

بررسی سینتیک انتقال جرم ناگت مرغ طی پخت با سامانه مادون قرمز

دل آسا رحیمی^۱، مهدی کاشانی نژاد^{۲*}، امان محمد ضیایی فر^۳، علیرضا صادقی ماهونک^۴

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۲- استاد، گروه مهندسی علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۳- دانشیار، گروه مهندسی علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۴- دانشیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

(تاریخ دریافت: ۹۶/۰۲/۰۸ تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۷/۰۲)

چکیده

ناگت مرغ یکی از انواع غذاهای آماده پرفرودار در سطح دنیا است. از طرفی به علت محتوای روغن بالا در ناگت‌های تهیه شده با روش‌های معمول و ایجاد چاقی و بیماری‌های مرتبط با آن، اخیراً روش‌های مختلفی از جمله سرخ کردن جزئی و استفاده از فرآیندهای دیگر برای پخت نهایی مورد توجه قرار گرفتند. در این پژوهش، برای کاهش محتوای روغن ناگت مرغ از روش پخت با مادون قرمز استفاده گردید. بدین منظور ناگت مرغ با روش‌های سرخ کردن عمیق، مادون قرمز، پیش‌سرخ کردن-مادون قرمز و مادون قرمز-سرخ کردن در زمان‌ها و توان‌های متفاوت مادون قرمز پخته شد. سپس، تأثیر هر فرایند بر مقادیر E_a و D_{eff} ، محتوای رطوبت و روغن این محصول بررسی شد. محتوای روغن نمونه‌ها از ۱۱/۸۷ درصد در نمونه شاهد به ۱۱/۶۲-۲/۱۸ درصد در نمونه‌های آماده شده با مادون قرمز، سرخ شده-مادون قرمز و مادون قرمز-سرخ شده، کاهش یافت. با افزایش توان لامپ مادون قرمز و زمان پخت ناگت مرغ، محتوای روغن و رطوبت نمونه‌ها کاهش یافته و کمترین محتوای رطوبت در نمونه پیش‌سرخ شده-مادون قرمز با توان ۶۲۰ وات و زمان پخت ۷ دقیقه مشاهده شد. علاوه بر این، ضریب انتشار مؤثر رطوبت با افزایش توان لامپ افزایش یافت و بالاترین مقدار مشاهده شده $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ در نمونه پیش‌سرخ شده-مادون قرمز با توان ۶۲۰ وات و زمان ۷ دقیقه با ضریب تعیین ۰/۹۸۷ به دست آمد. همچنین، برازش داده‌ها با مدل‌های سینتیکی خزایی و لگاریتمی انجام شد و مدل لگاریتمی برای روش پخت با مادون قرمز و مدل خزایی برای پخت به روش مادون قرمز-سرخ کردن و پیش‌سرخ کردن-مادون قرمز به عنوان مدل بهتر انتخاب شد.

کلید واژگان: انتقال جرم، پخت، سرخ کردن، مادون قرمز، ناگت مرغ

۱- مقدمه

امروزه مصرف غذاهای آماده به دلیل تغییرات فرهنگی و اجتماعی رو به افزایش است و در میان آن‌ها فراورده‌های سرخ‌شده و سوخاریمانند ناگت مرغ به دلیل ویژگی‌های حسی مطلوب بسیار مورد توجه می‌باشند. غذاهای سرخ‌شده محتوای روغن بالا، انرژی بالا و در مقابل، ارزش تغذیه‌ای کمتری دارند. مشکل اضافه وزن و چاقی در کشورهای مختلف به دلیل مصرف بیش از حد غذاهای سرخ‌شده به یکی از معضلات تبدیل شده است [۱]. به عنوان مثال، بیش از ۶۶٪ آمریکایی‌ها اضافه وزن دارند و بیش از ۵۰٪ آن‌ها مبتلا به چاقی هستند [۲]. بیماری‌هایی که ناشی از چاقی هستند، نگرانی‌هایی را به وجود آورده است [۳]. بنابراین، در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی به منظور کاهش محتوای روغن در مواد غذایی سرخ‌شده ضمن حفظ ویژگی‌های کیفی انجام گرفته است که از آن جمله می‌توان به بهینه‌سازی شرایط آماده‌سازی و فرایند، تغییر فرمولاسیون مواد غذایی و استفاده از انواع پیش‌تیمارها اشاره کرد. با انتخاب پارامترهای مناسب برای این نوع فرایندها، می‌توان محصولاتی با پوسته ترد و قسمت داخلی نرم (مانند محصولات سرخ‌شده به صورت عمیق) که دارای محتوای روغن کمتر باشند، تولید کرد. استفاده از روش‌های کاهش محتوای روغن در غذاهای سرخ‌شده نیازمند آگاهی اولیه در ارتباط با مکانیزم انتقال حرارت و جرم در طول فرایند سرخ‌کردن است؛ به ویژه زمانی که هدف جایگزین کردن روش سرخ‌کردن (نسبی یا کامل) با یک روش حرارت‌دهی دیگر باشد [۴].

روش حرارت‌دهی با مادون‌قرمز به عنوان جایگزین برای سرخ‌شدن مواد غذایی به خوبی مورد تحقیق قرار نگرفته است؛ اما برای پاستوریزاسیون، خشک‌کردن، انجمادزدایی و پخت محصولات خمیری مورد استفاده قرار گرفته است [۵-۸]. تابش مادون قرمز بخشی از طیف امواج الکترومغناطیسی است که اغلب مسئول بخش حرارتی خورشید نیز است [۹]. طول موج پرتو مادون قرمز (۰/۷۶-۱۰۰۰ میکرومتر) مابین طول موج مرئی نور خورشید و امواج رادیویی قرار دارد و می‌توان آن را به سه گروه پرتو مادون قرمز نزدیک (۰/۷۶-۲ میکرومتر)، متوسط (۲-۴ میکرومتر) و دور (۴-۱۰۰۰ میکرومتر) تقسیم کرد [۱۰]. تابش مادون قرمز با داشتن مزایایی از جمله انتقال حرارت سریع در مواد غذایی، کاهش زمان فرآیند و هزینه انرژی، حرارت‌دهی یکنواخت به دلیل نفوذ آن به درون ماده

غذایی و جلوگیری از حرارت‌دهی بیش از حد ماده غذایی (به دلیل سرعت بالای حرارت‌دهی نسبت به روش پخت در آون‌های معمولی)، به عنوان روش مهمی در صنعت غذا پذیرفته شده است. همچنین، در این روش امکان طراحی تجهیزات به صورت اتوماتیک و فشرده با کاربری آسان، امنیت بالا و کنترل دقیق وجود دارد. حرارت‌دهی با مکانیزم تابش در مقایسه با مکانیزم‌های هدایتی و همرفتی بسیار موثرتر است [۱۱] و قابلیت تولید شار حرارتی بالا در ماده غذایی را نسبت به فرایندهای دیگر دارد. بهینه‌سازی فرایند باعث بهبود انتقال حرارت در فراوری مواد غذایی با مادون‌قرمز شده و مصرف انرژی را در مقایسه با مکانیزم‌های انتقال حرارت هدایتی و همرفتی کاهش می‌دهد [۱۲]. لوید (۲۰۰۳) روشی برای استفاده از حرارت‌دهی مادون‌قرمز که پروفایل شار حرارتی مشابه فرایند سرخ‌کردن دارد را پیشنهاد داد و خلال‌های سیب‌زمینی سرخ‌شده ای تولید کرد که از نظر ارزیابی حسی و دستگامی مشابه نمونه کاملاً سرخ‌شده بود. علاوه بر این، این محصول نیمه سرخ‌شده که پخت نهایی آن با مادون قرمز صورت گرفت، محتوای روغن پایین‌تری نسبت به نمونه سرخ‌شده داشت (۱۳٪ در برابر ۱۹/۲٪). به دلیل این‌که حرارت مادون‌قرمز با موفقیت برای تولید سیب‌زمینی با طعم و بافت مشابه محصول سرخ‌شده مورد استفاده قرار گرفت، مطالعه در مورد پخت دیگر محصولات سرخ‌شده با روش حرارت‌دهی مادون‌قرمز مورد توجه است [۱۳]. ناگت مرغ یکی از محصولاتی هست که در پژوهش‌های انجام‌شده توسط سالوادور و همکاران (۲۰۰۳) و کومکوگلو و همکاران (۲۰۱۵) محتوای روغن آن به ترتیب ۱۳/۱٪ و ۱۶/۸۴٪ گزارش شده [۱۵-۱۴] و طبق استاندارد ملی ایران (۷۴۲) بیشینه محتوای روغن این محصول باید ۱۴٪ باشد. پخت با اشعه مادون قرمز در مواد غذایی و به ویژه گوشت‌های فرآوری شده مورد توجه قرار گرفته است؛ زیرا آون‌های پخت معمولی با جابه‌جایی هوای گرم با سرعت بالا ممکن است باعث تخریب سطح، اکسیداسیون و سوختگی شوند. همچنین، بازده کمی دارند و انرژی زیادی مصرف می‌کنند. اشعه مادون‌قرمز با نگره‌داشتن دما و رطوبت آون در سطح معمول باعث صرفه‌جویی در مصرف انرژی و حفاظت از بافت و ترکیبات ماده غذایی می‌شود که بر خلاف روش‌های معمول پخت، این ترکیبات به وسیله دمای بالای آون و در اثر تبخیر از دست نخواهند رفت. در این روش، تجهیزات می‌تواند به

