

## عنوان مقالات

- ۱۸۵ ..... بررسی ویژگی‌های فیلم آئزینات حاوی باکتری پروبیوتیک *Lactobacillus plantarum* جهت پوشش‌دهی کالباس ورقه‌ای .....  
دینا شهرام‌پور - مرتضی خمیری - سیدمحمدعلی رضوی - محبوبه کشیری
- ۲۰۱ ..... ارزیابی عملکرد خشک کردن و بازده انرژی خشک‌کن خورشیدی مجهز به مواد تغییر فاز دهنده و سامانه جریان بازگشتی .....  
محدثه احمدی - هادی صمیمی اخججهانی - پیمان سلامی
- ۲۱۹ ..... بررسی پایداری حرارتی تری‌آسیل‌گلیسرول‌های آفتابگردان و زیتون تحت تأثیر اسیدگالیک و متیل‌گالات .....  
مزگان اکبری - رضا فروش - مرضیه معین فرد
- ۲۳۱ ..... اثر محلول‌بندی کود سلیسیم بر برخی صفات کیفی و عناصر غذایی میوه خرما رقم برحی در شرایط شوری خاک .....  
رحمان یوسفی - محمدرضا پورقیومی - سید سمیع مرعشی - علی قاسمی
- ۲۳۹ ..... بررسی اثر پوشش‌های خوراکی بر کیفیت و عمر انبارمانی گیلان رقم لامبرت .....  
علی اکبر شکوهیان - شهریار عینی‌زاده - مهرداد دشتی
- ۲۵۱ ..... بررسی اثر آزن بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، میکروبی و حسی پنیر فرابالایش آب‌نمکی طی دوره رسیدگی .....  
علی اکبر غلامحسین‌پور - علی کریمی‌داویجانی - مصطفی کریمی
- ۲۶۹ ..... تولید فیلم مرکب ژلاتین-پلوان-نانوالیاف سلولز حاوی فاز سالمونلا و بررسی اثر ضدسالمونلایی آن علیه سالمونلا تایفی موریوم .....  
اسما انتظاری - ناصر صداقت - گلشن شاکری
- ۲۸۳ ..... تأثیر حرارت‌دهی خشک و مرطوب و اندازه ذرات آرد برنج بر کیفیت نان بدون گلوتن .....  
علی هاشمی شکایی - جعفر محمد زاده میلانی - علی معتمدزادگان - سیده حقیقت خرازی
- ۲۹۷ ..... استفاده از پیش‌تیمار مایکروویو در هیدرولیز آنزیمی پروتئین دانه کدو (*Cucurbita maxima* L.) توسط آلکالاز و بررسی خواص آنتی‌اکسیدانی آن .....  
زینب نوشی منجیلی - علیرضا صادقی ماهونک - وحید عرفانی مقدم - محمد قربانی - هدی شهری طبرستانی
- ۳۱۱ ..... مقایسه استخراج آستاگزانتین از میگوی موزی (*Fenneropenaeus merguensis*) و سخت پوست گاماروس (*Pontogammarus maeoticus*) به کمک حلال آلی، روغن آفتابگردان و میکروامولسیون مایع یونی در آب .....  
پریسا فیضی - یحیی مقصدلو - هدی شهری طبرستانی - سید مهدی جعفری - امیر هوشنگ بحری
- ۳۲۵ ..... بهبود بافت ناگت میگوی تولیدی از سوریمی ماهی در ترکیب با کارازینان، آئزینات و زانتان .....  
بهاره شعبان‌پور - پرستو پورعاشوری - انیسه جمشیدی - کاوه رحمانی‌فرح - اکبر وجدان طالشمی‌کائیل
- ۳۴۱ ..... اثر تیماردهی با امواج مایکروویو بر خصوصیات فیزیکوشیمیایی و کارایی فرآیند خشک شدن آلبالو .....  
فخرالدین صالحی - معین اینانلودوقوز - سارا قزوینه - پریسا مرادخانی

# نشریه پژوهش‌های علوم و صنایع غذایی ایران

با شماره پروانه ۱۳۴/۸۴۷ و درجه علمی-پژوهشی شماره ۳/۱۱/۸۱۰ از وزارت علوم، تحقیقات و فناوری  
"براساس مصوبه وزارت عتف از سال ۱۳۹۸، کلیه نشریات دارای درجه "علمی-پژوهشی" به نشریه "علمی" تغییر نام یافتند."

خرداد- تیر ۱۴۰۳

شماره ۲

جلد ۲۰

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد

مدیر مسئول: دکتر ناصر شهنوشی

سر دبیر: دکتر مسعود باورمنش

اعضای هیئت تحریریه:

استاد، میکروبیولوژی و بیوتکنولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد	دکتر سید علی مرتضوی
استاد، میکروبیولوژی مواد غذایی، دانشگاه فردوسی مشهد	دکتر فخری شهیدی
استاد، میکروبیولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد	دکتر محمدباقر حبیبی نجفی
دانشیار، میکروبیولوژی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان	دکتر مرتضی خمیری
استاد، مهندسی و خواص بیوفیزیک مواد غذایی، دانشگاه فردوسی مشهد	دکتر سید محمد علی رضوی
استاد، شیمی مواد غذایی، دانشگاه فردوسی مشهد	دکتر رضا فرحوش
استاد، میکروبیولوژی، دانشکده داروسازی، دانشگاه علوم پزشکی مشهد	دکتر بی بی صدیقه فضلای بزاز
استاد، مهندسی مواد غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان	دکتر مهدی کاشانی نژاد
استاد، تکنولوژی مواد غذایی، دانشگاه فردوسی مشهد	دکتر آرش کوچکی
استاد، مهندسی مواد غذایی، دانشگاه فردوسی مشهد	دکتر محبت محبی
استاد، مهندسی مواد غذایی، دانشگاه تبریز	دکتر بابک قنبرزاده
استاد، بیوتکنولوژی مواد غذایی، دانشگاه صنعتی شریف	دکتر ایران عالمزاده
دانشیار، نانو فناوری مواد غذایی، مؤسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مشهد	دکتر قدیر رجبزاده اوغاز
دانشیار، زیست مولکولی، بیمارستان زنان و بزرگام، ایالت متحده آمریکا	دکتر مهیار حیدرپور
دانشیار، میکروبیولوژی غذایی، دانشگاه متروپولیتن لندن	دکتر حمید بهادر قدوسی
استاد، بیوتکنولوژی مواد غذایی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی	دکتر کیانوش خسروی
استاد، مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه آریزونا	دکتر مرتضی عباسزادگان
استاد، مهندسی تولید مواد غذایی، دانشگاه فنی دانمارک	دکتر محمدمامین محمدی فر
استاد، بیوتکنولوژی مواد غذایی، دانشگاه صنعتی شریف	دکتر منوچهر وثوقی
دانشیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه	دکتر هادی الماسی
دانشیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه صنعتی اصفهان	دکتر میلاد فتحی
استاد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه تربیت مدرس.	دکتر سلیمان عباسی
استاد، گروه علوم تغذیه و مواد غذایی، دانشگاه پورتو، پرتغال	دکتر نونو بورخس
دانشیار، گروه علوم مولکولی، دانشکده منابع طبیعی و علوم کشاورزی، دانشگاه سوئد	دکتر علی عطا معظمی
دانشیار گروه میکروبیولوژی، دانشگاه کشاورزی مایکل اوکپارا، ایالت ابیا، نیجریه	دکتر کلیفورد نکمناسو اوبی
دانشیار گروه فناوری غذایی، مؤسسه تکنولوژی و علم هندوستان، چنای، تامیل نادو، هند	دکتر ساموئل ایوفمی اولالکان آدیبه

ناشر: دانشگاه فردوسی مشهد

این نشریه در پایگاه‌های زیر نمایه شده است:

AGRIS, CABI, DOAJ, EBSCO, Google scholar, Internet Archive, پایگاه استنادی جهان اسلام (ISC), سامانه نشریات علمی ایران, پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی (SID), بانک اطلاعات نشریات کشور (MAGRAN), مرجع دانش CIVILICA

پست الکترونیکی: ifstrj@um.ac.ir

مقالات این شماره در سایت <https://ifstrj.um.ac.ir> به صورت مقاله کامل نمایه شده است.

