



بهینه سازی فرایند آبیگری اسمزی و مدل سازی سینتیک انتقال جرم طی خشک کردن با هوای داغ گوشت شترمرغ

سحر نایبندی آتشی^۱، سید علی مرتضوی^{۲*}، فریده طباطبایی یزدی^۲، محبت محبی^۲، محمد جواد وریدی^۲

۱. دانشجوی دکتری، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
۲. استاد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

(تاریخ دریافت: 95/8/15، تاریخ پذیرش: 95/11/5)

چکیده

گوشت شترمرغ دارای مزیت‌های بسیاری نسبت به گوشت دام‌های دیگر می‌باشد، به طوری که به عنوان گوشت قرن بیست و یکم معرفی شده است. فرایند آبیگری اسمزی یک فرایند انتقال جرم چند مولفه‌ای است، به گونه‌ای که همزمان با خروج آب از ماده غذایی، عوامل اسمزی به درون بافت نفوذ می‌کنند که مقدار آن در مقایسه با آب خروجی اندک می‌باشد. از آنجایی که مواد غذایی در طی مدت نگهداری به علت فعالیت آبی بالا دچار تغییرات شیمیایی و میکروبیولوژی شده، که این تغییرات تأثیرات منفی بر ماده غذایی گذاشته و باعث فساد ماده غذایی می‌شود، بنابراین استفاده از آبیگری اسمزی که سبب کاهش آب بافتی و سهولت انتقال جرم در طی خشک کردن می‌شود، مفید خواهد بود. فرایند آبیگری اسمزی گوشت شترمرغ در محلول اسمزی شامل کلرور سدیم با غلظت‌های 10، 20 و 30 درصد وزنی-وزنی، نسبت نمونه به محلول اسمزی 1:4، 1:6 و 1:8 و مدت زمان غوطه‌وری در محلول اسمزی، 30، 45 و 60 دقیقه، بر میزان خروج آب، جذب مواد جامد و چروکیدگی با استفاده از روش سطح پاسخ محاسبه گردید، نمونه‌های آبیگری شده در شرایط بهینه، سپس با هوای داغ 65 و 75 °C خشک شدند. محتوی رطوبتی طی سینتیک خشک کردن و مقایسه ده مدل ریاضی و انتخاب بهترین مدل جهت توصیف سینتیک انتقال جرم به دست آمد. در شرایط بهینه غلظت کلرور سدیم 30 درصد، نسبت نمونه به محلول اسمزی 1:6 و مدت زمان غوطه‌وری 60 دقیقه، میزان خروج آب، جذب مواد جامد و چروکیدگی به ترتیب 50/5، 5/45 و 6/99 درصد بودند. مناسب‌ترین مدل جهت توصیف سینتیک انتقال جرم طی خشک کردن گوشت شترمرغ، مدل Two-term تعیین گردید.

واژه‌های کلیدی: آبیگری اسمزی، بهینه سازی، انتقال جرم، مدل سازی، گوشت شترمرغ.

1- مقدمه

شترمرغ (*Struthio camelus*) بزرگ‌ترین پرنده زنده است که متعلق به خانواده رتایت‌ها به معنای سینه‌پنهان می‌باشد و در بیش‌تر کشورهای جهان به‌خصوص برای تولید گوشت پرورش می‌یابد. گوشت شترمرغ دارای مزیت‌های بسیاری نسبت به گوشت دام‌های دیگر می‌باشد؛ به‌طوری که به‌عنوان گوشت قرمز برتر و گوشت قرن بیست و یکم معرفی شده است. ویژگی‌های حسی گوشت شترمرغ مانند بافت، آبداری و طعمی بسیار شبیه به گوشت گاو، مورد علاقه مصرف‌کنندگان است. علاوه بر این مقدار چربی و کلسترول کم آن، این گوشت را به‌عنوان یک غذای سالم مشخص می‌سازد [1]. یکی از روش‌های نگاهداری گوشت پس از کشتار، خشک کردن آن است. خشک کردن مواد غذایی به روش‌های مختلفی امکان‌پذیر است. خشک کردن توسط هوای داغ انرژی بر بوده و مقرون به‌صرفه نمی‌باشد. استفاده از عملیات پیش‌تیمار می‌تواند منجر به کاهش آب بافتی و سهولت انتقال جرم هنگام خشک کردن با هوا گردد [2]. فرایند آبیگری اسمزی می‌تواند به‌عنوان پیش‌تیمار جهت آبیگری اولیه، قبل از خشک کردن با هوای داغ مورد استفاده قرار گیرد. فرایند آبیگری اسمزی عبارت است از خارج کردن بخشی از آب بافت گیاهی یا حیوانی به‌وسیله تماس مستقیم آن‌ها با یک محلول غلیظ مناسب (محلول‌های قندی یا نمکی و یا مخلوطی از آن‌ها). در این فرایند براساس گرادیان غلظت به‌وجود آمده بین ماده غذایی و محلول، دو جریان خلاف جهت هم به‌وجود می‌آید، که موجب خروج آب از بافت محصول به سمت محلول و نفوذ مواد جامد از محلول به داخل بافت ماده غذایی می‌گردد. تحقیقات متعددی در خصوص فرایند آبیگری اسمزی و تأثیر آن بر ویژگی‌های کیفی محصول انجام شده است که بر تأثیر مثبت این پیش‌فرایند بر بهبود ویژگی‌های بافتی، رنگ و هم‌چنین سایر ویژگی‌های کیفی مواد خشک شده تأکید شده است [2، 3].