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- آماده سازی نمونه‌های خام ناگت مرغ

مواد اولیه مورد استفاده در این تحقیق شامل گوشت سینه مرغ، آرد سفید، بیکنگ پودر، فلفل سیاه، ادویه، نمک طعام (تولید شرکت گلها، ایران) روغن سرخ‌کردنی ترکیبی از سویا، پالم اولئین، آفتابگردان (تولید شرکت اوپلا، ایران) و پیاز بودند که از فروشگاه‌های محلی شهرستان گرگان تهیه گردید. آرد سوخاری از شرکت تردک و حلال هگزان از شرکت سویابین خریداری شد. سینه مرغ بعد از شست و شو و استخوان‌گیری چرخ شد و تا زمان استفاده در دمای 4°C نگهداری شد.

مخلوطی از گوشت سینه مرغ (۸۸ درصد)، پیاز (۱۰ درصد)، ادویه (۰/۵ درصد) و نمک (۱/۵ درصد) به عنوان بخش گوشتی ناگت مرغ در ابعاد $3/5 \times 3/5 \times 1/5 \pm 0/2 \text{ cm}$ با استفاده از قالب استیل برش داده شد. به منظور آماده‌سازی خمیرابه، آرد گندم ۹۴٪، نمک ۱٪، ماده حجم دهنده ۲/۵٪ و فلفل سیاه ۲/۵٪ با استفاده از همزن دستی (مدل SHM-300، ساپر-ساخت چین) در سرعت ۱۲۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۳۰ ثانیه مخلوط شده و نسبت ماده خشک به آب ۳:۵ (وزنی/حجمی) در نظر گرفته شد. نمونه‌های آماده‌شده در خمیرابه با دماهای 25°C به مدت ۳۰ ثانیه غوطه‌ور گردید و به مدت ۱۰ ثانیه جهت طی شدن مرحله چکاندن خمیرابه اضافی و حذف خطای آزمون به صورت عمودی نگه داشته شد. سپس، نمونه‌ها توسط آرد سوخاری به طور سطحی پوشش دهی شدند [۲۲].

۲-۲- پخت ناگت مرغ

نمونه‌های خام آماده شده به روش‌های زیر پخته شدند:

۲-۲-۱- سرخ کردن عمیق

سرخ کردن عمیق نمونه‌ها به عنوان روش شاهد در یک سرخ‌کن برقی خانگی (سرگیو، ایتالیا، مدل SDF555) مجهز به سیستم کنترل دما دارای ترموکوپل نوع K با حجم ۲/۵ لیتر و با استفاده از روغن سرخ‌کردنی اوپلا در دمای $(180 \pm 2^{\circ}\text{C})$ و به مدت ۴ دقیقه (یک نمونه در ۲/۵ لیتر) انجام شد. به منظور رسیدن به یک دمای ثابت، سرخ‌کن یک ساعت قبل از شروع فرایند روشن شد و در همین زمان نمونه‌ها به منظور خارج شدن از حالت منجمد در دمای اتاق (23°C) قرار گرفتند. در پایان فرایند، بلافاصله نمونه‌ها از سرخ‌کن خارج شده و روغن اضافی موجود در سطح آنها توسط کاغذ جاذب گرفته شد. بعد از

صورت فشرده و با کنترل دقیق‌تر دما طراحی شود [۱۶]. شریدان و شیلتون (۱۹۹۹) اثر مادون‌قرمز دور را بر پخت همبرگر بررسی و نتایج را با امواج متداول در آون مادون قرمز مقایسه کردند. نمونه‌هایی که با امواج مادون قرمز دور حرارت‌دهی شدند، نسبت به نمونه‌های حرارت‌دهی شده با امواج متوسط در طی پخت، مواد از دست‌رفته و مصرف انرژی کمتری داشتند. در دماهای بالاتر (طول موج‌های کوتاه‌تر) منبع انرژی، دمای مرکز همبرگرها نزدیک‌تر به دمای سطح بود و زمان پخت نیز کوتاه‌تر بود [۱۷].

هم‌چنین، شیلتون و همکاران (۲۰۰۲) یک مدل از نوع حالت ناپایا و تک بعدی برای پیش‌بینی انتقال حرارت و جرم در طول پخت همبرگرها با تابش اشعه مادون قرمز دور را شرح دادند. با در نظر گرفتن تأثیر جابه‌جایی در محاسبات انتقال حرارت در همبرگر پیش‌بینی مدل را هم برای انتقال حرارت و هم برای انتقال جرم به طور قابل توجهی بهبود بخشیدند [۱۸]. شریدان و شیلتون (۲۰۰۲) گزارش کردند که زمان پخت فاکتور اولیه تأثیرگذار بر کیفیت همبرگرها به وسیله مادون قرمز دور است. هم‌چنین، همبرگرهایی که به مدت طولانی پخته شدند، رطوبت و روغن زیادی از دست دادند و قابلیت پذیرش آنها کاهش یافت [۱۹]. بریکمن و همکاران (۲۰۰۹) تأثیر کباب کردن با مادون‌قرمز و پخت با هوای داغ را بر محتوای رطوبت، روغن، بافت و رنگ همبرگر بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از سرعت و دمای هوای بالاتر در طول فرآیند حرارتی، زمان پخت را کوتاه می‌کند و تفاوت اندکی در رطوبت و کاهش وزن کلی همبرگرها به وجود می‌آورد [۲۰]. ملیتو و فارکاس (۲۰۱۳) پارامترهای فرآیند برای تولید دونات بدون گلوتن به روش پیش‌سرخ-مادون‌قرمز را مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافته‌اند که این دونات‌ها بافت و ویژگی‌های حسی مشابهی با دونات‌های کاملاً سرخ‌شده داشته و محتوای روغن آنها پایین‌تر بود [۲۱]. باتوجه به مزایای حرارت‌دهی با مادون‌قرمز، هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر این روش (به تنهایی یا در ترکیب با روش متداول سرخ‌کردن عمیق) بر ویژگی‌های شیمیایی (محتوای رطوبت و روغن) ناگت مرغ و سینتیک کاهش رطوبت، انرژی فعال‌سازی و ضریب انتشار مؤثر رطوبت بود.

۳-۲- تعیین ویژگی‌های شیمیایی

۳-۲-۱- اندازه‌گیری محتوای رطوبت

اندازه‌گیری محتوای رطوبت مطابق با استاندارد (۱۹۸۶) AACC، با استفاده از آون آزمایشگاهی (200VO، ممرت^۴ آلمان) در دمای °C ۱۰۵ و به مدت ۲۴ ساعت انجام گرفت. محتوای رطوبت بر مبنای وزن مرطوب با استفاده از رابطه ۱ محاسبه گردید [۲۳].

