغ و کدهای مربوطه

Table 1- Levels of independent variables of hot air frying process and related codes

Independent variable	Math symbol	Code		
		-۱	۰	+۱
Time(min)	X1 (A)	۱۰	۲۰	۳۰
Temp(C°)	X2 (B)	۱۶۰	۱۸۰	۲۰۰
Air flow speed (m/s)	X3 (C)	۱/۵	۲/۵	۳/۵

یافته‌ها

تاثیر شرایط فرآیند سرخ کردن با هوای داغ بر محتوی رطوبت

برای برآزش داده‌های حاصل از رطوبت نمونه‌های تولیدی مدل چند جمله‌ای ساده (2FI) نسبت به مدل‌های پیشنهادی مدل بهتری بود (جدول ۲). با توجه به جدول ۲، تاثیر دو متغیر دما و زمان فرآیند سرخ کردن با هوای داغ تاثیر معنی‌داری بر روی محتوی رطوبتی فیله‌های مرغ سرخ شده نشان داد ($p < 0.05$). با افزایش سرعت جریان

هوا، میزان رطوبت نمونه‌ها به صورت غیرمعنی‌داری کاهش یافت. با توجه به شکل ۱، محتوی رطوبتی فیله‌های مرغ سرخ شده با افزایش دما و زمان فرآیند سرخ کردن با هوای داغ کاهش یافت، زیرا با افزایش دما میزان بیشتری از رطوبت از محصول خارج شده و همچنین با گذشت زمان فرصت بیشتری برای خروج آب از محصول به وجود می‌آید. میزان رطوبت به طور مستقیم وابسته به دما و زمان سرخ کردن است (Bravo et al., 2009).

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس (ANOVA) مدل سطح پاسخ برای شاخص محتوی رطوبت

Table 2- Results of analysis of variance (ANOVA) of the response surface model for moisture content

Source	Sum of Squares	Degree of freedom	Mean Square	F-value	p-value
Model	303.50	6	2.73	2.73	0.0311
A-time	1.43	1	0.077	0.077	0.02857
B-Temperature	0.54	1	0.029	0.029	0.03668
C-air flow speed	20.81	1	1.12	1.12	0.03088
AB	89.02	1	4.80	4.80	0.0473
AC	27.72	1	1.49	1.49	0.02432
BC	163.98	1	8.84	8.84	0.0108
A ²	241.08				
B ²	164.90		1.35	1.35	0.03849
C ²	76.18				
Lack of Fit	544.58	8			
Error	303.50	5	2.73	2.73	

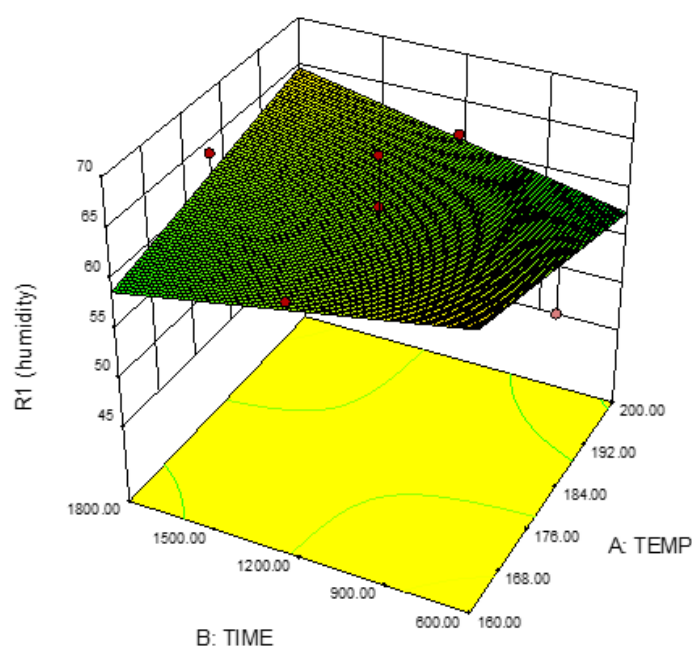


Figure 1- Three dimensional display of the effect of time and temperature on the moisture content of fried chicken fillet.

شکل ۱- نمایش سه بعدی اثر زمان و دما بر محتوی رطوبت فیله مرغ سرخ شده با هوای داغ.

بهبودسازی شرایط سرخ کردن فیله‌های مرغ با استفاده از هوای داغ به روش سطح پاسخ

افزایش سرعت جریان هوا، فشار بخار محیط کاهش یافته و رطوبت محصول با مانع کمتری از محصول خارج شده و روغن جایگزین رطوبت محصول می‌گردد.

- تاثیر شرایط فرآیند سرخ کردن با هوای داغ بر تردی محصول

بر اساس جدول ۴، نتایج آماری نشان می‌دهد که تاثیر متغیرهای دما و زمان سرخ کردن با هوای داغ بر بافت و تردی محصول نهایی معنی دار است ($p < 0.05$). با توجه به شکل ۳، با افزایش دما و زمان سرخ کردن، میزان سفتی نمونه‌ها به طور معنی‌داری افزایش یافت که ناشی از تشکیل پوسته و کاهش میزان رطوبت نمونه‌ها بود.

- تاثیر شرایط فرآیند سرخ کردن با هوای داغ بر محتوی چربی

بر اساس جدول ۳، نتایج آماری نشان می‌دهد که متغیرهای سرعت جریان هوا، دما و زمان فرآیند سرخ کردن با هوای داغ تاثیر معنی‌داری بر روی محتوی چربی فیله‌های مرغ سرخ شده داشت ($p < 0.05$). با توجه به شکل ۲ افزایش دما یا زمان فرآیند سرخ کردن با هوای داغ سبب افزایش محتوی چربی در فیله مرغ سرخ شده گردید. همچنین اثر متقابل این دو فاکتور می‌تواند در این روند تاثیرگذار باشد، زیرا هر چه زمان فرآیند سرخ کردن در دمای بالا طولانی‌تر شود، فرآورده نهایی روغن بیشتری جذب می‌کند و این نشان می‌دهد که میزان محتوی روغن در فیله‌های مرغ سرخ شده تابعی از دما و زمان سرخ کردن است. همچنین با

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس (ANOVA) مدل سطح پاسخ چند جمله‌ای درجه دوم برای شاخص درصد چربی

Table 3- Results of analysis of variance (ANOVA) of quadratic polynomial response surface model for fat percentage index

Source	Sum of Squares	Degree of freedom	Mean Square	F-value	p-value
Model	26.59	6	4.43	2.52	0.0368
A-time	4.40	1	4.40	2.50	0.01379
B-Temperature	0.25	1	0.25	0.14	0.04103
C-air flow speed	0.24	1	0.24	0.14	0.02178
AB	2.05	1	2.05	1.16	0.03002
AC	1.68	1	1.68	0.95	0.03467
BC	17.97	1	17.97	10.21	0.0070
A ²	22.88	13	1.76		
B ²	17.39	8	2.17	1.98	0.2343
C ²	5.49	5	1.10		
Lack of Fit	49.47	19			
Error	26.59	6	4.43	2.52	

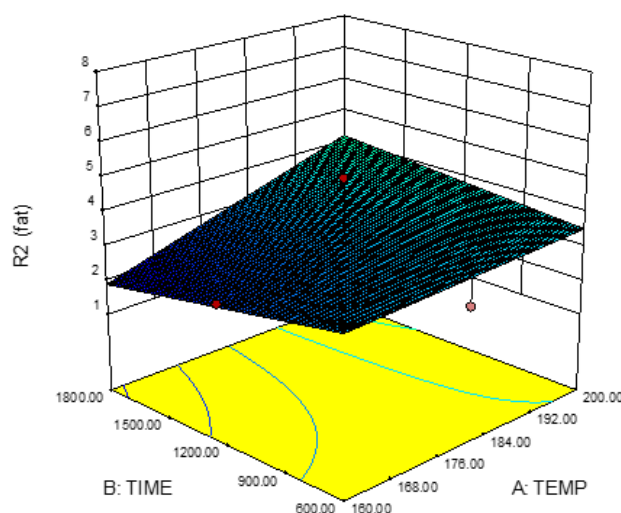


Figure 2- Three dimensional display of the effect of time, temperature on the fat content of fried chicken fillet

شکل ۲ - نمایش سه بعدی اثر زمان، دما بر میزان جذب روغن فیله مرغ سرخ شده با هوای داغ.