روش سطح پاسخ، روشی است که در بررسی اثرات متغیرهای مستقل بر روی شاخص‌های کیفی و هم‌چنین بهینه‌سازی فرایند، به‌طور گسترده در صنایع غذایی استفاده می‌گردد [4، 5].

هدف از این تحقیق بهینه‌سازی فرایند آبیگری اسمزی گوشت شترمرغ با هدف بیشینه کردن خروج آب، کمینه کردن

1. Ratite

جذب مواد جامد و چروکیدگی، سپس خشک کردن نمونه بهینه توسط هوای داغ و مقایسه 10 مدل ریاضی انتقال جرم و انتخاب بهترین مدل جهت توصیف سینتیک انتقال جرم می‌باشد.

2- مواد و روش‌ها

در این تحقیق از عضله M. Gastrocnemius pars externa قسمت پا شترمرغ نر 10 ماهه نژاد گردن‌آبی¹ استفاده گردید. گوشت شترمرغ خام مورد استفاده در این تحقیق از کشتارگاه صنعتی گوشت مشهد، تهیه شد. گوشت در ابعاد 5 × 5 × 1 cm ($30 \pm 0/5$ g) قطعه قطعه و با فیلم پلاستیکی (سلوفان) پوشیده شدند تا از خروج رطوبت سطحی در نمونه ممانعت شود. تیمار اسمزی در این تحقیق محلول نمکی (کلرور سدیم با درصد خلوص 99/2٪) در غلظت‌های 10، 20 و 30 درصد وزنی-وزنی آماده شد. نمونه‌ها با نسبت وزنی نمونه به محلول اسمزی 1:4، 1:6 و 1:8 در محلول هیپرتنیک قرار گرفتند و بعد از طی شدن زمان آبیگری به مدت 30، 45 و 60 دقیقه، برش‌های گوشت از محلول خارج و پس از حذف رطوبت سطحی توسط کاغذ جاذبه‌الرطوبه و ثبت وزن با استفاده از ترازوی دیجیتال TE612 با دقت $\pm 0/001$ گرم (ساخت کشور ژاپن)، نمونه‌ها دوباره توزین شدند.

2-1- اندازه‌گیری میزان خروج آب² (WL) و جذب مواد جامد³ (SG)

برای اندازه‌گیری میزان خروج آب و جذب مواد جامد به ترتیب از رابطه‌های (1 و 2) استفاده شد [6].

$$(1) \quad WL = \frac{\text{محتوی رطوبت پس از فرایند} - \text{محتوی رطوبت اولیه}}{\text{وزن اولیه}} \times 100$$

$$(2) \quad SG = \frac{\text{ماده خشک اولیه} - \text{ماده خشک پس از فرایند}}{\text{وزن اولیه}} \times 100$$

2-2- اندازه‌گیری درصد چروکیدگی⁴

تصویربرداری از نمونه‌ها با استفاده از دوربین دیجیتال انجام

1. Blue neck
2. Water Loss
3. Solid gain
4. Shrinkage

ماده جامد) و M_0 محتوی رطوبت اولیه از نمونه‌های گوشت (کیلوگرم آب/ کیلوگرم ماده جامد) می‌باشند.

با توجه به این‌که به طور معمول مقدار M_e در مقایسه با M_0 و M_1 عدد کوچکی است، خطای ناشی از در نظر گرفتن آن نیز جزئی است در نتیجه می‌توان رابطه را به شکل ساده‌تری درآورد.

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (5)$$

در این تحقیق در طول بازه‌های زمانی 30 دقیقه نمونه‌ها از خشک‌کن خارج، توزین و بعد درون خشک‌کن قرار می‌گیرد، طوری که بتوان میزان رطوبت آن را به‌دست آورد. (زمان در برابر محتوی رطوبتی) سپس داده‌هایی که از خشک‌کردن به‌دست آمد به‌وسیله 10 مدل مختلف مدل سازی شدند (جدول 1).

قانون دوم فیک (رابطه 6) به‌طور وسیعی به‌منظور توصیف فرایند خشک‌کردن در طول دوره کاهش نرخ رطوبت برای بیش‌تر مواد بیولوژیکی استفاده می‌شود:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla [D_{eff} (\nabla M)] \quad (6)$$

که در آن D_{eff} ضریب نفوذ رطوبت موثر $M(m^2/s)$ میزان رطوبت بر مبنای وزن خشک (kg water/ kg dry solid) و t زمان (s) می‌باشد. ضریب نفوذ با استفاده از داده‌های تجربی تعیین شد. فرض اصلی در تعیین این پارامتر این است که خشک‌کردن فقط به انتقال جرم محدود شده، فرایند خشک‌کردن به‌صورت هم‌دما در تمام نمونه انجام شد.

