

Variation in density and moisture diffusion coefficient of shrimp affected by shrinkage during drying

Mohammad Amin Zandpour¹, Seyed Mehdi Nassiri^{1*}, Mehdi Moradi Hasanabad¹, Mohammad Amin Nematollahi¹

1- Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran.

ARTICLE INFO

Keywords:

Drying,
Moisture diffusion
coefficient,
Moisture ratio,
Shrimp,
Shrinkage
Real-time Soil Surface,

Received:
March 2, 2025

Revised:
June 28, 2025

Accepted:
July 18, 2025

* Corresponding author:
nasiri@shirazu.ac.ir

ABSTRACT

Introduction

Drying agricultural and aquatic products is a widespread practice globally, aimed at increasing shelf life and preventing microbial growth. During the drying process, heat and mass transfer are dominant phenomena, which are closely linked to the moisture diffusion coefficient. Drying is a thermal process where heat and moisture transfer occur simultaneously, with moisture being reduced as the sample heats up. This process concludes when significant temperature changes, and moisture transfer stops once the moisture content reaches a stable point. The drying process can lead to product shrinkage and pore formation, which can affect the quality and efficiency of drying. Shrinkage occurring alongside moisture release, can impact moisture transfer during drying. In meat processing, muscle shrinkage influences the energy consumption and tenderness of meat products, a key quality trait. Shrinkage and structural changes also contribute to a reduction in food volume during drying. Without considering shrinkage in drying models, results may lack accuracy. Mathematical modeling is a powerful tool for studying moisture transfer phenomena and understanding drying processes. This study examines the effect of shrimp shrinkage on the moisture diffusion coefficient during hot air convection drying. The aim is to assess the impact of shrinkage on moisture diffusion in both linear and nonlinear models and select the most accurate relationship for practical applications.

Materials and Methods

In this study, 212 Vannamei shrimp (*Litopenaeus vannamei*) which were packed in a standard packaging size for export, with an average weight of approximately 3 kg per box, were purchased from Marjan-e-Bushehr Company. The frozen shrimp boxes were transferred to a laboratory and stored in freezer for experiments. Required samples from batch were randomly chosen and kept for 12 hours at laboratory temperature before testing and skinned. The moisture content of the shrimp was determined by drying 20 shrimp at 105°C for 24 hours. The shrimp were dried in a convective hot air dryer at temperatures of 40, 50, and 60 °C with air velocity of 1 and 2 m/s. Samples were prepared in two forms: intact shrimp and cuboid shape samples (15×17×30 mm). During the drying process, parameters such as mass, volume, thickness, and image data were collected at intervals. The drying continued until the moisture content of the shrimp reached 17 % (d.b.). The shrinkage of dried samples based on volume and surface area were calculated, and mathematical models were developed to describe the relationship between moisture content and shrinkage. These models, evaluated using MATLAB 2020, were used to calculate the moisture diffusion coefficient (D_e) for both intact and cuboid shrimp at different drying duration times. The results were analyzed using various error indices to validate the models' accuracy.

How to cite:

Zandpour,MA. Nassiri,SM. Moradi Hasanabad,M. Nematollahi,MA. (2025). *Variation in density and moisture diffusion coefficient of shrimp affected by shrinkage during drying*. Journal of Agricultural Mechanization, 10 (2):61-75.
<https://doi.org/10.22034/jam.2025.65789.1320>.



Results and Discussion

The results present the average bulk density values, ranging from 704 to 3374 kg/m³, indicating a significant effect of drying treatments on shrimp volume changes. Previous studies report a bulk density range of 1042 to 1093 kg/m³ for shrimp at 20°C. Drying weakens molecular bonds in shrimp's protein structures, leading to shrinkage, which ultimately changes its volume and density. Factors like sample geometry, drying method, temperature, and air velocity also influence bulk density. During drying, a consistent trend was observed across all treatments, bulk density increased towards the end as volume reduction slowed. This is due to the decreased moisture content, while shrinkage continues to increase. Analysis showed that polynomial models fit the bulk density data better than linear or exponential ones. Additionally, drying time was strongly affected by temperature, with each degree increase reducing drying time by approximately 45 minutes. The study also explored the use of image processing for assessing shrinkage, which provided more accurate volume measurements compared to surface area-based methods. Moreover, the study suggests that for accurate models of moisture-shrinkage relations, intact samples and volume-based shrinkage measurements using toluene are preferable. However, image processing, being non-destructive, could serve as a suitable alternative. Lastly, moisture diffusion coefficients were affected by the drying conditions, with higher temperatures and air speeds leading to faster drying, as confirmed by other studies. The study also concluded that sample size impacts drying rates, with smaller samples drying faster.

Conclusion

It was found that the true density of shrimp increased due to greater volume reduction than mass change at the end of the drying process. Drying time was influenced by air temperature, velocity, and sample size (shape). The best models subjected to moisture-shrinkage data were Polynomial D2 and D3. Moisture diffusion coefficient was then calculated based on D3 shrinkage model, and it was found that this coefficient is inversely affected by the shrimp shrinkage.



تغییر جرم حجمی و ضریب انتشار رطوبت میگو متاثر از چروکیدگی هنگام خشک شدن

محمد امین زندپور^۱، سید مهدی نصیری^{۱*}، مهدی مرادی حسن آباد^۱، محمدمبین نعمت‌اللهی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۸

۱- بخش مهندسی بیوسیستم - دانشکده کشاورزی - دانشگاه شیراز - شیراز - ایران

* نویسنده مسئول: E-mail: nasiri@shirazu.ac.ir

چکیده

خشک کردن بخشی از راهبرد مهندسی صنایع غذایی برای پاسخ سریع به نیازهای بازار مصرف، کاهش هزینه تولید، افزایش ماندگاری، بازده و کیفیت محصول است. میگو یک محصول دریایی فصلی پر رونق در جنوب کشور برای مصارف خارج فصل یا صادرات، خشک می‌شود. برای خشک کردن صنعتی میگو، دانستن خصوصیات فیزیکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش اثر چروکیدگی میگو هنگام خشک شدن در یک خشک کن هوای داغ همرفتی بر تغییرات جرم حجمی و ضریب انتشار رطوبت مورد بررسی قرار گرفت. میگوی وانامی (سفید آمریکایی) پرورشی با هوای داغ در دو سطح سرعت یک و دو متر بر ثانیه و سه سطح دمای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس خشک شد. از ۲۱۲ عدد میگو، ۱۰۶ عدد میگو به صورت مکعب مستطیل و ۱۰۶ عدد میگو به صورت کامل مورد آزمایش قرار گرفت. در هر آزمایش دما و رطوبت هوای ورودی و خروجی خشک کن، و جرم، ضخامت و رطوبت نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. با استفاده از پردازش تصویر عکس‌های تهیه شده در زمان آزمایش، مساحت نمونه‌ها در فواصل زمانی مشخص محاسبه شد و بر مبنای این داده‌ها، چروکیدگی (بر مبنای مساحت) تعیین شد. همچنین، چروکیدگی واقعی با استفاده از تغییرات حجم نمونه‌ها محاسبه گردید. بر داده‌های نسبت رطوبت (مبنای خشک) و چروکیدگی مدل‌های خطی و غیرخطی نمایی و چند جمله‌ای درجه دو و سه در نرم افزار MATLAB 2020 برازش داده شد و برای هر مدل شاخص‌های R^2 , RMSE, SSE محاسبه شد. مطابق این شاخص‌ها، مدل‌های چند جمله‌ای درجه دو و سه، بیشترین دقت برای تخمین چروکیدگی را داشتند. از این مدل‌ها در حل معادله فیک استفاده شد و ضرایب انتشار رطوبت برای هر آزمایش به ازای هر مقدار چروکیدگی و نسبت رطوبت تعیین گردید. نتایج نشان داد که شکل نمونه و نوع مدل استفاده شده برای مقادیر چروکیدگی و محتوای رطوبت، بر مقدار ضرایب انتشار رطوبت محاسبه شده موثر بوده‌اند.