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس (ANOVA) مدل سطح پاسخ چند جمله‌ای درجه دوم برای شاخص تردی فیله مرغ سرخ شده

Table 4- The results of the analysis of variance (ANOVA) of the quadratic polynomial response surface model for the crispy index of fried chicken fillet

Source	Sum of Squares	Degree of freedom	Mean Square	F-value	p-value
Model	7.19	9	0.7989	5.52	0.0090
A-time	0.3419	1	0.3419	2.36	0.0158
B-Temperature	1.56	1	1.56	10.79	0.0094
C-air flow speed	0.5527	1	0.5527	3.82	0.0823
AB	0.8653	1	0.8653	5.98	0.0370
AC	0.5666	1	0.5666	3.92	0.0791
BC	0.4945	1	0.4945	3.42	0.0975
A ²	1.22	1	1.22	8.45	0.0174
B ²	2.42	1	2.42	16.74	0.0027
C ²	0.0065	1	0.0065	0.0447	0.8372
Lack of Fit	0.7681	5	0.1536	0.4584	1.15
Error	0.5335	4	0.1334	-	-

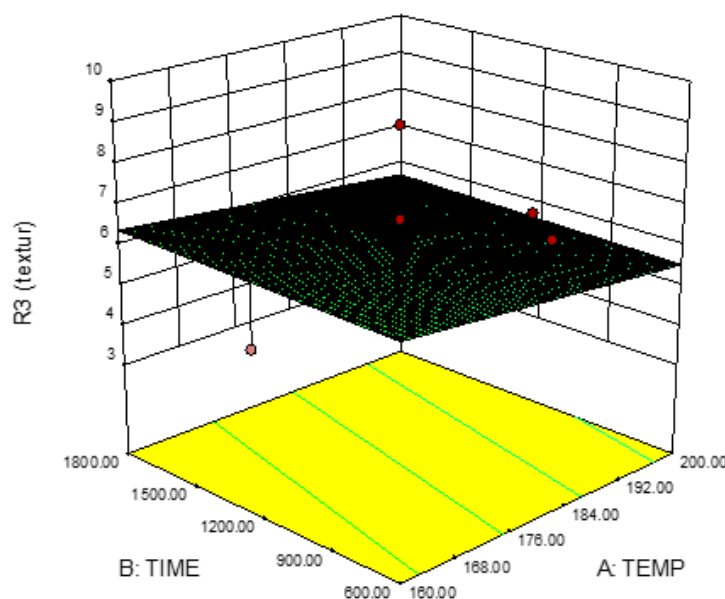


Figure 3- Three dimensional display of the effect of time and temperature on the crispiness of fried chicken fillet. شکل ۳- نمایش سه بعدی اثر زمان و دما بر تردی فیله مرغ سرخ شده با هوای داغ.

میزان روشنایی آن تغییر کرد که الگوی این تغییرات به شدت تحت تأثیر زمان سرخ کردن است.

- تأثیر شرایط فرآیند سرخ کردن با هوای داغ بر تغییرات شاخص a^*

با توجه به جدول ۶ نتایج آماری نشان می‌دهد با افزایش زمان و دمای سرخ کردن، شاخص a^* فیله‌های مرغ سرخ شده افزایش یافت، ولی سرعت جریان هوا تأثیر معنی‌داری

- تأثیر شرایط فرآیند سرخ کردن با هوای داغ بر شاخص L^*

با توجه به جدول ۵، نتایج آماری نشان می‌دهد با افزایش زمان و دمای فرآیند سرخ کردن با هوای داغ، شاخص L^* فیله‌های مرغ کاهش یافت، ولی سرعت جریان هوا تأثیر معنی‌داری بر این شاخص نداشت. همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود، با افزایش مدت زمان سرخ کردن به علت تغییرات فیزیکی و شیمیایی که در پوسته اتفاق افتاد،

بهبودسازی شرایط سرخ کردن فیله‌های مرغ با استفاده از هوای داغ به روش سطح پاسخ

با توجه به جدول ۷، نتایج آماری نشان می‌دهد با افزایش زمان و دمای فرآیند سرخ کردن، شاخص b^* فیله‌های مرغ سرخ شده با هوای داغ افزایش یافت. ولی سرعت جریان هوا تأثیر معنی‌داری بر این شاخص نداشت. با توجه به شکل ۶، مقدار تغییرات این پارامتر طی فرآیند سرخ کردن با هوای داغ، از مقادیر منفی به مقادیر مثبت بیانگر تغییر رنگ از آبی به زرد بود.

بر این شاخص نداشت. با توجه به شکل ۵، طی فرآیند سرخ کردن مقدار a^* از مقدار منفی به مقادیر مثبت تغییر کرد. این امر بدان معنی است که تحت شرایط سرخ کردن عمیق و هوای داغ، رنگ نمونه‌ها به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای a^* به سمت قرمز تغییر می‌کند.

تأثیر شرایط فرآیند سرخ کردن با هوای داغ بر تغییرات شاخص b^*

جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس (ANOVA) مدل سطح پاسخ چند جمله‌ای درجه دوم برای L^*

Table 5- Results of analysis of variance (ANOVA) of quadratic polynomial response surface model for L^*

Source	Sum of Squares	Degree of freedom	Mean Square	F-value	p-value
Model	7.19	9	0.7989	5.52	0.0090
A-time	0.3419	1	0.3419	2.36	0.0158
B-Temperature	1.56	1	1.56	10.79	0.94
C-air flow speed	0.5527	1	0.5527	3.82	0.0823
AB	0.8653	1	0.8653	5.98	0.0370
AC	0.5666	1	0.5666	3.92	0.0791
BC	0.4945	1	0.4945	3.42	0.0975
A ²	1.22	1	1.22	8.45	0.0174
B ²	2.42	1	2.42	16.74	0.0027
C ²	0.0065	1	0.0065	0.0447	0.8372
Lack of Fit	0.7681	5	0.1536	0.4584	1.15
Error	0.5335	4	0.1334	-	-

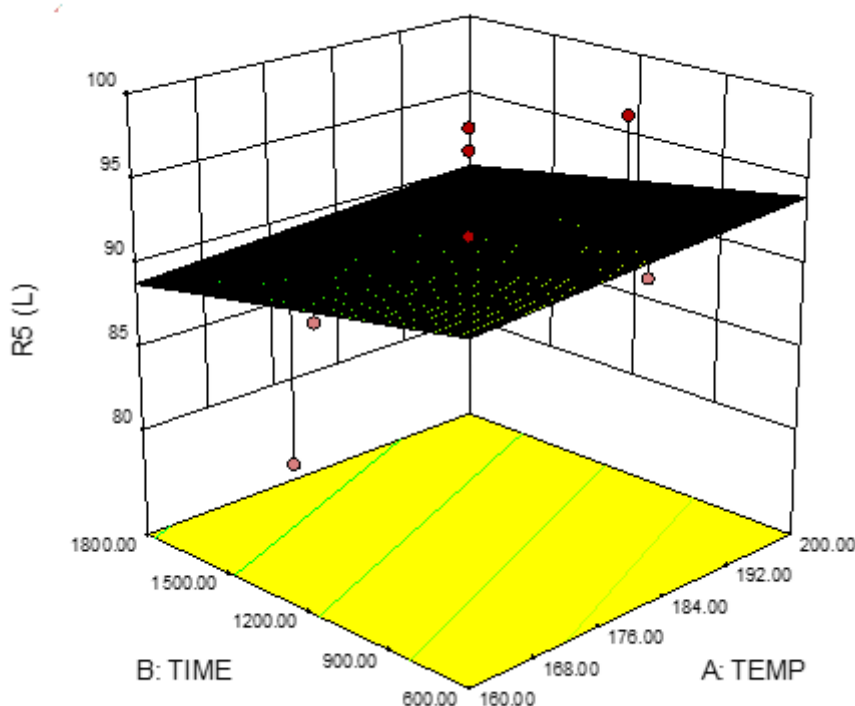


Figure 4- Three-dimensional display of the effect of Time - temperature on the L^* value of fried chicken fillet. شکل ۴- نمایش سه بعدی اثر زمان - دما بر شاخص L^* فیله‌های مرغ سرخ شده با هوای داغ.

جدول ۶- نتایج تجزیه واریانس (ANOVA) مدل سطح پاسخ چند جمله‌ای درجه دوم برای پارامتر a^* فیله‌های مرغ سرخ شده با هوای داغ

Table 6- The results of analysis of variance (ANOVA) of quadratic polynomial response surface model for a^* of hot air fried chicken fillets

Source	Sum of Squares	Degree of freedom	Mean Square	F-value	p-value
Model	165.95	6	18.44	3.75	0.0309
A-time	46.21	1	46.21	9.41	0.0134
B-Temperature	1.89	1	1.89	0.3846	0.5505
C-air flow speed	4.54	1	4.54	0.9238	0.3616
AB	13.86	1	13.86	2.82	0.1273
AC	13.02	1	13.02	2.65	0.1380
BC	6.09	1	6.09	1.24	0.2944
A ²	15.57	13	15.57	3.17	0.1087
B ²	3.96	8	3.96	0.8059	0.3927
C ²	24.66	5	24.66	5.02	0.0518
Lack of Fit	33.54	19	6.71	2.51	3.55
Error	10.68	6	2.67	-	-

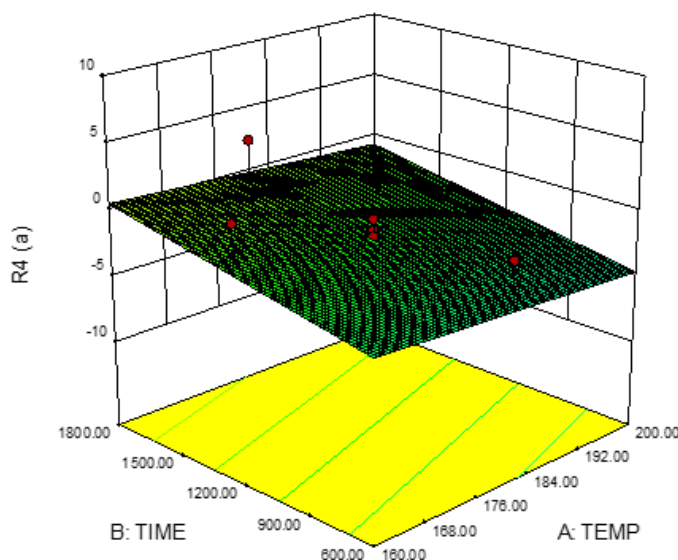


Figure 5- Three-dimensional display of the effect of Time-temperature on the a^* value of fried chicken fillet.
شکل ۵- نمایش سه بعدی اثر زمان-دما بر مقدار a^* فیله‌های مرغ سرخ شده با هوای داغ.