با حل عددی معادله فیک، نفوذ رطوبت برای تیغه نامحدود با استفاده از معادله قابل محاسبه است. فرض‌هایی که برای این معادله در نظر گرفته شد به شرح زیر است:

- 1- رطوبت در ابتدا به‌صورت یکنواخت درون نمونه پخش شده است.
- 2- انتقال جرم به‌صورت متوازن نسبت به مرکز ماده انجام می‌گیرد.
- 3- محتوی رطوبت سطحی نمونه به‌طور آبی به تعادل با محیط اطراف می‌رسد.
- 4- مقاومت به انتقال جرم در سطح نسبت به نواحی درونی ماده ناچیز است.
- 5- انتقال جرم فقط با مکانیسم نفوذ انجام می‌گیرد.
- 6- ضریب نفوذ ثابت می‌باشد و افت آن قابل چشم‌پوشی است.

شد. عکس‌ها با رزولوشن 200 dpi و به فرمت JPEG ذخیره شد. تقطیع تصاویر (جدا نمودن تصویر حقیقی نمونه‌های گوشت شتر مرغ از پس زمینه) با استفاده از نرم افزار فتوشاپ (Adobe, v.8.0) انجام گرفت و عکس‌ها به فرمت bmp ذخیره شدند. چروکیدگی با استفاده از نرم افزار ایمیج جی¹ مورد ارزیابی قرار گرفت. تصاویر باینری شامل 2 بخش پس‌زمینه (بخش سیاه) و نمونه اسمز شده گوشت شتر مرغ (بخش سفید) بوده و درصد چروکیدگی با استفاده از رابطه 3 محاسبه گردید [7]:

$$= \text{درصد چروکیدگی} \quad (3)$$

$$\times 100 \frac{\text{بزرگ‌ترین قطر گوشت اسمز شده - بزرگ‌ترین قطر گوشت خام}}{\text{بزرگ‌ترین قطر گوشت خام}}$$

در این مرحله پس از آنالیز داده‌ها توسط نرم افزار (Design Expert) نمونه بهینه برای خشک‌کردن فرستاده شد.

3-2- خشک کردن توسط هوای داغ²

به‌منظور حصول شرایط پایدار در سیستم، خشک‌کن به مدت 30 دقیقه قبل از فرایند روشن و سپس سینی حاوی نمونه‌ها در محفظه خشک‌کن قرار داده شدند. دماهای مورد بررسی در این تحقیق 65 و 75 درجه سانتی‌گراد و سرعت هوای ورودی 1/5 m/s در نظر گرفته شد. در این مرحله پس از آن که رطوبت محصول به 25٪ رطوبت اولیه خود رسید [8]، فرایند خشک‌کردن متوقف شد.

4-2- مدل‌سازی ریاضی سینتیک خشک‌کردن

در این پژوهش برای محاسبه نسبت رطوبت گوشت در طول فرایند خشک‌کردن از رابطه (4) استفاده شد.

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

MR، نسبت رطوبت (بدون بعد)، M_t ، محتوی رطوبت در هر لحظه از فرایند خشک‌کردن (کیلوگرم آب/ کیلوگرم ماده جامد)، M_0 ، محتوی رطوبت تعادلی (کیلوگرم آب/ کیلوگرم

1. Image J
2. Hot Air

جدول (۱) مدل‌های ریاضی مورد استفاده در تعیین سینتیک انتقال جرم

نام مدل‌ها	معادلات	رفرنس
لوویس (نیوتن)	$MR = \exp(-k.t)$	[10]
پیچ	$MR = \exp(-k.tn)$	[11]
مادیفاید پیچ	$MR = \exp(-(k.t)n)$	[12]
هندرسون و پاییز	$MR = a \exp(-(k.t))$	[13]
لگاریتمیک	$MR = a \exp(-(k.t)) + c$	[14]
تو-ترم	$MR = a \exp(-k_0.t) + b \exp(-k_1.t)$	[15]
تو-ترم اکسین نشال	$MR = a \exp(-k.t) + (1-a) \exp(-k.a.t)$	[15]
ونگ و سینگ	$MR = 1 + a.t + b.t^2$	[16]
دیفوزیون ابروچ	$MR = a \exp(-k.t) + (1-a) \exp(-k.b.t)$	[17]
تامسون	$t = a \ln MR + b (\ln MR)^2$	[18]

MR: Moisture ratio

در روش RSM برای هر متغیر وابسته مدلی تعریف می‌شود که آثار اصلی و همزمان فاکتورها را بر روی هر متغیر جداگانه بیان می‌نماید، مدل چند متغیره به صورت زیر می‌باشد.

(9)

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_1 \beta_1 x_1^2 + \beta_2 \beta_2 x_2^2 + \beta_3 \beta_3 x_3^2 + \beta_1 \beta_2 x_1 x_2 + \beta_1 \beta_3 x_1 x_3 + \beta_2 \beta_3 x_2 x_3$$

در معادله ذکر شده Y پاسخ پیش‌بینی شده، β_0 ضریب ثابت، $\beta_1 \beta_2 \beta_3$ اثرات خطی، $\beta_1 \beta_1, \beta_2 \beta_2, \beta_3 \beta_3$ اثر مربعیات، $\beta_1 \beta_2, \beta_1 \beta_3, \beta_2 \beta_3$ اثرات همزمان بوده که جهت برازش و محاسبه ضرایب معادله لازم است. برای آنالیز داده‌ها و بهینه‌سازی نمونه‌ها از نرم افزار Design Expert (6.0.2) استفاده شد. تمامی آزمایش‌ها در سه تکرار انجام گرفت.