کلمات کلیدی: چروکیدگی، خشک کردن، ضریب انتشار رطوبت، میگو، نسبت رطوبت

۱- مقدمه

خشک کردن محصولات کشاورزی و آبریان صنعتی بسیار گسترده در جهان است. این کار برای افزایش ماندگاری و جلوگیری از رشد میکروارگانیسم‌ها انجام می‌شود. طی مدت فرآیند خشک شدن انتقال حرارت و جرم در محصول یک پدیده غالب است که وابستگی کاملی به ضریب انتشار رطوبت دارد. خشک کردن یک فرآیند حرارتی است که در آن انتقال حرارت و رطوبت به طور همزمان رخ می‌دهد. انتقال حرارت از طریق هوای داغ به نمونه انجام می‌شود و با گرم شدن نمونه، میزان رطوبت کاهش می‌یابد. فرآیند انتقال حرارت زمانی به پایان می‌رسد که دمای نمونه تغییرات قابل توجهی نداشته باشد. از طرف دیگر، به دلیل غالب بودن فشار بخار در نمونه از فشار هوا، نمونه رطوبت را به محیط اطراف خود منتقل می‌کند. این فرآیند زمانی به پایان می‌رسد که میزان رطوبت تغییر قابل ملاحظه‌ای نداشته باشد (Corrales et al., 2010). خشک شدن می‌تواند منجر به تشکیل منافذ و انقباض محصول شود (Koch et al., 2008).

پدیده انقباض و تغییر شکل میوه‌ها و سبزی‌های تازه عامل مهمی است که بر کیفیت و کارایی خشک کردن تأثیر می‌گذارد. انقباض، همزمان با انتشار رطوبت در طول خشک شدن اتفاق می‌افتد و در نتیجه ممکن است بر انتقال رطوبت تأثیر بگذارد (Yuan et al., 2019). گزارش شده است که انقباض عضلانی در طول فرآوری گوشت بر مصرف انرژی فرآورده‌های گوشتی تأثیر دارد. انقباض عضلانی در طی فرآوری گوشت بر کیفیت خوردن محصولات گوشتی تأثیرگذار است. لطافت یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های حسی مربوط به استقبال مصرف‌کنندگان گوشت گاو و سایر فرآورده‌های گوشتی است. انقباض و انحلال حرارتی بافت هم‌بند در حین گرم شدن رابطه مستقیمی با نرمی گوشت دارد (Rao et al., 2022).

یکی از مهم‌ترین تغییرات فیزیکی که مواد غذایی در طول خشک شدن به آن دچار می‌شوند، کاهش حجم خارجی یا چروکیدگی است. چروکیدگی میزان کاهش حجم محصول را نسبت به حجم اولیه نشان می‌دهد و شاخصی از خصوصیات ظاهری و شدت تغییرات ساختمانی ماده غذایی است. از دست دادن آب و گرمایش باعث ایجاد تنش بر ساختار سلولی مواد غذایی شده و در نهایت منجر به تغییر شکل و کاهش در ابعاد ماده غذایی می‌گردد. بررسی مدل‌های خشک کردن بدون در نظر گرفتن چروکیدگی منجر به نتایج قابل اطمینانی نخواهد شد. مطالعات نشان می‌دهد که داده‌های تجربی ناشی از خشک کردن مواد غذایی انطباق مطلوبی با مدل‌های خشک کردن که در آنها چروکیدگی در نظر گرفته شده است، دارند (Mayor et al., 2004; Niamnuy et al., 2008). در زمان خشک کردن، توزیع رطوبت در داخل نمونه غیریکنواخت است و برای محصول چروکیدگی رخ می‌دهد. بنابراین، لازم است توزیع رطوبت به دقت مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد تا بتوان رطوبت داخل نمونه را تا حد رطوبت ایمن برای نگهداری طولانی مدت آن کاهش داد. با این حال،

از طریق آزمایش، امکان ارزیابی تغییرات رطوبت گذرا در نمونه وجود ندارد. در این زمینه، مدل‌سازی ریاضی یکی از ابزارهای قدرتمندی است که برای مطالعه پدیده‌های انتقال رطوبت برای درک بهتر فرآیند خشک کردن مفید است (Mahapatra and Tripathy, 2018a). کار قابل توجهی در توسعه مدل‌های ریاضی لایه نازک نیمه تجربی برای تجزیه و تحلیل رفتار خشک کردن آناناس (Olanipekun et al., 2015) و سایر میوه‌ها مانند انگور فرنگی (Junqueira et al., 2017) و زردآلو (Faal et al., 2015) گزارش شده است. از آنجایی که آنها ماهیت تجربی و نیمه تجربی دارند و اصول فرآیند خشک کردن را شامل نمی‌شوند، نتوانستند توجیه مطلوبی در مورد انتقال رطوبتی که در داخل نمونه‌های غذا در طول خشک شدن رخ می‌دهد ارائه دهند (Khan et al., 2017). از این رو، تمایل به توسعه مدل شبیه‌سازی واقعی‌تر وجود دارد که اصول و فیزیک دخیل در انتقال گرما و جرم را در خود جای دهد و قادر به حل مسائل پیچیده واقع‌بینانه همراه با در نظر گرفتن توزیع رطوبت و چروکیدگی در داخل نمونه باشد (Dhalsamant et al., 2018; Mahapatra and Tripathy 2018b).

حذف آب از ماتریس جامد در طول خشک شدن منجر به تغییر در اندازه شکل همراه با خواص حمل و نقل مواد غذایی می‌شود که مدل‌سازی فرآیند خشک کردن را پیچیده می‌کند. اکثر محققان خواص حمل و نقل ثابت و انقباض ناچیز را در طول مدل‌سازی فرآیند خشک کردن فرض کرده‌اند (Reddy et al., 2017; Vallespir et al., 2019). با این حال، عملاً ابعاد نمونه به طور مداوم با زمان تغییر می‌کند زیرا رطوبت نمونه با زمان خشک شدن کاهش می‌یابد. در برخی موارد، پدیده انقباض می‌تواند کاملاً غالب باشد و نادیده گرفتن آن به طور قابل توجهی دقت مدل را محدود کند. در نظر گرفتن انقباض برای پیش‌بینی دقیق رطوبت در طول مدل‌سازی فرآیند خشک کردن، همانطور که توسط تحقیقات قبلی پیشنهاد شده است، مهم است (Datta 2007; Golestani et al., 2013).

ضریب انتشار و ضریب انتقال جرم فراسنجه‌های مهمی هستند که به طور قابل توجهی بر سرعت خشک شدن تأثیر می‌گذارند و تحت تأثیر عوامل زیادی مانند رطوبت، دما، انقباض در طول فرآیند خشک کردن قرار می‌گیرند و از این رو نقش عمده‌ای در کنترل، شبیه‌سازی و طراحی فرآیند ایفا می‌کنند (Khan et al., 2017). ادغام مقادیر دقیق این فراسنجه‌ها در طول مدل‌سازی، دقت مدل را بهبود می‌بخشد و مدل را برای کاربردهای عملی واقعی‌تر می‌کند (Rani et al., 2020). بنابراین، تعیین صحیح مدل چروکیدگی و تأثیر آن بر رابطه فیک از طریق بسط جملات معادله مرتبط با ضریب انتشار مؤثر رطوبت، نقش مهمی در شناخت و تجزیه و تحلیل دقیق فرآیند خشک کردن بازی می‌کند (المعی و همکاران، ۱۴۰۲).