این نشریه به تعداد ۶ شماره در سال و به صورت آنلاین منتشر می‌شود.

# بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## مندرجات

- ۱۸۵ بررسی ویژگی‌های فیلم آژینات حاوی باکتری پروبیوتیک *Lactobacillus plantarum* جهت پوشش‌دهی کالباس ورقه‌ای دینا شهرام‌پور - مرتضی خمیری - سیدمحمدعلی رضوی - محبوبه کشیری
- ۲۰۱ ارزیابی عملکرد خشک کردن و بازده انرژی خشک‌کن خورشیدی مجهز به مواد تغییر فاز دهنده و سامانه جریان بازگشتی محدثه احمدی - هادی صمیمی اخیحجانی - پیمان سلامی
- ۲۱۹ بررسی پایداری حرارتی تری‌آسیل‌گلیسرول‌های آفتابگردان و زیتون تحت تأثیر اسیدگالیک و متیل‌گالات مزگان اکبری - رضا فرهوش - مرضیه معین فرد
- ۲۳۱ اثر محلول‌پاشی کود سلیسیم بر برخی صفات کیفی و عناصر غذایی میوه خرما رقم برحی در شرایط شوری خاک رحمان یوسفی - محمدرضا پورقیومی - سید سمیع مرعشی - علی قاسمی
- ۲۳۹ بررسی اثر پوشش‌های خوراکی بر کیفیت و عمر انبارمانی گیلاس رقم لامبرت علی اکبر شکوهیان - شهریار عینی‌زاده - مهرداد دشتی
- ۲۵۱ بررسی اثر آزن بر ویژگی‌های فیزیکی میوه، میکروبی و حسی پنبه فراپالایش آب‌نمکی طی دوره رسیدگی علی اکبر غلامحسین‌پور - علی کریمی داویجانی - مصطفی کریمی
- ۲۶۹ تولید فیلم مرکب ژلاتین-پولان-نانوالیاف سلولز حاوی فاژ سالمونلا و بررسی اثر ضدسالمونلایی آن علیه سالمونلا تایفی مورיום اسما انتظاری - ناصر صداقت - گلشن شاکری
- ۲۸۳ تأثیر حرارت‌دهی خشک و مرطوب و اندازه ذرات آرد برنج بر کیفیت نان بدون گلوتن علی هاشمی شکتایی - جعفر محمدزاده میلانی - علی معتمدزادگان - سپیده حقیقت خرازی
- ۲۹۷ استفاده از پیش‌تیمار مایکروویو در هیدرولیز آنزیمی پروتئین دانه کدو (*Cucurbita maxima* L.) توسط آلکالاز و بررسی خواص آنتی‌اکسیدانی آن زینب نوشی منجیلی - علیرضا صادقی ماهونک - وحید عرفانی مقدم - محمد قربانی - هدی شهیری طبرستانی
- ۳۱۱ مقایسه استخراج آستاگزانتین از میگوی موزی (*Fenneropenaeus merguensis*) و سخت‌پوست گاماروس (*Pontogammarus maeoticus*) به کمک حلال آلی، روغن آفتابگردان و میکروامولسیون مایع یونی در آب پریسا فیضی - یحیی مقصدلو - هدی شهیری طبرستانی - سید مهدی جعفری - امیر هوشنگ بحری
- ۳۲۵ بهبود بافت ناگت میگوی تولیدی از سوریمی ماهی در ترکیب با کاراژینان، آژینات و زانتان بهاره شعبان‌پور - پرستو پورعاشوری - انیسه جمشیدی - کاوه رحمانی‌فرح - اکبر وجدان طالش‌میکائیل
- ۳۴۱ اثر تیماردهی با امواج مایکروویو بر خصوصیات فیزیکی میوه و کارایی فرآیند خشک شدن آلبالو فخرالدین صالحی - معین اینانلودوقوز - سارا قزوینه - پریسا مرادخانی





## Investigation of Characteristics of Alginate Film Containing Probiotic *Lactobacillus plantarum* for Sliced Sausages Coating

D. Shahrampour<sup>1\*</sup>, M. Khomeiri<sup>2</sup>, S.M.A. Razavi<sup>3</sup>, M. Kashiri<sup>4</sup>

1- Assistant Professor, Department of Food Safety and Quality Control, Research Institute of Food Science and Technology, Mashhad, Iran

(\*- Corresponding Author Email: [d.shahrampour@rifst.ac.ir](mailto:d.shahrampour@rifst.ac.ir))

2 and 4- Professor and Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, respectively.

3- Professor, Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Received: 31.01.2022  
Revised: 12.02.2022  
Accepted: 16.02.2022  
Available Online: 15.05.2022

### How to cite this article:

Shahrampour, D., Khomeiri, M., Razavi, S.M.A., & Kashiri, M. (2024). Investigation of characteristics of alginate film containing probiotic *Lactobacillus plantarum* for sliced sausages coating. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 20(2), 183-198. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/ifstrj.2022.75042.1143>

### Introduction

Increasing public awareness of the impact of diet on health has increased the demand for healthy food products, especially probiotics. Probiotics are living and non-pathogenic microorganisms with beneficial effects on the host when consumed on a regular basis and sufficient amounts ( $10^6$  cfu/gr or ml). A significant number of probiotics become inactive during various food processes (thermal, mechanical and osmotic stress), storage condition (exposure to oxygen, UV light and low or high temperature) or during interaction with food ingredients. In addition, the breakdown and passage of food through the digestive system can also affect the survival and ability of probiotics to form colony in the intestine. Therefore, it is a challenge for food manufacturers to maintain and deliver live probiotic cells in sufficient quantities via food product. On the other hand, the variety of probiotic food products in the market, especially in Iran, is low and is mainly limited to dairy products, fermented drinks and pickles. Bioactive edible films and coatings are defined as biopolymer-based structures that carry bioactive components such as vitamins, enzymes, peptides, etc, and slowly release them on the food surface during storage. Biopolymers such as polysaccharides, proteins, and lipids are used in the preparation of edible films and coatings. Trapping probiotic bacteria in the structure of edible films and coatings is a new approach that has been proposed to increase the survival of these microorganisms and to develop new probiotic products in the food industry.

### Materials and Methods

In this study, an alginate-based probiotic bioactive film containing *L. plantarum* was fabricated after centrifuging of overnight culture of probiotic bacterium from MRS medium and adding the bacterial cells into film forming solution. The effect of bacterial addition on physical, mechanical and prevention properties of alginate film was evaluated. In addition, the effect of two temperatures 4 °C and 25 °C on the survival of embedded probiotic bacterium in the film structure during one month of storage was also investigated by microbial count assay on MRS agar medium. Then, the model food was covered with probiotic film and the survival of probiotic bacterium during storage at 4 °C was determined.

### Results and Discussion

The results showed that the population of probiotic bacterium declined about 4.61% after drying of alginate film solution. Addition of probiotic bacterium to the alginate film increased the thickness, turbidity, and tensile



©2022 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

<https://doi.org/10.22067/ifstrj.2022.75042.1143>

strength of the film, while had no significant effect on solubility, water activity, Elongation (%) and microstructure of alginate film. In addition, the probiotic film containing bacteria had less Lightness ( $L^*$ ), and moisture content than the control film. Also, the incorporation of *L. plantarum* in alginate film could decrease the water vapor permeability (WVP) from 0.755 to 4.51 ( $\times 10^{-10}$  g m<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>pa<sup>-1</sup>). The total color difference ( $\Delta E$ ) of alginate film containing probiotic bacteria compared to control film without probiotic bacteria was 1.1. The SEM images were confirmed the proper and uniform distribution of probiotic *L. plantarum* cells on the surface of alginate film. The survival percentage of *L. plantarum* in alginate film after one month of storage at 4 °C and 25 °C was 96.84 and 47.29%, respectively. Also, the population of embedded bacteria in the film structure on the food model (sausage) surface after three weeks storage in refrigerator was in desired level of probiotic products ( $> 10^6$  cfu / gr).

