

بررسی تجربی فرایند خشک کردن فیله ماهی با استفاده از تابش مادون قرمز

فرخ فرخ پور¹، لاله رومیانی^{2*}، سروش زرین آبادی³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی شیمی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

2- دانشیار، گروه شیلات، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

* نویسنده مسئول (l.roomiani@iauhvaz.ac.ir)

3- استادیار، گروه مهندسی شیمی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

چکیده

تاریخ دریافت: 1399/11/20
تاریخ بازنگری: 1400/02/05
تاریخ پذیرش: 1400/02/10
تاریخ انتشار برخط: 1400/02/12

واژه‌های کلیدی

اشعه مادون قرمز
خشک کردن
روش سطح پاسخ
فیله ماهی

هدف از این پژوهش استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) برای طراحی آزمایش و بهینه‌سازی فرایند خشک شدن فیله کپور معمولی (*Cyprinus carpio*) با استفاده از اشعه مادون قرمز بود. قدرت تابش اشعه مادون قرمز 83، 104 و 125 وات و توان لامپ 250 وات و فاصله آن از فیله ماهی 5 سانتی‌متر بود. قطعه‌های فیله ماهی در فواصل زمانی 60، 120 و 180 دقیقه با ترازوی دیجیتال با دقت 0/01 گرم وزن شدند. قدرت تابش (A) و زمان تابش (B) در کاهش مقدار رطوبت مؤثر بودند و اثر درجه دوم قدرت تابش و زمان تابش به‌طور معنی‌داری نسبت به اثر خطی آنها در کاهش مقدار رطوبت مؤثرتر عمل نمودند. در روند تغییرات سرعت خشک شدن اثر تداخلی قدرت تابش و زمان تابش نشان‌دهنده همبستگی این دو متغیر در بهینه کردن سرعت خشک شدن بود. هرچند قدرت تابش در مقایسه با زمان تابش نقش مهم‌تری داشت. میزان خشک شدن فیله‌ها در زمان تابش پایین‌تر و قدرت تابش بالاتر، افزایش یافت. به‌طوری‌که در حداقل زمان تابش (60 دقیقه) تحت قدرت بالای تابش سرعت خشک شدن فیله‌ها بهبود یافت. نفوذپذیری مؤثر رطوبت در قدرت تابش پایین و زمان کم کاهش یافت. براساس مدل‌های طراحی مرکب مرکزی، تیمار 2 با قدرت اشعه 125 وات و زمان 60 دقیقه (رطوبت 1/32 گرم آب بر گرم نمونه، سرعت خشک شدن 0/022 گرم آب بر گرم وزن نمونه در دقیقه و نفوذپذیری مؤثر رطوبت 1/25846E-007 مترمربع بر ثانیه) سبب بهبود ماندگاری فیله ماهی شد.

مقدمه

آبزیان و فراورده‌های ناشی از آنها را افزایش داد (Duan, 2011; Jiang, Wang, Yu, & Wang, 2011). فرایند خشک کردن نه تنها محتوی رطوبت محصول را کاهش می‌دهد، بلکه سبب ایجاد تغییرات فیزیکی، بیولوژیکی و شیمیایی شده و روی فعالیت‌های فیزیوکوشیمیایی همانند فعالیت‌های آنزیمی، فساد باکتریایی، ویسکوزیته، سختی، عطر و بو، طعم و قابلیت بسته‌بندی مؤثر است (Calin-Sanchez, Figiel, Wojdyło, Szarycz, & Carbonell-Barrachina, 2014; Traffano-Schiffo, Castro-Giráldez, Fito, & Balaguer, 2014).

ماهی تازه صیدشده بیشتر از 80 درصد آب دارد (Jain & Pathare, 2007) و ماهیان توزیع‌شده در بازار رطوبتی حدود 36/1 تا 52 درصد دارند (Kim, Oh, Lee, Yoon, & Lee, 2020). از آنجایی‌که آبزیان دارای اسیدهای چرب غیراشباع زیادی هستند، آنها را به ماده‌ای با قدرت فساد بالا تبدیل کرده است که سبب ماندگاری کوتاه آنها می‌شود. پس ضروری است که روش‌هایی اتخاذ گردد تا بتوان آنها را به‌طور صحیح نگهداری کرد و ماندگاری

خشک کردن با استفاده از نور خورشید یکی از روش‌های سنتی است. با این حال، خشک کردن در آفتاب، اغلب معایب زیادی دارد، از جمله قرارگیری محصول برای زمان طولانی در شرایط غیراستریل و فراوری با دست که نتیجه آن کیفیت و جذابیت پایین محصول است. سایر روش‌ها که به منظور بهبود فرایند خشک کردن توسعه یافته‌اند می‌توانند به خشک کردن از طریق هوای داغ، خشک کردن در خلأ، خشک کردن انجمادی، خشک کردن با استفاده از مادون قرمز و خشک کردن در مایکروویو (Jafari, Kalantari, & Azadbakht, 2017; 2018; Pan et al., 2008) اشاره کرد.

برای به حداقل رساندن معایب خشک کردن در مطالعه‌های مختلف چندین روش مورد توجه قرار گرفته است. اشعه مادون قرمز یکی از روش‌های رایج خشک کردن مواد غذایی است. این اشعه به درون ماده غذایی نفوذ کرده و در آنجا انرژی اشعه از طریق حرکت سریع مولکول‌های آب به گرما تبدیل می‌شود (Hebbar & Ramesh, 2005; Ismail & Kocabay, 2018). این موضوع می‌تواند زمان خشک کردن را کاهش دهد، هزینه انرژی را پایین آورده و همچنین به شکل مساوی دما را در محصول پراکنده نماید که منجر به تولید محصول با کیفیت بالاتری می‌شود (Nowak & Lewicki, 2004). این روش بخصوص برای مواد غذایی همانند فیله ماهیان که لایه‌ای نازک با سطحی وسیع دارند، بسیار مناسب است. در روش تابش مادون قرمز، به دلیل اینکه امواج مادون قرمز در محدوده طول موج‌های قابل جذب به وسیله آب هستند، با جذب این امواج به وسیله رطوبت موجود در محصول و ارتعاش مولکول‌های آب، گرما به صورت یکسان در درون ماده تولید می‌گردد و در نتیجه فشار بخار سبب انتقال رطوبت به سطح شده و به راحتی توسط محیط اطراف حذف می‌شود (حافظی، شیخ‌داودی و سجادی، 1395).