در فاز دوم داده‌های به‌دست آمده از سینتیک خشک کردن نمونه‌ها با نرم افزار Matlab 17 آنالیز شدند. تجزیه و تحلیل رگرسیون غیرخطی براساس (Leven berg-Marquardt) انجام شد. داده‌های تجربی حاصل از خشک کردن گوشت شترمرغ در دماهای مختلف با 10 مدل ریاضی و تجربی موجود برازش شدند (جدول 1). برای ارزیابی مدل از معیارهای ضریب همبستگی¹ (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا² (RMSE) و مجموع مربعات خطا³ (SSE) در رابطه‌های 10، 12 و 13

1. Regression Coefficient
2. Root Mean Square Error
3. Square Sum of Error

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (7)$$

در رابطه زیر MR نسبت رطوبت، L ضخامت ورقه‌های گوشت (m) و n عدد صحیح مثبت می‌باشد، که در زمان‌های طولانی خشک کردن برابر 1 می‌باشد [9].

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left[-\frac{\pi^2 D t}{4L^2}\right] \quad (8)$$

در این پژوهش فرض شده است، که انتقال حرارت فقط در یک سطح صورت می‌گیرد.

5-2- روش تجزیه و تحلیل آماری

در این تحقیق بهینه‌سازی فرایند آبیگری اسمزی با هدف بیشینه سازی خروج آب و کمینه‌کردن جذب مواد جامد و درصد چروکیدگی گوشت شترمرغ با استفاده از طرح مرکب مرکزی¹ انجام شد. متغیرهای تحت بررسی در سه سطح در مقادیر کد شده (0، +1، -1) و مقادیر واقعی، در جدول (2) و نتایج واریانس در جدول (3) قابل مشاهده است، که آرایش روش CCD را با 6 تکرار در نقطه مرکزی نشان می‌دهد. میانگین درصد مقادیر به‌دست آمده از سه مرتبه تکرار هر آزمایش به‌عنوان متغیر وابسته یا پاسخ (Y) در نظر گرفته شد.

1. Central composite design

جدول (2) نمایش متغیرهای مستقل فرایند و مقادیر آنها

متغیر مستقل	نماد	-1	0	+1
نسبت گوشت به محلول اسمزی	X_1	1:4	1:6	1:8
غلظت محلول اسمزی	X_2	10	20	30
مدت زمان غوطه‌وری در محلول اسمزی	X_3	30	45	60

جدول (3) آنالیز واریانس (ANOVA) مدل‌های مدل سطح پاسخ

منبع	مدل	Standard Deviation	Mean	R^2	R^2 -adj
میزان خروج آب	$Y = -7.30 + 1.83X_1 + 1.13X_2 - 0.14X_2X_3$	2/74	44/31	0/9476	0/9004
جذب مواد جامد	$Y = 40.11 - 16.27X_1 + 0.48X_2 + 0.33X_3 + 1.36X_1 - 0.004X_3^2 - 0.08X_1X_2 + 0.03X_1X_3 + 5.98X_2X_3$	0/21	9/91	0/9977	0/9957
چروکیدگی	$Y = 18.09 - 1.75X_2 + 2.32X_1^2 - 0.04X_3^2$	3/73	19/63	0/8684	0/8480

می‌دهد که تیمار اسمزی، غلظت محلول نمکی و زمان آبگیری بر میزان خروج آب نمونه‌های گوشت اثر معنی‌دار ($p < 0/05$) دارند. همان‌طور که انتظار می‌رود و در (شکل 1) مشاهده می‌شود با افزایش زمان فرایند میزان خروج آب نمونه‌ها افزایش می‌یابد. در واقع با افزایش زمان تماس، عوامل اسمزی قادر خواهند بود به میزان بیشتری در بافت گوشت نفوذ کنند و در مقابل میزان آب بیشتری از بافت خارج شود. نتایج مشابه توسط کروز و منگالی، مسلوجنویک و همکاران برای مواد غذایی به‌دست آمده است [19، 20]. البته این مسئله تا زمانی صورت می‌گیرد که تعادل بین خروج آب از محصول و نفوذ عامل اسمزی به درون آن ایجاد شود. اما تا برقراری این تعادل، امکان انتقال جرم وجود دارد. در آزمایش‌های انجام شده در شرایط یکسان، مقدار خروج آب از محصول در 45 دقیقه 42/04 درصد جرم اولیه بود، در صورتی که با افزایش زمان 60 دقیقه خروج آب از محصول به 52/02 درصد جرم اولیه افزایش می‌یابد.

هم‌چنین در صورت افزایش مقدار کلرور سدیم موجود در محلول اسمزی، میزان خروج آب از محصول افزایش می‌یابد. کلرور سدیم که به علت گرادیان غلظت به درون بافت نفوذ می‌کند، جایگزین آب در منافذ بافت شده و باعث می‌شود آب از بافت خارج گردد. همان‌طور که ذکر شد، تا زمان برقراری تعادل، هر چقدر عامل اسمزی بیشتر نفوذ کند، آب بیشتری از بافت محصول خارج می‌شود. نتایج مشابه توسط کروز و

استفاده گردید. میزان تطابق داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل با داده‌های آزمایشگاهی با محاسبه معیارهای ارزیابی سنجیده شد. در نهایت مدلی با همبستگی، و با حداقل ریشه میانگین مربع‌خطا و حداقل مجموع مربعات خطا به‌عنوان مناسب‌ترین مدل برای توصیف سینتیک انتقال جرم طی خشک‌کردن با هوای داغ نمونه گوشت شترمرغ انتخاب شد.