## Conclusion

The viability of probiotic bacteria after the application of alginate film containing *L. plantarum* on the surface of food model (sausage) during cold storage remained at the optimal recommended level for three weeks. Therefore, alginate film is recommended as a suitable carrier for probiotic microorganisms to produce new functional products.

**Keywords:** *L. plantarum*, Permeability, Probiotic film, Survival

## مقاله پژوهشی

جلد ۲۰، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۳، ص. ۱۹۸-۱۸۳

# بررسی ویژگی‌های فیلم آلزینات حاوی باکتری پروبیوتیک *Lactobacillus plantarum* جهت پوشش دهی کالباس ورقه‌ای

دینا شهرام‌پور<sup>۱\*</sup> - مرتضی خمیری<sup>۲</sup> - سیدمحمدعلی رضوی<sup>۳</sup> - محبوبه کشیری<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۲۷

## چکیده

افزایش آگاهی مردم از تأثیر رژیم غذایی بر سلامتی، تقاضا برای محصولات غذایی فراسودمند به‌ویژه پروبیوتیک‌ها را افزایش داده است. با توجه تنوع کم محصولات غذایی پروبیوتیک ارائه راه‌کارهای مناسب برای عرضه محصولات جدید اهمیت دارد. به دام انداختن باکتری‌های پروبیوتیک در بستر پلیمری فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی رویکرد نوینی است که جهت افزایش زنده‌مانی این میکروارگانیسم‌ها و توسعه محصولات جدید پروبیوتیک در صنعت غذا مطرح شده است. در این مطالعه فیلم زیست فعال پروبیوتیک حاوی باکتری *L. plantarum* بر پایه آلزینات تولید شد. تأثیر افزودن باکتری بر ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و مانع‌کنندگی فیلم آلزینات ارزیابی شد. علاوه بر این، تأثیر دو دمای ۳۰°C و ۲۵°C بر زنده‌مانی باکتری پروبیوتیک محصور در ساختار فیلم در طی یک ماه نگهداری از طریق آزمون شمارش باکتری در سطح محیط کشت MRS agar بررسی شد. سپس بر این اساس پوشش‌دهی ماده غذایی مدل با فیلم پروبیوتیک انجام شده و زنده‌مانی باکتری پروبیوتیک در طول دوره نگهداری غذا تعیین شد. نتایج نشان داد که میزان افت جمعیت باکتری پروبیوتیک پس از خشک شدن محلول فیلم آلزینات حدود ۴/۶۱ درصد بود. افزودن باکتری پروبیوتیک به فیلم آلزینات منجر به افزایش ضخامت، کدورت، مقاومت در برابر کشش فیلم شد، در حالی که بر حلالیت، فعالیت آبی، افزایش طول و ریزساختار فیلم آلزینات تأثیر معناداری نداشت. علاوه بر این فیلم پروبیوتیک حاوی باکتری نسبت به فیلم کنترل فاقد باکتری از درخشندگی، محتوای رطوبت و نفوذپذیری در برابر بخار آب کمتری برخوردار بود. درصد زنده‌مانی باکتری *L. plantarum* در فیلم آلزینات پس از یک ماه نگهداری در دمای ۴°C بیشتر از ۲۵°C و به ترتیب ۹۶/۸۴ و ۴۷/۲۹ درصد بود. همچنین جمعیت باکتری محصور در ساختار فیلم در سطح مدل غذایی (کالباس) پس از سه هفته نگهداری در یخچال در حد مطلوب محصولات پروبیوتیک ( $10^6$  cfu/gr) بود. بنابراین فیلم آلزینات به‌عنوان حامل مناسب برای میکروارگانیسم‌های پروبیوتیک جهت تولید محصولات غذایی فراسودمند جدید توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: زنده‌مانی، فیلم پروبیوتیک، نفوذپذیری، *L. plantarum*

## مقدمه

(Lim., 2013) پروبیوتیک‌ها میکروارگانیسم‌های زنده و غیربیماری-زایی هستند که مصرف مداوم و کافی آن‌ها ( $10^6$  cfu/gr or ml)، اثرات مفیدی بر سلامت میزبان دارد (FAO, 2001). اثرات سلامتی بخش پروبیوتیک‌ها عمدتاً از طریق حفظ میکروفلور طبیعی روده، محافظت از روده در برابر میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا، تولید ترکیبات ضد میکروبی،

در طول دو دهه گذشته با توجه به آگاهی مردم از تأثیر رژیم غذایی بر سلامتی، تقاضا برای محصولات غذایی فراسودمند حاوی ریزمغذی‌ها، پری‌بیوتیک‌ها و پروبیوتیک‌ها افزایش یافته است (Kanmani, &

۱- استادیار، گروه پژوهشی ایمنی و کنترل کیفیت مواد غذایی، مؤسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مشهد، ایران  
\* - نویسنده مسئول: (Email: [d.shahrapour@rifst.ac.ir](mailto:d.shahrapour@rifst.ac.ir))

۲ و ۴ - به ترتیب استاد و دانشیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

۳ - استاد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

تقویت سیستم ایمنی، کاهش کلسترول و فشارخون و فعالیت ضد سرطانی ایجاد می‌گردد. اثرات پروبیوتیک‌ها به نوع نژاد وابسته است، بنابراین اطلاع از جنس و گونه میکروارگانیسم پروبیوتیک برای آگاهی از اثرات مطلوب آن‌ها بر میزبان ضروری است (Espitia et al., 2016). با توجه به روند رو به رشد بازار جهانی محصولات پروبیوتیک، توسعه غذاهای سلامتی بخش پروبیوتیک، یکی از اهداف اصلی صنعت غذا در دهه‌های اخیر در بسیاری از کشورهای پیشرفته محسوب می‌شود. مصرف میکروارگانیسم‌های پروبیوتیک از طریق فرآورده‌های غذایی نسبت به مکمل‌های دارویی از محبوبیت بیشتری در بین کودکان و حتی بزرگسالان برخوردار است. فرآورده‌های لبنی جزء مشهورترین و متداول‌ترین محصولات غذایی پروبیوتیک شناخته می‌شوند که خواص سلامتی بخش آن‌ها برای مصرف‌کنندگان به اثبات رسیده است. با این حال، بسیاری از افراد به دلیل مشکل عدم تحمل لاکتوز و یا کلسترول بالا تمایلی به مصرف این محصولات غذایی ندارند. بنابراین نیاز به تولید و عرضه محصولات غیرلبنی پروبیوتیک افزایش یافته است (Roble et al., 2010).

براساس نتایج حاصل از پژوهش‌های مختلف، میزان مصرف روزانه توصیه شده برای اطمینان از اثرات درمانی پروبیوتیک‌ها حدود  $10^6-10^9$  cfu/day می‌باشد. با این حال رسانش سلول‌های زنده پروبیوتیک به میزان کافی ذکر شده برای تولیدکنندگان مواد غذایی با محدودیت‌هایی همراه است. برای مثال تعداد قابل توجهی از پروبیوتیک‌ها در طول فرآیندهای مختلف مواد غذایی (استرس حرارتی، مکانیکی و اسمزی)، نگهداری (قرار گرفتن در معرض عوامل سمی حاد مانند اکسیژن) و یا در طی تعامل با ترکیبات ماده غذایی غیرفعال می‌شوند (Jankovic et al., 2010). علاوه بر این، تجزیه و عبور مواد غذایی از دستگاه گوارش نیز می‌تواند بر زنده‌مانی و توانایی تشکیل کلنی پروبیوتیک‌ها و همچنین ترکیب میکروب‌های روده مؤثر باشد (Cook et al., 2012). تلاش‌های بسیاری جهت مقابله با این موانع و افزایش حداکثر زنده‌مانی باکتری‌های پروبیوتیک در طی تولید، انبارداری، توزیع در بازار و حتی در زمان مصرف و مواجهه با اسید و نمک‌های صفراوی صورت گرفته است و تاکنون ریزپوشانی رایج‌ترین فناوری جهت افزایش زنده‌مانی باکتری‌های پروبیوتیک در سیستم‌های غذایی معرفی شده است (Burgain et al., 2011). به دام انداختن باکتری‌های پروبیوتیک در بستر پلیمری فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی رویکرد نوینی است که در دهه اخیر جهت افزایش زنده‌مانی این میکروارگانیسم‌ها و توسعه محصولات جدید پروبیوتیک در صنعت غذا مطرح شده است که می‌تواند زمینه تولید و گسترش محصولات غذایی پروبیوتیک جدید را فراهم آورد. در زمینه فیلم‌های پروبیوتیک پژوهش‌های مختلفی تاکنون انجام شده است به‌عنوان مثال کنمانی و لیم