صالحی، اسدی‌امیرآبادی و کاشانی‌نژاد (1396) در مدل‌سازی فرایند خشک کردن بادمجان توسط مادون قرمز به این نتیجه رسیدند که با افزایش توان لامپ از 150 به 375 وات، مقدار کاهش وزن از 31/08 به 92/44 درصد افزایش و با افزایش فاصله لامپ از 5 به 15 سانتی‌متر، میزان وزن از 92/44 به 31/15 درصد، کاهش یافت. آیدانی، حدادخداپرست و کاشانی‌نژاد (1396) در بررسی

خصوصیات کیوی خشک شده با سامانه مادون قرمز گزارش کردند که با افزایش توان لامپ، مادون قرمز باعث افزایش آفت وزن نمونه‌ها و افزایش توان لامپ ضریب نفوذ رطوبت را افزایش داد. Eun و Jiang, Zhao (2017) در مطالعه بهینه‌سازی فرایند خشک کردن اسکوئید با روش‌های ترکیبی و با استفاده از روش سطح پاسخ گزارش کردند که با افزایش زمان خشک شدن، محتوی رطوبت و فعالیت آب در اسکوئید به ترتیب از 9/07 به 4/76 درصد و 0/136 به 0/056 رسید. براساس روش سطح پاسخ (RSM¹) شرایط بهینه برای خشک کردن اسکوئید 70 درجه سانتی‌گراد و به مدت 3 ساعت بود. با توجه به مطالعه‌های چندین فاکتور روی کیفیت نهایی ماده خشک شده مؤثر است از جمله دما، سطح قدرت و زمان خشک کردن که در طراحی آنها، مدل‌های شبیه‌سازی مناسبی مورد نیاز است (Hebbar & Ramesh, 2005). در واقع هدف از فرایند مدل‌سازی، انتخاب مدل‌های مناسب قابل استفاده در حیطه کاری مورد نظر و برازش داده‌های آزمایشگاهی با این مدل‌ها می‌باشد، به طوری که بتوان از بین این مدل‌ها، بهترین مدل را که داده‌های آزمایشگاهی را برازش می‌کند، به دست آورد. از این رو، با انتخاب بهترین مدلی که سینتیک خشک کردن را توصیف کند، می‌توان روند تغییرات ماده غذایی را طی فرایند خشک کردن مورد بررسی قرار داد و خشک‌کن‌های صنعتی مناسب را با توجه به نوع ماده غذایی طراحی کرد (Li, Cao, & Liu, 1997; Steinteld & Segal, 1986). بهینه‌یابی چند پاسخ در چهارچوب RSM اهمیت ویژه‌ای دارد. در مجموع پژوهش‌های فعلی در زمینه RSM در سه مسیر دنبال می‌شود. این مسیرها شامل شناسایی و توسعه واحدهای آزمایشی (چیزی که باید اندازه‌گیری شود)، توسعه مدل‌های برآورد سطح پاسخ و افزایش دقت مدل را شامل می‌شود (Vieira, Pereira, & Hubinger, 2012). کاربرد و استفاده موفقیت‌آمیز از طرح آزمایشی و آماری روش سطح پاسخ می‌تواند برای کمک به مهندسان جهت توسعه فرایندها مورد استفاده قرار گیرد؛ چرا که به طور مؤثری در کاهش هزینه و زمان توسعه کارا بوده و منتهی به نتایجی می‌گردد که در محیط آزمایشی اطمینان و راندمان بالاتری در مقایسه با استفاده از دیگر

¹ Response surface method

سانتی متری نصب شده و به فیله‌ها تابیده می‌شد. قدرت تابش اشعه مادون قرمز 83، 104 و 125 وات بود. قطعه‌های ماهی در فواصل زمانی 60، 120 و 180 دقیقه با ترازوی دیجیتال با دقت 0/1 گرم (model BB3000، Mettler-Toledo AG، Greifensee، ساخت سوئیس) وزن شدند. تیمارهای آزمایش در این بررسی در **جدول (1)** نشان داده شده است.

جدول 1- تیمارهای مورد مطالعه

تیمار	قدرت تابش (وات)	زمان تابش (دقیقه)
1	83	60
2	104	60
3	125	60
4	83	120
5	104	120
6	125	120
7	83	180
8	104	180
9	125	180

زمانی که محتوی رطوبت نمونه‌ها به حدود 0/18 گرم آب/گرم ماده خشک رسید، فرایند خشک کردن متوقف شد. محصولات خشک شده در یک دسیکاتور قراردادده تا خنک شدند (Darvishi, Azadbakht, & Farhang, 2013). مقدار رطوبت نمونه ماهی در طول فرایند خشک کردن با استفاده از نسبت MR (رابطه 1) به دست آمد (Darvishi et al., 2013).

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

در رابطه (1)، M_t میانگین رطوبت ماهی در طول زمان t ، M_0 محتوی رطوبت اولیه، M_e عدد تعادل رطوبت که به صورت گرم آب/گرم ماده خشک بیان می‌شود. این عدد در طول فرایند خشک کردن صفر در نظر گرفته شد (Maskan, 2000). باتوجه به اینکه مقدار رطوبت در طول فرایند خشک کردن ثابت نیست و دارای کاهش است فرمول بالا به صورت رابطه (2) بیان شد:

$$MR = \frac{M_t}{M_0}$$

روش‌ها دارد (Manivannan & Rajasimman, 2008).

ماهی کپور معمولی¹ یکی از مهم‌ترین ماهیان پرورشی در جهان محسوب می‌شود که بالاترین آمار پرورش ماهیان گرمابی را به خود اختصاص می‌دهد. به دلیل ارزش غذایی و پروتئین بالا، اسیدهای چرب امگا-3 و اسیدهای آمینه ضروری این گونه توانسته است در سفره غذایی مصرف‌کنندگان سراسر جهان جای گیرد. از این گونه فراورده‌های زیادی تولید می‌شود مانند: ماهی نمک‌سود، شور شده، ماهی ماریناد شده²، سوریمی و ماهی خشک شده (FAO, 2019). از آنجایی که خشک کردن یکی از روش‌های افزایش ماندگاری ماهیان و فراورده‌های آنها محسوب می‌گردد و روش‌های سنتی باعث بروز آلودگی‌های میکروبی می‌شوند، ضروری است روش‌های صنعتی و کارآمد جایگزین روش‌های سنتی شوند. از آنجایی که تاکنون مطالعه‌ای در این زمینه روی آبزیان در ایران به ثبت نرسیده است، هدف از این مطالعه مدل‌سازی فرایند خشک کردن فیله ماهی کپور معمولی به روش مادون قرمز بود تا بتوان با راهکار مناسب کمک به افزایش ماندگاری، حفظ ارزش غذایی و ایمنی آن کرد.