(۱)

$$M_c(wb) = \frac{W_m - W_{ov}}{W_{ov}} \times 100$$

که در این رابطه W_m و W_{ov} به ترتیب جرم نمونه قبل و بعد از قرار دادن در آون می‌باشد.

۳-۲-۲- اندازه‌گیری محتوای روغن

محتوای روغن مطابق با روش استاندارد (۱۹۹۰) AOAC اندازه‌گیری شد [۲۴]. بدین منظور، ۲-۴ گرم از نمونه‌های خشک‌شده در کارتوش قرار گرفت. استخراج روغن با استفاده از هگزان و به روش سوکسله در طی ۶ ساعت سیرکولاسیون حلال انجام گرفت. بعد از پایان استخراج، کارتوش‌ها به مدت یک ساعت جهت حذف حلال در آون °C ۱۰۵ قرار گرفتند. محتوای روغن نیز بر مبنای وزن خشک و با استفاده از رابطه ۲ محاسبه گردید.

$$F_c(db) = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (2)$$

که در این رابطه F_c بیانگر محتوای روغن نمونه بر پایه خشک و W_1 وزن نمونه قبل از سوکسله و W_2 وزن بعد از سوکسله می‌باشد.

۴-۲- بررسی سینتیک تغییرات رطوبت

تغییرات جرم با استفاده از ترازوی (لوترون جی ام، مدل 300p، تایوان) تعبیه‌شده در آون پخت با دقت ± 0.1 گرم و در فاصله زمانی ۲۰ ثانیه ثبت شد. با استفاده از داده‌های به دست آمده از کاهش جرم نمونه‌ها، نحوه تغییرات رطوبت محصول در طی زمان پخت نمونه‌های ناگت مرغ با استفاده از معادله ۳ برحسب نسبت رطوبت در طول پخت محاسبه گردید [۲۵].

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e}$$

4. Memmert.

خنک شدن نمونه‌ها به مدت ۵ دقیقه، آزمایش‌های بعدی انجام گرفت.

۳-۲-۲- پخت در سامانه مادون قرمز

نمونه‌های ناگت مرغ با استفاده از سامانه مادون قرمز طراحی شده (شکل ۱) پخته شدند. در این سامانه از دو لامپ مدادی مادون قرمز دور^۲ (شرکت لامپ نور، ایران) با توان ۱۵۰۰ وات در بالا و پایین نگهدارنده نمونه و با فاصله ۴/۵ از آن استفاده شد و با استفاده از متغیر^۳ توان‌های تولیدی دستگاه در مقادیر ۴۲۰، ۵۲۰ و ۶۲۰ وات تنظیم شد. لامپ‌های مادون قرمز ۵ دقیقه قبل از شروع هر آزمایش روشن شدند تا به شرایط پایدار و یکنواخت برسند. در این پژوهش، سه روش متفاوت به منظور بررسی اثر پخت با پرتو مادون قرمز مورد استفاده قرار گرفت که عبارتند از:

- ۱- پخت به روش مادون قرمز: ناگت‌ها در سه توان ۴۲۰، ۵۲۰ و ۶۲۰ وات و در سه زمان ۵، ۷ و ۹ دقیقه در آون مادون قرمز پخته شدند.
- ۲- پخت به روش پیش‌سرخ کردن-مادون قرمز: ابتدا نمونه‌ها به مدت ۳۰ ثانیه در دمای °C ۱۸۰ پیش‌سرخ شده و سپس در سه توان ۴۲۰، ۵۲۰ و ۶۲۰ وات و سه زمان ۳، ۵ و ۷ دقیقه پخته شدند.
- ۳- پخت به روش مادون قرمز-سرخ کردن: ابتدا نمونه‌ها در آون پخت در سه توان ۴۲۰، ۵۲۰ و ۶۲۰ وات و سه زمان ۳، ۵ و ۷ دقیقه پخته شده و سپس به مدت ۳۰ ثانیه در دمای °C ۱۸۰ سرخ شدند.

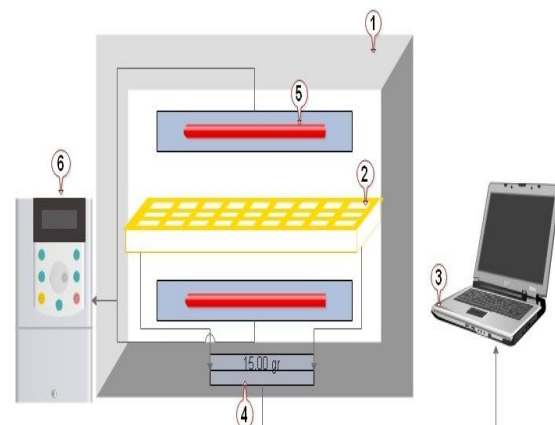


Fig 1 Schematic diagram of designed IR heating oven used for cooking the chicken nuggets: 1) cooking chamber; 2) sample holder; 3) computer; 4) electronic balance; 5) IR lamp; 6) variable.

2. Infrared Heat Lamp (FIR)
3. Variable

$$\text{slope} = \frac{-\pi^2 D_{\text{eff}}}{4l^2} \quad (6)$$

ضریب انتشار مؤثر رطوبت به دمای هوای آن و ترکیب ماده غذایی بستگی دارد. میزان حرارت جذب شده شاخص مؤثر دیگری است که بر نفوذ مؤثر با حرکت رطوبت درون ماده غذایی متناسب می‌باشد [۲۸]. از آنجا که در پژوهش حاضر متغیر مورد نظر توان لامپ مادون قرمز است، از رابطه آرنیوس اصلاح شده (معادله ۷) استفاده شد تا رابطه میان ضریب نفوذ مؤثر و توان مادون قرمز و جرم نمونه نمایش داده شود [۲۹].

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp [-E \times m/p] \quad (7)$$

که در این معادله D_0 ضریب نفوذ در دمای مبنا (ms^{-1})، Ea انرژی فعال سازی kJ.mol^{-1} ، P توان لامپ (W) و m جرم نمونه (kg) است. در این شرایط انرژی فعال سازی از طریق شیب خط نمودار $\ln D_{\text{eff}}$ در برابر m/P به دست می‌آید.

۲-۶- بررسی سینتیک کاهش رطوبت ناگت

مرغ در حین پخت با مادون قرمز

بررسی سینتیک کاهش رطوبت طی پخت، اهمیت زیادی در بررسی ویژگی‌های پختی ناگت مرغ دارد. معمولاً رفتار افت رطوبت در طی زمان در فرایند خشک شدن توسط معادلات نمایی به خوبی توصیف می‌شود. مدل‌های مختلفی برای بیان سرعت افت رطوبت در طی خشک شدن لایه نازک مواد زیستی پیشنهاد شده است [۳۰] که در این پژوهش از دو مدل لگاریتمی [۳۱] و خزایی [۳۲] استفاده شد (جدول ۱).

Table 1 Models used for thin-layer drying during cooking of chicken nugget

Model name	Model equation
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$
Khazaei	$MR = a + b \exp(-c.t) - d.t$

با توجه به اینکه فرایند پخت با استفاده از مادون قرمز نوعی فرایند خشک کردن لایه نازک محسوب می‌شود، در این مطالعه اطلاعات تجربیکاهش رطوبت طی پخت ناگت مرغ با استفاده از سامانه مادون قرمز و برازش آن‌ها با مدل‌های خشک کردن لایه نازک لگاریتمی و خزایی مورد استفاده قرار گرفت. تخمین شاخص‌های مدل‌های تجربی از داده‌های آزمایشی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB ۲۰۱۰ توسط رگرسیون غیر خطی در

که در این رابطه MR نسبت رطوبت (بدون بعد)، M_t رطوبت نمونه‌ها در هر لحظه بر پایه خشک ($d.b$)، M_e رطوبت تعادلی نمونه‌ها یا رطوبت در زمانی که تغییر جرم در نمونه مشاهده نمی‌شود ($d.b$) و M_0 رطوبت اولیه نمونه‌ها ($d.b$) می‌باشد. با توجه به رابطه ۳ نسبت رطوبت به رطوبت اولیه، رطوبت تعادلی و رطوبت نمونه‌ها در هر لحظه در طی پخت وابسته است. برای زمان‌های طولانی، مقادیر M_e در مقایسه با مقادیر M_0 و M_t بسیار کوچک می‌باشد. لذا برای محاسبه نسبت رطوبت از رطوبت تعادلی صرف نظر شد [۲۶].