(Kanmani, & Lim, 2013) در مطالعه‌ای اثر افزودن نشاسته‌های مختلف (سیب‌زمینی، تاپیوکا و ذرت) در محلول فیلم‌سازی پولالان بر زنده‌مانی سه باکتری پروبیوتیک مختلف (*L. reuteri* و *L. rhamnosus* GG و *L. acidophilus*) در فیلم خشک شده در دو دمای  $4^{\circ}\text{C}$  و  $25^{\circ}\text{C}$  را ارزیابی کردند. رومانو و همکاران (Romano et al., 2014)، اثر افزودن فروکتولوگوساکارید (FOS) به‌عنوان یک پری‌بیوتیک در فیلم‌های متیل سلولز حاوی دو سویه پروبیوتیک *L. plantarum* و *delbrueckii bulgaricus* بر زنده‌مانی باکتری مذکور را بررسی نمودند. پیرماریا و همکاران (Piermaria et al., 2015)، زنده‌مانی سلول‌های باکتری *L. plantarum* و مخمر *Kluyveromyces marxianus* را در فیلم‌های کفیران حاوی نرم‌کننده گلیسرول بررسی کردند. به‌علاوه تأثیر افزودن این میکروارگانیسم‌ها بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی فیلم کفیران ارزیابی شد. ابراهیمی و همکاران (Ebrahimi et al., 2018) نیز تأثیر چهار نوع باکتری پروبیوتیک را بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی فیلم کربوکسی متیل سلولز ارزیابی کردند. همچنین قابلیت زنده‌مانی این باکتری‌ها در ساختار فیلم مورد مقایسه قرار گرفت. در پژوهشی دیگر تأثیر نوع نرم‌کننده بر زنده‌مانی باکتری پروبیوتیک *L. plantarum* در فیلم کامپوزیت آلژینات/پکتین مورد مطالعه قرار گرفت (Shahrapour et al., 2019). اکمان و همکاران (Akman et al., 2020) نیز تأثیر کپسولاسیون را بر زنده‌مانی باکتری پروبیوتیک محصور در ساختار فیلم آلژینات سدیم و همچنین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی فیلم را بررسی کردند.

هدف از مطالعه حاضر ارزیابی تأثیر افزودن باکتری پروبیوتیک *L. plantarum* بر خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و مانع‌کنندگی فیلم آلژینات بود. علاوه بر این اثر خشک کردن محلول فیلم بر میزان افت جمعیت باکتری و همچنین قابلیت زنده‌مانی باکتری در طی یک ماه نگهداری فیلم در دو دمای  $4^{\circ}\text{C}$  و  $25^{\circ}\text{C}$  مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس قابلیت به کارگیری فیلم پروبیوتیک در سطح ماده‌غذایی مدل بررسی شد.

## مواد و روش‌ها

### فعال‌سازی باکتری پروبیوتیک

سویه باکتری *L. plantarum* KMJC4 که از محصول غذایی تخمیری پنیرکوزه جدا شده و قابلیت پروبیوتیکی آن قبلاً توسط محمودی و همکاران (Mahmoudi et al., 2020) تأیید شده بود از کلکسیون میکروبی آزمایشگاه میکروبیولوژی موادغذایی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان تهیه شد. جهت فعال‌سازی باکتری پروبیوتیک میزان  $1 \times 10^8$  از کشت ذخیره به  $10\text{ ml}$  محیط کشت مایع

آزمون ضخامت هر فیلم در محاسبات مربوط به خواص مکانیکی و نفوذپذیری به بخار آب مورد استفاده قرار گرفت (Soukoulis et al., 2014).

#### مقدار رطوبت و فعالیت آبی ( $a_w$ )

جهت تعیین میزان رطوبت فیلم‌های تهیه شده، ابتدا نمونه‌های فیلم با ابعاد  $3 \times 3 \text{ cm}^2$  توزین شد و در آون با دمای  $105^\circ \text{C}$  تا رسیدن به وزن ثابت خشک گردید. سپس نمونه‌های خشک شده پس از سرد شدن در دسیکاتور مجدد توزین شدند و درصد رطوبت فیلم‌ها از طریق رابطه زیر بدست آمد. در این رابطه  $W_i$  و  $W_f$  به ترتیب وزن ابتدایی و نهایی فیلم‌های مورد آزمون قبل و پس از خشک شدن می‌باشد. علاوه بر این فعالیت آبی فیلم‌های خشک شده مختلف از دستگاه  $a_w$  متر استفاده شد. ابتدا هر نمونه قبل از قرار گرفتن در داخل کاپ مخصوص خرد شد و در تماس با صفحه سنسور دستگاه قرار گرفت. سپس میزان فعالیت آبی فیلم از روی صفحه نمایش دستگاه قرائت شد (Shahrampour et al., 2019).

$$\text{درصد رطوبت} = \frac{W_i - W_f}{W_i} \times 100 \quad (1)$$

#### حلالیت در آب

در این آزمون پس از خشک شدن نمونه‌های فیلم با ابعاد  $3 \times 3 \text{ cm}^2$  در آون  $105^\circ \text{C}$  و تعیین وزن خشک اولیه آن‌ها پس از خروج از آون، نمونه‌ها در  $50 \text{ ml}$  آب مقطر به مدت ۶ ساعت در دمای  $25^\circ \text{C}$  غوطه‌ور شد. سپس محلول حاوی ذرات معلق فیلم روی کاغذ صافی واتمن ریخته شد و در آون با دمای  $105^\circ \text{C}$  به مدت ۱۲ ساعت تا رسیدن به وزن ثابت خشک گردید. پس از توزین نمونه‌های خشک شده درصد حلالیت در آب نمونه‌های فیلم از طریق رابطه زیر تعیین شد. در این رابطه  $W_1$  و  $W_2$  به ترتیب وزن فیلم قبل و پس از غوطه‌وری در آب می‌باشند (Shahrampour et al., 2019).

$$\text{درصد مواد جامد محلول کل} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (2)$$

#### رنگ

جهت تعیین رنگ فیلم‌ها از دستگاه رنگ‌سنج لایو باند استفاده شد. قبل از اندازه‌گیری رنگ فیلم‌ها دستگاه توسط یک صفحه سفید استاندارد تنظیم شد و پارامترهای استاندارد دستگاه به صورت  $L^* = 94/7$ ،  $a^* = 2/7$  و  $b^* = -0/4$  تعیین گردید. سپس نمونه‌ها روی صفحه سفید استاندارد قرار گرفتند و اندازه‌گیری پارامترهای رنگی  $L$  و  $a$  و  $b$  انجام

استریل MRS منتقل شده و به مدت ۲۴ ساعت تا ظهور کدورت مطلوب در دمای  $37^\circ \text{C}$  گرمخانه‌گذاری شد. پس از طی زمان مذکور جهت جداسازی سلول‌های باکتری کشت حاصل تحت سانتریفوژ ( $4000 \text{ g}$ ) به مدت ۱۵ دقیقه قرار گرفت و بعد از حذف رومان سلول‌های باکتری دو بار با آب مقطر استریل شست و شو داده شد و در مرحله بعدی در تهیه فیلم پروبیوتیک مورد استفاده قرار گرفت.