مواد و روش‌ها

تهیه ماهی

باتوجه به گستردگی پرورش ماهیان گرمابی، کپور معمولی به عنوان گونه مورد آزمایش انتخاب شد. ماهیان (1650±4/50 گرمی) به صورت تازه از مزارع پرورش ماهیان گرمابی در استان خوزستان، تهیه و همراه با یخ به آزمایشگاه منتقل شدند. نمونه‌ها پس از انتقال، شسته و پاک شده و به شکل فیله با ابعاد 5×15 و ضخامت 2 سانتی متر بریده شدند.

خشک کردن فیله ماهی با اشعه مادون قرمز

آزمایش خشک کردن (Snijders Moisture Balance)، Snijders b.v.، Tilburg، 430B، ساخت هلند) با یک لامپ هالوژن 250 وات انجام شد (Infrared Heat Lamp، ساخت ایران). لامپ مادون قرمز گازی با المان فلزی در بالای سطح نمونه‌ها به صورت عمودی و در فاصله 20

¹ *Cyprinus carpio*

² *Marinade*

شد. هرچه R^2 به 1 نزدیکتر و مجموع مربعات خطا کوچکتر باشد، مدل برازش بهتری برای داده‌های آزمایشگاهی خواهد بود و به‌عنوان بهترین مدل انتخاب شد.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

در این پژوهش از روش RSM برای طراحی آزمایش‌ها و بهینه‌سازی فرایند خشک‌شدن فیله با استفاده از اشعه مادون قرمز از نرم‌افزار مینی‌تب نسخه 16 جهت تجزیه و تحلیل اطلاعات استفاده شد. با توجه به تکنیک طراحی مرکب مرکزی از نوع مرکز وجه ($\alpha=1$)، رابطه بین متغیرها و نتایج حاصله از آزمایش‌ها به صورت یک مدل برازش چندجمله‌ای تقریبی خطی، تداخلی و توانی (معادله خطی، فاکتور متقابل دوگانه، درجه دوم) به دست آمد. اختلاف بین میانگین‌ها با آزمون دانکن مقایسه شد. همچنین، مناسب بودن مدل با استفاده از آنالیز تجزیه و تحلیل واریانس برازش و کفایت و کیفیت مدل برازش شده توسط شاخص ضریب تبیین (R^2 -Squared) بررسی شد.

نتایج و بحث

بررسی نتایج استفاده از اشعه مادون قرمز روی رطوبت، نفوذپذیری رطوبت و نرخ خشک کردن فیله کپور معمولی با توجه به اطلاعات به دست آمده از مقایسه نتایج تجربی، پیش‌بینی شده و مدل پیشنهادی، تحقیق حاضر نشان داد که روش RSM قادر به پیش‌بینی مطلوب، طراحی آزمایش و فرایند خشک شدن فیله با استفاده از اشعه مادون قرمز می‌باشد که صحت فرایند را به اثبات می‌رساند. براساس خصوصیات آماری مدل انتخاب شده، مدل ریاضی براساس مقادیر بیان شده برای هریک از شاخص‌های اندازه‌گیری شده به دست آمد. براساس نتایج جدول (2)، در هر سه تیمار 83، 104 و 125 وات، افزایش زمان تابش، سبب کاهش معنی‌دار میزان رطوبت شد ($P < 0/05$).

نرخ خشک کردن نمونه‌های ماهی با استفاده از رابطه (3) تعیین شد.

رابطه (3)

$$DR = \frac{M_t - M_{t+\Delta t}}{\Delta t}$$

در رابطه (3)، $M_{t+\Delta t}$ محتوی رطوبت نمونه‌های ماهی در $t + \Delta t$ (گرم آب/گرم ماده خشک)، Δt فاصله زمانی بین دو نمونه برداری. علاوه بر این، نفوذپذیری مؤثر رطوبت (D_{eff}) با استفاده از رابطه (4) تعیین شد (Okos, Campanella, Narsimhan, Singh, & Weitnauer, 2006). براساس قانون فیک، D_{eff} با استفاده از تعادل Crank تعیین شد:

رابطه (4)

$$MR = \frac{M_t - M_E}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left[-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right]$$

در رابطه (4)، D_{eff} نفوذپذیری مؤثر رطوبت (مترمربع بر ثانیه)، L ضخامت ماهی (سانتی‌متر)، t زمان خشک کردن (ثانیه). MR در برابر زمان خشک کردن یک خط راست با شیب K طبق رابطه (5) است:

رابطه (5)

$$K = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2}$$

با استفاده از شیب خط، راندمان رطوبت تعیین شد. وابستگی D_{eff} به نسبت قدرت خروجی مادون قرمز برای نمونه‌ها با استفاده از فرمول آرنیوس¹ تعیین شد (رابطه (6):

رابطه (6)

$$D_{eff} = D_0 \exp\left[-\frac{E_a m}{P}\right]$$

در رابطه (6)، D_0 ضریب نفوذ مؤثر اولیه (مترمربع بر ثانیه)، E_a انرژی فعال سازی (وات بر گرم)، P سطح قدرت تابش یا مادون قرمز (وات) و m وزن نمونه (گرم). شیب خط E_a و نقطه قطع D_0 بود.

برای انتخاب بهترین مدل (معادله خطی، فاکتور متقابل دوگانه، درجه دوم) از پارامترهای آماری مربع ضریب همبستگی (R^2) و مجموع مربعات خطا (SSE^2) استفاده

¹ Arrhenius

² Standard Sum of Error

جدول 2- بررسی تأثیر استفاده از اشعه مادون قرمز بر پارامترهای فیله کپور معمولی

نمود پذیر مؤثر رطوبت (10^{-7} مترمربع در ثانیه)	نرخ خشک شدن (گرم آب بر گرم وزن نمونه در دقیقه)	میزان رطوبت (گرم آب بر گرم وزن نمونه)	تیمار
0/43±0/02 ^a	0/011±0/00 ^a	2/76±0/12 ^a	1
0/86±0/02 ^b	0/014±0/09 ^b	2/14±0/04 ^b	2
1/32±0/02 ^c	0/022±0/00 ^c	1/22±0/02 ^c	3
0/69±0/02 ^d	0/006±0/00 ^d	1/90±0/07 ^d	4
1/20±0/01 ^e	0/008±0/00 ^e	0/89±0/04 ^e	5
1/43±0/02 ^f	0/012±0/00 ^f	0/37±0/01 ^f	6
1/12±0/02 ^g	0/005±0/00 ^g	1/39±0/02 ^g	7
1/38±0/03 ^h	0/004±0/00 ^h	0/43±0/02 ^h	8
1/81±0/04 ⁱ	0/002±0/00 ^e	0/20±0/03 ⁱ	9

حروف غیرمشابه به معنی اختلاف معنی دار در سطح 0/05 است ($P<0/05$).