۲-۵- تعیین ضریب انتشار مؤثر رطوبت و

انرژی فعال سازی

تعداد مکانیزم‌های انتقال رطوبت زیاد و اغلب پیچیده است. پدیده‌های انتقال معمولاً بر حسب انتشار فشاری، انتشار اجباری و انتشار معمولی (انتقال خالص ماده بدون حرکت سیال) طبقه‌بندی می‌شود. به منظور ایجاد تصویر ساده ای از انتقال رطوبت در طی پخت و داشتن هماهنگی مناسب بین داده‌های تجربی و مقادیر محاسبه شده، از قانون دوم انتشار فیک (معادله ۴) برای توصیف سینتیک انتشار رطوبت در مواد غذایی حرارت دیده استفاده گردید [۲۷].

$$\frac{\partial m}{\partial t} = D_{\text{eff}} V^2 m \quad (8)$$

برای استفاده از قانون فیک فرض گردید که فرآورده غذایی تک‌بعدی است و رطوبت اولیه یکنواختی دارد. قانون دوم انتشار فیک به دلیل کاهش محتوای رطوبت ناگت مرغ در فاز سرعت نزولی و به منظور کنترل فرایند از طریق انتشار آب به کار گرفته شد. حل معادله فیک برای یک نمونه تیغه‌ای شکل به صورت معادله ۵ می‌باشد.

$$\ln MR = \frac{\ln 8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{4l^2} \quad (9)$$

که در اینجا L نصف ضخامت نمونه (بر حسب متر)، t زمان پخت (s) و D_{eff} ضریب انتشار مؤثر رطوبت (m^2s^{-1}) می‌باشد. ضریب نفوذ مؤثر از طریق محاسبه شیب معادله ۵ به دست آمد. ضریب نفوذ معمولاً با رسم داده‌های تجربی کاهش رطوبت ناگت مرغ بر حسب $\ln MR$ نسبت به زمان تعیین می‌گردد. بعد از رسم نمودار $\ln MR$ نسبت به زمان، شیب خط به دست آمده در معادله ۶ قرار داده می‌شود تا ضریب نفوذ مؤثر به دست آید.

جداول ۲، ۳ و ۴ محتوای رطوبت و روغن را به ترتیب طی فرآیند پخت ناگت مرغ با استفاده از مادون قرمز، مادون قرمز-سرخ کردن و پیش سرخ کردن-مادون قرمز نشان می دهند. بیشترین و کمترین مقدار رطوبت به ترتیب در نمونه پخته شده با روش مادون قرمز در توان ۴۲۰ وات (با مقدار $61/42 \pm 0/48$ درصد) و نمونه پیش سرخ شده -مادون قرمز در توان ۶۲۰ وات و ۷ دقیقه (با مقدار $57/87 \pm 2/98$ درصد) مشاهده شد. همچنین، محتوای رطوبت ناگت هایی که تحت مادون قرمز با توان بالاتر قرار گرفتند نسبت به نمونه های تحت توان پایتتر لامپ در زمان ۹ دقیقه در هر سه روش پخت، به طور معنی داری کاهش یافت ($p < 0/05$). حرارت دهی مادون قرمز در توان و زمان بالاتر و به دنبال آن دمای بالاتر می تواند منجر به دناتوراسیون حرارتی و انقباض پروتئین ها شود که این به نوبه خود منجر به کاهش محتوای رطوبت ناگت مرغ می گردد. از سوی دیگر، تبخیر به دلیل اختلاف غلظت بخار آب میان لایه مرزی اشباع در سطح ناگت مرغ و محیط اطراف آن یا همان محفظه آون اتفاق می افتد. با افزایش توان لامپ و زمان دمای سطح نمونه افزایش یافته و بنابراین اختلاف غلظت بخار آب بالاتر خواهد بود [۱۹].

تیمارهای آزمایشی با طولانی ترین زمان پخت انجام شد. بدین ترتیب، ثابت ها در فرایند کاهش رطوبت ناگت مرغ محاسبه شد. شاخص هایی نظیر ضریب تعیین (R^2) و کمترین مربع میانگین خطا (SSE) برای ارزیابی برازش مدل های تجربی بر داده های آزمایشی استفاده شد [۳۳].

۷-۲- تجزیه و تحلیل آماری

به منظور بررسی اثر توان های مختلف لامپ مادون قرمز (۴۲۰، ۵۲۰ و ۶۲۰ وات) و زمان های مختلف پخت بر ویژگی های کیفی ناگت های مرغ پخته شده از آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی استفاده شد. در هنگام مشاهده معنی دار بودن اثر تیمارها، مقایسه میانگین ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح اطمینان ۹۵ درصد انجام شد. در این پژوهش، نرم افزارهای (2010) MATLAB و Microsoft Excel و (2013) SAS نسخه 9.0 مورد استفاده قرار گرفت.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ارزیابی محتوای رطوبت ناگت مرغ

Table 2 The effect of IR cooking on moisture and fat contents of the chicken nuggets

Physicochemical properties		Cooking conditions	
Moisture content	Fat content (db)	Power (W)	Time
47.12 ± 0.17^d	11.87 ± 0.82^a	-	contr
61.42 ± 0.48^a	3.87 ± 0.07^b	420	5
59.66 ± 0.19^{ab}	3.01 ± 0.12^c	520	5
57.87 ± 1.15^{abc}	2.81 ± 0.01^{cd}	620	5
59.08 ± 0.56^{ab}	3.06 ± 0.14^c	420	7
56.67 ± 2.16^{bc}	2.78 ± 0.08^{cd}	520	7
54.45 ± 0.21^c	2.29 ± 0.12^d	620	7
56.71 ± 1.53^{bc}	2.83 ± 0.04^{cd}	420	9
55.73 ± 1.49^{bc}	2.64 ± 0.05^{cd}	520	9
48.87 ± 4.28^d	2.18 ± 0.01^d	620	9

Same letters in each column indicate no significant difference ($P > 0.05$).

Table 3 The effect of cooking time and IR power on some physicochemical aspects of the chicken nuggets processed using IR cooking - post frying (IR-PF) method

Physicochemical properties		Cooking conditions	
Moisture content (wb)	Fat content (db)	Power (W)	Time
47.12 ± 0.17^{cd}	11.87 ± 0.82^a	-	Control
57.41 ± 2.19^a	10.82 ± 1.69^{ab}	420	3
55.52 ± 2.45^{ab}	10.06 ± 2.48^{abc}	520	3
52.61 ± 0.19^{abc}	5.09 ± 1.37^c	620	3
52.41 ± 0.45^{abc}	9.38 ± 1.41^{abcd}	420	5
51.13 ± 6.39^{bcd}	9.59 ± 2.69^{abcd}	520	5
49.87 ± 1.37^{bcd}	5.99 ± 0.92^{de}	620	5
54.21 ± 0.44^{ab}	11.48 ± 0.79^a	420	7
50.32 ± 0.59^{bcd}	7.32 ± 0.91^{bcde}	520	7
45.45 ± 0.58^d	6.52 ± 0.16^{cde}	620	7

Same letters in each column indicate no significant difference ($P > 0.05$).

Table 4 The effect of pre frying - IR cooking (PF-IR) method on some physicochemical properties of the chicken nuggets

Physicochemical properties		Cooking conditions	
Moisture content (wb)	Fat content (db)	Power (W)	Time
47.12±0.19 ^{cd}	11.87±0.82 ^a	-	Control
56.49±0.76 ^{ab}	11.62±0.15 ^a	420	3
57.47±1.21 ^a	8.04±0.01 ^c	520	3
54.01±3.14 ^{ab}	8.34±0.43 ^{bc}	620	3
54.97±1.56 ^{ab}	11.19±2.52 ^{ab}	420	5
51.41±5.91 ^{abc}	8.19±1.75 ^c	520	5
53.53±1.33 ^{abc}	8.54±0.08 ^{bc}	620	5
54.15±0.83 ^{ab}	9.52±0.19 ^{abc}	420	7
49.86±3.53 ^{bcd}	8.31±1.62 ^c	520	7
44.57±2.98 ^d	8.75±0.21 ^{bc}	620	7

Same letters in each column indicate no significant difference ($P > 0.05$).