جدول ۷- نتایج تجزیه واریانس (ANOVA) مدل سطح پاسخ چند جمله‌ای درجه دوم برای رنگ فیله‌های مرغ سرخ شده با هوای داغ

Table 7- The results of analysis of variance (ANOVA) of quadratic polynomial response surface model for the color of hot air fried chicken fillets

Source	Sum of Squares	Degree of freedom	Mean Square	F-value	p-value
Model	237.68	9	26.41	11.31	0.0006
A-time	6.91	1	6.91	2.96	0.01196
B-Temperature	0.7290	1	0.7290	0.3123	0.5899
C-air flow speed	94.68	1	94.68	40.55	0.03
AB	0.4418	1	0.4418	0.1892	0.06738
AC	31.44	1	31.44	13.47	0.0052
BC	8.12	1	8.12	3.48	0.0951
A ²	0.0200	1	0.0200	0.0086	0.9282
B ²	0.0398	1	0.0398	0.0170	0.020
C ²	52.08	1	52.08	22.31	0.11
Lack of Fit	19.53	5	3.91	10.52	5.75
Error	1.48	4	0.3712	-	-

بهینه‌سازی شرایط سرخ کردن فیله‌های مرغ با استفاده از هوای داغ به روش سطح پاسخ

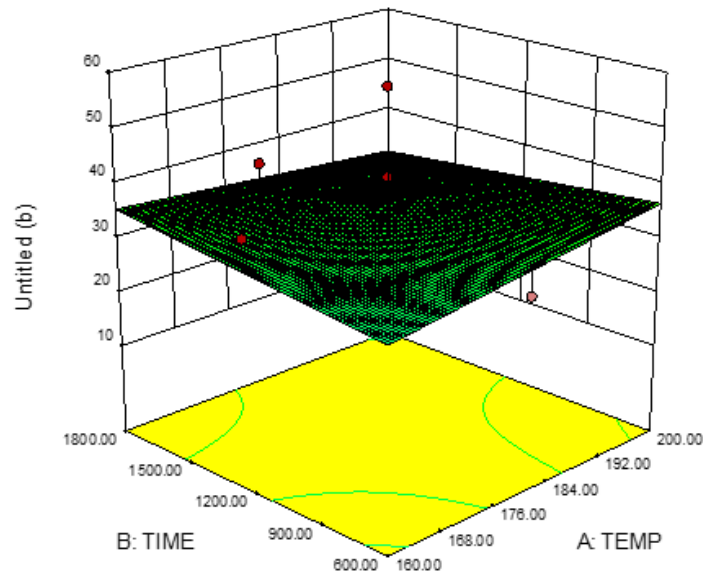


Figure 6. Three-dimensional display of the effect of Time-temperature on the b* value of fried chicken fillet.

شکل ۶- نمایش سه بعدی اثر زمان، دما بر رنگ (b*) فیله‌های مرغ سرخ شده با هوای داغ

دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس، زمان ۱۰/۸۷ دقیقه و سرعت دمنده ۱/۵ متر بر ثانیه بود.

بحث

محتوی رطوبتی فیله‌های مرغ سرخ شده با افزایش دما و زمان فرآیند سرخ کردن با هوای داغ کاهش یافت، زیرا با افزایش دما میزان بیشتری از رطوبت از محصول خارج شده و همچنین باگذشت زمان فرصت بیشتری برای خروج آب از محصول به وجود می‌آید. سازوکار کاهش رطوبت طی سرخ کردن پیچیده است و این اتفاق از راه‌های مختلفی مثل انتشار مولکولی، موینگی و جریان فشار صورت می‌گیرد (Pedreschi *et al.*, 2007). در مجموع اکثر ترکیبات غذایی شامل اجزای متفاوتی از ساختارهای ناهمگن، هیگروسکوپیک و منافذ موینه با ساختارهای خالی معینی هستند که انتقال جرم (رطوبت و روغن) را طی فرایند حرارت دهی کنترل می‌کنند (Kassama & Ngadi, 2005). در این فرایندها از دست رفتن آب اغلب در دمای بالای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد. بخار آب نقاط ضعیف را در سطح ماده غذایی می‌یابد که باعث شکل‌گیری مسیر موینگی و افزایش تخلخل سطح می‌شود. علاوه بر این، مقداری از این بخار می‌تواند به علت انتشار بین یاخته‌ای محدود و توسعه در درون منافذ باقی

ارزیابی حسی

مقایسه‌ی میانگین امتیازها در مورد هر کدام از فاکتورهای ارزیابی حسی محصول در شکل ۷ نشان داده شده اند. بالاترین میانگین امتیاز، مربوط به فاکتور رنگ می باشد. رنگ فیله مرغ سرخ شده، مرغوب‌ترین فاکتور از نظر ارزیابها بوده است و با توجه به تحلیل آماری توسط آنالیز نرم‌افزار Minitab بین میانگین هیچ یک از فاکتورهای مورد ارزیابی اختلاف معنی‌داری وجود نداشت.

بهینه‌یابی فرآیند سرخ کردن فیله‌های مرغ با هوای داغ و مقایسه نمونه‌های تولیدی این روش

با نمونه‌های حاصل از سرخ کردن عمیق

شرایط عملیاتی بهینه برای تمام متغیرها با استفاده از تکنیک بهینه‌سازی عددی در جدول ۸ بیان شده است. این بهینه‌سازی به منظور رسیدن به محصولی با ویژگی‌های مطلوب برای کاربرد در محصولات غذایی انجام شده است. باتوجه به نتایج این پژوهش، در فرآیند سرخ کردن با هوای داغ، میزان رطوبت فیله‌های مرغ با افزایش دما و زمان کاهش یافت. افزایش دما و زمان فیله‌های مرغ سرخ شده با هوای داغ موجب افزایش سفتی بافت گردید. محتوی چربی فیله‌های سرخ شده با افزایش دما و زمان بالا رفت. شرایط بهینه جهت سرخ کردن با هوای داغ فیله‌های مرغ

۱۰۶

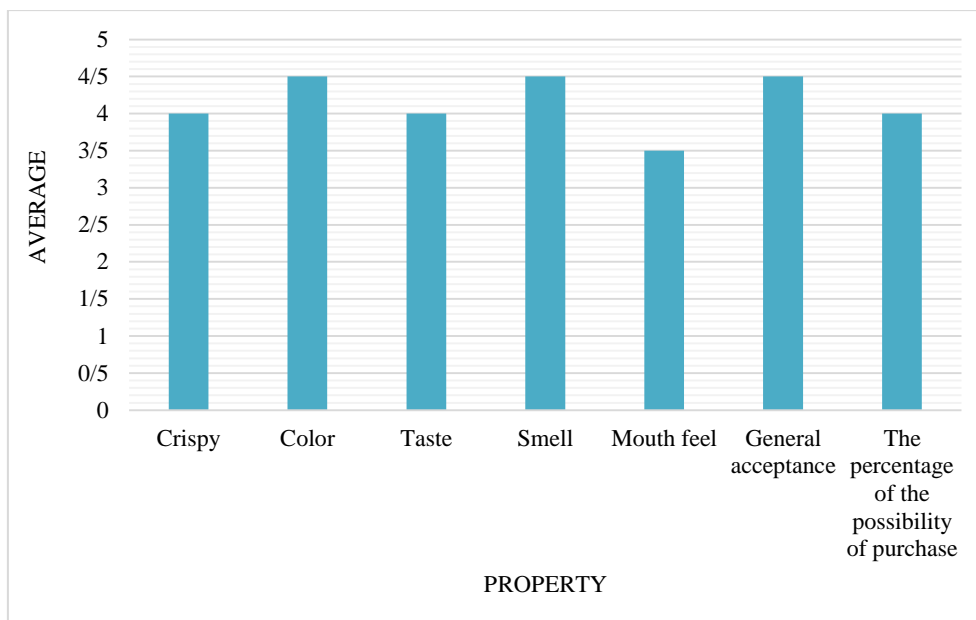


Figure7- Sensory evaluation results of fried chicken fillet.

شکل ۷- نتایج ارزیابی حسی فیله مرغ سرخ شده.

جدول ۸- نتایج بهینه‌یابی فرآیند سرخ کردن فیله مرغ سرخ شده در هوای داغ

Table 8- The results of optimizing the frying process of fried chicken fillet in hot air

Parameter	Optimal Selection Conditions	Optimal Values are Selected
Time (min)	In range	10.87
Temperature (°C)	In range	600
air flow speed (m/s)	In range	1.5
Humidity content (%)	Minimum	49.88
Crispiness(N)	Maximum	4.73
Fat content (%)	Minimum	4.38
the color L^*	Maximum	-6.93
the color a^*	Minimum	95.99
the color b^*	In range	50.65

۱۰۷

بیشتری برای خروج رطوبت وجود دارد. Alvis و همکاران (2009) فرآیند انتقال جرم را تابعی از زمان و دما در فرآیند سرخ کردن دانستند و بیان کردند که با افزایش دما و زمان سرخ کردن رطوبت کاهش می‌یابد. Pang و همکاران (2021) نیز به این نتیجه رسیدند که افزایش دما و زمان سرخ کردن در فیله مرغ باعث افزایش انتقال جرم و کاهش رطوبت شد. Andrés و همکاران (2012) در مطالعه‌ای که بر روی سیب‌زمینی سرخ‌شده به روش عمیق و هوای داغ داشتند اعلام کردند که در زمان‌های یکسان، نمونه‌هایی که به روش عمیق سرخ‌شده بودند رطوبت بیشتری از دست داده‌اند. هرچند که ممکن است در پایان فرآیند سرخ کردن به علت طولانی‌تر بودن زمان فرآیند در روش هوای داغ (که تا ۱۵ دقیقه بیشتر از روش عمیق است) ممکن است