در این پژوهش از یک خشک‌کن هوای داغ همرفتی برای خشک کردن میگو استفاده شد و اثر چروکیدگی هنگام خشک شدن،

در زمان آزمایش هر ۴۵ دقیقه، ابتدا دما و رطوبت هوای ورودی و خروجی با سرعت سنج سیم داغ مدل testo 435 ساخت کشور آلمان با دقت ± 0.1 درجه سلسیوس (برای دما) و ± 0.1 درصد (برای رطوبت) اندازه‌گیری می‌شد. از هر یک از نمونه‌ها از دو نمای بالا و روبه‌رو عکس‌برداری می‌شد. سپس هر کدام از آنها برای تعیین حجم در استوانه مدرج حاوی تولوئن غوطه‌ور می‌شدند. در نهایت ضخامت نمونه خارج شده از خشک‌کن با کولیس مدل Mitutoyo (ساخت چین) با دقت ± 0.01 میلی‌متر اندازه‌گیری و در خشک‌کن قرار می‌گرفت. هر آزمایش با رسیدن مقدار میانگین رطوبت ۴ نمونه به ۱۷ درصد (مبنای خشک) به اتمام می‌رسید.

برای هر آزمایش نمودار رطوبت - زمان ترسیم شد. افزون بر آن، با محاسبه جرم حجمی نمونه‌ها در فواصل مختلف از شروع زمان خشک‌شدن، نمودار جرم حجمی - زمان نیز رسم شد. در مدت زمان خشک شدن چروکیدگی بر مبنای حجم و مساحت با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد (المعی و همکاران، ۱۴۰۲):

$$S = \frac{V}{V_0} \quad \text{or} \quad S = \frac{A}{A_0} \quad (1)$$

که V و A به ترتیب حجم و مساحت میگو در رطوبت ثانویه و V_0 و A_0 مقادیر مشابه در رطوبت اولیه است. با استفاده از داده‌های نسبت رطوبت و چروکیدگی، چهار رابطه خطی، دو جمله‌ای درجه دو، درجه سه و نمایی در نرم‌افزار MATLAB 2020 رسم گردید و معادلات مربوطه تعیین شد. برای مدل‌های ایجاد شده شاخص‌های ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و مجموع مربعات خطا (SSE) محاسبه گردیدند.

معادلات مربوط به مدل‌های چروکیدگی در رابطه ۲ که حل معادله فیک^۱ است (المعی و همکاران، ۱۴۰۲) جایگذاری شد و با استفاده از داده‌های مربوط به چروکیدگی، ضریب انتشار رطوبت برای هر چروکیدگی در هر گام زمانی، برای دو حالت نمونه‌های کامل و مکعب مستطیل بدست آمد.

$$\frac{M}{M_0} = \frac{8}{\pi^2} \exp(-\pi^2 \frac{D_e}{L^2} t) + \frac{8}{9\pi^2} \exp(-9\pi^2 \frac{D_e}{L^2} t) \quad (2)$$

که M درصد رطوبت میگو در زمان مورد نظر (بر مبنای خشک)، M_0 درصد رطوبت اولیه میگو (بر مبنای خشک)، D_e ضریب

بر تغییرات ضریب انتشار رطوبت مورد بررسی قرار گرفت. افزون بر آن، تاثیر چروکیدگی بر ضریب انتشار رطوبت در دو حالت خطی و غیر خطی مورد مقایسه قرار گرفت و در نهایت با واسنجی مدل، بهترین رابطه ضریب انتشار رطوبت متاثر از چروکیدگی انتخاب شد.

۲- مواد و روش‌ها

برای انجام پژوهش تعداد ۲۱۲ میگو ولنامی (سفید آمریکایی) پرورشی از شرکت مرجان بوشهر در اندازه‌های استاندارد ۵۰ تا ۶۰ در یک جعبه به ابعاد 30×20 سانتی‌متر به صورت منجمد تهیه گردید. این بسته‌بندی‌ها با ابعاد بیان شده برای صادرات مورد استفاده قرار می‌گیرد. وزن تقریبی هر جعبه معادل سه کیلوگرم است. این اندازه میگو امکان تهیه نمونه‌های مکعبی به ابعاد $30 \times 17 \times 15$ میلی‌متر را فراهم آورد. میگوهای صید شده از مزارع پرورشی پس از حمل و انتقال به کارخانه بلافاصله با آب خنک شستشو شده و بر اساس اندازه دسته‌بندی شده‌اند. سپس ضد عفونی و ضمن بازرسی فیزیکی در جعبه حاوی کیسه پلاستیک پلی‌ونیل قرار گرفته و برای منجمدسازی به فریزرهای تونلی منتقل و در سردخانه ذخیره شده‌اند. نمونه‌های خریداری شده با شرایط منجمد به آزمایشگاه دانشگاه منتقل شدند، اما قبل از هر آزمون تعداد نمونه مورد نیاز در شرایط یخچال به مدت ۱۲ ساعت نگهداری شد تا از حالت منجمد خارج شوند. برای تعیین رطوبت اولیه میگو تعداد ۲۰ عدد میگو به صورت کامل در آون به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس قرار داده شد (Rani et al., 2020).

نمونه‌های آماده شده در یک آزمایش فاکتوریل با یک خشک‌کن هوای داغ همرفتی با سه دمای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس و دو سرعت هوا ۱ و ۲ متر بر ثانیه به دو صورت نمونه کامل و مکعب مستطیل خشک شدند. برای هر آزمایش از ۱۶ عدد میگو استفاده شد. خشک‌کن مورد استفاده دارای ۶ المنت حرارتی ۱۰۰۰ وات و یک پنکه گریز از مرکز بود (شکل ۱).

در ابتدای شروع هر آزمایش جرم، حجم و ضخامت شانزده نمونه پوست‌گیری شده اندازه‌گیری می‌شد. وزن نمونه‌های میگو با ترازوی AND-GF400 با دقت ± 0.01 گرم و حجم آن‌ها با روش غوطه‌وری در یک استوانه مدرج حاوی تولوئن با دقت ± 2 میلی-لیتر اندازه‌گیری شد. افزون بر آن، تصویر نمونه‌های اولیه در اتاقک تصویر با نور غیر مستقیم عکس‌برداری، با یک دوربین ۴۸ مگاپیکسل (به فاصله ۱۰ سانتی‌متر از نمونه) تهیه شد. پس از آن ۱۶ نمونه روی سینی توری قرار داده شده و به خشک‌کن منتقل می‌شدند.

¹ - Fick's equation

۳- نتایج و بحث

۳-۱- سینتیک خشک شدن

با توجه به شکل‌های ۲ تا ۴ چند نکته قابل ارائه است. نخست آنکه زمان خشک شدن به شدت تحت تاثیر دمای خشک شدن است. به طور تقریبی هر درجه افزایش در دمای هوای خشک کن حدود ۴۵ دقیقه از مدت زمان خشک شدن کاسته است. افزون بر آن، افزایش سرعت هوای خشک کن نیز در پایین ترین سطح دمای خشک کردن حدود ۱۸۰ دقیقه از مدت زمان خشک شدن کاسته است و با افزایش دما این مقدار افزایش داشته است، به نحوی که در دمای ۶۰ درجه سلسیوس مدت زمان خشک شدن به مقدار ۲۰۰ دقیقه کاهش یافته است. آنچه که از نمودار ۲ قابل درک است، شکل منظم نمونه باعث ایجاد روند نرم تر (با کمترین پراکنش داده) در خشک شدن نمونه است. در مطالعات پیشین مشخص شده است که افزایش دما و سرعت هوا در افزایش نرخ انتقال رطوبت در میوه‌ها (Tagne et al., 2016)، و بافت‌های گوشتی (Hosseinpour et al., 2011., Tsurutu et al., 2015) اثر مستقیم داشته است.