هم‌چنین، نتایج مطالعه ملیتو و فارکاس (۲۰۱۳) روی دونات‌های پخته شده به روش پیش‌سرخ شده-مادون قرمز نشان داد که شار حرارتی بالا ($18/9\text{ kW/m}^2 - 24/3$) موجب افزایش خشکی سطح و سرعت مهاجرت رطوبت به سطح و تبخیر آب شده و در نتیجه، محتوای رطوبت پایین‌تر نمونه‌های دونات حاصل می‌شود. همان‌طور که انتظار می‌رفت، زمان‌های پایین‌تر حرارت‌دهی منجر به محتوای رطوبت بالاتر در محصول شد.

هم‌چنین، نتایج مطالعه ملیتو و فارکاس (۲۰۱۳) روی دونات‌های پخته شده به روش پیش‌سرخ شده-مادون قرمز نشان داد که شار حرارتی بالا ($18/9\text{ kW/m}^2 - 24/3$) موجب افزایش خشکی سطح و سرعت مهاجرت رطوبت به سطح و تبخیر آب شده و در نتیجه، محتوای رطوبت پایین‌تر نمونه‌های دونات حاصل می‌شود. همان‌طور که انتظار می‌رفت، زمان‌های پایین‌تر حرارت‌دهی منجر به محتوای رطوبت بالاتر در محصول شد.

۳-۳- سینتیک کاهش نسبت رطوبت (بدون

بعد) در حین پخت

اثر توان لامپ مادون قرمز و روش پخت مادون قرمز، مادون قرمز-سرخ‌کردن و سرخ‌کردن سمدون قرمز بر نسبت رطوبت (بدون بعد) ناگت مرغ حین پخت در طول زمان فرایند به ترتیب در شکل‌های ۲، ۳ و ۴ مشاهده می‌گردد. در طول پخت، نسبت رطوبت به کمتر از ۰/۶ رسید.

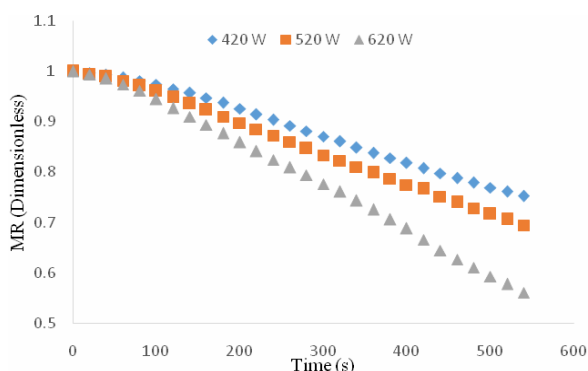


Fig 2. Effect of different power of IR cooking on moisture ratio (MR) of the chicken nuggets (IR method).

۲-۳- ارزیابی محتوای روغن ناگت مرغ

محتوای روغن تحت تأثیر توان لامپ مادون قرمز و زمان فرآیند پخت قرار می‌گیرد. با افزایش توان لامپ، محتوای روغن کاهش یافت. در نمونه‌هایی که پیش‌سرخ‌شدند، به دلیل خارج شدن روغن از ناگت مرغ طی فرآیند تکمیلی مادون قرمز، محتوای روغن آن کاهش می‌یابد. در واقع، شار حرارتی بالا روغن سطحی را که بر روی پوسته وجود دارد گرم نگه داشته و ویسکوزیته روغن را کاهش می‌دهد و این مساله باعث خارج شدن آن به صورت شیرابه^۵ در طول فرایند پخت با مادون قرمز خواهد شد (ملیتو و فارکاس، ۲۰۱۳). در نمونه‌هایی که ابتدا در آون مادون قرمز پخته شدند، به دلیل خشک شدن سطح آن و تشکیل پوسته ضخیم، نفوذ روغن کمتر بوده و در نتیجه محتوای روغن کمتری داشتند.

با توجه به جداول ۲، ۳ و ۴ مشاهده می‌شود که روغن نمونه‌ها با افزایش زمان پخت و توان لامپ مادون قرمز به طور معنی‌داری نسبت به نمونه شاهد کاهش یافته است ($p < 0.05$). مطابق جدول ۲، کمترین محتوای روغن مربوط به نمونه پخته شده با مادون قرمز در توان ۶۲۰ وات و زمان ۹ دقیقه بود

همان طور که انتظار می‌رود، توان‌های بالاتر مادون قرمز موجب جذب انرژی حرارتی بیشتر و در نتیجه افزایش دمای محصول و افزایش سرعت انتقال جرم می‌شود [۳۵]. نتایج مشابهی در پخت همبرگر [۱۹]، خشک‌کردن فلفل قرمز [۳۶] (کایماک-ارتکین، ۲۰۰۲) و کدو حلواپی (دویماز، ۲۰۰۷) [۲۶] گزارش شده است. مقادیر نسبت رطوبت ناگت مرغ در شرایط مختلف پخت با دو مدل تجربی لگاریتمی و خزایی به وسیله روش آنالیز رگرسیون غیرخطی برازش شدند (جدول ۵). بهترین مدل توصیف کننده روند کاهش رطوبت ناگت مرغ طی پخت با بیشترین ضریب تعیین (R^2) و کمترین مربع میانگین خطا (SSE) انتخاب شد. دو مدل لگاریتمی و خزایی، ضریب تعیین بیشتری نسبت به مدل‌های پیچ، پیچ اصلاح شده و میدیلی داشتند. جزئیات آنالیز آماری این دو مدل در جدول ۵ نشان داده شده است. واضح است که مقادیر R^2 و SSE در مدل لگاریتمی به ترتیب بین ۰/۹۹۸۵-۰/۹۸۶۹ و ۰/۰۰۰۲-۰/۰۰۲۳ و در مدل خزایی بین ۰/۹۹۹۷-۰/۹۷۹۴ و ۰/۰۰۰۱-۰/۰۰۳۶ متغیر است.

به منظور بررسی اعتبار مدل‌های برازش شده، نمودار مقایسه داده‌های تجربی و پیش‌بینی شده با استفاده از مدل لگاریتمی و (شکل ۵) و مدل خزایی (شکل ۶ و ۷) رسم شد. همان طور که مشاهده می‌شود، تطابق خوبی میان داده‌های تجربی و پیش‌بینی شده نسبت رطوبت با استفاده از این دو مدل در شرایط مختلف پخت ناگت مرغ وجود دارد. این نمودارها اثباتی بر توانایی مدل‌های انتخابی برای توضیح فرایند پخت ناگت مرغ در محدوده شرایط مورد استفاده در پژوهش حاضر است.

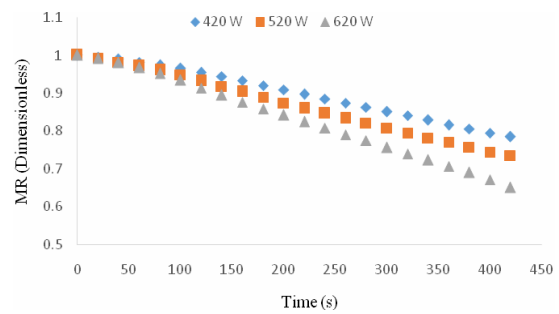


Fig 3 Effect of different power of IR cooking on moisture ratio (MR) of the chicken nuggets (IR-PF method).

کاهش مداوم نسبت رطوبت نشان می‌دهد که ضریب انتشار، انتقال جرم درونی را کنترل می‌کند [۳۰]. همان طور که در شکل‌های ۴-۲ مشاهده می‌شود، در توان‌های بالاتر مادون قرمز، سرعت کاهش نسبت رطوبت و در نتیجه شیب نمودار افزایش می‌یابد.