بماند و فوق گرم شود و در نتیجه دیوار منافذ را تخریب کرده و در تخلخل ماده‌ی غذایی تغییر ایجاد کند (Kalogianni & Smith, 2013). Krokida و همکاران (۲۰۰۱) نیز طی پژوهشی با اشاره به معادلات فیک و آرنیوس به این نتیجه دست یافتند که فرآیند انتقال جرم تابعی از زمان و دمای سرخ کردن می‌باشد، همچنین دمای سرخ کردن می‌تواند تأثیر معناداری بر روی کاهش میزان آب داشته باشد، در واقع آن‌ها بیان نمودند با افزایش دما طی سرخ کردن رطوبت کاهش می‌یابد که با نتایج تحقیق حاضر مطابقت داشت. میزان رطوبت به طور مستقیم وابسته به دما و زمان سرخ کردن است. با افزایش دما، انرژی بیشتری به نمونه‌ها وارد می‌شود و سرعت تبخیر آب افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش زمان سرخ کردن، زمان

بهبودسازی شرایط سرخ کردن فیله‌های مرغ با استفاده از هوای داغ به روش سطح پاسخ

زمان سرخ کردن سبب کاهش محتوای رطوبت نمونه‌ها شد. این روند کاهشی در ابتدای فرآیند سرخ کردن سریع‌تر بود، که این امر به خاطر حذف رطوبت سطحی است. روند مشابهی توسط برخی از پژوهشگران طی فرآیند سرخ کردن عمیق و هوای داغ گزارش شده است (Yu, Li *et al.*, 2021; Fang *et al.*, 2020; Ding و همکاران (2022) در مطالعه‌ای که بر روی سرخ کردن عمیق و سرخ کردن با هوای داغ بر روی فیله‌های نوعی ماهی اقیانوسی به نام *Trichiurus lepturus* انجام دادند اعلام کردند که زمان سرخ کردن طولانی‌تر ممکن است باعث از دست رفتن رطوبت بیشتر در همان روش سرخ کردن شود. همچنین در طی مراحل اولیه فرآیند سرخ کردن، میزان رطوبت در نمونه‌ها کاهش می‌یابد که صرفنظر از نوع روش سرخ کردن نسبت به زمان‌های بعدی کاهش رطوبت با سرعت بسیار بیشتری انجام می‌گیرد. افزایش زمان سرخ کردن باعث می‌شود دمای سطح فیله‌های ماهی به سرعت بالا رود که این امر باعث تشکیل یک لایه خشک بر روی سطح فیله‌ها می‌شود و این امر می‌تواند به حفظ رطوبت داخلی بافت فیله ماهی در طی سرخ کردن کمک کند. انتقال حرارتی توسط روغن به علت عمل مویرگی روغن داغ نسبت به هوای داغ سریع‌تر صورت می‌گیرد. همچنین کاهش رطوبت در روش سرخ کردن عمیق با روغن بیشتر از روش سرخ کردن با هوای داغ است (Ding *et al.*, 2022). در پژوهش Liu و همکاران (2022) بر روی استیک‌های ماهیان خاویار دیده شد با افزایش دما طی سرخ کردن با هوا داغ، میزان رطوبت سطح استیک ماهیان خاویاری به طور چشمگیری کاهش یافت و رطوبت بافت داخلی به خوبی حفظ شده بود. که مشابه با مطالعه حاضر است. Zhou و همکاران (2012) با مطالعه بر روی گوشت میگوی سرخ شده به روش عمیق و سرخ شده با هوای داغ به این نتیجه رسیدند در روش سرخ کردن با هوای داغ در مقایسه با روش عمیق، رطوبت و محتوای چربی گوشت میگو سرخ شده در هوا کمتر بود.

افزایش دما یا زمان سرخ کردن سبب افزایش محتوای چربی در فیله مرغ سرخ شده با هوای داغ می‌شود. همچنین اثر متقابل این دو فاکتور می‌تواند در این روند تاثیرگذار باشد، زیرا هر چه زمان فرآیند سرخ کردن با هوای داغ در دمای بالا طولانی‌تر شود، فرآورده نهایی روغن بیشتری

رطوبت نهایی کمتر از روش عمیق شود. Tourell و همکاران (۲۰۱۸) نیز در تحقیقی مشابه سیب‌زمینی را به دو روش عمیق و هوای داغ در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه سرخ کردند. آن‌ها نیز دریافتند که روش عمیق باعث کاهش بیشتر رطوبت می‌شود. البته تفاوت رطوبت بین دو نمونه سرخ‌شده طی کل زمان سرخ شدن یکسان نبود. بیشترین اختلاف بین نمونه‌های سرخ‌شده به این دو روش از زمان ۲/۵ تا ۱۵ دقیقه بود و حدود ۱۰۰ گرم آب به ازای ۱۰۰ گرم ماده خشک بدون چربی بود که با افزایش زمان سرخ کردن این تفاوت کاهش یافت، به طوری که در پایان فرآیند (دقیقه‌ی سی‌ام) به کمتر از ۲۰ گرم آب به ازای ۱۰۰ گرم ماده خشک بدون چربی می‌رسید. محققان دیگر نیز به نتایج مشابهی دست یافتند. Rady و همکاران (۲۰۱۹) در بررسی انتقال جرم طی سرخ کردن با هوای داغ بیان نمودند، میزان جذب روغن در هوای داغ با افزایش دما و زمان حرارت دادن کاهش یافت در واقع حین سرخ کردن رطوبت از دست می‌رود و روغن جایگزین می‌گردد. با افزایش دما، محتوای رطوبت در زمان‌های یکسان سرخ کردن کاهش می‌یابد زیرا افزایش دما منجر به افزایش انرژی جنبشی مولکول‌های آب می‌شود و در نتیجه، افت رطوبت به شکل بخار آب سریع‌تر می‌شود و محتوای رطوبت فرآورده کاهش می‌یابد (Farinu and Baik 2005). دمای سرخ کردن بر محتوای رطوبت نمونه‌های سینه مرغ سرخ‌شده اثر چشمگیری داشت به طوری که با افزایش دمای سرخ کردن، میزان رطوبت باقیمانده در نمونه‌ها کاهش یافت. بر این مبنا کمترین رطوبت در زمان‌های یکسان از فرآیند سرخ شدن در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد. عبدالرحمان و همکاران (۲۰۱۶) برای سیب‌زمینی شیرین سرخ‌شده همین حالت را گزارش کردند. به طور کلی انتقال جرم بستگی به ساختار یا توزیع منافذ و گسترش ریزساختارها دارد. دمای بالا شدت انتقال رطوبت را افزایش می‌دهد و متعاقباً منافذ دچار تغییر شکل می‌شوند. هرچند که مشخص شده طی فرآیند حرارت دهی در دمای بالا ممکن است منافذ جدیدی در ماده غذایی ایجاد می‌شود و ساختار منافذ قبلی تغییر کند، اما جزئیات آن هنوز مشخص نشده است (Gouyo *et al.*, 2021). زمان سرخ کردن نیز بر کاهش رطوبت تأثیر چشمگیری داشت. همان‌طور که انتظار می‌رفت، افزایش

جذب می‌کند و این نشان می‌دهد که میزان محتوی روغن در فیله‌های مرغ سرخ شده تابعی از دما و زمان سرخ کردن است. همچنین با افزایش سرعت جریان هوا فشار بخار محیط کاهش می‌یابد و رطوبت محصول با مانع کمتری از محصول خارج شده و روغن جایگزین رطوبت محصول می‌گردد (Teruel *et al.*, 2015). مطالعات پیشین تایید می‌کنند که در حین سرخ کردن، بخار آب از محصول به روغن داغ منتقل شده و روغن داغ به طور همزمان به داخل محصول نفوذ می‌کند. محتوای نهایی روغن محصول بستگی به میزان رطوبت باقی مانده در محصول دارد. سرخ کردن در دماهای بالاتر موجب کاهش محتوای رطوبت محصول و جایگزینی روغن با رطوبت تبخیر شده از محصول گشته و در نهایت سبب افزایش میزان روغن باقیمانده در محصول می‌گردد (Teruel *et al.*, 2015). تحقیقات انجام شده نشان داده، ثابت سرعت جذب روغن (K0) با افزایش دما افزایش می‌یابد. از طرف دیگر ثابت‌های به دست آمده برای جذب روغن نسبت به ثابت‌های مربوط به کاهش رطوبت، دارای مقادیر بزرگتری هستند، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که طی فرآیند سرخ کردن، جذب روغن سریع‌تر از خروج رطوبت محصول صورت می‌گیرد. البته خروج رطوبت، طی سرخ کردن و در اثر انتقال حرارت از روغن داغ به فیله مرغ اتفاق می‌افتد که این امر با افزایش دمای منجر به افزایش تخلخل محصول می‌گردد، اما جذب روغن صرفاً یک پدیده سطحی است که در پایان سرخ کردن و هنگام خروج محصول رخ می‌دهد. در واقع خلا ایجاد شده در اثر کندانس شدن بخار هنگام خروج از سرخ کردن و مکش موئینگی عامل اصلی جذب روغن هستند. بنابراین خروج رطوبت و جذب روغن طی سرخ کردن سینه مرغ، دو پدیده غیر هم زمان و در ارتباط با یکدیگر هستند (Abd Rahman *et al.*, 2016). در طول سرخ کردن معمولی، محصول در تماس کامل با روغن است و به طور موثر آبیگری و خروج آب انجام می‌شود. در مقابل، در فرآیند سرخ کردن با هوای داغ، محصول فقط اندکی با روغن در تماس است و از آنجایی که هوا منبع گرما بوده، فرآیند خروج آب و جابه جایی رطوبت با روغن به اندازه فرآیند سرخ کردن معمولی کارآمد نیست (Pedreschi, 2012). Tian و همکاران (2017) مشاهده کردند که برش‌های سیب زمینی سرخ شده در هوا