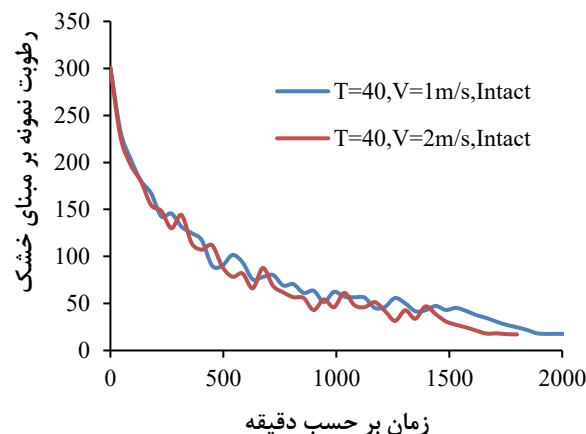
در برخی از پژوهش‌ها گزارش شده است که اثر عامل دما هوای خشک کردن نسبت به سرعت آن و همچنین اندازه نمونه بیشتر است (Rani et al., 2020; Amankwah et al., 2016). نمونه مکعب مستطیل به علت انتقال رطوبت از سه جهت، در زمان کمتری نسبت به نمونه کامل خشک شده است. مقدار نسبت تغییرات زمان خشک شدن (نسبت اختلاف زمان خشک شدن نمونه مکعب مستطیل به زمان خشک شدن نمونه کامل) در عامل‌های اصلی آزمایش در جدول ۱ و برای تغییرات دمای خشک کردن در جدول ۲ درج شده است.

انتشار رطوبت میگو بر حسب متر مربع-ثانیه، L ضخامت میگو بر حسب متر و t زمان بر حسب ثانیه است. در این پژوهش از بسط دوجمله‌ای برای حل معادله فیک استفاده شد (Amankwah et al., 2018)، اما تعداد بسط با جملات بیشتر نیز مورد استفاده قرار گرفته است و نشان داده شده است که تاثیر خروجی مدل در تخمین ضریب انتشار پس از بسط بیشتر از ۱۰ جمله تفاوت ایجاد نکرده است (المعی و همکاران، ۱۳۹۱).



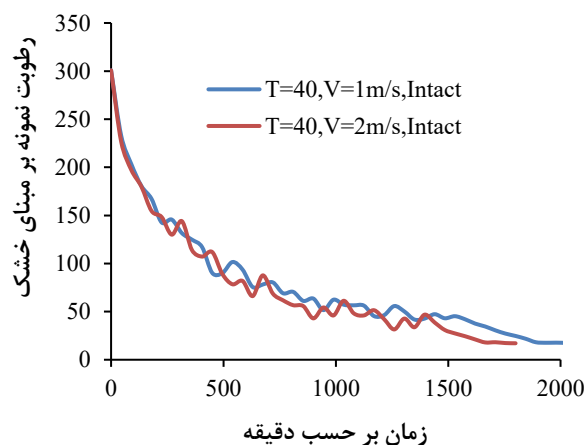
شکل ۱- نمای خشک کن هوای داغ همرفتی، ۱) واحد کنترل الکتریکی ۲) فن ۳) المنت‌های حرارتی ۴) سینی نمونه‌های میگو

Figure 1- A view of convective hot air dryer, 1) Electric control unit 2) Fan 3) Thermal elements 4) Tray of shrimp samples

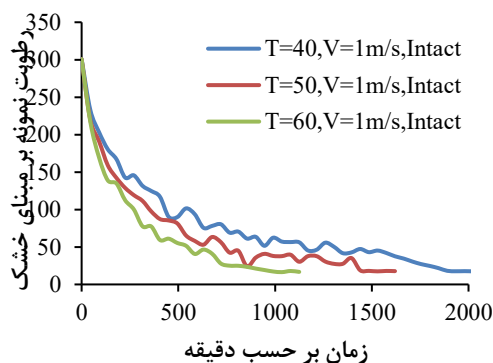


شکل ۲- سینتیک خشک شدن میگو در دمای ۴۰ درجه سلسیوس و سرعت یک متر بر ثانیه (نمونه کامل و مکعب مستطیل)

Figure 3- Kinetics of shrimp drying at temperature of 40 °C and air velocity of 1 m/s (intact and rectangular cube shape sample)



شکل ۳- سینتیک خشک شدن میگو در دمای ۴۰ درجه سلسیوس و سرعت یک و دو متر بر ثانیه برای نمونه کامل
Figure 4- Kinetics of shrimp drying at temperature of 40 °C and air velocity of 1 and 2 m/s (intact sample)



شکل ۴- سینتیک خشک شدن میگو در دمای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس، سرعت یک متر بر ثانیه، نمونه کامل
Figure 5- Kinetics of shrimp drying at temperature of 40, 50 and 60 °C and air velocity of 1 m/s (intact sample)

جدول ۱- نسبت تغییرات زمان خشک شدن نمونه مکعب مستطیل (به نمونه کامل)

Table 1- The ratio of drying time variation of rectangular cube sample (to intact one)

نسبت تغییرات	سرعت هوای	دمای هوای
زمان	خشک کن (m/s)	خشک کن (°C)
0.88	1	40
0.90	2	
0.92	1	50
0.89	2	
0.88	1	60
0.95	2	

جدول ۲- نسبت تغییر زمان خشک شدن در اثر تغییر دمای خشک کردن (مبنا دمای ۴۰ °C)

Table 2- The ratio of drying time variation due to variation in drying temperature (40 °C base temperature)

نسبت تغییرات	دمای هوای	شکل نمونه	سرعت هوای
زمان	خشک کن (°C)		خشک کن (m/s)
0.80	50	کامل	1
0.55	60	Intact	
0.82	50	مکعب مستطیل	
0.55	60	Rectangular cube	
0.72	50	کامل	2
0.50	60	Intact	
0.72	50	مکعب مستطیل	
0.52	60	Rectangular cube	

۳-۲- تغییرات جرم حجمی

در جدول ۳ میانگین مقادیر جرم حجمی متناسب با عامل‌های اصلی آزمایش درج شده است. مقادیر جرم حجمی اولیه برای همه تیمارها بین ۹۱۳ و ۱۲۰۶ کیلوگرم بر متر مکعب و دامنه تغییرات آن نیز بین ۷۰۴ تا ۳۳۷۳ کیلوگرم بر متر مکعب محاسبه شد که نشان از تاثیر عمده تیمار خشک کردن بر تغییرات حجم میگو دارد. با این وجود، با در نظر گرفتن عامل‌های آزمایش، میانگین جرم حجمی نهایی نمونه‌های خشک شده دارای اختلاف معناداری نیستند ($p > 0.05$). با توجه به گزارش ارائه شده، دامنه تغییرات جرم حجمی میگو بین ۱۰۴۲ و ۱۰۹۳ کیلوگرم بر متر مکعب در دمای ۲۰ درجه سلسیوس است (Brasiello et al., 2013). در موادی نظیر میگو به دلیل ضعیف شدن پیوند مولکولی در ساختارهای پروتئینی در زمان خشک شدن، پدیده چروکیدگی رخ می‌دهد. این پدیده به نوبه خود باعث ایجاد تغییرات در حجم، و در نهایت به تغییر جرم حجمی منجر می‌شود. گزارش شده است با افزایش دما علاوه بر افزایش سرعت انتقال رطوبت در اثر فشار بخار ایجاد شده بیشتر و خالی شدن فضای بین سلولی از

رطوبت، تغییر ساختار (شکل) و اکسیدشدن پروتئین نیز مقدار چروکیدگی را افزایش داده و شکل نامنظم‌تری را برای محصول خشک شده ایجاد می‌کند (Chen et al., 2022; Rao et al., 2022). این موضوع با نتایج این پژوهش تطابق دارد. افزون بر آن، عواملی مانند هندسه نمونه، روش خشک کردن، شرایط آزمایش شامل دما و سرعت هوا نیز می‌تواند بر جرم حجمی موثر باشد (Kassama et al., 2004). نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد در هر عامل آزمایش اختلاف‌هایی بین جرم حجمی نهایی و نسبت جرم حجمی (نسبت جرم حجمی نهایی به جرم حجمی اولیه نمونه) وجود دارد. افزایش دمای هوای خشک کن افزایش جرم حجمی نهایی و نسبت جرم حجمی را به دنبال داشت در صورتی که روند آن برای افزایش سرعت هوای خشک کن برای هر دو فراسنجه محاسبه شده به صورت معکوس بود. نمونه‌های مکعب مستطیل دارای جرم حجمی نهایی بیشتر و در نتیجه نسبت جرم حجمی بالاتر بودند، اما نتایج تجزیه واریانس هیچکدام از اختلاف‌های ایجاد شده توسط عامل‌های آزمایش را معنادار نشان نداد ($p > 0.05$).