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_{exp,i} - y_{pred,i})^2 \quad (10)$$

$$SST = \sum_{i=1}^n (y_{exp} - y_{ave})^2 \quad (11)$$

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (12)$$

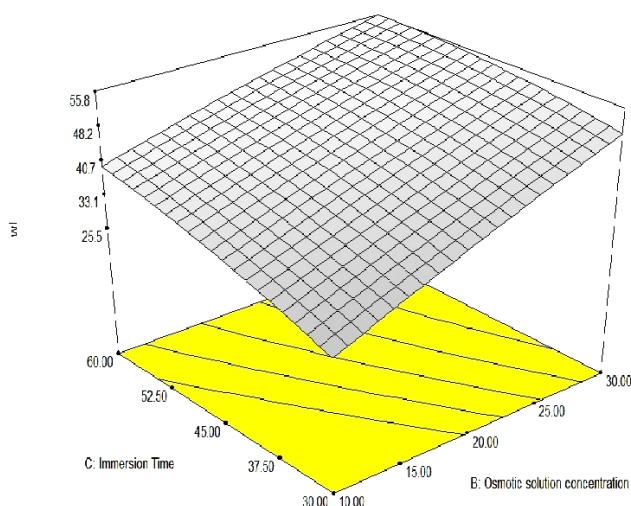
$$RMSE = \sqrt{\frac{SSE}{n-m}} \quad (13)$$

در این معادلات n تعداد مشاهدات (داده‌ها) و m ضرایب ثابت به کار رفته در هر مدل می‌باشد.

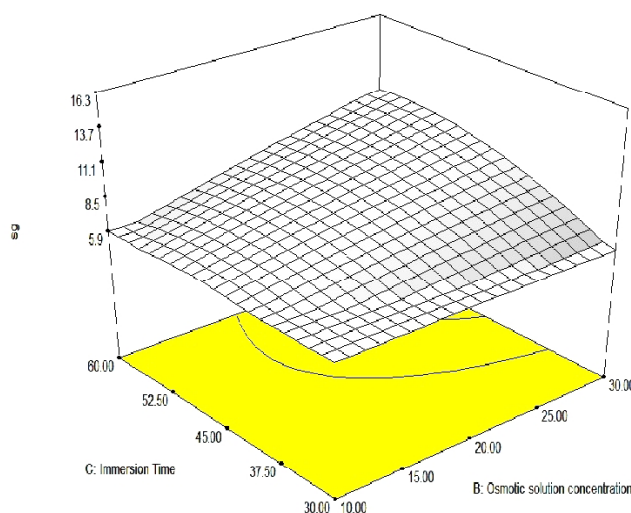
3- نتایج و بحث

3-1- میزان خروج آب

تأثیر متغیرهای مستقل بر میزان خروج آب به‌صورت شکل‌های سه بعدی رویه پاسخ در شکل‌های 1 و 2 نشان داده شده است. نتایج آنالیز واریانس و شکل رویه پاسخ نشان



شکل (1) نمودار سه بعدی اثر همزمان غلظت محلول اسمزی (B) و زمان آبیگری (C) بر میزان از دست دادن آب (WL)



شکل (2) نمودار سه بعدی اثر همزمان غلظت محلول اسمزی (B) و زمان آبیگری (C) بر میزان جذب مواد جامد (SG)

خروج آب از گوشت، مقدار کلرورسدیم بیش‌تری به درون بافت گوشت نفوذ می‌کند و درصد نفوذ ماده جامد افزایش می‌یابد (شکل 2). نتایج مشابه توسط کروز و منگالی، مسلوجنویک و همکاران و سرینو و همکاران برای مواد غذایی به‌دست آمده است. [19-21]. تماس بر روی جذب ماده جامد اثر کم‌تری دارد. در زمان شروع فرایند به دلیل افزایش نیروی محرکه بین نمونه و محلول هیپرتونیک، بیش‌ترین نرخ انتقال جرم مشاهده می‌شود. با گذشت 60 دقیقه از شروع فرایند غلظت محلول اسمزی رقیق‌تر شده و نیروی محرکه کاهش یافت در نتیجه نرخ انتقال جرم به حالت تعادلی رسید. نتایج مشابه توسط سانکا و راگون، چیون و امروکس و رضاگاہ و همکاران برای مواد غذایی به‌دست آمده است. [22-24].

منگالی، مسلوجنویک و همکاران برای مواد غذایی به‌دست آمده است [19، 20]. آزمایش‌های انجام‌شده در شرایط یکسان نیز گویای این مسئله است که با افزایش سدیم کلرید از 20 به 30 درصد، میزان خروج آب از 44/32 درصد به 52/02 درصد افزایش می‌یابد. اما بین میزان از دست دادن آب و نسبت گوشت به محلول اسمزی، با توجه به تجزیه واریانس که در (جدول 4) مشاهده می‌شود، رابطه معنی‌داری وجود ندارد.