روغن بسیار کمتری (۱۵٪) نسبت به برش‌های سرخ شده معمولی (۳۴٪) جذب کردند. ریزساختارها بین نمونه‌های سرخ شده در هوا و نمونه‌های سرخ شده معمولی کاملاً متفاوت بود. Jin و همکاران (2021) طی پژوهشی بر روی کوفته سمندر غول پیکر (با عنوان "بچه ماهی" شناخته شده است و بزرگ‌ترین دوزیست در جهان است)، به این نتیجه رسیدند که فرآیند سرخ کردن عمیق کوفته سمندر غول پیکر نه تنها باعث از دست دادن آب شد، بلکه بخشی از چربی سرخ کردنی را جذب کرده و در نتیجه چربی نهایی حاصل از روش عمیق بیشتر از روش سرخ کردن با هوای می‌باشد. تبخیر رطوبت به وسیله انتقال حرارت در طی فرآیند سرخ کردن باعث ایجاد فضاهای خالی در ماده غذایی می‌شود (Kim *et al.*, 2011). فضاها و ترک‌هایی که به دلیل فرار بخار ایجاد می‌شوند، با روغن پر می‌شوند. از دست دادن رطوبت به طور قابل توجهی با جذب روغن ارتباط دارد. همچنین نتایج نشان داد با افزایش زمان سرخ کردن، جذب روغن به طور معنی‌داری افزایش یافت، که این نتایج در تطابق با یافته‌های ساهین و همکاران (Sahin *et al.*, 2005) در مطالعه بر روی ناگت مرغ است. به طور کلی جذب روغن بیشتر، در نمونه‌های با محتوای رطوبت پایین‌تر (نمونه‌هایی که در طی سرخ کردن رطوبت بیشتری را از دست داده اند) مشاهده شد. این نتایج رابطه‌ی بین میزان حذف رطوبت و جذب روغن را تایید می‌کند. نتایج مشابهی توسط بسیاری از محققان گزارش شده است (Akdeniz *et al.*, 2006; Salvador *et al.*, 2005) پژوهشگران متعددی به این نتیجه رسیده‌اند که در روش سرخ کردن عمیق بین ۶۴٪ تا ۹۰٪ روغن در هنگام سرد شدن محصول سرخ‌شده به آن نفوذ می‌کند. هنگام سرد شدن محصول و کاهش دما به زیر نقطه‌ی جوش، بخار آب کندانس می‌شود و در اثر گرادیان فشار ایجادشده بین سطح و بخش‌های داخلی فرآورده‌ی سرخ‌شده مکش روغن به داخل اتفاق می‌افتد (Fikry, 2021). در روش عمیق محصول موردنظر با مقدار زیادی روغن در تماس است ولی در روش هوای داغ این مقدار بسیار کمتر است که قبل از سرخ شدن روی آن پاشیده می‌شود. این امر باعث می‌شود که بعد از فرآیند سرخ شدن مقدار کمی روغن در سطح فرآورده باقی‌مانده باشد (حدود ۱۰٪ از میزان روغن پاشیده شده روی فرآورده) و در نتیجه جذب روغن کاهش می‌یابد،

بهبودسازی شرایط سرخ کردن فیله‌های مرغ با استفاده از هوای داغ به روش سطح پاسخ

فرآیند می‌شود (Teruel, 2015).

تغییرات بافت محصولات سرخ شده ممکن است به عمل مشترک انتقال گرما و جرم و واکنش‌های شیمیایی رخ داده در فرآیند سرخ کردن بستگی داشته باشد. تغییرات بافتی عمدتاً به دلیل غیر طبیعی شدن پروتئین، تبخیر آب و قهوه‌ای شدن بافت است. این تغییرات تا حد زیادی بر دوست داشتن مصرف کنندگان در محصولات تأثیر می‌گذارد. با افزایش دما و زمان فرآیند سرخ کردن میزان سفتی نمونه‌ها افزایش یافت که دلیل این امر کاهش میزان رطوبت نمونه‌ها و تشکیل لایه سطحی گوشت مرغ به تدریج در طی فرآیند سرخ کردن با هوا و ایجاد یک پوسته سخت می‌باشد. گزارش شده است که استفاده از دماهای بالاتر موجب کاهش مقدار رطوبت در پوسته محصولات سرخ‌شده می‌شود. اگر دمای محیط طی سرخ کردن بیشتر از دمای اشباع آب باشد، رطوبت محصول تبخیر می‌شود. از آنجایی که پوسته در تماس مستقیم با روغن سرخ کردنی است، دمای آن بسیار بیشتر از دمای اشباع آب است و موجب خروج سریع‌تر رطوبت نسبت به بخش‌های مرکزی می‌شود. از آنجایی که دمای آب نمی‌تواند بیشتر از دمای اشباع باشد، گرمای اضافی، سرعت تبخیر رطوبت را افزایش می‌دهد (Shyu and Hwang, 2001). استفاده از دما و زمان کمتر همچنین می‌تواند ساختار پروتئین‌ها را نیز متورم کند که تمامی این عوامل سبب کاهش سفتی بافت خواهد شد که این سفتی کمتر بافت به معنی تردتر بودن بیشتر نمونه‌ها می‌باشد. در پژوهش Liu و همکاران (2022) بر روی استیک‌های ماهیان خاویار دیده شد وقتی دما از ۱۳۰ به ۱۹۰ درجه سلسیوس و زمان از ۱۵ به ۲۰ دقیقه افزایش یافت، میزان تردی نیز افزایش می‌یابد که مشابه با مطالعه حاضر است.

رنگ اولین پارامتر کیفی است که توسط مصرف کننده مورد توجه قرار می‌گیرد و در پذیرش آن موثر است. این ویژگی بصری عمدتاً تحت تأثیر نوع روغن، تاریخ تولید روغن و شاخصه حرارتی روغن، کشش سطحی بین روغن و محصول، دما، زمان سرخ کردن و اندازه نمونه می‌باشد. (Zaghi et al., 2019). با افزایش زمان و دمای فرآیند سرخ کردن با هوای داغ، شاخص L^* فیله‌های مرغ کاهش یافت. ارزیابی تغییرات روشنایی نشان می‌دهد که روشنایی به مقدار آب آزاد موجود در سطح فرآورده بستگی دارد که

محققان دیگری که به مقایسه جذب روغن در روش عمیق و هوای داغ پرداخته‌اند به نتایج مشابهی رسیدند (Yu et al., 2020; Fikry, 2021). علاوه بر این، طی سرخ کردن روغن جایگزین آب تبخیر شده از محصول می‌گردد. محتوای نهایی روغن محصول بستگی به میزان رطوبت باقی‌مانده در محصول دارد. سرخ کردن در دماهای بالاتر موجب کاهش محتوای رطوبت محصول و جایگزینی روغن با رطوبت تبخیر شده از محصول گشته و در نهایت سبب افزایش میزان روغن باقیمانده در محصول می‌گردد. تحقیقات انجام‌شده نشان داده، ثابت سرعت جذب روغن (KO) با افزایش دما افزایش می‌یابد. از طرف دیگر ثابت‌های به‌دست‌آمده برای جذب روغن نسبت به ثابت‌های مربوط به کاهش رطوبت، دارای مقادیر بزرگ‌تری هستند، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که طی فرآیند سرخ کردن، جذب روغن سریع‌تر از خروج رطوبت محصول صورت می‌گیرد. البته خروج رطوبت، طی سرخ کردن و در اثر انتقال حرارت از روغن داغ به سینه مرغ اتفاق می‌افتد که این امر با افزایش دمای منجر به افزایش تخلخل محصول می‌گردد اما جذب روغن صرفاً یک پدیده سطحی است که در پایان سرخ کردن و هنگام خروج محصول رخ می‌دهد. در واقع خلأ ایجادشده در اثر کندانس شدن بخار هنگام خروج از سرخ کردن و مکش موئینگی عامل اصلی جذب روغن به هستند. بنابراین خروج رطوبت و جذب روغن طی سرخ کردن سینه مرغ، دو پدیده غیر هم‌زمان و در ارتباط با یکدیگر هستند (Abd Rahman et al. 2017). نتایج مشابهی توسط Rady و همکاران (۲۰۱۹) در بررسی انتقال جرم طی سرخ کردن با هوای داغ بیان نمودند، حین سرخ کردن رطوبت از دست می‌رود و روغن جایگزین می‌گردد و میزان جذب روغن در سرخ کردن با هوای داغ با افزایش دما و زمان حرارت دادن افزایش یافت. همچنین با افزایش سرعت جریان هوا فشار بخار محیط کاهش یافته و رطوبت محصول برای خروج از آن با مقاومت کمتری مواجه می‌شود. در نتیجه رطوبت با سرعت بیشتری از محصول خارج می‌گردد و طی سرخ کردن روغن جایگزین آب تبخیر شده از محصول می‌گردد. البته این پدیده در سرعت‌های هوای بالاتر که دمای هوای ورودی پایین می‌باشد به علت خنک‌شدن سطح محصول توسط جریان هوا و کاهش گرادیان حرارتی، اثر عکس داشته و سبب افزایش زمان