جدول ۳- مقادیر جرم حجمی میگوی خشک شده در تیمارهای مختلف (کیلوگرم بر متر مکعب)
Table 3- Amount of dried shrimp density at different drying treatment levels (kg/m³)

نسبت جرم حجمی	میانگین و انحراف معیار جرم حجمی (kg/m ³)	شکل نمونه	سرعت هوای خشک کن (m/s)	دمای هوای خشک کن (°C)
1.17	1237.9 ± 270.3	کامل Intact	1	40
1.19	1253.4 ± 368.3	مکعب مستطیل Rectangular cube		
1.12	1195.5 ± 429.7	کامل Intact	2	
1.14	1138.2 ± 442.5	مکعب مستطیل Rectangular cube		
1.15	1227.1 ± 318.5	کامل Intact	1	50
1.25	1350.5 ± 501.4	مکعب مستطیل Rectangular cube		
1.14	1208.0 ± 354.3	کامل Intact	2	
1.19	1238.5 ± 530.1	مکعب مستطیل Rectangular cube		
1.22	1308.5 ± 390.8	کامل Intact	1	60
1.23	1338.0 ± 455.3	مکعب مستطیل Rectangular cube		
1.13	1233.4 ± 271.4	کامل Intact	2	
1.27	1359.9 ± 487.6	مکعب مستطیل Rectangular cube		

تفاوت جرم حجمی نهایی نمونه‌های مکعب مستطیل نسبت به نمونه‌های کامل را می‌توان به خروج بهتر رطوبت از آن‌ها نسبت داد. همانطور که در بخش قبل نیز بیان شد، مدت زمان خشک شدن این نمونه‌ها کمتر از نمونه‌های کامل در شرایط یکسان خشک کردن بوده است. با توجه به این که جرم حجمی بدون توجه به مقدار چروکیدگی و حجم نهایی بی مفهوم است، همانطور که در بخش بعدی توضیح داده شده است، جرم حجمی بیشتر نمونه‌های مکعبی به علت کاهش بیشتر در حجم آنها بوده است که می‌تواند ناشی از تغییرات ابعاد نمونه در سه جهت باشد. این مورد برای نمونه‌های کامل در راستای طولی به میزان کمتری صورت می‌پذیرد. برای بررسی بیشتر تغییرات جرم حجمی در طول مدت زمان خشک شدن برای تیمار مختلف، روند تغییرات آن مورد ارزیابی قرار گرفت که نمونه‌ای از آن در شکل ۵ نشان داده شده است. روند مشابه در همه تیمارها مشاهده شد.

در انتهای هر آزمایش مقادیر جرم حجمی روند افزایشی را دنبال کرده است. در انتهای فرآیند خشک شدن به دلیل کاهش قابل توجه حجم رطوبت درون محصول، نمونه رطوبت چندانی از دست نمی‌دهد و در نتیجه جرم محصول تغییر چندانی ندارد، در حالی که تغییرات حجم آن بنا به ادامه روند چروکیدگی بیشتر است، در نتیجه باعث افزایش جرم حجمی نمونه می‌شود. در مطالعه پیشین نیز روند مشابه گزارش شده است (Yuan et al., 2019). روند تغییرات نسبت جرم حجمی نیز بررسی و روند مشابهی مشاهده شد.

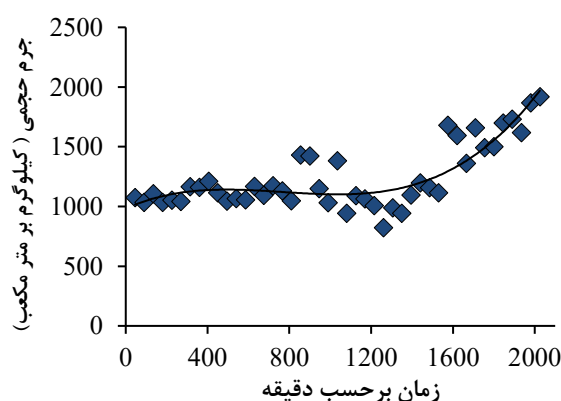
نمودار چروکیدگی - زمان

با توجه به شکل ۶، میزان چروکیدگی بر اساس پردازش مساحت تصاویر نشان داد که هر سه مقدار چروکیدگی بر اساس نسبت مجموع مساحت تصاویر روبرو و بالا، نسبت مساحت تصویر روبرو به تنهایی و نسبت مساحت تصویر بالا به تنهایی، دارای مقادیر بیشتری نسبت به چروکیدگی بر مبنای حجم هستند و در مدت زمان خشک شدن نمونه‌ها این روند بیش برآزش دنبال شده است.

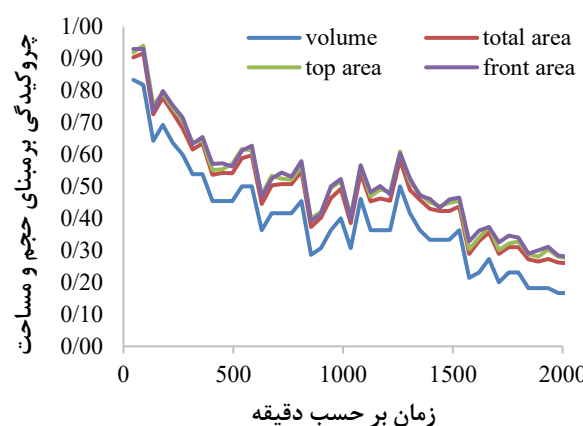
احاطه تولوئن اطراف نمونه‌های چروکیده شده تقریباً مقدار دقیق تری را برای اندازه‌گیری حجم فراهم نموده است و انتظار آن است که مقدار چروکیدگی بر اساس حجم به واقعیت نزدیک‌تر باشد (Ersan et al., 2020). چروکیدگی بر مبنای مساحت تصاویر در هر سه حالت محاسبه تفاوت قابل چشم‌پوشی داشته است به نحوی که هر سه نمودار به طور تقریبی بر یکدیگر منطبق شده‌اند. بنابراین، چنانچه سامانه تصویربرداری محدود به یک دوربین تصویربرداری باشد هر کدام از تصاویر بالا یا روبرو (بسته به موقعیت دوربین برای نصب راحت‌تر) به تنهایی قادر به محاسبه چروکیدگی هستند. با این وجود نسبت سطح حاصل از هر دو نما (نمودار قرمز رنگ در شکل ۶) به نمودار چروکیدگی حجمی (نمودار آبی رنگ در شکل ۶) نزدیک‌تر است و با گزارش قبلی نیز مطابقت دارد (Ersan et al., 2020).