مدل سازی رطوبت فیله‌ها

به منظور انتخاب بهترین مدل برای سنجش تأثیر استفاده از اشعه مادون قرمز روی مقدار رطوبت (جدول 3)، از آزمون واریانس استفاده شد. باتوجه به اینکه سطح P-value، از 0/05 کوچکتر است ($P<0/05$) مدل طراحی شده، مدل مناسبی برای این سنجش است. براساس معادله چندجمله‌ای متغیرهای مستقل، پارامتر خطی قدرت تابش (A) و زمان تابش (B) و جمله درجه دوم آنها (B^2, A^2) در کاهش مقدار رطوبت دارای تأثیر بودند، این موضوع در شکل (1) نیز مشخص شده است. باتوجه به P-value، قدرت تابش و زمان خشک شدن بیشترین تأثیر را روی رطوبت داشتند ($P<0/05$)، همچنین باتوجه به F-value، مقدار رطوبت به شدت تحت تأثیر قدرت تابش و زمان خشک شدن قرار دارد. در این آزمون اثر درجه دو قدرت تابش و اثر درجه دو زمان خشک شدن بر روند خشک شدن مؤثر بودند؛ اما جمله‌های مربوط به اثر تداخلی خطی متغیرها (BA) تأثیر معنی داری در کاهش رطوبت نداشتند؛ بنابراین از مدل پیشنهادی حذف شدند. در واقع با افزایش توان لامپ، افزایش ظرفیت جذب رطوبت هوا بالا رفته که به دلیل افزایش اختلاف دما بین هوا و محصول می‌باشد. این امر عبور مولکول‌های بخار آب را به سمت خارج افزایش داده و زمینه را برای خروج رطوبت بیشتر از بافت فیله فراهم می‌سازد و زمان خشک شدن کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد تمام فرایند خشک کردن در مرحله نزولی خشک کردن اتفاق می‌افتد و این نشان می‌دهد که انتشار، مکانیسم فیزیکی حاکم بر رطوبت نمونه‌هاست (Del Nobile et al., 2009).

با افزایش زمان تابش اشعه مادون قرمز و افزایش قدرت اشعه، میزان رطوبت کاهش یافت ($P<0/05$). روند خشک شدن با افزایش قدرت اشعه در دو زمان 60 و 120 دقیقه قابل مشاهده بود ($P<0/05$) اما در 180 دقیقه افزایش قدرت اشعه، نرخ خشک شدن را افزایش نداد ($P<0/05$). این موضوع می‌تواند به دلیل خارج شدن سریع رطوبت در زمان‌های اولیه خشک شدن باشد، که با نتایج مطالعه یوسفی، دیلمقانیان، ضیافروری و معزی (1397) مطابقت دارد؛ مطابقت دارد؛ چراکه آنها بیان کردند با افزایش دما از 50 به 80 درجه سانتی‌گراد، میزان زمان خشک کردن 60 درصد کاهش می‌یابد. در دماهای بالاتر، به دلیل خروج سریع تر رطوبت، فرایند خشک شدن در زمان کمتری رخ می‌دهد. نرخ کمتر خشک شدن با افزایش دما، به دلیل افزایش فشار بخار آب درون فیله‌هاست که مهاجرت رطوبت را افزایش می‌دهد. سرعت خشک شدن در ابتدا زیاد و سپس کم می‌شود و نشان از آن دارد که انتشار عامل حاکم در پدیده انتقال جرم درون فیله‌هاست. در هر سه تیمار اشعه کمترین میزان خشک شدن در 180 دقیقه اندازه‌گیری شد ($P<0/05$). میزان نفوذپذیری مؤثر رطوبت فیله کپور معمولی در جدول (2) نشان داده شده است. براساس نتایج جدول (2)، در قدرت اشعه‌های 83، 104 و 125 وات کمترین میزان نفوذپذیری در 60 دقیقه و بالاترین میزان نفوذپذیری در 180 دقیقه اندازه‌گیری شد. در هر سه زمان 60، 120 و 180 دقیقه، اشعه با قدرت تابش 125 وات، بالاترین میزان نفوذپذیری را نشان داد. در روش مادون قرمز، لایه سطحی و قسمت‌های داخلی به شدت گرم شده و در نتیجه باعث افزایش سرعت انتقال جرم و حرارت می‌گردند و رطوبت به سرعت خارج می‌گردد.

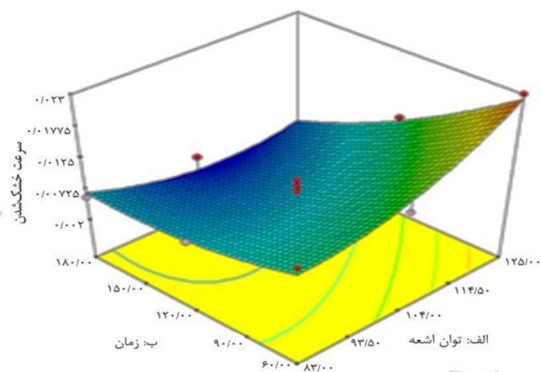
جدول 3- آنالیز واریانس فاکتورهای مؤثر بر فرایند خشک‌شدن فیلهٔ کپور معمولی

میانگین مربعات			df	Source
نفوذپذیری رطوبت مؤثر	نرخ خشک‌شدن	تغییرات رطوبت		
6/883 E-015**	6/063 E-005**	1/38**	5	Model
8/893 E-015**	2/817 E-005*	3/18**	1	A-Radiation
4/873 E-015**	1/815 E-004**	2/90**	1	B-Time
-	4/900 E-005*	0/046 ^{ns}	1	AB
-	2/024 E-005**	0/14*	1	A ²
-	8/047 E-006 ^{ns}	0/37**	1	B ²
-	4/235 E-006	0/021	7	Residual
6/09 ^{ns}	4/148 E-006 ^{ns}	0/040 ^{ns}	3	Lack of Fit
9/200 E-018	4/300 E-006	6/850 E-003	4	Pure Error