می‌تواند نور را منعکس کند که طی افزایش زمان و دمای فرآیند سرخ کردن میزان آب آزاد موجود در سطح فیله مرغ کاهش می‌یابد و در نتیجه منجر به قهوه‌ای شدن و تیره شدن سطح فیله مرغ می‌شود همین امر باعث کاهش شاخص L^* فیله‌های مرغ می‌گردد (Santos *et al.*, 2017). L^* برآورد میانگین روشنایی و پارامتری مهم در صنعت سرخ کردن به شمار می‌رود، زیرا می‌تواند به عنوان یک عامل کنترل کیفیت استفاده شود. این پارامتر اولین شاخص کیفی است که توسط مصرف‌کننده برای پذیرش فرآورده ارزیابی می‌شود (Andreadis, 2000). شاخص L^* روشنایی و تاریکی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. مقادیر پایین L^* نشان‌دهنده تیرگی رنگ است. معمولاً مصرف‌کنندگان محصولی با رنگ تیره را ترجیح نمی‌دهند و اساساً رنگ تیره نمونه‌ها به واکنش‌های قهوه‌ای شدن غیر آنزیمی مانند اکسیداسیون شیمیایی، کاراملی شدن و واکنش میلارد مربوط می‌شود (Abd Rahman *et al.*, 2016). با پیشرفت زمان سرخ کردن به علت تغییرات فیزیکی شیمیایی که در پوسته اتفاق می‌افتد، میزان روشنایی آن تغییر می‌کند که البته الگوی این تغییرات به شدت تحت تأثیر زمان سرخ کردن است (Zaghi *et al.*, 2019). به طور کلی روند تغییرات L^* را می‌توان به دو بخش تقسیم کرد: بخش اول در مراحل آغازین سرخ کردن اتفاق می‌افتد. در این مرحله هنوز دمای پوسته به بالاتر از نقطه جوش آب نرسیده است (حدود ۹۰ درجه سانتی‌گراد) و پوسته‌داری رطوبت است بنابراین رنگدانه‌های ناشی از واکنش‌های قهوه‌ای شدن آنزیمی هنوز تولید نشده‌اند. در این مرحله پوسته بخشی از رطوبت خود را از دست می‌دهد و پروتئین‌ها دناتوره می‌گردند. مدت زمان این مرحله تحت تأثیر زمان و دمای سرخ کردن است (Teruel *et al.*, 2015). Heredia و همکاران (2014) به افزایش اولیه مقدار L^* در برخی تیمارهای فرنچ فرایز سرخ‌شده به روش عمیق و هوای داغ اشاره کردند. آن‌ها ادعا کردند که این افزایش اولیه به خاطر وجود آب بیشتر در سطح نمونه و انعکاس نور است. بخش دوم شامل مرحله‌ی کاهش روشنایی است. این مرحله طی پخت نان نیز مشاهده شده است. مهم‌ترین عامل تغییر رنگ در این مرحله تجمع رنگ‌دانه‌های ناشی از واکنش‌های قهوه‌ای شدن غیر آنزیمی مثل میلارد و کاراملیزاسیون است. پژوهش‌هایی که

تاکنون انجام‌گرفته است به نتیجه واحدی در مورد تأثیر سرخ کردن به روش هوای داغ بر میزان روشنایی محصولات غذایی منتج نشده است. به‌عنوان مثال، یافته‌های تورل و همکاران (Teruel *et al.*, 2015) نشان داد که فرنچ فرایز تهیه‌شده به روش عمیق تیره‌تر از هوای داغ بود، هرچند که این تفاوت معنی‌دار نبود. زمان سرخ کردن در این مورد ۳۰ دقیقه بود که در مورد هر دو روش سرخ کردن اعمال شده بود. سانسانو و همکاران (Sansano *et al.*, 2015) به بررسی تأثیر پیش تیمارها بر رنگ سیب‌زمینی سرخ شده به روش عمیق و هوای داغ پرداختند. زمان سرخ کردن در روش عمیق ۲۵ دقیقه و در هوای داغ ۳۵ دقیقه بود. طبق یافته‌های به دست آمده، روشنایی نمونه‌های تولید شده به این دو روش با هم تفاوت زیادی نداشتند. فقط در مورد سیب‌زمینی تیمار شده با ۲٪ اسید سیتریک، مقدار روشنایی نمونه سرخ شده به روش عمیق به شکل قابل ملاحظه‌ای کمتر از نمونه‌ی سرخ شده به روش هوای داغ بود. هردیا و همکاران (Heredia *et al.*, 2014) بیان کردند که سرخ کردن به روش هوای داغ روشنایی نمونه‌ها را کاهش نداده، سبب افزایش پارامتر L^* در سه نمونه سیب‌زمینی سرخ شده (نمونه‌های شاهد، آنزیم‌بری شده و منجمد) گردید. زمان سرخ کردن برای نمونه‌های سیب‌زمینی در روش عمیق ۱۶ دقیقه و در روش هوای داغ ۳۰ دقیقه بود.

Ding و همکاران (2022) در مطالعه‌ای که بر روی سرخ کردن عمیق و سرخ کردن با هوای داغ بر روی فیله‌های نوعی ماهی اقیانوسی به نام *Trichiurus lepturus* انجام دادند اعلام کردند که مقدار L^* فیله‌های ماهی سرخ شده به روش عمیق با افزایش زمان سرخ کردن به دلیل تشکیل ترکیبات تیره رنگ طی فرآیند میلارد و کاهش محتوی آب به طور قابل توجهی کاهش یافت. اما مقدار L^* فیله‌های ماهی سرخ شده به روش سرخ کردن با هوای داغ تأثیر معنی‌داری بر روی این فاکتور نداشت. در پژوهش Liu و همکاران (2022) بر روی استیک‌های ماهیان خاویار دیده شد با افزایش دما و از دست دادن رطوبت و تضعیف انعکاس نور با افزایش مقدار فاکتور L^* کاهش یافت با افزایش زمان فرآیند سرخ کردن با هوای داغ، شاخص a^* فیله‌های مرغ افزایش یافت. پارامتر a^* که یکی دیگر از کانال‌های رنگی در فضای

بهبودسازی شرایط سرخ کردن فیله‌های مرغ با استفاده از هوای داغ به روش سطح پاسخ

رنگی $L^* a^* b^*$ است بین ۱۲۰- تا ۱۲۰ قرار دارد و مقادیر مثبت و منفی آن به ترتیب معادل قرمزی و سبزی است. از لحاظ دید انسان، افزایش a^* و کاهش L^* منجر به ایجاد رنگ طلایی دلخواه در مواد غذایی سرخ شده می‌شود. این پارامتر مستقیماً تحت تأثیر فرایند قهوه‌ای شدن است (Sansano et al., 2015). طی فرایند سرخ کردن مقدار a^* از اعداد منفی به سوی اعداد مثبت تغییر می‌کند. این امر بدان معنی است که به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای در شرایط سرخ کردن عمیق و هوای داغ حرکت a^* از مقادیر منفی (به سمت سبز) به مقادیر مثبت (به سمت قرمز) اتفاق می‌افتد. نکته قابل‌توجهی که در مورد پروفایل تغییرات a^* وجود داشت آن بود که تغییرات این پارامتر هم طی دو مرحله (مرحله ثبات و مرحله افزایش) انجام می‌پذیرد. در گزارشات پیشین آورده شده است که مقدار نهایی پارامتر a^* محصولات سرخ شده به روش عمیق بیشتر از روش هوای داغ است (Teruel et al., 2015). Majzoubi و همکاران (2014) در بررسی حذف روغن مصرفی برای سرخ کردن اسنک با استفاده از هوای داغ گزارش نمودند، قرمزی نمونه‌ها با افزایش دمای هوای فر افزایش یافت. آن‌ها علت افزایش میزان قرمزی در استفاده از هوای داغ برای برشته کردن را تشکیل رنگدانه‌های قهوه‌ای بیشتر در سطح پوست بیان نمودند. همچنین در پژوهش Liu و همکاران (2022) بر روی استیک‌های ماهیان خاویار دیده شد با افزایش دما مقدار a^* تغییر کرد.

به مقدار مثبت ۲,۹۴ که نشان دهنده افزایش قرمزی است. مطالعات نشان داده اند که مقدار a^* ارتباط مستقیمی با تولید ترکیب سرطان زا آکریل آمید دارد (Ding et al., 2022).

Ding و همکاران (2022) در مطالعه‌ای که بر روی سرخ کردن عمیق و سرخ کردن با هوای داغ بر روی فیله‌های نوعی ماهی اقیانوسی به نام *Trichiurus lepturus* انجام دادند اعلام کردند که مقدار a^* و b^* فیله‌های ماهی سرخ شده به روش عمیق با افزایش زمان سرخ کردن افزایش یافت.

با افزایش درجه حرارت شاخص b^* فیله‌های مرغ افزایش یافت. نوسانات موجود در محور b^* به اندازه‌ی دو محور قبلی مورد توجه نیست. تغییرات این پارامتر از مقادیر منفی به مقادیر مثبت بیانگر تغییر رنگ از آبی به زرد است.