3-2- جذب مواد جامد

افزایش غلظت محلول اسمزی سبب افزایش فشار اسمزی و به‌دنبال آن افزایش نیروی محرکه جهت انتقال جرم می‌شود. به این ترتیب با افزایش غلظت محلول اسمزی، همزمان با

جدول (4) آنالیز واریانس (ANOVA) مدل سطح پاسخ برای آبگیری اسمزی گوشت شترمرغ

منبع	درجه آزادی	میزان خروج آب		جذب مواد جامد		چروکیدگی	
		P-Value	مجموع مربعات	P-Value	مجموع مربعات	P-Value	مجموع مربعات
مدل	9	< 0/0001	1351/51	< 0/0001	197/09	0/0022	918/04
خطی							
A	1	0/7528	0/78	0/0055	0/56	0/1824	28/56
B	1	< 0/0001	1062/69	< 0/0001	27/52	0/0003	413/58
C	1	0/0002	237/17	< 0/0001	22/86	0/9967	0/00025
درجه دو							
A ²	1	0/6046	2/14	< 0/0001	82/27	0/0020	237/75
B ²	1	0/6939	1/23	0/1318	0/12	0/1951	26/82
C ²	1	0/4261	5/15	< 0/0001	5/75	0/0008	308/80
اثر متقابل							
AB	1	0/6696	1/44	< 0/0001	22/24	0/3056	16/22
AC	1	0/8600	0/24	< 0/0001	9/72	0/6002	4/08
BC	1	0/0462	38/72	< 0/0001	6/44	0/1820	28/61
باقیمانده	10		74/80		0/45		139/11
عدم برازش	5	0/3909	42/25	0/1273	0/34	0/0733	111/92
خطای مطلق	5		32/55		0/11		27/18
جمع کل	19		1426/32		197/54		1057/14

3-3- چروکیدگی و چروکیدگی 6/99 درصد بود.

بین میزان چروکیدگی نمونه‌های گوشت شترمرغ و متغیرهای تحت بررسی، با توجه به تجزیه واریانس که در (جدول 4) مشاهده می‌شود، رابطه معنی‌داری وجود ندارد. از دلایل عمده عدم تأثیرپذیری چروکیدگی از عوامل تحت بررسی، می‌توان به پدیده هم زمان خروج آب از محصول و نفوذ عامل و یا عوامل اسمزی به درون محصول اشاره نمود [25].

3-5- سینتیک خشک کردن نمونه گوشت

منحنی خشک‌کردن، زمان به نسبت رطوبت (MR) نمونه گوشت شترمرغ با استفاده از هوای داغ در دمای 65 و 75 درجه سانتی‌گراد در (شکل 3) قابل مشاهده است. نسبت رطوبت به‌صورت نمایی در زمان کاهش پیدا کرده است که نتایج مشابه توسط دموز، هی و همکاران، ایگاز و همکاران، مارکوسکی و همکاران و پریا-فلورز و همکاران برای مواد مختلف خشک شده به‌دست آمده است [26-30].

3-6- مدل‌های سینتیک خشک کردن

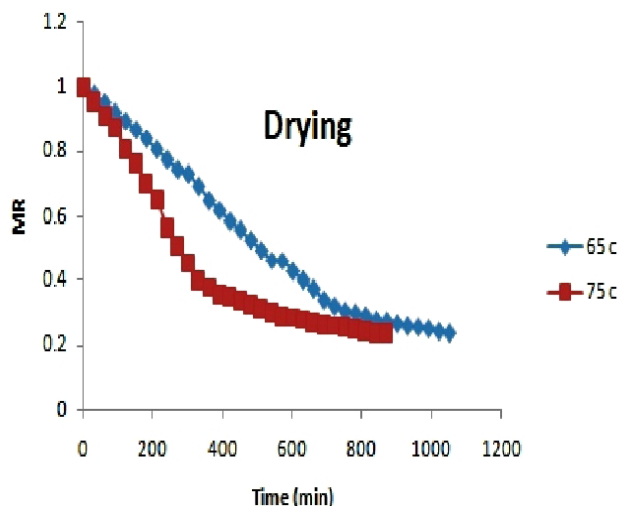
داده‌های تجربی حاصل از خشک‌کردن گوشت شترمرغ در دماهای مختلف با 10 مدل ریاضی موجود برازش شدند (جدول 3). معیارهای ارزیابی همبستگی، ریشه میانگین مربع

3-4- تعیین شرایط بهینه

بیشینه نمودن خروج آب و کمینه نمودن چروکیدگی و میزان جذب ماده جامد به‌عنوان اهداف مورد نظر قرار گرفته و بدین گونه شرایط برای انجام فرایند بهینه: نسبت گوشت به محلول اسمزی 1:6، غلظت محلول اسمزی 30 درصد و زمان تماس محصول و محلول اسمزی 60 دقیقه به‌دست آمد (جدول 5)، که میزان خروج آب 50/5، جذب مواد جامد 5/45

جدول (5) بهینه سازی آبگیری اسمزی گوشت شترمرغ

متغیر مستقل	مینیمم	ماکزیمم	مقدار بهینه
نسبت گوشت به محلول اسمزی	1:4	1:8	1:6
غلظت محلول اسمزی (%)	10	30	30
مدت زمان غوطه‌وری در محلول اسمزی (دقیقه)	30	60	60



شکل (3) نمودار خشک کردن گوشت شترمرغ با هوای داغ

خطا و مجموع مربعات خطا می‌باشد، با توجه به (جدول 6) میانگین مربع خطا، مجموع مربعات خطا نسبت به دیگر مدل‌ها مدل پیشنهادی Two-term با حداکثر همبستگی، و با حداقل ریشه میانگین مربع خطا و مجموع مربعات خطا نسبت به دیگر مدل‌ها بهتر می‌تواند سینتیک انتقال جرم را در دماهای 65 و 75 درجه سانتی‌گراد توصیف کند.