* معنی‌داری در سطح 0/05 درصد؛ ** معنی‌داری در سطح 0/01؛ ^{ns} عدم معنی‌داری

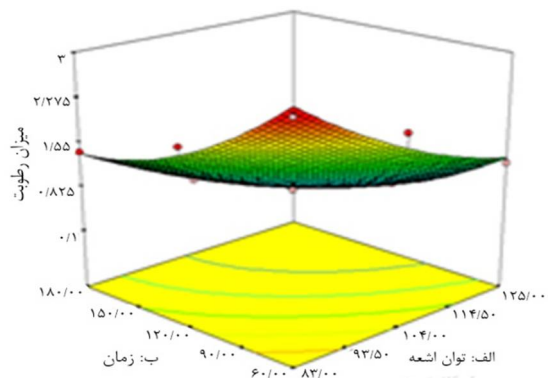
مدل‌سازی سرعت خشک‌شدن فیله‌ها

در جدول (3) نتایج آزمون آنالیز واریانس روی نرخ خشک‌شدن فیله‌ها تحت تأثیر زمان و قدرت اشعه نشان داده شده است. باتوجه‌به مشاهده‌های مدل رگرسیون حاصل از آزمون در سطح اطمینان 99 درصد معنی‌دار بوده و مدلی مناسب جهت توصیف نرخ خشک‌شدن فیله‌ها بود ($P < 0/05$)، زیرا آزمون عدم برازش یا خطای آزمایش عدم اختلاف معنی‌داری را نشان داد. در بین متغیرهای ورودی پارامتر خطی زمان تابش با سطح اطمینان 99 درصد بر سرعت خشک‌شدن فیله‌ها مؤثر بود ($P < 0/05$). بیشینهٔ میزان F-value در این پارامتر بیانگر اثر بالای زمان تابش بر سرعت خشک‌شدن فیله‌ها در فرایند خشک‌کردن می‌باشد. همچنین در این آزمون پارامتر خطی قدرت تابش و اثر متقابل قدرت تابش و زمان تابش بر روند نرخ خشک‌شدن فیله‌ها مؤثر بودند ($P < 0/05$). در روند تغییرات سرعت خشک‌شدن اثر تداخلی قدرت تابش و زمان تابش نشان‌دهندهٔ همبستگی این دو متغیر در بهینه‌کردن سرعت خشک‌شدن بود (شکل 2).



شکل 2- شکل سه‌بعدی اثر متغیرهای ورودی (زمان و توان اشعه) بر سرعت خشک‌شدن فیلهٔ کپور معمولی

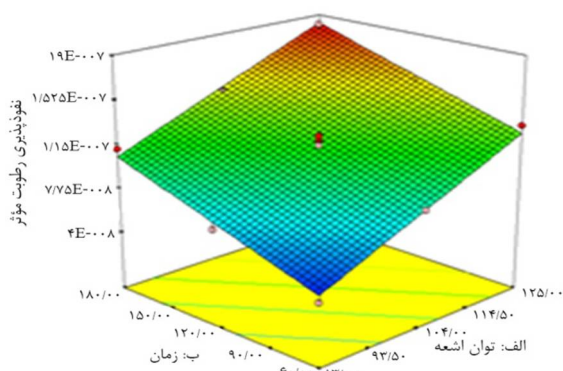
باتوجه‌به تصویر سه‌بعدی (شکل 1) با افزایش قدرت تابش و زمان تابش رطوبت فیله در حال کاهش است. این کاهش رطوبت در قدرت‌های بالا و زمان بالا مشهودتر است. Chayjan و Fealekari (2014) در بررسی بهینه‌سازی شرایط خشک‌کردن روی پیاز شالوت¹ با استفاده از RSM، افزایش نفوذ رطوبت را ناشی از افزایش بالقوه انتقال گرما بین سطح و داخل پیاز دانستند که سبب افزایش نفوذ رطوبت می‌شود و با یافته‌های مطالعهٔ حاضر هم‌خوانی دارد. گنجه، جعفری و قادری (1395) در بررسی سطح پاسخ آب‌گیری اسمزی دانه‌های انار عنوان کردند که افزایش دما به شدت میزان کاهش آب را تحت تأثیر قرار داد و به‌صورت خطی آن را افزایش داد که با نتایج یافته‌های حاضر هم‌خوانی دارد که این امر در شکل سه‌بعدی (شکل 1) به‌خوبی قابل مشاهده است.



شکل 1- شکل سه‌بعدی اثر متغیرهای ورودی (زمان و توان اشعه) بر میزان رطوبت فیلهٔ کپور معمولی

¹ Shallot

قدرت تابش بالاترین میزان F-value را داشت که نشان می‌دهد، قدرت تابش نسبت به زمان تابش بر نفوذپذیری رطوبت مؤثر در طی فرایند خشک شدن فیلهها مؤثرتر بود.



شکل 3- شکل سه‌بعدی اثر متغیرهای ورودی (زمان و توان اشعه) بر نفوذپذیری رطوبت مؤثر در فیله کپور معمولی

شکل (3) نشان‌دهنده اثر متغیرهای ورودی بر روند نفوذپذیری رطوبت مؤثر است. نفوذپذیری رطوبت در قدرت تابش پایین و زمان کم کاهش یافت، به عبارتی تحت تابش ملایم در مدت زمان طولانی به‌طور مؤثرتری می‌توان از نفوذپذیری رطوبت جلوگیری کرد و بدین طریق مدت ماندگاری فیلهها را افزایش داد. در واقع افزایش انرژی گرمایش باعث افزایش فعالیت مولکول‌های آب و در نهایت افزایش ضریب نفوذ مؤثر رطوبت شد (Xiao et al., 2010). در مطالعه احمدی‌قوبدلان و امیری‌چایجان (1395) بهینه‌سازی خشک کردن فندق در بستر سیال مادون قرمز با استفاده از روش سطح پاسخ عنوان کردند که با افزایش توان مادون قرمز از 500 تا 1500 وات، مقدار ضریب نفوذ رطوبت مؤثر به دلیل انتقال جرم به ترتیب از $2/34 \times 10^{-10}$ به $1/49 \times 10^{-10}$ و از $5/98 \times 10^{-10}$ به 9×10^{-10} افزایش یافت. نوسان مولکول‌های آب در اثر نفوذ اشعه مادون قرمز به داخل مواد بیولوژیک، سبب می‌شود که مولکول‌ها برای انتقال از مواد متخلخل به انرژی کمتری نیاز داشته باشند. بنابراین با افزایش توان مادون قرمز ضریب نفوذ رطوبت مؤثر افزایش می‌یابد (Pathare & Sharma, 2006) که توجیه‌کننده یافته‌های مطالعه حاضر است. مطابق با مدل‌های ارائه شده از لحاظ آماری اثر توانی یا مربعی قدرت تابش و زمان تابش (A^2B^2) ، تأثیری بر بهبود سرعت خشک کردن و کاهش نفوذپذیری رطوبت مؤثر نداشتند.