بر اساس گزارش‌های محققان مختلف تغییرات b^* طی سرخ شدن هر فرآورده منحصر به فرد است (Shaker, 2015). به‌عنوان مثال Dueik و همکاران (2010) گزارش کردند که با افزایش زمان و دمای سرخ کردن مقدار b^* در هویج سرخ شده تحت خلاً کاهش می‌یابد. Ding و همکاران (2022) در مطالعه‌ای که بر روی سرخ کردن عمیق و سرخ کردن با هوای داغ بر روی فیله‌های نوعی ماهی اقیانوسی به نام *Trichiurus lepturus* انجام دادند اعلام کردند که مقدار b^* فیله‌های ماهی سرخ شده به روش سرخ کردن با هوای داغ با افزایش زمان سرخ کردن به صورت تدریجی کاهش یافت و دلیل این امر را ذوب شدن چربی بافت فیله ماهی در دمای بالا و چسبیدن چربی به سطح فیله‌ها می‌باشد. در مورد نمونه‌های فیله سرخ شده دمای سرخ کردن و سرعت هوا تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر میزان نهایی و سرعت تغییرات این پارامتر داشت. روند کلی تغییرات این پارامتر طی سرخ کردن، از مقادیر کم (نزدیک به صفر) به مقادیر مثبت (افزایش زردی) بود.

بامقایسه میانگین امتیازها در مورد هر کدام از فاکتورهای ارزیابی حسی محصول، بالاترین میانگین امتیاز مربوط به فاکتور رنگ می‌باشد. در پژوهشی توسط Yasaei و همکاران (2011) طی مقایسه‌ی میانگین امتیازهای حسی محصول بر روی چیپس کدو حلواپی، مرغوب‌ترین فاکتور از نظر ارزیابها رنگ بوده است و با توجه به تحلیل‌های آماری میان میانگین هیچ یک از فاکتورهای مورد ارزیابی اختلاف معنی داری وجود نداشت که با نتایج مطالعه حاضر مطابقت داشت.

شرایط عملیاتی بهینه برای تمام متغیرها با استفاده از تکنیک بهینه‌سازی عددی بیان شده است. این بهینه‌سازی به منظور رسیدن به محصولی با ویژگی‌های مطلوب برای کاربرد در محصولات غذایی است. با توجه به نتایج این پژوهش، با فرایند سرخ کردن با هوای داغ، میزان رطوبت فیله‌های مرغ با افزایش دما و زمان کاهش یافت. فیله‌های مرغ سرخ شده با افزایش دما و زمان بافت سفت‌تری داشتند. محتوی چربی فیله‌های سرخ شده با افزایش دما و زمان افزایش نشان داد که دلیل این امر خروج رطوبت است که باعث بالا رفتن میزان چربی در اندازه گیری می‌شود. ترول و همکاران (Teruel et al., 2015) در مقایسه با فرایند سرخ کردن با هوای داغ و سرخ کردن عمیق در

Abd Rahman, N.A., Abdul Razak, S.Z., Lokmanalhakim, S.L., Taip, F.S. & Mustapa Kamal, S. M. (2016). Response surface optimization for hot air-frying technique and its effects on the quality of sweet potato snack. *Journal of Food Process Engineering*, 40(4), 1-8. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12507>

AOAC. (1997). Official Method and Recommended Practices of the AOCS, 15th edition, The American Oil chemist 's Society Champagn, IL

Alvis, A., Vélez, C., Rada-Mendoza, M., Villamiel, M. & Villada, H. S. (2009). Heat transfer coefficient during deep-fat frying. *Food Control*, 20 (4), 321-325. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2008.05.016>

Andrés, A., Arguelles, Á., Castelló, M. L. & Heredia, A. (2012). Mass transfer and volume changes in french fries during air frying. *Food and Bioprocess Technology*, 6(8), 1917-1924. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0861-2>

Andres, A., Heredia, A., Castello, M.L. & Arguelles, A. (2014). Evolution of mechanical and optical properties of French fries obtained by hot air-frying. *LWT- Food science and Technology*, 57, 755-760. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.02.038>

Akdeniz, N., Sahin S. & Sumnu G. (2006). Functionality of batters containing different gums for deep-fat frying of carrot slices. *Journal of Food Engineering*. 75, 522-526. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.04.035>

Andreadis, I. (2000). A color coordinate normalizer chip. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 28, 181-196. <https://doi.org/10.1023/A:1008157318480>

Bravo, J., Sanjuan, N., Ruales, J. & Mulet, A. (2009). Modeling the dehydration of apple slices by deep fat frying. *Drying Technology*, 27, 782-786. <https://doi.org/10.1080/07373930902828187>

Braeckman, L., Ronsse, F., Hidalgo, P. C. & Pieters, J. (2009). Influence of combined IR-grilling and hot air cooking conditions on moisture and fat content, texture and colour attributes of meat patties. *Journal of Food Engineering*, 93(4), 437-443. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.02.009>

Ding, Y., Zhou, T., Liao, Y., Lin, H., Deng, S. & Zhang, B. (2022). Comparative Studies on the Physicochemical and Volatile Flavour Properties of Traditional Deep Fried and

سیب زمینی بیان کردند که میزان جذب روغن و بافت محصول در مقایسه با سرخ کردن عمیق کاهش یافت و روشنایی شاخص رنگ افزایش یافت. در بررسی دیگر روی سرخ کردن سیب زمینی، محققین نتیجه گرفتند سرخ کردن در هوای داغ با تغییر ریزساختارها میزان جذب چربی نسبت به سرخ کردن معمولی کاهش می‌یابد (Liu *et al.*, 2022). نتایج تحقیقات Liu و همکاران (۲۰۰۵) بر روی استیک ماهی خاویار نشان داد که همراه با افزایش دما در حین سرخ کردن با هوای داغ میزان تردی بافت افزایش پیدا می‌کند، در حالی که رطوبت در داخل آن به خوبی حفظ می‌شد و لیپیدها به راحتی اکسید شده و به ترکیبات فرار تجزیه می‌شوند. آنها روش سرخ کردن با هوای داغ را برای تولید صنعتی استیک ماهی خاویار پیشنهاد دادند.

نتیجه گیری

این مطالعه که با هدف بهینه سازی شرایط تولید فیله‌های مرغ با استفاده از هوای داغ صورت گرفت اثرات سرخ کردن با هوای داغ بر ویژگی‌های کیفی فیله مرغ از نظر میزان رطوبت، محتوی چربی، سفتی بافت، رنگ و فاکتورهای حسی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که با فرآیند سرخ کردن با هوای داغ، میزان رطوبت و فاکتور L^* فیله‌های مرغ با افزایش دما و زمان کاهش یافت همچنین موجب افزایش سفتی بافت و محتوی چربی و فاکتور a^* و b^* گردید. مقایسه ی میانگین امتیازها در مورد هر کدام از فاکتورهای ارزیابی حسی محصول نشان داد، بالاترین میانگین امتیاز، مربوط به فاکتور رنگ می‌باشد. باتوجه به نتایج حاصل از آزمایشات برای رسیدن به محصولی با کیفیت بهتر، درجه حرارت، زمان فرآیند سرخ کردن با هوای داغ و سرعت جریان هوا بایستی به ترتیب ۲۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، ۲۲/۸۷ دقیقه و ۱/۵۰ متر بر ثانیه باشد که این شرایط موجب رضایت اعضای پانل انتخابی بود. به طور کلی، روش سرخ کردن با هوای داغ، روش سالم‌تری برای غذاهای سرخ شده از جمله فیله مرغ است و جایگزین ارزشمندی است.

منابع

AACC. (1986). Approved methods of the American Association of cereal chemists, Minneapolis MN: AACC.

- Engineering, 102(4), 317-320. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.09.005>
- Kowalska, J., Miarka, D., Marzec, A., Ciużyńska, A., Janowicz, M., Galus, S. & Kowalska, H. (2023). Sous-Vide as an Innovative and Alternative Method of Culinary Treatment of Chicken Breast in Terms of Product Quality and Safety. *Applied Sciences*, 13(6), 3906. <https://doi.org/10.3390/app13063906>
- Krokida, M.K., Oreopoulou, V. & Maroulis, Z.B. (2001). Colour changes during deep fat frying. *Journal of food Engineering*, 48(3), 219-225. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00161-8](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00161-8)
- Kalogianni, E. P. & P. G. Smith (2013). Effect of frying variables on French fry properties. *International Journal of Food Science & Technology*, 48(4), 758-770.
- Kassama, L. & M. Ngadi (2005). Pore structure characterization of deep-fat-fried chicken meat. *Journal of Food Engineering*, 66(3), 369-375. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.04.00>
- Kurp, L., Danowska-Oziewicz, M. & Kłębukowska, L. (2022). Sous vide cooking effects on physicochemical, microbiological and sensory characteristics of pork loin. *Applied Sciences*, 12(5), 2365. <http://dx.doi.org/10.3390/app12052365>
- Liu, L., Huang, P., Xie, W., Wang, J., Li, Y., Wang, H. & Zhao, Y. (2022). Effect of air fryer frying temperature on the quality attributes of sturgeon steak and comparison of its performance with traditional deep fat frying. *Food Science & Nutrition*, 10(2), 342-353. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2472>
- Majzoubi, M., Imani, B. & Farhanaki, A. (2014). Removing oil used for frying snacks using hot air. The first national snack conference. Food Science and Technology Research Institute, Mashhad [In persian].
- Michalak-Majewska, M., Stanikowski, P., Gustaw, W., Sławińska, A., Radzki, W., Skrzypczak, K. & Jabłońska-Ryś, E. (2018). Sous-vide cooking technology—Innovative heat treatment method of food. *ŻYWNOSĆ. Nauka. Technologia. Jakość*, 25, 34-44. <https://doi.org/10.15193/ZNTJ/2018/116/244>
- Ngadi, M., Li, Y. & Oluwa, S. (2007). Quality changes in chicken nuggets fried in oils with different degrees of hydrogenation. *LWT-Food Science and Technology*, 40(10), 1784-1791. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.01.004>
- Circulating-Air Fried Hairtail (*Trichiurus lepturus*). *Foods*, 2022, 11, 2710. <https://doi.org/10.3390/foods11172710>
- Dueik, V. (2010). Vacuum frying reduces oil uptake and improves the quality parameters of carrot crisps. *Food Chemistry*, 119(3), 1143-1149. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.08.027>
- Fang, M. (2021). Mass transfer and texture characteristics of fish skin during deep-fat frying, electrostatic frying, air frying and vacuum frying. *LWT*, 137, 110494. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110494>
- Farinu, A. & Baik, O.D. (2005). Deep fat frying of foods-Transport Phenomena. *Food Reviews International*, 21(4), 389-410. <https://doi.org/10.1080/87559120500222896>
- Fikry, M. (2021). Optimization of the Frying Temperature and Time for Preparation of Healthy Falafel Using Air Frying Technology. *Foods*, 10(11).
- Garayo, J. & Moreira, R. (2002). Vacuum frying of potato chips. *Food Engineering*, 55, 181-191. <https://doi.org/10.1016/S0260-8774%2802%2900062-6>
- Gouyo, T. (2021). Microstructure analysis of crust during deep-fat or hot-air frying to understand French fry texture. *Journal of food Engineering*, 298, 110484. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110484>
- Heredia, A., Castello, M., Argüelles, A. & Andres, 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. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.02.038>
- Innawong, B., Mallikarjunan, P., Marcy, J. & Cundiff, J. (2006). Pressure conditions and quality of chicken nuggets fried under gaseous nitrogen atmosphere. *Journal of food processing and preservation*, 30(2), 231-245. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2006.00061.x>
- Jin, W., Pei, J., Chen, X., Geng, J., Chen, D. & Gao, R. (2021). Influence of Frying Methods on Quality Characteristics and Volatile Flavor Compounds of Giant Salamander (*Andrias davidianus*) Meatballs. *Journal of Food Quality*. <https://doi.org/10.1155/2021/8450072>
- Kim, D. N., Lim, J., Bae, I. Y., Lee, H. G. & Lee, S. (2011). Effect of hydrocolloid coatings on the heat transfer and oil uptake during frying of potato strips. *Journal of Food*