همان‌طور که در جدول ۴ مقدار اختلاف چروکیدگی بر مبنای حجم و مساحت نمونه‌ها در تیمارهای مختلف نشان می‌دهد، اختلاف این دو نسبت بسیار جزئی است و تقریباً وابستگی به تیمارهای خشک کردن نداشته است. چون روند تغییرات چروکیدگی با هر دو روش سطح و حجم هماهنگ و مشابه هستند، می‌توان از روش تصویربرداری در شرایط برخط نمودن فرآیند خشک کردن استفاده نمود و بر مبنای روش حجمی مقدار بیش‌اندازه‌گیری روش سطحی را با ضریب تصحیح اصلاح نمود.

از آنجا که کاهش خطا در تخمین میزان ضریب انتشار رطوبت مد نظر است، برای محاسباتی که نیاز به در نظر گرفتن چروکیدگی بود در این پژوهش هر دو روش مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۵- نمودار جرم حجمی - زمان در دمای ۴۰ درجه سلسیوس و سرعت یک متر بر ثانیه برای نمونه کامل
Figure 2- Volumetric mass-time diagram at 40 °C temperature and 1 m/s air velocity for intact sample



شکل ۶- روند تغییرات چروکیدگی (بر مبنای حجم، مساحت مجموع دو نما، مساحت نمای بالا و مساحت نمای روبرو) در دمای ۴۰ درجه سلسیوس و سرعت یک متر بر ثانیه برای نمونه کامل

Figure 6 – Trend of shrinkage variation (based on volume and area of sum of two dimensions, top view and front view) at 40 °C and 1 m/s drying air condition for intact shrimp sample

جدول ۴- میانگین اختلاف مقادیر چروکیدگی بر مبنای حجم و مساحت (نسبت مجموع مساحت نمای بالا و رو به رو)

Table 4- Average difference between shrinkage values based on volume and area (the ratio of the sum of top and front view area)

میانگین چروکیدگی	شکل نمونه	سرعت هوای خشک کن (m/s)	دمای هوای خشک کن (°C)
	کامل	1	40
0.088	Intact		
	مکعب مستطیل		
	Rectangular cube		
0.086	کامل	2	
0.086	Intact		
	مکعب مستطیل		
	Rectangular cube		
0.086	کامل	1	50
0.086	Intact		
	مکعب مستطیل		
	Rectangular cube		
0.089	کامل	2	
0.086	Intact		
	مکعب مستطیل		
	Rectangular cube		
0.086	کامل	1	60
0.085	Intact		
	مکعب مستطیل		
	Rectangular cube		
0.082	کامل	2	
0.088	Intact		
	مکعب مستطیل		
	Rectangular cube		
0.086	کامل		

۳-۴- مدل‌های نسبت رطوبت- چروکیدگی

در جدول ۵ معادلات مربوط به نمودارهای نسبت رطوبت- چروکیدگی (حجمی) و شاخص آماری آن‌ها برای یک سطح دما و دو سطح سرعت درج شده است. با مقایسه خطاهای معادلات برازش

داده‌شده مشخص است خطای معادلات چند جمله‌ای درجه ۲ و درجه ۳ از مدل‌های خطی و نمایی کم‌تر است. به عبارت دیگر این مدل‌ها برازش بهتری نسبت به مدل‌های خطی و نمایی دارند.

جدول ۵- معادلات برازش شده بر داده‌های نسبت رطوبت (مبنا خشک) در مقابل چروکیدگی بر مبنا حجم و مساحت در دمای ۴۰ درجه

سلسیوس

Table 5- Equations fitted to data on moisture content (dry basis) versus shrinkage based on volume and area at 40 degrees Celsius

SSE	RMSE	R ²	معادله مدل	شکل نمونه	سرعت هوای خشک کن (m/s)	مبنای چروکیدگی
						حجم Volume
0.163	0.061	0.911	$MR = 1.049S - 0.1687$	کامل Intact	1	
0.107	0.050	0.942	$MR = 0.7229S^2 + 0.3122S - 0.01229$			
0.103	0.049	0.944	$MR = -0.9389S^3 + 2.243S^2 - 0.3996S + 0.08274$			
0.183	0.065	0.900	$MR = 0.07828e^{2.657S}$			
0.358	0.096	0.808	$MR = 1.111S - 0.19$	مکعب مستطیل Rectangular cube		
0.311	0.091	0.833	$MR = 0.6799S^2 + 0.451S - 0.05435$			
0.273	0.086	0.854	$MR = -2.537S^3 + 4.803S^2 - 1.456S + 0.1914$			
0.450	0.107	0.758	$MR = 0.08257e^{2.634S}$			
0.316	0.090	0.821	$MR = 1.065S - 0.1958$	کامل Intact	2	
0.243	0.080	0.862	$MR = 0.8458S^2 + 0.2049S - 0.008802$			
0.236	0.080	0.866	$MR = -1.099S^3 + 2.617S^2 - 0.6146S + 0.09795$			
0.317	0.090	0.820	$MR = 0.07223e^{2.739S}$			
0.326	0.097	0.805	$MR = 1.009S - 0.189$	مکعب مستطیل Rectangular cube		
0.193	0.076	0.885	$MR = 1.107S^2 - 0.08217S + 0.03803$			
0.185	0.075	0.890	$MR = -1.05S^3 + 2.774S^2 - 0.8338S + 0.1287$			
0.252	0.085	0.850	$MR = 0.06374e^{2.869S}$			
0.151	0.059	0.881	$MR = 0.9869S - 0.2333$	کامل Intact	1	مساحت Area
0.113	0.052	0.911	$MR = 0.8419S^2 + 0.06988S - 0.008386$			
0.107	0.051	0.916	$MR = -2.065S^3 + 4.351S^2 - 1.759S + 0.282$			
0.153	0.059	0.880	$MR = 0.05031e^{3.027S}$			
0.365	0.098	0.719	$MR = 1.033S - 0.2496$	مکعب مستطیل Rectangular cube		
0.301	0.090	0.768	$MR = 1.598S^2 - 0.5364S + 0.1002$			
0.296	0.090	0.772	$MR = -2.735S^3 + 5.666S^2 - 2.415S + 0.3657$			
0.324	0.092	0.750	$MR = 0.03319e^{3.857S}$			
0.306	0.089	0.745	$MR = 0.9795S - 0.2477$	کامل Intact	2	
0.256	0.083	0.786	$MR = 1.079S^2 - 0.1691S + 0.03174$			
0.256	0.084	0.787	$MR = -0.7165S^3 + 2.246S^2 - 0.7527S + 0.1202$			
0.277	0.085	0.769	$MR = 0.04063e^{3.322S}$			
0.288	0.092	0.741	$MR = 0.9069S - 0.227$	مکعب مستطیل		

Rectangular cube			
0.192	0.076	0.827	$MR = 1.486S^2 - 0.632S + 0.1299$
0.191	0.077	0.828	$MR = 1.317S^3 - 0.5752S^2 + 0.3493S - 0.007971$
0.191	0.074	0.829	$MR = 0.0286e^{3.761S}$

۳-۵- ضرایب انتشار رطوبت

ضرایب انتشار رطوبت مربوط به هر آزمایش متناسب با معادله برازش داده شده نسبت رطوبت- چروکیدگی آنها، برای یک سطح دما و سرعت و نمونه کامل در جدول ۶ درج شده است. از داده‌های به دست آمده استنباط می‌شود که روش مورد استفاده در تعیین چروکیدگی و ضریب انتشار رطوبت موثر بوده است، به این معنی که ضرایب انتشار رطوبت مربوط به روش پردازش تصویر (چروکیدگی بر مبنای سطح) با ضرایب انتشار رطوبت مبتنی بر چروکیدگی حجمی متفاوت است. این موضوع در توافق مناسب با مطالعه قبلی است (Rao et al., 2022). با این وجود، آزمون t انجام شده بین مقادیر بدست آمده از چروکیدگی‌های حجمی و سطحی در همه تیمارهای آزمایش نشان داد هیچ اختلاف معناداری بین آنها وجود ندارد ($p < 0.05$).