#### تهیه فیلم‌ها

جهت تهیه محلول تشکیل دهنده فیلم میزان  $1/5 \text{ g}$  آلزینات سدیم (w/v) به  $100 \text{ ml}$  آب مقطر اضافه شده و توسط همزن مغناطیسی تحت شرایط ثابت در دمای  $70^\circ \text{C}$  به مدت ۳۰ min همزده شد. سپس سوربیتول به عنوان نرم‌کننده به میزان  $60\%$  (w/w) اضافه شده و به مدت  $10 \text{ min}$  همزدن ادامه یافت. در ادامه جهت حذف میکروارگانسیم‌های بیماری‌زای احتمالی، محلول به مدت ۳۰ min در  $80^\circ \text{C}$  در بن ماری قرار گرفت. بعد از سرد شدن محلول فیلم‌سازی سوسپانسیون باکتری پروبیوتیک *L. plantarum* با غلظت حدود  $10^{10} \text{ cfu/ml}$  به آن اضافه گردید. در این مطالعه از فیلم آلزینات فاقد باکتری به عنوان کنترل استفاده گردید. در نهایت محلول‌های فیلم‌سازی به روش قالب‌ریزی در سطح پلیت پخش گردید و جهت خشک شدن در دمای  $38^\circ \text{C}$  به مدت ۱۸ ساعت در آون قرار گرفت.

#### تعیین درصد زنده‌مانی باکتری پروبیوتیک در فیلم خشک

جهت تعیین اثر تنش خشک کردن بر زنده‌مانی باکتری پروبیوتیک شمارش جمعیت باکتری در محلول فیلم‌سازی پس از تهیه رقت سریالی به روش کشت آمیخته در محیط کشت MRS آگار انجام گرفت. همچنین جهت تعیین جمعیت زنده باکتری پروبیوتیک در فیلم خشک شده نیز میزان  $0/1 \text{ g}$  از فیلم به  $10 \text{ ml}$  سرم فیزیولوژی استریل منتقل و برای حل شدن کامل به مدت ۱ ساعت در اینکوباتور شیکردار قرار گرفت. پس از تهیه رقت سریالی از سوسپانسیون حاصل، کشت آمیخته در محیط کشت MRS آگار تهیه شد. کلنی‌های تشکیل شده در سطح محیط کشت پس از گرمخانه‌گذاری برای ۴۸ ساعت در دمای  $37^\circ \text{C}$  توسط کلنی کانتی شمارش شدند و درصد زنده‌مانی محاسبه شد (Soukoulis et al., 2014).

#### ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی فیلم‌ها

##### ضخامت

ضخامت فیلم‌ها توسط یک میکرومتر دستی دیجیتال با دقت  $0/01 \text{ mm}$  در حداقل ۵ نقطه تصادفی (۴ نقطه در اطراف و یک نقطه در مرکز فیلم) اندازه‌گیری و میانگین آن تعیین شد. داده‌های حاصل در

## اندازه‌گیری خواص مکانیکی فیلم‌ها

آزمون‌های مکانیکی شامل مقاومت کششی ( $TS^4$ ) و میزان افزایش طول تا نقطه پارگی ( $E^5$ ) توسط دستگاه بافت‌سنج (آستام، ایران) انجام گرفت. جهت انجام آزمون نمونه‌های فیلم با ابعاد  $10 \times 5 \text{ cm}^2$  بریده شد و پس از مشروط‌سازی به مدت ۴۸ ساعت در دسیکاتور حاوی محلول اشباع نیترات منیزیم با رطوبت نسبی ۵۲ درصد، بین دو فک دستگاه بافت‌سنج با فاصله ۵۰ mm قرار گرفت. میزان کشش و نیروی لازم برای کش آمدن فیلم‌ها با سرعت ۵ mm/min تا نقطه شکست فیلم در دستگاه تنظیم شد. در نهایت مقاومت در برابر کشش به صورت مگاپاسگال و ازدیاد طول به صورت درصد از طریق روابط زیر به دست آمد (Sánchez-González et al., 2013).

$$TS = F / A \quad (7)$$

$TS$  = مقاومت در برابر کشش (مگاپاسگال)،  $F$  = نیروی لازم برای پاره شدن (نیوتن)،  $A$  = سطح فیلم (میلی متر مربع)

$$E (\%) = \Delta L / L_0 \times 100 \quad (8)$$

$E (\%)$  = درصد ازدیاد طول،  $L$  = مقدار ازدیاد طول تا نقطه پارگی (میلی متر)،  $L_0$  = فاصله بین دو فک دستگاه (میلی متر).

بررسی ریز ساختار فیلم‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی ( $FE-SEM^6$ )

جهت بررسی تغییرات سطح فیلم و ساختار درونی فیلم‌ها پس از افزودن باکتری از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی ( $FE-SEM$ ) در مرکز پژوهش متالوژی رازی استفاده شد. به منظور تهیه تصاویر سطحی نمونه‌های فیلم با ابعاد مشخص برش خوردند و به کمک چسب دو طرفه بروی سطح پایه‌های آلومینیومی دستگاه چسبانده شدند. جهت تصویربرداری از مقطع عرضی نیز نمونه‌ها پس از شکسته شدن در ازت مایع، از قسمت شکسته شده بروی پایه آلومینیومی توسط چسب دو طرفه قرار گرفتند. سپس سطح نمونه‌ها در دستگاه پوشش دهنده به مدت ۵ min با طلا پوشش داده شد. تصویربرداری توسط میکروسکوپ الکترونی در بزرگنمایی‌های مختلف در ولتاژ ۳kV انجام گرفت (Romano et al., 2014).

بررسی اثر دمای نگهداری فیلم بر میزان زنده‌مانی باکتری *L. plantarum*

فیلم زیست‌فعال آلزینات حاوی باکتری *L. plantarum* پس از خشک شدن، در دو دمای  $4^\circ\text{C}$  و  $25^\circ\text{C}$  به مدت یک ماه نگهداری شدند

شد. پارامترهایی که دستگاه اندازه می‌گیرد شامل وضوح یا  $L^1$  (۱۰۰  $L$  = سفید) و  $L=0$  (سیاه) و پارامترهای رنگی  $a^2$  (قرمزی)  $= a + a$  تا سبزی  $= -a$  و  $b^3$  (زرده)  $= b + b$  تا آبی  $= -b$  می‌باشد. همچنین اختلاف رنگی کل ( $\Delta E$ ) و اندیس سفیدی ( $WI$ ) از طریق روابط زیر محاسبه شد (Soukoulis et al., 2014).

$$\Delta E = \sqrt{((L^*-L)^2 + (a^*-a)^2 + (b^*-b)^2)} \quad (3)$$

$$WI = 100 - \sqrt{((100-L) + a^2 + b^2)} \quad (4)$$

## کدورت

میزان کدورت نمونه‌های فیلم تولیدی پس برش با ابعاد مشخص (۰/۷×۱/۵ سانتی‌متر) و قرار گرفتن با دقت در سطح کووت پلاستیکی با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر UV-VIS و اندازه‌گیری جذب در ۵۵۰nm از طریق رابطه زیر تعیین شد (Núñez-Flores et al., 2012).

$$\text{کدورت} = A_{550} / \text{thickness} \quad (5)$$

## نفوذپذیری به بخار آب (WVP)

آزمون نفوذپذیری به بخار آب (WVP) فیلم‌ها با استفاده از استاندارد سال ۱۹۹۵ (ASTM, E96-95)، با کمی تغییر انجام گرفت. فیلم‌های خشک شده که به اندازه قطر دهانه فنجانک‌های مخصوص این آزمون برش خورده بودند با استفاده از پارافین بین دو لبه فنجانک قرار گرفته و درزبندی شدند. داخل فنجانک‌ها از قبل با سلیکاژل پر شده بود. سپس نمونه‌ها به دسیکاتور حاوی نمک اشباع کلرید سدیم با رطوبت نسبی ۷۵٪ در دمای  $25^\circ\text{C}$  منتقل شد. این اختلاف رطوبت نسبی فشاری معادل ۱۷۵۳/۵۵ پاسگال بین دو سوی فیلم در هر فنجانک ایجاد می‌نماید. فنجانک‌ها در فواصل زمانی معین به مدت ۷۲ ساعت توزین شدند. در نهایت تغییرات وزن ایجاد شده در اثر عبور بخار آب از عرض فیلم‌ها و جذب توسط سلیکاژل در طی مدت زمان تعیین شده ثبت گردید. نفوذپذیری به بخار آب از طریق رابطه زیر محاسبه شد (Soukoulis et al., 2016).

$$WVP = \Delta W \times X / \Delta T \times A \times \Delta P \quad (6)$$

$\Delta W$  = تغییرات وزن ایجاد شده در هر فنجانک (گرم)،  $X$  = ضخامت فیلم (میلی متر)،  $A$  = سطح مؤثر فیلم (متر مربع)،  $\Delta T$  = مدت زمان طی شده (ساعت)،  $\Delta P$  = اختلاف فشار جزئی بین دو سطح فیلم (پاسگال).