pretreatments and air-frying, a novel technology, on acrylamide generation in fried potatoes. *Journal of Food Science*, 80(5), T1120-T1128. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12843>

Serdaroglu, M., Abdramimov, K. & Oenenc, A. (2007). The effects of marinating with citric acid solutions and grapefruit juice on cooking and eating quality of turkey breast. *Journal of Muscle foods*, 18(2), 162-172. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4573.2007.00074.x>

Shaker, M. A. (2015). Comparison between traditional deep-fat frying and air-frying for production of healthy fried potato strips. *International Food Research Journal*, 22(4), 1557-1563 <http://www.ifrj.upm.edu.my>.

Shyu, S.L. & Hwang, L. S. (2001). Effects of processing conditions on the quality of vacuum fried apple chips. *Food Research International*, 34(2-3), 133-142. [https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(00\)00141-1](https://doi.org/10.1016/S0963-9969(00)00141-1)

Shyu, S. L., Hau, L.B. & Hwang, L.S. (2005). Effects of processing conditions on the quality of vacuum-fried carrot chips. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(11), 1903-1908. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2195>

Singh, T., Kumar Chatli, M., Kumar, P., Mehta, N. & Prakash Malav, O. (2015). Effect of Different Cooking Methods on the Quality Attributes of Chicken Meat Cutlets. *Journal of Animal Research*, 5 (3), 547-554. <https://doi.org/10.5958/2277-940X.2015.00092.3>

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. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12753>

Tourell, M. C. (2018). Singlet-assisted diffusion-NMR (SAD-NMR): redefining the limits when measuring tortuosity in porous media. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 20(20), 13705-13713. <https://doi.org/10.1039/c8cp00145f>

Tian, J., Chen, S., Shi, J., Chen, J., Liu, D., Cai, Y. & Ye, X. (2017). Microstructure and digestibility of potato strips produced by conventional frying and air-frying: An in vitro study. *Food structure*, 14, 30-35. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2017.06.001>

Pang, B., Yu, X., Bowker, B., Zhang, J., Yang, Y. & Zhuang, H. (2021). Effect of meat temperature on moisture loss, water properties, and protein profiles of broiler pectoralis major with the woody breast condition. *Poultry Science*, 100(2), 1283-1290. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2020.10.034>

Pedreschi, F. (2005). Color changes and acrylamide formation in fried potato slices. *Food Research International*, 38(1), 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2004.07.002>

Pedreschi, F. (2012). Frying of potatoes: Physical, chemical, and microstructural changes. *Drying Technology*, 30(7), 707-725. <http://dx.doi.org/10.1080/07373937.2012.663845>

Rabeler, F., Skytte, J. L. & Feyissa, A. H. (2019). Prediction of thermal induced color changes of chicken breast meat during convective roasting: A combined mechanistic and kinetic modelling approach. *Food Control*, 104, 42-49. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.04.018>

Rabeler, F. & Feyissa, A. H. (2018). Modelling the transport phenomena and texture changes of chicken breast meat during the roasting in a convective oven. *Journal of Food Engineering*, 237, 60-68. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.05.021>

Rady, A. (2019). Pretreatment and freezing rate effect on physical, microstructural, and nutritional properties of fried sweet potato. *Transactions of the ASABE*, 62(1), 45-59. <https://doi.org/10.13031/trans.13099>

Sahin, S., Sumnu, G. & Altunakar, B. (2005). Effects of batters containing different gum types on the quality of deep-fat fried chicken nuggets. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(14), 2375-2379. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2258>

Salvador, A., Hough G. & Fiszman S.M. (2005). Acceptability of batter-coated squid rings prepared without industrial pre-frying. *European Food Research and Technology*, 221, 36-40. <https://doi.org/10.1007/s00217-005-1150-3>

Santos, C. S.P., Cunha, S.C. & Susana Casal, S. (2017). Deep or air frying? A comparative study with different vegetable oils. *European Journal of lipid science and Technology*, 119(6), 1600375. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201600375>

Sansano, M., Juan-Borrás, M., Escriche, I., Andrés, A. & Heredia, A. (2015). Effect of

lipidomic characteristics of surimi during processing. *Innovative food science & emerging technologies*, 60, 102305. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102305>

Zaghi, A. N., Barbalho, S.M., Guiguer, E.L. & Otoboni, A.M. (2019). Frying Process: From Conventional to Air Frying Technology, *Food Reviews International*, <https://doi.org/10.1080/87559129.2019.1600541>.

Zhou, M., S, G., Deng, Y., Wang, C., Qiao, Y., Xiong, G., Wang, L., Wu, W., Shi, L. & Ding, A. (2022). Study on the physicochemical and flavor characteristics of air frying and deep frying shrimp (crayfish) meat. *Frontiers in Nutrition*, 9, 1022590. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1022590>

Yasai Mehrjardi, P., Ghayathi Tarzi, B., Basiri, A.L., Bamni Moghadam, M. & Esfandiari, G. (2011). Determining the optimal conditions for the process of frying pumpkin under vacuum (*Cucurbita moschata* Duch). *Innovation in food science and technology*, 3 (3), 61-69.

Yu, Y., Wang, G., Yin, X., Ge, C. & Liao, G. (2021). Effects of different cooking methods on free fatty acid profile, water-soluble compounds and flavor compounds in Chinese Piao chicken meat. *Food Research International*, 149, 110696. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110696>.

Yu, X. (2020). Effect of air-frying conditions on the quality attributes and

Optimizing the Conditions of Frying Chicken Fillets using Hot Air by the Response Surface Method

F. Keshavarzian ^a, H. E Mirzaei ^{b*}, M. Soltani Firoz ^c, A. Sadeghi Mahonak ^d, M. Khan Ali ^e, H.A. Tash Shamsabadi ^f

^a PhD Student, Faculty of Food Science and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran.

^b Associate Professor, Faculty of Food Science and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran.

^c Assistant Professor, Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Iran.

^d Professor, Faculty of Food Science and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran.

^e Associate Professor, Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Tehran, Iran.

^f Associate Professor, Faculty of Biosystem Mechanics Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran.

Received: 21 August 2023

Accepted: 18 December 2023

Abstract

Introduction: Chicken meat is one of the important and healthy sources of protein in the diet. Therefore, due to its high consumption, its preparation and cooking methods should be taken into consideration. Frying process is one of the most common operations in the food industry. In this method efforts have been made to obtain products with low oil content. Hot air frying is a new method of frying in which products are processed through direct contact with hot air and oil droplets in the frying chamber.

Materials and Methods: In this research, a hot air fryer was used to process chicken fillets. The response surface method was employed to model and obtain the optimal conditions of the hot air frying process. The effect of process parameters (temperature of 160,180,200 degrees Celsius, time of 10, 20 and 30 minutes and air flow speed of 1.5, 2.5 and 3.5 m/s) on the characteristics of the final product (Moisture content, fat content, evaluation of color parameters, crispness and sensory evaluation) were evaluated in order to achieve the optimal conditions of the process.

Results: The results showed that the moisture content, crisp texture of the product and changes in the color of the product are affected by the temperature and duration of the process and increase with the increase of the parameters. The variables of air flow speed, temperature and process time have a significant effect on the fat content in fried chicken fillets ($P \leq 0.05$) and show an increasing trend.

Conclusion: Based on the results of the tests, the optimal conditions for frying with hot air temperature of 200 degrees Celsius, air blower speed of 1.50 meters per second and time of 22.87 minutes were determined.

Keywords: Chicken Fillet, Hot Air Frying, Process Optimization, Response Surface Method.

* Corresponding Author: mirzaehabib1@gmail.com