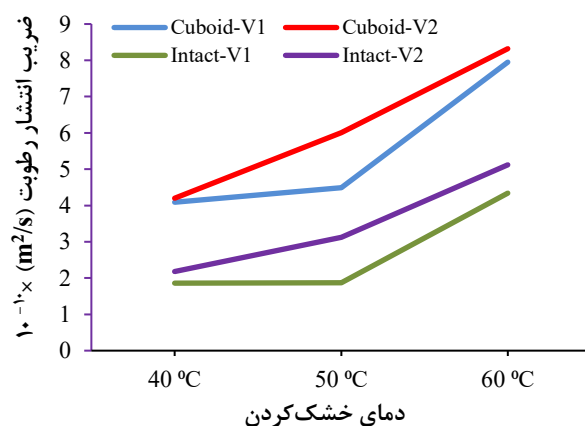
بر این اساس شکل نمونه میگو در تعیین زمان خشک‌شدن آن تاثیر دارد، گرچه از یک روند مشخص پیروی نمی‌کند. افزون بر آن، مشخص شد مقدار نسبت رطوبت تخمین زده شده با استفاده از معادلات مربوط به چروکیدگی حجمی دارای خطای کمتری نسبت به چروکیدگی بر مبنای مساحت است. در بخش قبل نیز نشان داده شد که چروکیدگی بر مبنای مساحت در مدت زمان خشک‌شدن نمونه دچار بیش‌اندازه‌گیری است که این مقدار در سایر اندازه‌گیری یا محاسبات پیامد نیز ورود پیدا خواهد کرد. می‌توان گفت برای داشتن مدل‌های دقیق‌تر نسبت رطوبت- چروکیدگی، استفاده از نمونه کامل در آزمایش و استفاده از چروکیدگی حجمی ارجحیت دارد. اما با توجه به نتایج جدول ۵ به دلیل این که مقادیر چروکیدگی بر مبنای مساحت اختلاف چندانی با مقادیر چروکیدگی حجمی ندارد و از طرفی روش پردازش تصویر یک روش غیر مخرب است با امکان برخط شدن هست، این روش را می‌توان جایگزین روش تولوئن برای افزایش سرعت محاسبه چروکیدگی پیشنهاد نمود (Rao et al., 2022; Rani et al., 2020).

جدول ۶- ضرایب انتشار رطوبت در دمای هوای ۴۰ درجه سلسیوس و سرعت ۱ متر بر ثانیه برای نمونه کامل
Table 6- Moisture diffusion coefficient at air temperature of 40 degrees Celsius and speed of 1 m/s for the intact sample

مقدار ضریب انتشار (m^2/s)		چروکیدگی بر مبنای	نوع برازش
بیشترین	کمترین		
1.06×10^{-9}	6.92×10^{-11}	مساحت Area	خطی Linear
7.89×10^{-10}	7.07×10^{-11}	حجم Volume	
6.69×10^{-10}	7.39×10^{-11}	مساحت Area	درجه ۲ Polynomiald2
6.65×10^{-10}	7.48×10^{-11}	حجم Volume	
7.02×10^{-10}	7.65×10^{-11}	مساحت Area	درجه ۳ Polynomiald3
6.25×10^{-10}	7.70×10^{-11}	حجم Volume	
7.60×10^{-10}	7.01×10^{-11}	مساحت Area	نمایی Exponential
8.20×10^{-10}	6.58×10^{-11}	حجم Volume	

همچنین نوع معادلات برازش شده به داده‌های نسبت رطوبت- چروکیدگی در هر آزمایش نیز بر ضرایب انتشار رطوبت موثر بود. به این معنی که ضرایب انتشار رطوبت مربوط به معادلات خطی و غیرخطی برازش شده به نمودار نسبت رطوبت - چروکیدگی هر آزمایش متفاوت است. نتایج نشان داد با افزایش میزان و سرعت چروکیدگی، مقدار ضریب انتشار رطوبت افزایش خواهد یافت (شکل ۷).

به عنوان مثال برای مدل درجه ۳ نسبت رطوبت- چروکیدگی، میانگین ضریب نفوذ نمونه‌های کامل میگو در دمای 40°C در حالت چروکیدگی سطحی $10^{-10} \times 1/9$ متر مربع بر ثانیه و در حالت چروکیدگی حجمی $10^{-10} \times 1/86$ متر مربع بر ثانیه محاسبه شد و این اختلاف معنادار نبود ($p < 0.05$). مقادیر متناظر برای بالاترین دما (60°C) به ترتیب $10^{-10} \times 5/05$ و $10^{-10} \times 5/12$ متر مربع بر ثانیه محاسبه شد که اختلاف کم و غیرمعنادار بود ($p < 0.05$).



شکل ۷- روند تغییر میانگین ضریب انتشار رطوبت (بر مبنای چروکیدگی حجمی) بر حسب دماهای مختلف خشک کردن در سرعت‌های ۱ و ۲ متر بر ثانیه برای نمونه‌های کامل و مکعب مستطیل

Figure 7 – Variation trend of the mean moisture diffusion coefficient (based on volumetric shrinkage) versus drying temperature at 1 and 2 air drying velocities for intact and rectangular cubic shrimp samples

رطوبت در دامنه 10^{-12} تا 10^{-10} قرار دارد که این دامنه مربوط به مواد غذایی خشک شده گزارش شده است (Costa et al., 2018).

نتیجه‌گیری نهایی

در این پژوهش نتایج زیر حاصل شد:

- در انتهای مرحله خشک شدن در هر آزمایش، مقادیر جرم حجمی به دلیل تغییر ادامه دار حجم نمونه نسبت به تغییر اندک جرم دچار افزایش بود. این چروکیدگی وابستگی کم‌تر به رطوبت و تابع شرایط یافت و شبکه فیزیکی میگو هست. بنابراین، اثر آن بر ضریب انتشار رطوبت بررسی شد.
- برای تعیین ضریب انتشار رطوبت شکل نمونه (تعیین کننده سرعت خشک شدن) و مدل برازش داده شده نسبت رطوبت- چروکیدگی، مهم است. در این مطالعه از بین مدل‌های خطی و غیرخطی برازش داده شده، مدل‌های چند جمله‌ای درجه دو و سه بیشترین دقت را برای تعیین ضریب انتشار رطوبت در روش خشک کردن میگو با هوای گرم داشتند.