4- Tensile strenght

5- Elongation at break

6- Field Emission Scanning Electron Microscopy

1- Lightness

2- Redness

3- Yellowness

شد و نمودارها به کمک نرم‌افزار Microsoft Office Excel نسخه ۲۰۱۳ رسم شدند.

## نتایج و بحث

### اثر خشک کردن فیلم بر زنده‌مانی باکتری پروبیوتیک

در تهیه فیلم‌های پروبیوتیک اثر اسمزی محلول فیلم‌سازی و اثر دهیدراسیون در مرحله خشک کردن فیلم در آون بر زنده‌مانی باکتری‌ها می‌تواند تأثیرگذار باشد (Romano et al., 2014). در این مطالعه نتایج شمارش باکتری پروبیوتیک *L. plantarum* در محلول فیلم‌سازی و فیلم خشک شده در شکل ۱ نشان داده شده است. بر این اساس جمعیت در محلول فیلم‌سازی و فیلم خشک شده آلزینات به ترتیب CFU/g or ml ۹/۱ و ۸/۶۸ تخمین زده شد. میزان افت جمعیت باکتری پس از خشک شدن محلول‌های فیلم‌سازی ۴/۶۱٪ و میزان زنده‌مانی باکتری ۹۵/۳۸٪ محاسبه شد. درصد زنده‌مانی بالای باکتری پروبیوتیک پس از خشک شدن فیلم را می‌توان به pH حدود خنثی پلیمر آلزینات (۵/۶) مربوط دانست که از اعمال تنش اسیدی جلوگیری می‌کند (جدول ۱). به‌طور مشابه سوکولیس و همکاران (Soukoulis et al., 2017) در مطالعه‌ای اثر افزودن کنستاتره پروتئین آب پنی‌ر به محلول فیلم‌سازی پلیمرهای زیستی آنیونی شامل کاپا-کارائینان، ژلاتین، آلزینات و پکتین بر تولید فیلم پروبیوتیک بررسی نمودند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که باکتری *L. rhamnosus GG* از بیشترین زنده‌مانی به ترتیب در فیلم‌های خشک شده کاپا-کارائینان، آلزینات، ژلاتین و پکتین برخوردار بود. این پژوهشگران زنده‌مانی کمتر در فیلم‌های حاصل از پکتین را به pH پایین (۳/۹-۴/۲) محلول‌های فیلم‌سازی آن در مقایسه با کاپا-کارائینان و آلزینات (pH= ۵/۴-۶/۷) مربوط دانستند. آن‌ها میزان زنده‌مانی باکتری در فیلم‌های خشک شده را حدود ۹۸/۲-۷۰٪ گزارش کردند. کنمانی و لیم (Kanmani, & Lim, 2013) به نقش نوع پلیمر بر زنده‌مانی باکتری پروبیوتیک در ساختار فیلم اشاره نمودند. به‌طوری‌که در پژوهش آن‌ها بیشترین زنده‌مانی باکتری پروبیوتیک *L. rhamnosus GG* در طی خشک کردن در فیلم‌های یک جزئی پولاتان حاصل شد و با افزایش میزان نشاسته زنده‌مانی باکتری کاهش یافت. علاوه بر این نوع نشاسته (کاساوا-ذرت-سیب‌زمینی) به کار رفته در ساخت فیلم بر زنده‌مانی باکتری مذکور اثرگذار بود. مشابه نتایج حاصل از مطالعه حاضر در پژوهشی کاهش جمعیت نژادی از باکتری *L. plantarum* پس از خشک شدن فیلم‌های متیل سلولز حاوی مقادیر مختلف فروکتوالیگوساکارید حدود ۱/۴۵-۱/۴۵ سیکل لگاریتمی گزارش شد (Romano et al., 2014). همچنین به مقاومت بالای باکتری *L. plantarum* در مقایسه با باکتری *L. delbrueckii subsp. bulgaricus* از نظر زنده‌مانی در ساختار فیلم متیل سلولز اشاره

و در طی این مدت پس از هر ۵ روز جهت تعیین میزان زنده‌مانی باکتری پروبیوتیک *L. plantarum* میزان ۰/۱ g از فیلم به ۱۰ ml سرم فیزیولوژی استریل منتقل و برای حل شدن کامل به مدت ۱ ساعت در اینکوباتور شیکردار قرار گرفت. جهت تعیین جمعیت زنده باکتری پس از تهیه رقت سریالی از سوسپانسیون حاصل، کشت آمیخته در محیط کشت MRS آگار تهیه و گرمخانه‌گذاری برای ۴۸ ساعت در دمای ۳۷°C انجام شد. کلنی‌های تشکیل شده در سطح محیط کشت توسط کلنی کانتز شمارش شدند. پس از بررسی نتایج در این مرحله بهترین دما جهت نگهداری فیلم زیست فعال با بیشترین زنده‌مانی باکتری *L. plantarum* مشخص گردید (Kanmani & Lim, 2013).

### استفاده از فیلم زیست فعال حاوی باکتری *L. plantarum* جهت پوشش‌دهی مدل غذایی

در این پژوهش ورقه‌های کالباس گوشت به‌عنوان مدل غذایی مورد استفاده قرار گرفتند. ابتدا نمونه کالباس گوشت (۸۰ درصد) متعلق به شرکت صنایع غذایی گوشتیان با تاریخ تولید روز از بازار گرگان خریداری شد و با حفظ زنجیره سرما به آزمایشگاه میکروبیولوژی مواد غذایی منتقل گردید. سپس دو طرف هریک از ورقه‌های کالباس دایره ای شکل توسط یک قطعه فیلم با همان ابعاد پوشیده شد و توسط دستگاه تحت خلاء بسته‌بندی در کیسه‌های مخصوص انجام گرفت. سپس نمونه‌ها در دمای ۴°C در یخچال به مدت ۴ هفته نگهداری شدند. در این آزمون از نمونه‌های کالباس بدون پوشش فیلم به‌عنوان کنترل استفاده گردید.