هرچند قدرت تابش در مقایسه با زمان تابش نقش مهم‌تری داشت. تحقیق‌های حاضر بیانگر آن است که اشعه مادون قرمز می‌تواند روشی رایج و مطلوب به‌منظور خشک کردن مواد غذایی باشد. تکنولوژی خشک‌کن مادون قرمز براساس خاصیت دفع آب توسط اشعه مادون قرمز است. زمانی که ماده در معرض اشعه مادون قرمز قرار می‌گیرد، اشعه با برخورد به سطح ماده غذایی و نفوذ به داخل آن، سبب افزایش نوسان مولکول‌های داخل ماده هم‌زمان در لایه‌های داخلی و سطح ماده می‌شود و نرخ خشک کردن را افزایش می‌دهد (Celma, Rojas, & Lopez-Rodriguez, 2008؛ احمدی‌قوبدلان و امیری‌چایجان، 1395). باتوجه به نتایج جدول (2)، نرخ خشک شدن فیلهها در زمان تابش پایین‌تر و قدرت تابش بالا، بالاتر بود به طوری که در حداقل زمان تابش (60 دقیقه) تحت قدرت بالای تابش سرعت خشک شدن فیلهها بهبود یافت. Matthujak و Dongbang (2013) در بررسی تأثیر استفاده از اشعه مادون قرمز روی خشک کردن ماهی آنچوی¹ گزارش کردند که افزایش قدرت اشعه (محدوده 400-800 وات) با کاهش زمان فراوری، کیفیت فیله را بهتر حفظ می‌کند. قدرت اشعه بالاتر، عموماً به‌واسطه تسریع در از دست دادن آب در حین انبساط و پلاسمولیز² غشاهای سلولی و افزایش انتشار آب در داخل محصول عمل می‌کند (Bchir, Besbes, Attia, & Blecker, 2009). کاهش مقاومت سطحی در برابر انتقال جرم در سطح محصول نیز به‌عنوان یکی از عوامل مؤثر بر آفت بیشتر میزان آب می‌باشد (Mundada, Hathan, & Maske, 2011) که با یافته‌های مطالعه حاضر هم‌خوانی دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت با کاهش زمان خشک شدن و افزایش توان خشک شدن فیلهها، هزینه انرژی کاهش یافته و منجر به تولید محصول با کیفیت شد.

مدل سازی نفوذپذیری رطوبت مؤثر

نتایج حاصل از آزمون آنالیز واریانس روند نفوذپذیری رطوبت مؤثر فیلهها در فرایند خشک شدن در جدول (3) آورده شده است. مدل رگرسیون در سطح اطمینان 99 درصد معنی‌دار است ($P < 0/05$) و آزمون عدم برازش معنی‌دار نبود که به این معنی است که مدل به‌کاررفته به‌خوبی روند داده‌ها را نشان داد. مطابق با نتایج، قدرت تابش و زمان تابش بر نفوذپذیری رطوبت مؤثر فیلهها تأثیر داشتند ($P < 0/05$). در این بین

¹ *Stolephorus indicus*

² Plasmolysis

جدول 4- مدل‌های برازش داده‌شده برای پارامترهای مورد اندازه‌گیری در طی خشک‌شدن فیله کپور معمولی

متغیر اندازه‌گیری شده	مدل به دست آمده	R ²	R ² -adj
مقدار رطوبت	$Y=+0.88-0.73A-0.69B+0.22A^2+0.36B^2$	0/9792	0/9643
سرعت خشک‌شدن	$Y=6.655E-003+2.167E-003A-5.500E-003B-3.500E-003AB$	0/9109	0/8473
نفوذپذیری رطوبت مؤثر	$Y=1.158E-007+3.850E-008A+2.850E-008B$	0/9736	0/9684

شرایط بهینه خشک‌کردن فیله کپور معمولی

براساس مدل‌های طراحی مرکب مرکزی (CCD) به کار برده شده در این پژوهش، تیمار 2 با قدرت اشعه 125 وات و زمان 60 دقیقه، تیمار بهینه بود (جدول 6) که در آن مقدار رطوبت 1/32 گرم آب بر گرم نمونه، سرعت خشک‌شدن 0/022 گرم آب بر گرم نمونه در دقیقه و نفوذپذیری مؤثر رطوبت 1/25846E-007 مترمربع بر ثانیه بود. Zhao و همکاران (2017) در بررسی خشک‌کردن اسکونید، زمان بیشتر در فرایند خشک‌کردن کیفیت اسکونید مؤثر بود و در درجه حرارت 50-70 درجه سانتی‌گراد و زمان خشک‌کردن 3-5 ساعت، درجه حرارت 70 و زمان 3 ساعت را به عنوان شرایط بهینه گزارش کردند. به این ترتیب، فیله‌های ماهی تحت اشعه مادون قرمز با قدرت تابش 125 وات و زمان تابش 60 دقیقه با مقدار رطوبت پایین، نفوذپذیری رطوبت مؤثر و سرعت خشک‌شدن بهینه قادر به پیشگویی تولید فیله‌های خشک‌شده با کیفیت بالا با صرف حداقل انرژی بود که توانست سبب بهبود ماندگاری هرچه بهتر فیله ماهی با کیفیت بالا و بازارپسند شود.

جدول 5- مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی برای متغیرهای وابسته

مقدار رطوبت	سرعت خشک‌شدن	نفوذپذیری مؤثر رطوبت	مقبولیت
1/32	0/022	$1/25 \times 10^{-7}$	0/688
1/24	0/023	$1/32 \times 10^{-7}$	

باتوجه به خروجی نرم‌افزار، طرح آزمایشی (CCD¹)، یک ابزار طراحی بسیار کارآمد برای معادله برازش مدل چندجمله‌ای متغیرهای مستقل مورد بررسی در فرایند خشک‌شدن فیله‌ها برای سطوح مختلف پاسخ‌ها بود ($P < 0/01$). در تمامی سطح پاسخ‌های مورد بررسی در آزمایش (متغیرهای وابسته)، صحت مدل از ضریب تعیین (R^2) نزدیک به 1 برخوردار بود. مشاهده‌های حاصل از انجام آزمایش‌ها، بیانگر همبستگی بسیار خوب بین نتایج به دست آمده با روش تجربی و مقادیر پیش‌بینی شده با روش آماری بود ($R^2 < 0/9792$ برای مقدار رطوبت، $R^2 < 0/9109$ برای سرعت خشک‌شدن و $R^2 < 0/9736$ برای نفوذپذیری رطوبت مؤثر)، (جدول 4 و 5).