4- نتیجه گیری

مشکل اصلی خشک کردن با هوای داغ، مصرف انرژی بالا و ناپایداری ترکیبات غذا در برابر اعمال حرارت می‌باشد. با کاهش زمان فرایند و همچنین تسهیل و تسریع فرایند خشک کردن می‌توان بر این مشکل غلبه کرد. در میان شیوه‌های نگهداری مواد غذایی، فرایند آبگیری اسمزی به دلیل دمای پایین، انرژی کم‌تر، کاهش ضایعات مواد غذایی و کیفیت خوب محصول اثبات کرده است که یکی از مفیدترین تکنیک‌های پیش‌تیمار در خشک کردن مواد غذایی می‌باشد. شرایط بهینه فرایند آبگیری اسمزی با میزان خروج آب 50/5، جذب مواد جامد 5/45 و چروکیدگی 6/99 درصد به دست آمد. مدل پیشنهادی Two-term با حداکثر ضریب همبستگی و حداقل ریشه

جدول (6) نتایج به دست آمده از پارامترهای ارزیابی مدل‌ها در خشک کردن گوشت شترمرغ

خشک کردن با هوای داغ (آون)		پارامتر	مدل
75 °C	65 °C		
0/0021	0/0013	K	Lewis
0/0499	0/0385	RMSE	
0/96	0/9774	R ²	
0/0723	0/0520	SSE	
0/0035	0/0002	K	Page
0/9195	1/24	N	
0/0488	0/0198	RMSE	
0/9631	0/9942	R ²	
0/0667	0/0133	SSE	
0/0062	0/0058	K	Modified page
0/3499	0/2356	N	
0/0508	0/0520	RMSE	
0/96	0/9774	R ²	
0/0723	0/0391	SSE	
1/005	0/4825	a	Henderson
0/0021	-0/4787	K	
0/0507	0/0285	RMSE	
0/9601	0/9879	R ²	
0/0722	0/0277	SSE	
0/8989	-43/15	a	Logarithmic
0/0035	5-10×1	K	
0/1736	44/1	C	
0/0343	0/0517	RMSE	
0/9824	0/9616	R ²	
0/0318	0/0882	SSE	
0/0009	0/0027	A	Two term
-0/0032	0/4898	K ₁	
1/051	-2/654	b	
0/0027	-0/5472	K ₂	
0/0303	0/0175	RMSE	
0/9868	0/9957	R ²	
0/0239	0/0098	SSE	

ادامه جدول (6) نتایج به دست آمده از پارامترهای ارزیابی مدل‌ها در خشک کردن گوشت شترمرغ

خشک کردن با هوای داغ (آون)		پارامتر	مدل
75 °C	65 °C		
-2/329	28/47	A	Two-term exponential
1×10^{-3}	1×10^{-6}	K	
0/1275	0/0573	RMSE	
0/7483	0/9514	R ²	
0/4552	0/119	SSE	
-0/0021	-0/0011	a	Wang & Singh
1×10^{-6}	3×10^7	b	
0/0313	0/0266	RMSE	
0/9847	0/9895	R ²	
0/0275	0/0241	SSE	
0/0020	-0/2551	a	Diffusion
-0/5079	-6/421	b	
-0/0047	0/0001	K	
0/0353	0/0305	RMSE	
0/9813	0/9867	R ²	
0/0338	0/0307	SSE	Thompson
-184/5	-801/5	a	
245	-96/7	b	
52/68	43/05	RMSE	
0/9616	0/982	R ²	
7×10^4	6×10^4	SSE	

منابع

- [1] Sales, J., Mellett, F. D., Heydenrych, H. J. (1996). Ultrastructural changes in ostrich muscles during post-mortem aging. *So. Afr. J. Fd. Nutr.*, 8, 23-25.
- [2] Fabiano A. N., Fernandes, Gall., M. I. Rodrigues, S. (2009). Effect of osmosis and ultrasound on pineapple cell tissue structure during dehydration. *J. Food Eng.*, 90 (2), 186-190.
- [3] Torregiani, D., Bertolo, G. (2001). Osmotic pre-treatments in fruit processing: Chemical, physical and structural effects. *J. Food Eng.*, 49 (2-3), 247-253.
- [4] Corzo, O., Bracho, N. (2006). Determination of water effective diffusion coefficient of sardine sheets during vacuum pulse osmotic dehydration. *J. Food Eng.*, 40 (8), 1452-1458.