### بررسی زنده‌مانی باکتری *L. plantarum* در مدل غذایی

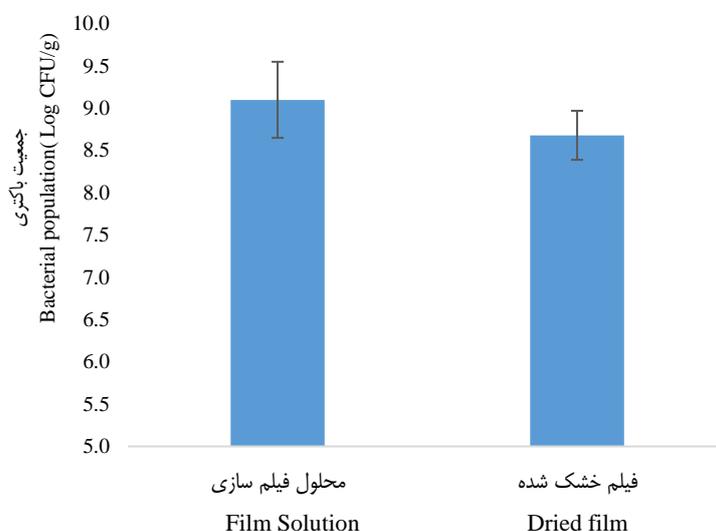
جهت شمارش باکتری *L. plantarum* زنده در نمونه‌های کالباس پوشش‌دار و فاقد پوشش فیلم نگهداری شده در دمای ۴°C به مدت ۴ هفته، هر هفته ۱۰ نمونه کالباس توزین و به کیسه استومیگر حاوی ۹۰ ml محلول سرم فیزیولوژی استریل منتقل گردید. پس از یکنواخت شدن محلول در استومیگر به مدت ۱ min، رقت‌سازی و شمارش باکتری در محیط کشت MRS آگار به روش کشت آمیخته انجام گرفت. پلیت‌ها پس از ۴۸ ساعت قرار گرفتن در دمای ۳۷°C توسط کلنی کانتز شمارش شدند (Tavera-Quiroz et al., 2015).

### آنالیز آماری

در این پژوهش تمامی آزمون‌ها در سه تکرار انجام شد. آنالیز و تجزیه تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۳ صورت گرفت. جهت مقایسه میانگین‌ها از آزمون T-student استفاده

مکانیسم‌های دخیل در پایداری باکتری‌های پروبیوتیک در ساختار فیلم‌های پلیمری در دست نیست اما براساس گزارش سوکولیس و همکاران (Soukoulis *et al.*, 2014) و شهرام‌پور و همکاران (Shahrampour *et al.*, 2019) می‌توان عواملی مانند حضور مواد مغذی، نوع نرم‌کننده، pH محیط، جمعیت اولیه باکتری پروبیوتیک، ترکیبات محافظت‌کننده مانند مهارکننده‌های رادیکال‌های آزاد، انتقال رطوبت و اکسیژن، برقراری پیوند هیدروژنی با بخش‌های قطبی غشای فسفولیپیدی باکتری که به نوعی مرتبط با ساختار شیمیایی پلیمرها می‌باشد را در حفظ وضعیت فیزیکی غشاء سلولی و پایداری باکتری پروبیوتیک در ساختار فیلم بسیار مؤثر دانست.

گردید. ما و همکاران (Ma *et al.*, 2019) ترکیب آلژینات و کربوکسی متیل سلولز را در محلول فیلم‌سازی را در مقایسه با ترکیب آلژینات و کلاژن و یا کربوکسی متیل سلولز و کلاژن را در زنده‌مانی باکتری *L. lactis* مؤثرتر دانستند و میزان افت جمعیت را پس از خشک کردن این فیلم را ۵٪ گزارش کردند. شهرام‌پور و همکاران (Shahrampour *et al.*, 2019) نیز در مطالعه‌ای دیگر تأثیر نوع نرم‌کننده بر زنده‌مانی باکتری پروبیوتیک *L. plantarum* را در فیلم مرکب آلژینات/پکتین را بررسی کردند. نتایج حاکی از آن بود که نرم‌کننده سوربیتول نسبت به گلیسرول در حفظ زنده‌مانی باکتری پروبیوتیک در طی خشک کردن فیلم‌ها موفق‌تر عمل نمود. با توجه به این که اطلاعات دقیقی در مورد



شکل ۱- زنده‌مانی باکتری *L. plantarum* در طی خشک شدن فیلم آلژینات  
Fig. 1. Viability of *L. plantarum* during drying of alginate film

محلول فیلم‌سازی را گزارش کردند. نتایج مطالعه و همکاران (Ebrahimi *et al.*, 2018) نیز افزایش ضخامت فیلم‌های پروبیوتیک در مقایسه با فیلم کنترل کربوکسی متیل سلولز فاقد باکتری را تأیید کرد. علاوه بر این نوع باکتری پروبیوتیک بر افزایش ضخامت فیلم تأثیر معناداری نداشت. برخلاف این نتایج در پژوهشی دیگر افزودن پکتین به محلول فیلم‌سازی آلژینات منجر به افزایش ضخامت فیلم‌ها شد و افزودن باکتری پروبیوتیک *L. plantarum* در محلول فیلم‌سازی بر ضخامت فیلم‌های خشک تأثیر معناداری نداشت (Shahrampour *et al.*, 2019). همچنین در مطالعه خدائی و همکاران (Khodaei *et al.*, 2020) نیز تأثیر افزودن میکروارگانیسم‌های پروبیوتیک مانند *L. plantarum* و *L. casei* و *Saccharomyces boulardii* بر ضخامت فیلم کامپوزیت ژلاتین/پکتین را معنادار نبود.

## ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی فیلم‌های آلژینات ضخامت

ضخامت فیلم یک پارامتر مهم در ارزیابی ویژگی‌های مکانیکی، شفافیت و نفوذپذیری به بخار آب فیلم‌ها محسوب می‌شود. ضخامت نهایی فیلم‌ها به روش آماده‌سازی و شرایط خشک کردن بستگی دارد (Galus & Lenart, 2013). در مطالعه حاضر نیز محلول‌های فیلم سازی با حجم ثابت ۵۰ میلی‌لیتر در پلیت‌های یکبار مصرف با قطر ۱۰ سانتی‌متر ریخته شدند و تحت شرایط یکسان خشک گردیدند. همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌گردد، ضخامت فیلم آلژینات با افزودن باکتری پروبیوتیک از ۰/۰۷۱ mm به ۰/۰۸۴ افزایش یافت. مطابق این نتایج کنمانی و لیم (Kanmani & Lim, 2013) افزایش ضخامت فیلم‌های پولانان/نشاسته، پس از افزودن باکتری پروبیوتیک به

## رطوبت و فعالیت آبی

محتوای رطوبت فیلم عامل مهمی برای حفظ زنده‌مانی باکتری پروبیوتیک و همچنین حفظ پایداری فیزیکی فیلم‌ها است. نتایج مربوط به محتوای رطوبت فیلم‌های تولید شده در **جدول ۱** گزارش شده است. بر این اساس درصد رطوبت فیلم‌آلژینات با افزایش باکتری به محلول فیلم‌سازی از ۱۵/۲ به ۱۱/۹٪ کاهش یافت. کاهش محتوای رطوبت فیلم‌آلژینات پروبیوتیک را می‌توان به برهمکنش بین زنجیره‌های پلیمری و باکتری مربوط دانست که می‌تواند موجب کاهش دسترسی گروه‌های هیدروکسیل و در نتیجه کاهش تعاملات بین پلیمر آلژینات و آب از طریق پیوندهای هیدروژنی شود (Martins et al., 2012). نتایج مربوط به اندازه‌گیری فعالیت آبی فیلم‌ها نیز نشان داد که هیچ‌گونه تفاوتی در بین فیلم‌های کنترل و فیلم‌های حاوی باکتری از این حیث وجود نداشت. علت عدم تفاوت مشاهده شده احتمالاً به یکسان بودن شرایط تهیه و خشک کردن فیلم‌ها (دما و زمان یکسان) ارتباط دارد. علاوه بر این میزان فعالیت آبی اندازه‌گیری شده در فیلم‌ها پایین‌تر از حداقل فعالیت آبی (۰/۹۹) مورد نیاز جهت رشد باکتری بود که دلیل افت جمعیت باکتری پروبیوتیک پس از خشک کردن را توجیه می‌نماید. سوکولیس و همکاران (Soukoulis et al., 2014) بیان کردند که نوع پلیمر به کار رفته در ساختار فیلم پروبیوتیک بر محتوای رطوبت آن مؤثر است. بر این اساس فیلم‌های تهیه شده از پکتین در مقایسه با سایر پلی‌ساکاریدها مانند کاراژینان و آلژینات از محتوای رطوبت بالاتری برخوردار بودند. به‌علاوه فعالیت آبی همه فیلم‌های پلی‌ساکاریدی پس از افزودن پروتئین آب پنیر در حد ۰/۵۳ ثابت باقی ماند.