جدول 6- شرایط بهینه خشک‌کردن فیله کپور معمولی

مطلوبیت	نفوذپذیری رطوبت مؤثر (10^{-7} مترمربع بر ثانیه)	سرعت خشک‌شدن (گرم آب بر گرم وزن نمونه در دقیقه)	مقدار رطوبت (گرم آب بر گرم وزن نمونه)	زمان تابش (دقیقه)	قدرت تابش (وات)
0/688	1/25846E-007	0/022	1/32	60	125

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که روش سطح پاسخ به خوبی قادر است رابطه مناسب بین متغیرها را ارائه کند. آگاهی از روابط بین متغیرهای مختلف در زمان خشک‌کردن محصولات غذایی می‌تواند به عنوان یک ابزار سودمند برای کنترل بهینه شرایط فرایند و افزایش کیفیت محصول خشک‌شده نهایی باشد. براساس مطالعه حاضر پارامتر شدت تابش اشعه مادون قرمز در مقایسه با مدت زمان تابش، تأثیر

بیشتری روی میزان رطوبت و نفوذپذیری رطوبت فیله داشت و در مورد نرخ خشک‌شدن، زمان تابش از اهمیت بیشتری برخوردار بود. همچنین اثر توانی یا مربعی قدرت تابش و زمان تابش (A^2B^2)، تأثیری بر بهبود سرعت خشک‌کردن و کاهش نفوذپذیری نداشتند. پارامتر نفوذپذیری رطوبت، در مدت زمان تابش کوتاه و قدرت تابش کم، پایین‌ترین مقدار را داشت و سرعت خشک‌شدن فیله در قدرت تابش زیاد و زمان تابش کم، بیشترین مقدار خود را نشان داد. براساس مدل‌های به دست آمده، تیمار 2 با قدرت اشعه 125 وات و زمان 60 دقیقه، تیمار بهینه بود.

¹ Central Composite Design

منابع

- احمدی قویدلان، م.، و امیری چایجان، ر. (1395). استفاده از روش سطح پاسخ جهت بهینه‌سازی خشک کردن فندق در بسترسیال مادون قرمز. *پژوهش های صنایع غذایی*، 26(4)، 639-657.
- آیدانی، ع.، حدادخداپرست، م.، و کاشانی‌نژاد، م. (1396). بررسی خصوصیات کیوی خشک شده با سامانه مادون قرمز و مدل‌سازی فرآیند. *علوم غذایی و تغذیه*، 14 (پاییز 96)، 53-66.
- حافظی، ن.، شیخ‌داودی، م.، و سجادی، س. (1395). مطالعه سرعت فرآیند خشک کردن خلایبی-تابشی ورقه‌های سیب‌زمینی با استفاده از مدل‌های رگرسیونی و شبکه عصبی مصنوعی. *مهندسی بیوسیستم ایران*، 47(2)، 279-289. doi:<https://doi.org/10.22059/IJBSE.2016.58777>
- صالحی، ف.، اسدی امیرآبادی، ع.، و کاشانی‌نژاد، م. (1396). مدل‌سازی فرآیند خشک کردن بادمجان توسط سامانه مادون قرمز به روش الگوریتم ژنتیک-شبکه عصبی مصنوعی. *نشریه فرآوری و نگهداری مواد غذایی*، 9(1)، 85-96. doi:<https://doi.org/10.22069/ejfp.2017.7859.1192>
- گنجه، م.، جعفری، س.، و قادری، س. (1395). مدل‌سازی فازی-عصبی و سطح پاسخ آبیگری اسمزی دانه‌های انار. *مهندسی بیوسیستم ایران*، 47(2)، 243-255. doi:<https://doi.org/10.22059/ijbse.2016.58774>
- یوسفی، ع.، دیلمقانیان، س.، ضیافروغی، ا.، و معزی، م. (1397). سینتیک خشک کردن مادون قرمز برش های میوه به و مدل‌سازی آن با روش الگوریتم ژنتیک-شبکه‌های عصبی مصنوعی. *فناوری‌های نوین غذایی*، 6(2)، 175-186. doi:<https://doi.org/10.22104/jift.2018.2871.1694>
- Ahmadi Ghavidelan, M., & Chayjan, R. (2017). Application of response surface methodology for optimization of hazelnut drying under infrared fluidized bed. *Journal of Food Research*, 26(4), 639-657. (in Persian)
- Aidani, E., Haddad Khodaparast, M., & Kashaninejad, M. (2017). Characterization of Dried Kiwi by Infrared Systems and Process Modeling. *Journal of Food Technology and Nutrition*, 14(4(56)), 53-66. (in Persian)
- Bchir, B., Besbes, S., Attia, H., & Blecker, C. (2009). Osmotic dehydration of pomegranate seeds: mass transfer kinetics and differential scanning calorimetry characterization. *International Journal of Food Science & Technology*, 44(11), 2208-2217. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2009.02061.x>
- Calin-Sanchez, A., Figiel, A., Wojdyło, A., Szarycz, M., & Carbonell-Barrachina, A. A. (2014). Drying of garlic slices using convective pre-drying and vacuum-microwave finishing drying: kinetics, energy consumption, and quality studies. *Food and Bioprocess Technology*, 7(2), 398-408. doi:<https://doi.org/10.1007/s11947-013-1062-3>
- Celma, A. R., Rojas, S., & Lopez-Rodriguez, F. (2008). Mathematical modelling of thin-layer infrared drying of wet olive husk. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 47(9-10), 1810-1818. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cep.2007.10.003>
- Chayjan, R. A., & Fealekari, M. (2014). Optimization of convective drying process for Persian shallot using response surface method (RSM). *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 16(2), 157-166.
- Darvishi, H., Azadbakht, M., Rezaeiasl, A., & Farhang, A. (2013). Drying characteristics of sardine fish dried with microwave heating. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 12(2), 121-127. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jssas.2012.09.002>
- Del Nobile, M. A., Conte, A., Scrocco, C., Brescia, I., Speranza, B., Sinigaglia, M., . . . Antonacci, D. (2009). A study on quality loss of minimally processed grapes as affected by film packaging. *Postharvest Biology and Technology*, 51(1), 21-26. doi:<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2008.06.004>
- Dongbang, W., & Matthujak, A. (2013). Anchovy drying using infrared radiation. *American Journal of Applied Sciences*, 10(4), 353-360.
- Duan, Z.-h., Jiang, L.-n., Wang, J.-l., Yu, X.-y., & Wang, T. (2011). Drying and quality characteristics of tilapia fish fillets dried with hot air-microwave heating. *Food and Bioprocess processing*, 89(4), 472-476. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fbp.2010.11.005>