- American Society of Agricultural Engineers*, 17 (6), 1167–1172.
- [16] Wang, C. Y., Singh, R. P. (1978). A single layer drying equation for rough rice. *American Society of Agricultural Engineers* (Paper No. 3001).
- [17] Yaldiz, O., Ertekin, C., Uzun, H. B. (2001). Mathematical modelling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy*, 26 (5), 457–465
- [18] Thompson, T. L., Peart, R. M., Foster, G. H. (1968). Mathematical simulation of corn drying—A new model. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 11(4), 582–586.
- [19] Cruz, A. G., Menegalli, F. C. (2004). Osmotic dehydration and drying of aubergine (*Solanum Melongena*). *Proceedings of the 14th International Drying Symposium*, vol. c, pp. 2149-2156.
- [20] Misljenovic, N. M., Koprivica, G. B., Jevric, L. R., Levic, L. J. B. (2011). Mass transfer kinetics during osmotic dehydration of carrot cubes in sugar beet molasses. *Romanian Biotechnological Letters*, 16(6), 6790-679.
- [21] Sereno, A. M., Moreira, R., Martinez, E. (2001). Mass transfer kinetics of osmotic dehydration of cherry tomato. *J. Food Eng.*, 47(3), 43–49.
- [22] Chavan, U. D., Amarowicz, R. (2012). Osmotic Dehydration Process for Preservation of Fruits and Vegetables. *J. Food Research*, 1(2), 2002-2009.
- [23] Rezagah, M. E., Kashaninejad, M., Mirzaei, H., Khomeiri, M. (2010). Osmotic dehydration of Button mushroom, Fickian diffusion In Slab Configuration. *Latin American Applied Research*, 40, 23-26.
- [24] Sunjka, P. S., Raghavan, G. S. V. (2004). Assessment of pretreatment methods and osmotic dehydration for cranberries. *Canadian Biosystems Engineering*, 46(3), 35-40.
- [25] اصغری بیرام، ز؛ بصیری، ع. (1389). بهینه سازی فرایند [5] Singh, B., Kumar, A., Gupta, A. K. (2005). Study of mass transfer kinetics and effective diffusivity during osmotic dehydration of carrot cubes. *J. Food Eng.*, 79 (2), 471-480.
- [6] Fernandes, F. A. N., Gallao, M. I., Rodrigus, S. (2009). Effect of osmosis and ultrasound on pineapple cell tissue structure during dehydration. *J. Food Eng.*, 90 (2), 186-190.
- [7] Heydari, F., Varidi, M. J., Varidi, M., Mohebbi, M. (2012). Study on quality characteristics of camel burger and evaluating its stability during frozen storage, MSc thesis, Ferdowsi university of mashhad, 44, 1-120.
- [8] Baslar, M., Toker, O.S., Sagdic, O., Arici, M. (2014). Ultrasonic Vacuum Drying Technology as a Novel Process for Shortening the drying Period for Beef and Chicken Meats. *Innov. Food Sci. Emerg.*, 26, 182-190.
- [9] Crank, J. (1975). The mathematics of diffusion. 2nd ed. Oxford University Press, Oxford, 104-106.
- [10] Bruce, D. M. (1985). Exposed-layer barley drying, three models fitted to new data up to 150°C. *J. Agri. Engineer.*, (4), 337–347.
- [11] Madamba, P. S., Driscoll, R. H., Buckle, K. A. (1996). The thin layer drying characteristics of garlic slices. *J. Food Eng.*, 29 (1), 75–97.
- [12] White, G. M., Bridges, T. C., Loewer, O. J., Ross, I. J. (1981). Thin layer drying model for soybeans. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 24 (6), 1643–1649.
- [13] Henderson, S. M., Pabis, S. (1961). Grain drying theory I: Temperature effect on drying coefficient. *J. Agri. Engineer.*, 6, 169–174.
- [14] Togrul, I. T., Pehlivan, D. (2002). Modeling of drying kinetics of single apricot. *J. Food Eng.*, 58 (1), 23–32.
- [15] Henderson, S. M. (1974). Progress in developing the thin layer drying equation. *Transactions of the*

خشک کردن ترکیبی اسمز- هوای داغ برش های قارچ خوراکی دکمه ای (*Agaricus Bisporus*) توسط روش سطح پاسخ. مجله علمی-پژوهشی. علوم غذایی و تغذیه، سال 7، شماره 2، ص 39-50.

[26] Doymaz, I. (2005). Drying behavior of green beans. *J. Food Eng.*, 69(2), 161–165.

[27] Hii, C. L., Law, C. L., Cloke, M. (2009). Modeling using a new thin layer drying and product quality of cocoa. *J. Food Eng.*, 90 (2), 191–198.

[28] Iguaz, A., San Martin, M. B., Maté, J. I., Fernández, T., Vírveda, P. (2003). Modeling effective moisture diffusivity of rough rice (Lido cultivar) at low drying temperatures. *J. Food Eng.*, 59 (2-3), 253–258.

[29] Markowski, M., Bialobrzewski, I., Modrzewska, A. (2010). Kinetics of spouted-bed drying of barley: diffusivities for sphere and ellipsoid. *J. Food Eng.*, 96 (3), 380–387.

[30] Perea-Flores, M. J., Garibay-Febles, V., Chanona-Pérez, J. J., Calderón-Domínguez, G., Méndez-Méndez, J. V., Palacios-González, E., Gutiérrez-López, G. F. (2012). Mathematical modeling of castor oil seeds (*Ricinus communis*) drying kinetics in fluidized bed at high temperatures. *Industrial Crops and Products*, 38, 64–71.