در پژوهش انجام شده دیگری نیز به این موضوع اشاره شده است که می‌توان از روابط مختلف برای برازش داده‌های نسبت رطوبت- چروکیدگی استفاده نمود (Koch et al., 2008). سرعت و دمای هوا نیز بر تغییرات ضریب انتشار رطوبت موثر است، به این صورت که با افزایش سرعت و دمای هوا، ضرایب انتشار رطوبت بزرگ‌تر می‌شوند. به عبارت دیگر، با افزایش دما و سرعت هوا، نمونه‌ها زودتر خشک می‌شوند که در گزارش دیگری نیز مورد تایید قرار گرفته است (Hosseinpour et al., 2011). همچنین، شکل نمونه بر تغییرات ضریب انتشار رطوبت موثر است. با توجه به نتایج بدست آمده این چنین استنتاج می‌شود که ضرایب انتشار رطوبت مربوط به نمونه‌های کامل کم‌تر از ضرایب انتشار رطوبت مربوط به نمونه‌های مکعب مستطیل است. به عبارت دیگر نمونه‌های مکعب مستطیل زودتر از نمونه‌های کامل خشک می‌شوند و بیان شده است که اندازه نمونه در سینتیک خشک شدن آن موثر است (Perussello et al., 2014). در این آزمایش‌ها محدوده تغییر ضریب انتشار

- Science and Technology. 2950-2957. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1331-9>
- Golestani R, Raisi A, Aroujalian A (2013). *Mathematical modeling on air drying of apples considering shrinkage and variable diffusion coefficient*. Drying Technology, 31(1). 40-51. <http://dx.doi.org/10.1080/07373937.2012.714826>
- Hosseinpour, S., Rafiee, S., & Mohtasebi, S. (2011). *Application of Image Processing to Analyze Shrinkage and Shape Changes of Shrimp Batch during Drying*. Drying Technology, 29, 1416-1438. <http://dx.doi.org/10.1080/07373937.2011.587620>
- Junqueira, JRJ., Correia, JLG., de Oliveira, HM., Ivo Soares Avelar, R., Salles Pio, LA., (2017). *Convective drying of cape gooseberry fruits: effect of pretreatments on kinetics and quality parameters*. LWT Food Science and Technology, 82. 404-410. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.04.072>
- Kassama, L. S. & Ngadi, M. O. (2004). *Pore development in chicken meat during deep-fat frying*. LWT Food Science and Technology. 37. 841-847. <https://dx.doi.org/10.4236/fns.2016.710089>
- Khan M. I. H., Kumar C, Joardder M. U. H. & Karim M. A. (2017) *Determination of appropriate effective diffusivity for different food materials*. Drying Technology, 35(3). 335-346. <http://dx.doi.org/10.1080/07373937.2016.1170700>
- Koch, B., Eren, I., & Ertekin, F. (2008). *Modelling bulk density, porosity and shrinkage of quince during drying: The effect of drying method*. Journal of Food Engineering, 85, 340-349. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.07.030>
- Mahapatra, A. & Tripathy, P. P. (2018). *Modeling and simulation of moisture transfer during solar drying of carrot slices*. Journal of Food Process Engineering, 41(8). 1-15. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12909>
- Mayor, L. & Sereno, A. M. (2004). *Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review*. Journal of Food Engineering. 61(3). 373-386. [https://dx.doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00144-4](https://dx.doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00144-4)
- Niamnuy, C., Devahastin, S., Soponronnarit, S., & Raghavan, G. (2008). *Modeling coupled transport phenomena and mechanical deformation of shrimp during drying a jet spouted bed dryer*. Chemical Engineering Science, 63, 5503-5512. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2008.07.031>
- Olanipekun BF, Tunde-Akintunde TY, Oyelade OJ, Adebisi MG, Adenaya TA (2015) *Mathematical modeling of thin-layer pineapple drying*. Journal of Food Processing and Preservation, 39(6). 1431-1441. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12362>
- Perussello, C., Kumar, C., Castilhos, F., & Karim, M. (2014). *Heat and mass transfer modeling of the osmo-convective drying of yacon roots (Smallanthus sonchifolius)*. Applied Thermal Engineering, 63, 23-32.
- چروکیدگی تابع سرعت خشک شدن هست و بر این اساس و مطابق نتایج سرعت خشک شدن پایین تر تخمین درست تری از میزان چروکیدگی و در نتیجه مقدار واقعی تری از ضریب انتشار رطوبت را بدست می دهد.

منابع

- Almaei, M., Nassiri, S. M., Nematollahi, M. A., Zare, D., & Khorram, M. (2023). *Studying the drying process of farmed shrimp meat in a hot convective air dryer and the changes of some parameters related to it*. Agricultural Machines Journal, 15(1). (In Persian)
- Amankwah, E., Dzisi, K., Straten, G., & Bostel, A. (2018). *Moisture Dependent Diffusion and Shrinkage in Yam during Drying*. International Journal of Food Engineering. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2017-0394>
- Brasiello, A., Adiletta, G., Russo, P., Crescitelli, S., Albanese, D., & Matteo, M. (2013). *Mathematical modeling of eggplant: shrinkage effect*. Journal of Food Engineering, 114, 99-105. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.07.031>
- Chen, P., Qiu, Y., Chen, S., Zhao, Y., Wu, Y., & Wang, Y. (2022). *Insights into the effects of different drying methods on protein oxidation and degradation characteristics of golden pompano (Trachinotus ovatus)*. Frontiers in Nutrition, 9, 1063836. doi: 10.3389/fnut.2022.1063836
- Corrales, L., Prieto, J., Villasenor, J., & Hernandez, E. (2010). *Numerical and experimental analysis of heat and moisture transfer during drying of Ataulfo mango*. Journal of Food Engineering, 98, 198-206. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.12.026>
- Costa, M. V., Silva, A. K. N., Rodrigues, P. R., Silva, L. H. M. & Cruz Rodrigues, A. M. (2018). *Prediction of moisture transfer parameters for convective drying of shrimp at different pretreatments*. Food Science and Technology. 38(4). 612-618. <https://dx.doi.org/10.1590/fst.31517>
- Datta AK (2007). *Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. I: problem formulations*. Journal of Food Engineering, 80(1). 80-95.
- Dhalsamant K, Tripathy PP, Shrivastava SL (2018). *Heat transfer analysis during mixed-mode solar drying of potato cylinders incorporating shrinkage: numerical simulation and experimental validation*. Food and Bioprocess Processing, 109. 107-121. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2018.03.005>
- Erşan, A. C. & Tugrul, N. (2020). *The drying kinetics and characteristics of Shrimp dried by conventional methods*. Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly, 27(4). 319- 328. <https://dx.doi.org/10.2298/CICEQ201114050E>
- Faal S, Tavakoli T, Ghobadian B (2015). *Mathematical modelling of thin layer hot air drying of apricot with combined heat and power dryer*. Journal of Food

- <http://dx.doi.org.10.1016.j.applthermaleng.2013.10.020>
- Rani, P., Tripathy, P. (2020). *Modelling of moisture migration during convective drying of pineapple slice considering non-isotropic shrinkage and variable transport properties*. Food Scientists & Technologists, 57, 3748–3761, <https://doi.org.10.1007.s13197-020-04407-4>
- Rao, W., Shi, Z., Liu, S., Shu, Y., Chai, X., & Zhang, Z. (2022). *Shrinkage Properties and Their Relationship with Degradation of Proteins Linking the Endomysium and Myofibril in Lamb Meat Submitted to Heating or Air Drying*. Foods, 11, 2242. <https://doi.org.10.3390.foods11152242>
- Reddy RS, Ravula PR, Arepally D (2017). *Drying kinetics and modelling of mass transfer in thin layer convective drying of pineapple*. Chemical Science International Journal, 19(3). 1–12.
- Tagne, M., Remond, R., Rogaume, Y., Zoulalian, A., & Bonoma, B. (2016). *Modeling of coupled heat and mass transfer during drying of tropical woods*. International Journal of Thermal Sciences, 109, 299-308. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.06.012>
- Tsuruta, T., Tanigawa, H., & Sashi, H. (2015). *Study on shrinkage deformation of food in microwave–vacuum drying*. Drying Technology, 33, 1830–1836. <https://doi.org.10.1080.07373937.2015.1036286>
- Yuan, Y., Tan, L., Xu, Y., Yuan, Y., & Dong, J. (2019). *Numerical and experimental study on drying shrinkage-deformation of apple slices during process of heat-mass transfer*. International Journal of Thermal Sciences, 136, 539-548. <https://doi.org.10.1016.j.ijthermalsci.2018.10.042>
- Vallespir, F., Crescenzo, L., Rodri'guez, O., Marra, F. & Simal, S. (2019). *Intensification of low-temperature drying of mushroom by means of power ultrasound: effect on drying kinetics and quality parameters*. Food and Bioprocess Technology. 12(5). 839–851.