- FAO. (2019). The state of food and agriculture 2019. Moving forward on food loss and waste reduction. Rome. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. Retrieved from <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/igo>
- Ganjeh, M., Jafari, S. M., & Ghaderi, S. (2016). Neuro-fuzzy and response surface modeling of osmotic dehydration of pomegranate arils. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 47(2), 243-255. doi:<https://doi.org/10.22059/ijbse.2016.58774> (in Persian)
- Hafezi, N., Sheikhe Davoodi, M. J., & Sajjadih, S. M. (2016). A Study of Drying Rate of Sliced Potatoes during Radiation-Vacuum Drying Process using Regression and Artificial Neural Network Models. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 47(2), 279-289. doi:<https://doi.org/10.22059/IJBSE.2016.58777> (in Persian)
- Hebbar, U. H., & Ramesh, M. (2005). Optimisation of processing conditions for infrared drying of cashew kernels with testa. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(5), 865-871. doi:<https://doi.org/10.1002/jsfa.2045>
- Ismail, O., & Kocabay, O. (2018). Infrared and microwave drying of rainbow trout: drying kinetics and modelling. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 18(2), 259-266. doi:https://doi.org/10.4194/1303-2712-v18_2_05
- Jafari, H., Kalantari, D., & Azadbakht, M. (2017). Semi-industrial continuous band microwave dryer for energy and exergy analyses, mathematical modeling of paddy drying and its qualitative study. *Energy*, 138, 1016-1029. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.111>
- Jafari, H., Kalantari, D., & Azadbakht, M. (2018). Energy consumption and qualitative evaluation of a continuous band microwave dryer for rice paddy drying. *Energy*, 142, 647-654. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.065>
- Jain, D., & Pathare, P. B. (2007). Study the drying kinetics of open sun drying of fish. *Journal of Food engineering*, 78(4), 1315-1319. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.12.044>
- Kim, B.-S., Oh, B.-J., Lee, J.-H., Yoon, Y. S., & Lee, H.-I. (2020). Effects of Various Drying Methods on Physicochemical Characteristics and Textural Features of Yellow Croaker (*Larimichthys Polyactis*). *Foods*, 9(2), 196. doi:<https://doi.org/10.3390/foods9020196>
- Li, Y.-B., Cao, C.-W., & Liu, D.-Y. (1997). Simulation of recirculating circular grain dryer with tempering stage. *Drying Technology*, 15(1), 201-214. doi:<https://doi.org/10.1080/07373939708917226>
- Manivannan, P., & Rajasimman, M. (2008). Osmotic dehydration of beetroot in salt solution: optimization of parameters through statistical experimental design. *Int J Chem Biomol Eng*, 1(4), 215-222.
- Maskan, M. (2000). Microwave/air and microwave finish drying of banana. *Journal of Food engineering*, 44(2), 71-78. doi:[https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(99\)00167-3](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(99)00167-3)
- Mundada, M., Hathan, B. S., & Maske, S. (2011). Mass transfer kinetics during osmotic dehydration of pomegranate arils. *Journal of Food Science*, 76(1), E31-E39. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01921.x>
- Nowak, D., & Lewicki, P. P. (2004). Infrared drying of apple slices. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 5(3), 353-360. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ifset.2004.03.003>
- Okos, M. R., Campanella, O., Narsimhan, G., Singh, R. K., & Weitnauer, A. C. (2006). Food dehydration. In D. R. Heldman & D. B. Lund (Eds.), *Food Engineering* (Second ed., pp. 601-744): CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Pan, Z., Khir, R., Godfrey, L. D., Lewis, R., Thompson, J. F., & Salim, A. (2008). Feasibility of simultaneous rough rice drying and disinfestations by infrared radiation heating and rice milling quality. *Journal of Food engineering*, 84(3), 469-479. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.06.005>
- Pathare, P. B., & Sharma, G. (2006). Effective moisture diffusivity of onion slices undergoing infrared convective drying. *Biosystems Engineering*, 93(3), 285-291. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.12.010>
- Salehi, F., Amirabadi, A. A., & Kashaninejad, M. (2017). Modeling of Eggplant Drying Process by Infrared System using Genetic Algorithm–Artificial Neural Network Method. *Journal of Food Processing and Preservation*, 9(1), 85-96. doi:<https://doi.org/10.22069/ejpp.2017.7859.1192> (in Persian)

- Steinteld, A., & Segal, I. (1986). A simulation model for solar thin-layer drying process. *Drying Technology*, 4(4), 535-554. doi:<https://doi.org/10.1080/07373938608916349>
- Traffano-Schiffo, M. V., Castro-Giráldez, M., Fito, P., & Balaguer, N. (2014). Thermodynamic model of meat drying by infrared thermography. *Journal of Food engineering*, 128, 103-110. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.12.024>
- Vieira, G. S., Pereira, L. M., & Hubinger, M. D. (2012). Optimisation of osmotic dehydration process of guavas by response surface methodology and desirability function. *International Journal of Food Science & Technology*, 47(1), 132-140. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2011.02818.x>
- Xiao, H.-W., Pang, C.-L., Wang, L.-H., Bai, J.-W., Yang, W.-X., & Gao, Z.-J. (2010). Drying kinetics and quality of Monukka seedless grapes dried in an air-impingement jet dryer. *Biosystems Engineering*, 105(2), 233-240. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.11.001>
- Yusefi, A., Dilmaghanian, S., Ziafoughi, A., & Moezzi, M. (2018). Study on infrared drying kinetics of quince slices and modelling of drying process using genetic algorithm-artificial neural networks (GA-ANNs). *Innovative Food Technologies*, 6(2), 175-186. doi:<https://doi.org/10.22104/jift.2018.2871.1694> (in Persian)
- Zhao, C.-C., Jiang, G.-H., & Eun, J.-B. (2017). Optimization of drying process for squid-laver snack by a combined method of fuzzy synthetic and response surface methodology. *Journal of Food Quality*, 2017. doi:<https://doi.org/10.1155/2017/9761356>

Experimental Investigation of Fish Fillet Drying Process using IR Radiation

Farokh Farokhpour¹, Laleh Roomiani^{2*}, Sorosh Zarinabadi³

- 1- MSc. Student, Department of Chemical Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran
- 2- Associate Professor, Department of Fisheries, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran
* Corresponding author (l.roomiani@iauahvaz.ac.ir)
- 3- Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

Abstract

The aim of this study was to use the Response Surface Method (RSM) model to design, test and optimize the drying process of fillets of common carp (*Cyprinus carpio*) using infrared radiation. The power of infrared radiation was 83, 104 and 125 watts and the power of the IR-lamp was 250 watts and its distance from the fish fillet was 5 cm. Pieces of fish fillets were weighed at intervals of 60, 120 and 180 min with a digital scale with an accuracy of 0.01 g. Radiation power (A) and irradiation time (B) were effective in reducing the amount of moisture and the effect of quadratic radiation power and irradiation time were significantly more effective in comparison with their linear effect in reducing the amount of moisture. However, the power of radiation played a more important role compared to the time of radiation. The drying rate of the fillets increased with lower irradiation time and higher irradiation power, so that the drying speed of the fillets improved in the minimum irradiation time (60 min) under high irradiation power. Effective moisture permeability was reduced at low irradiance and low radiation time. Based on central composite design models, treatment 2 with 125 watt power and time of 60 min (moisture of 1.32 g of water/g of sample weight, drying speed of 0.022 g water/g sample weight per minute and effective moisture permeability $1.25846E-007$ m²/s) improved the shelf life of fish fillets.

Keywords: Drying, Fish fillet, Infrared radiation, Response Surface Method