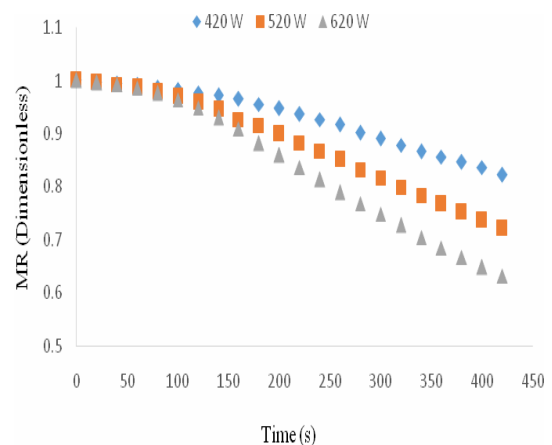


Fig 4 Effect of different power of IR cooking on moisture ratio (MR) of the chicken nuggets (PF-IR method).

Table 5 Statistical results obtained from the selected models for cooking of chicken nuggets

Khazayi		Logaritmic		Time (min)	Power (W)	Treatment
SSE	R^2	SSE	R^2			
0.0021	0.9882	0.0019	0.9893	9	420	IR
0.0008	0.9950	0.0018	0.9895	9	520	IR
0.0036	0.9794	0.0023	0.9869	9	620	IR
0.0002	0.9974	0.0005	0.995	7	420	IR-PF
0.0001	0.9989	0.0002	0.9983	7	520	IR-PF
0.0008	0.9997	0.0003	0.9985	7	620	IR-PF
0.0021	0.9882	0.0019	0.9893	7	420	PF-IR
0.0008	0.9950	0.0018	0.9895	7	520	PF-IR
0.0036	0.9794	0.0023	0.9869	7	620	PF-IR

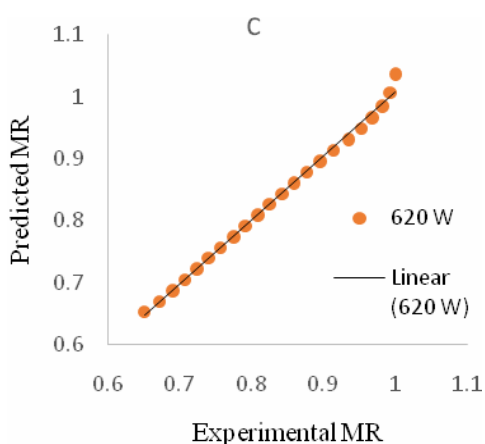
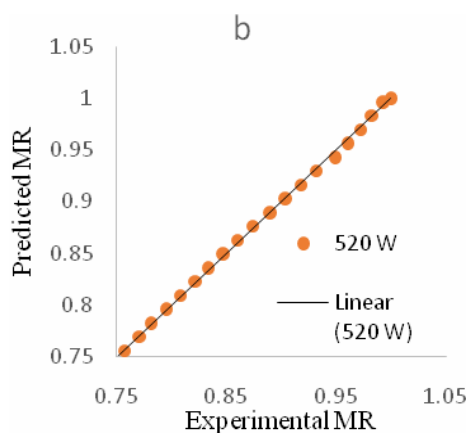
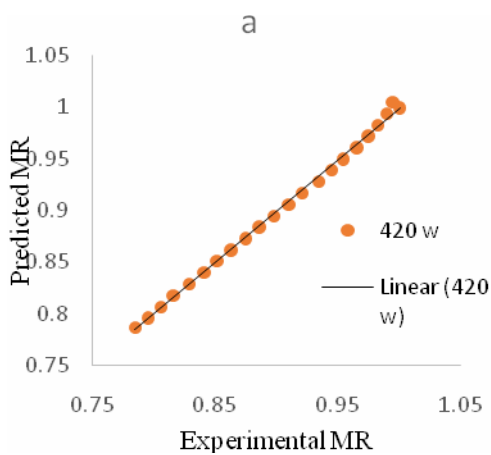


Fig 6 Comparison of actual and predicted MR values by the Khazaei model for cooking of chicken nuggets (IR-PF method). a (420W), b (520W) and c (620W).

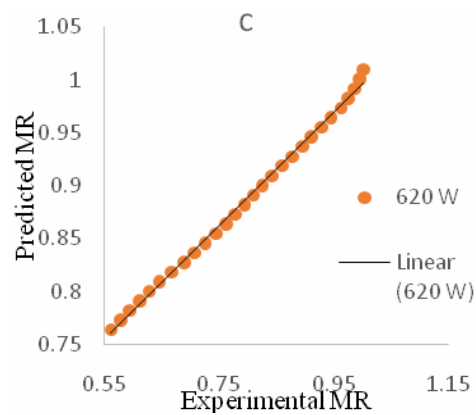
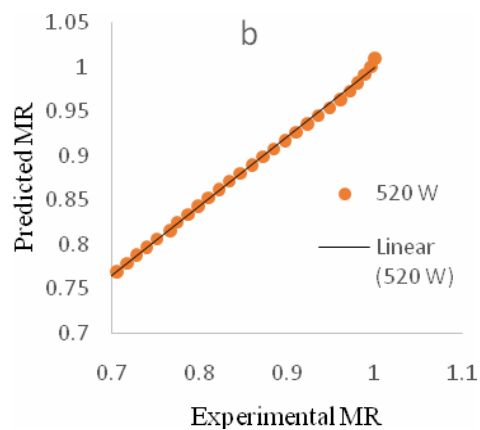
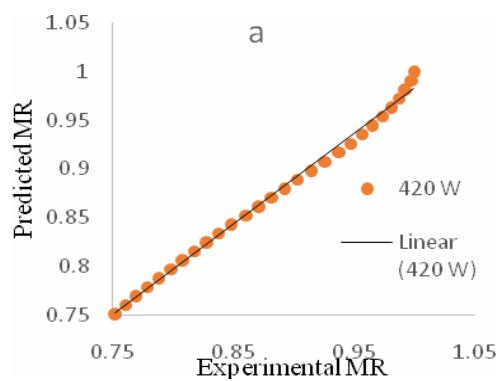


Fig 5 Comparison of actual and predicted MR values by the Logarithmic model for cooking of chicken nuggets (IR method). a (420W), b (520W) and c (620W).

۳-۴- محاسبه ضریب انتشار مؤثر رطوبت در

پخت ناگت مرغ با روش مادون قرمز

ضریب نفوذ مؤثر یک ماده غذایی ویژگی‌های انتقال جرم رطوبت شامل نفوذ مولکولی، مایع و بخار و جریان هیدرودینامیک و دیگر مکانیزم‌های دخیل در وقوع پدیده انتقال جرم را توصیف می‌کند [۳۷].

جدول ۶ میزان ضریب نفوذ مؤثر و ضریب تعیین معادله خطی در پخت ناگت مرغ با مادون قرمز به سه روش مختلف را نشان می‌دهد. ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برای توان‌های مختلف مورد استفاده برای پخت ناگت مرغ بین $1/099 \times 10^{-8}$ تا $2/69 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ متفاوت بود. با افزایش توان لامپ مادون قرمز، مقادیر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت به طور قابل توجهی افزایش یافت. این افزایش را می‌توان به بالا رفتن سریع دمای محصول در اثر افزایش فشار بخار نسبت داد که باعث افزایش سرعت کاهش رطوبت در طی پخت ناگت مرغ و متعاقباً افزایش ضریب نفوذ رطوبت در محصول می‌شود. بیشترین میزان ضریب نفوذ مؤثر رطوبت در نمونه پیش‌سرخ‌شده-مادون قرمز با توان ۶۲۰ و مدت زمان ۷ دقیقه و کمترین میزان آن را در نمونه پیش‌سرخ‌شده-مادون قرمز در توان ۴۲۰ وات و زمان ۷ دقیقه مشاهده شد. همچنین، میزان ضریب نفوذ مؤثر در خشک‌کردن هویج با استفاده از مادون قرمز بین $2/45 \times 10^{-9}$ تا $7/38 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ گزارش شده است که با افزایش توان لامپ به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد [۳۸].

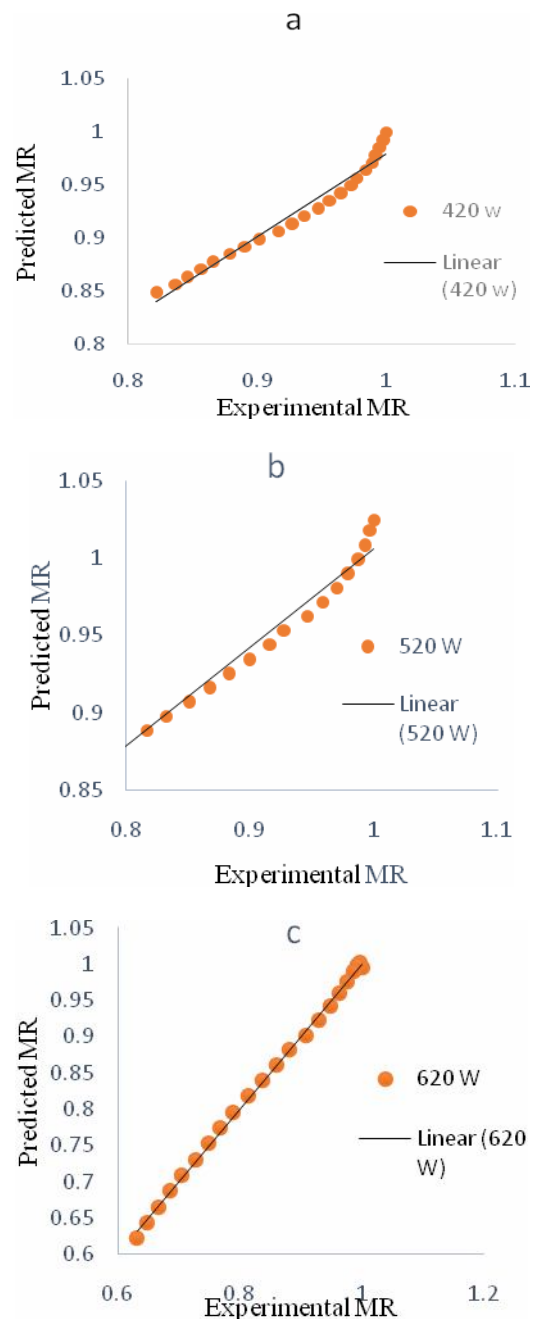


Fig 7 Comparison of actual and predicted MR values by the Khazaei model for cooking of chicken nuggets (PF-IR method). a (420W), b (520W) and c (620W).

Table 6 Effect of different IR cooking on Effective moisture diffusivity of chicken nugget.

Treatment	Power (W)	Time (min)	D_{eff} (m^2/s)	R
IR	420	9	1.282×10^{-8}	0.996
IR	520	9	1.601×10^{-8}	0.998
IR	620	9	2.487×10^{-8}	0.992
IR-PF	420	7	1.378×10^{-8}	0.996
IR-PF	520	7	1.748×10^{-8}	0.999
IR-PF	620	7	2.373×10^{-8}	0.997
PF-IR	420	7	1.099×10^{-8}	0.979
PF-IR	520	7	1.873×10^{-8}	0.988
PF-IR	620	7	2.692×10^{-8}	0.987

شدند، به دلیل عدم استفاده از روغن کمتر از سایر نمونه‌ها بود. محتوای روغن در نمونه‌های پیش‌سرخ‌مادون قرمز به دلیل خروج روغن به صورت شیرابه طی فرایند مادون قرمز و در نمونه‌های مادون قرمز-سرخ‌شده به دلیل خشک‌شدن و تشکیل پوسته طی همین فرایند، کمتر از نمونه شاهد بود. نتایج نشان داد که توان لامپ مادون قرمز بر ضریب نفوذ موثر اثر مثبت دارد که این می‌تواند ناشی از دمای بالاتر در توان‌های بالاتر باشد. با افزایش توان و متناسب با آن دمای حرارت‌دهی، مقدار این ضریب افزایش یافت برآزش داده‌های کاهش رطوبت با دو مدل خزایی و لگاریتمی انجام شد و نمونه‌های تیمارشده با روش مادون قرمز با مدل لگاریتمی (باتوجه به نمودار ۵) و نمونه‌های مادون قرمز-سرخ‌شده و پیش‌سرخ-مادون قرمز (باتوجه به نمودارهای ۶ و ۷) با مدل خزایی بهترین برآزش را داشتند.

۵- منابع

- [1] Sanz, T., Salvador, A., and Fiszman, S. (2004). Innovative method for preparing a frozen, battered food without a pre-frying step. *Food Hydrocolloids*, 18(2), 227-231.
- [2] United States Department of Health and Human Services, 2005.
- [3] Nicklas, T. A., Baranowski, T., Cullen, K. W., and Berenson, G. (2001). Eating patterns, dietary quality and obesity. *Journal of the American College of Nutrition*, 20(6), 599-608.
- [4] García, M., Ferrero, C., Campana, A., Bértola, N., Martino, M., and Zaritzky, N. (2004). Methylcellulose coatings applied to reduce oil uptake in fried products. *Food Science and Technology International*, 10(5), 339-346.
- [5] Krishnamurthy, K., Khurana, H. K., Soojin, J., Irudayaraj, J., and Demirci, A. (2008). Infrared heating in food processing: an overview. *Comprehensive Reviews In Food Science and Food Safety*, 7(1), 2-13.
- [6] Aghajanzadeh, S., Kashaninejad, M., and Ziaifar, A. M. (2016). Effect of infrared heating on degradation kinetics of key lime juice physicochemical properties. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 38, 139-148.
- [7] Salehi, F., Kashaninejad, M., Asadi, F., and Najafi, A. (2016). Improvement of quality attributes of sponge cake using infrared dried button mushroom. *Journal of Food Science and Technology*, 53(3), 1418-1423.

۳-۵- محاسبه انرژی فعال‌سازی در پخت ناگت

مرغ با روش مادون قرمز

شکل ۸ رابطه آرنیوس اصلاح‌شده بین ضریب نفوذ موثر و توان لامپ مادون قرمز در طول پخت ناگت مرغ به سه روش مادون قرمز، مادون قرمز-سرخ‌کردن و پیش‌سرخ-مادون قرمز را نشان می‌دهد. مقادیر انرژی فعال‌سازی و D_0 به دست آمده طی پخت ناگت مرغ با استفاده از مادون قرمز به ترتیب برابر با 27 kW/kg و $1.0 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ بود. همچنین، این مقادیر در روش مادون قرمز-سرخ‌کردن، برابر با 55 kW/kg و $3.0 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ و در روش پیش‌سرخ-مادون قرمز به ترتیب 96 kW/kg و $1.8 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ بود. بیشترین میزان انرژی فعال‌سازی برای روش پیش‌سرخ-مادون قرمز به دست آمد. دویمز (۲۰۱۵) در خشک کردن هویج با استفاده از مادون قرمز مقدار انرژی فعال‌سازی را 25 kW/kg گزارش کرد [۳۸].

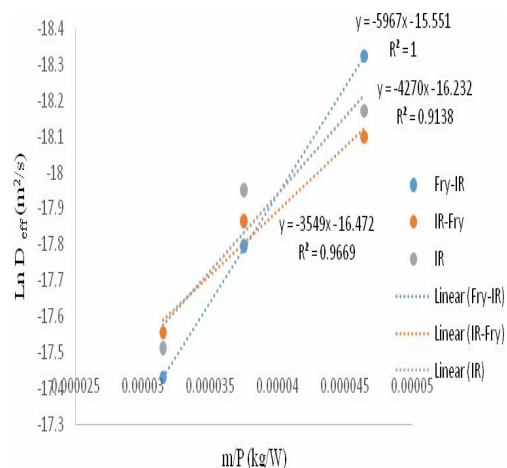


Fig 8 Modified Arrhenius relationship between D_{eff} and infrared power during cooking of chicken nugget.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، اثر توان‌های مختلف لامپ مادون قرمز، زمان فرایند و نوع فرایند پخت بر ویژگی‌های کیفی و سینتیک انتقال جرم ناگت مرغ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که توان لامپ اثر قابل توجهی بر ویژگی‌های کیفی مانند محتوای روغن و رطوبت داشت. طی فرایند پخت ناگت مرغ با استفاده از روش مادون قرمز، محتوای روغن و رطوبت با افزایش توان لامپ مادون قرمز و زمان فرایند در نمونه کاهش یافت و میزان جذب روغن در نمونه‌هایی که با مادون قرمز به تنهایی پخته

- [20] Braeckman, L., Ronsse, F., Hidalgo, P. C., and 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.
- [21] Melito, H. S., and Farkas, B. E. (2013). Effect of infrared finishing process parameters on physical, mechanical, and sensory properties of par-fried, infrared-finished gluten-free donuts. *Journal of Food Engineering*, 117(3), 399-407.
- [22] Mahdavian Mehr, H., Koocheki, A., Mohebbi, M. (2016). Kinetic modeling of mass transfer during deep fat frying of chicken nugget coated with batter containing Godume shahri seed gum/ soy protein isolates. *Iranian Food Science and Technology*, 12(4), 512-525.
- [23] AOAC, (1986). Moisture content. In: *Approved Methods of the American Association of Chemists*. AACC, St Paul, MN.
- [24] AOAC, (1990). *Official Methods of Analysis*. Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC.
- [25] Doymaz, I. (2007a). Air-drying characteristics of tomatoes. *Journal of Food Engineering*, 78(4), 1291-1297.
- [26] Doymaz, I. (2007b). The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. *Journal of Food Engineering*, 79(1), 243-248.
- [27] Nasiri, F. D., Mohebbi, M., Yazdi, F. T., and Khodaparast, M. H. H. (2011). Kinetic modeling of mass transfer during deep fat frying of shrimp nugget prepared without a pre-frying step. *Food and Bioprocess Processing*, 89(3), 241-247.
- [28] Babalis, S. J., and Belessiotis, V. G. (2004). Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. *Journal of Food Engineering*, 65(3), 449-458.
- [29] Dadali, G., and Özbek, B. (2008). Microwave heat treatment of leek: drying kinetic and effective moisture diffusivity. *International Journal of Food Science & Technology*, 43(8), 1443-1451.
- [30] Da Silva, W.P., E Silva, C.M., Gama, F.J., and Gomes, J.P. (2014). Mathematical models to describe thin-layer drying and to determine drying rate of whole bananas. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 13(1), 67-74.
- [8] Salehi, F., Kashaninejad, M., Mahoonak, A., and Ziaifar, A. (2017). Drying of button mushroom by infrared-hot air system. *Iranian Food Science and Technology*, 13(59), 151-159.
- [9] Ranjan, R., Irudayaraj, J., and Jun, S. (2002). Simulation of three dimensional infrared drying using a set of three-coupled equations by the control volume method. *Transactions of the ASAE*, 45(5), 1661.
- [38] Barbosa-Cánovas, G. V., Welti-Chanes, J., and Vélez-Ruiz, J. F. (2003). *Transport Phenomena in Food Processing*: CRC Press.
- [11] Sandu, C. (1986). Infrared radiative drying in food engineering: a process analysis. *Biotechnology Progress*, 2(3), 109-119.
- [12] Martínez-Bustos, F., Morales, S., Chang, Y., Herrera-Gómez, A., Martínez, M., Banos, L., and Flores, M. (1999). Effect of infrared baking on wheat flour tortilla characteristics 1. *Cereal Chemistry*, 76(4), 491-495.
- [13] Lloyd, B.J., B.E. Farkas, and K.M. Keener. (2004). Quality comparison of French fry style potatoes produced by oven heating, immersion frying and controlled dynamic radiant heating. *Journal of Food Processing and Preservation*. 28(6), 460-472.
- [14] Kumcuoglu, S., and Cagdas, E. (2015). Effects of grape seed powder and whey protein on quality characteristics of chicken nuggets. *Journal of Food Quality*, 38(2), 83-93.
- [15] Salvador, A., T. Sanz, and S. Fiszman. (2003). Rheological properties of batters for coating products-effect of addition of corn flour and salt. *Food Science and Technology International*, 9(1), 23-27.
- [16] Rastogi, N. K. (2012). Recent trends and developments in infrared heating in food processing. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 52(9), 737-760.
- [17] Sheridan, P., and Shilton, N. (1999). Application of far infra-red radiation to cooking of meat products. *Journal of Food Engineering*, 41(3), 203-208.
- [18] Sheridan, P., and Shilton, N. (2002b). Determination of the thermal diffusivity of ground beef patties under infrared radiation oven-shelf cooking. *Journal of Food Engineering*, 52(1), 39-45.
- [19] Sheridan, P., and Shilton, N. (2002a). Analysis of yield while cooking beefburger patties using far infrared radiation. *Journal of Food Engineering*, 51(1), 3-11.

- FIR-convection drying of barley. *Journal of Food Engineering*, 42(4), 177-182.
- [36] Kaymak - Ertekin, F. (2002). Drying and rehydrating kinetics of green and red peppers. *Journal of Food Science*, 67(1), 168-175.
- [37] Karathanos, V.T., Villalobos, G., and Saravacos, G.D. (1990). Comparison of two methods of estimation of the effective moisture diffusivity from drying data. *Journal of Food Science*, 55, 218-223.
- [38] Doymaz, I. (2015). Infrared drying kinetics and quality characteristics of carrot slices. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(6), 2738-2745.
- [31] Yaldiz, O., Ertekin, C., and Uzun, H.I. (2001). Mathematical modeling of thin layer solar drying of Sultana grapes. *Energy*, 42, 167-171.
- [32] Khazaei, J. (2008). Natural drying characteristics of sesame seeds. *Cercetări Agronomice în Moldova*, 3(135), 5-22.
- [33] Madamba, P. S., Driscoll, R. H., and Buckle, K.A. (1996). The thin-layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of Food Engineering*, 29(1), 75-97.
- [34] Haghi, A., and Amanifard, N. (2008). Analysis of heat and mass transfer during microwave drying of food products. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 25(3), 491-501.
- [35] Afzal, T., Abe, T., and Hikida, Y. (1999). Energy and quality aspects during combined

Study of mass transfer kinetics of chicken nugget during cooking by infrared system

Rahimi, D.¹, Kashaninejad, M.^{2*}, Ziaifar, A. M.³, Sadeghi Mahoonak, M.⁴

1. MSc of Food Process Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources
2. Professor, Department of Food Process Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources
3. Associate Professor, Department of Food Process Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources
4. Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources
5. PhD student of food Process Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

(Received: 2017/04/28 Accepted:2017/09/24)

Chicken nugget is one of the popular ready to eat food in the world. Due to high fat content in nuggets cooked using conventional method and obesity and corresponding disease, different methods such as partial frying and other final cooking method have been considered recently. In this study, chicken nuggets were cooked using several cooking methods including deep-fat frying, IR cooking, Pre frying - IR cooking (PF-IR) and IR cooking-post frying (IR-PF) using various IR power and process times. The effect of each treatment on moisture and fat contents and moisture loss kinetic (D_{eff} and E_a) of the chicken nuggets was investigated. The results revealed that fat content of samples reduced from 11.78% (control) to 2.18-11.62% in infrared, pre frying-infrared and infrared-post frying methods. The moisture and fat contents of the nuggets decreased when the higher IR power and longer process time were applied. The minimum moisture content was observed during PF-IR method (620 W-7 min). Moisture diffusivity value enhanced by increasing power of IR and the highest amount (2.69×10^{-8}) was obtained in the sample prepared using pre frying-infrared process in 620 W and 7 min cooking time. Finally, cooking process modeling was conducted using Khazaei and Logarithmic models and the best model for describing each process was chosen. Logarithmic model was better for infrared cooking and Khazaei model was selected for describing pre frying-IR and IR-post frying mass transfer kinetics.

Keywords: Chicken nugget, Cooking, Frying, Infrared, Mass transfer

* Corresponding Author E-Mail Address: Kashani@gau.ac.ir