به‌طور مشابه آکمان و همکاران (Akman et al., 2020) کاهش رطوبت فیلم آلژینات را بعد از افزودن باکتری پروبیوتیک به فرم آزاد و کپسوله شده را مشاهده کردند. برخلاف این نتایج ما و همکاران (Ma et al., 2019) افزایش محتوای رطوبت فیلم‌های آلژینات/کربوکسی متیل سلولز را بعد از افزودن باکتری پروبیوتیک *L. lactis* را گزارش کردند و دلیل این امر را وجود میزان جزئی محتوای رطوبت موجود در سلول باکتری‌ها دانستند.

## حلالیت در آب

به‌طور کلی حلالیت فیلم‌ها به انتشار مولکول‌های آب بین زنجیره‌های پلیمر، یونیزاسیون گروه‌های هیدروکسیل و کربوکسیل و شکستن پیوندهای هیدروژنی و یونی مربوط می‌شود (Mathew et al., 2006). همانطور که در **جدول ۱** مشاهده می‌شود، بین فیلم‌آلژینات کنترل و فیلم‌آلژینات پروبیوتیک از نظر حلالیت در آب اختلافی وجود نداشت. کنمانی و لیم (Kanmani & Lim, 2013) نوع پلی‌ساکارید به کار رفته در تولید فیلم را در افزایش حلالیت فیلم‌ها موثر دانستند. به‌طوری که افزایش نشاسته به فیلم‌های پولالان حلالیت در آب را کاهش داد. همچنین این محققان پس از افزودن سه نوع باکتری پروبیوتیک به فیلم‌های پولالان و نشاسته تفاوت معناداری در حلالیت در آب آن‌ها مشاهده نکردند. در مطالعه ما و همکاران (Ma et al., 2019) نیز تأثیر افزودن باکتری پروبیوتیک *L. lactis* بر حلالیت فیلم مرکب معنادار نبود و افزودن کلاژن به فیلم‌آلژینات و کربوکسی متیل سلولز منجر به افزایش حلالیت آن‌ها شد.

جدول ۱- تأثیر افزودن باکتری *L. plantarum* بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی فیلم‌آلژینات

Table 1- Effect of addition of *L. plantarum* on physicochemical properties of alginate film

فیلم	pH محلول فیلم	فعالیت آبی	درصد رطوبت	درصد حلالیت	ضخامت
Film	pH of film solution	Water activity (aw)	Moisture (%)	Solubility (%)	Thickness (mm)
A*	5.6	0.53 ±0.01	15.2 ±1.83	85.62 ±1.02	0.071 ±0.015
AB	5.6	0.53 ±0.01	11.9 ±0.61	86.88 ±1.01	0.084 ±0.02

\*A: فیلم‌آلژینات فاقد باکتری پروبیوتیک، AB: فیلم‌آلژینات حاوی باکتری پروبیوتیک.

\*A: Alginate film without probiotic bacteria, AB: Alginate film containing probiotic bacteria.

## رنگ و کدورت فیلم‌ها

رنگ یکی از فاکتورهای مهم است که در ظاهر و مرغوبیت محصولات غذایی تأثیر بسزایی دارد و در تکنولوژی تهیه فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی باید مد نظر قرار بگیرد. فیلم‌ها و پوشش‌های خوراکی باید در حد امکان بی‌رنگ بوده و ظاهری مشابه فیلم‌های پلیمری رایج داشته باشند (Rhim et al., 2002). در این مطالعه جهت ارزیابی اثر افزودن باکتری پروبیوتیک بر رنگ فیلم‌آلژینات، پارامترهای مختلف رنگی توسط دستگاه رنگ‌سنج هانتربل اندازه‌گیری و نتایج در

**جدول ۲** ثبت گردید. نتایج نشان داد که فیلم‌آلژینات درخشندگی بیشتری داشت و با افزودن باکتری مقدار پارامتر *L* یا درخشندگی از ۹۳ به ۹۱/۹٪ کاهش یافت. علاوه بر این دو پارامتر *a* و *b* تحت تأثیر افزودن باکتری قرار نگرفتند. اختلاف رنگ کل ( $\Delta E$ ) نیز نسبت به صفحه سفید استاندارد از ۵/۲۹ در فیلم کنترل به ۴/۵۱ در فیلم حاوی باکتری کاهش یافت. در حالی که اندیس سفیدی (WI) فیلم‌ها تفاوتی نداشت. همچنین افزودن باکتری پروبیوتیک منجر به افزایش کدورت فیلم‌آلژینات شد. به‌طور مشابه ابراهیمی و همکاران (Ebrahimi et

آلژینات/کلاژن پس از افزودن باکتری پروبیوتیک *L. lactis* توسط ما و همکاران (Ma et al., 2019) گزارش شد. آکمان و همکاران (Akman et al., 2020) کاهش شاخص‌های L و a و افزایش شاخص b را پس از افزودن باکتری *L. plantarum* به فیلم آلژینات به دو فرم آزاد و کپسوله را مشاهده کردند.

(al., 2018) کاهش درخشندگی و افزایش کدورت فیلم کربوکسی متیل سلولز را پس از افزودن باکتری‌های پروبیوتیک را مشاهده کردند. علاوه بر این بین چهار نوع باکتری از نظر تأثیر بر پارامترهای رنگی و کدورت فیلم تفاوت معناداری وجود نداشت. نتایج مشابهی در مورد کاهش درخشندگی فیلم‌های مرکب آلژینات/کربوکسی متیل سلولز و

جدول ۲- تأثیر افزودن باکتری *L. plantarum* بر شاخص‌های رنگی و کدورت فیلم آلژینات  
Table 2- Effect of addition of *L. plantarum* on color indexes and turbidity of alginate film

فیلم Film	b	a	L	ΔE	WI	کدورت Turbidity
A*	3.5±0.69	1.2±0.01	93±2.56	5.03±0.01	89.26±0.79	0.65±0.3
AB	3.5±0.69	1.2±0.01	91.9±1.13	4.51±0.13	89.21±0.85	0.71±0.23

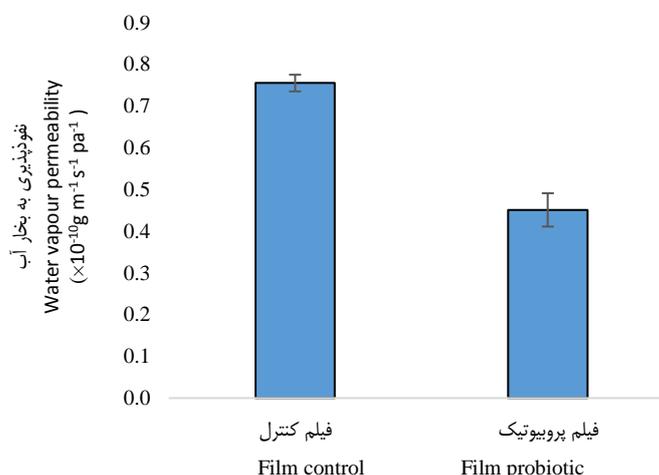
A: فیلم آلژینات فاقد باکتری پروبیوتیک، AB: فیلم آلژینات حاوی باکتری پروبیوتیک.

A: Alginate film without probiotic bacteria, AB: Alginate film containing probiotic bacteria. \*

نشان داد که افزودن باکتری پروبیوتیک توانست این پارامتر را به میزان ۴۰/۲۷٪ کاهش دهد (شکل ۲). برخلاف این نتایج ابراهیمی و همکاران (Ebrahimi et al., 2018) افزایش ۵۰ درصدی میزان WVP فیلم کربوکسی متیل سلولز را پس از افزودن باکتری‌های مختلف پروبیوتیک را گزارش نمودند و دلیل این امر را به احتمال حضور خلل و فرج بیشتر در ساختار فیلم در حضور باکتری دانستند. در مطالعه خدائی و همکاران (Khodaei et al., 2020) افزودن سه نوع باکتری پروبیوتیک مختلف بر ویژگی نفوذپذیری بر بخار آب فیلم ژلاتین و پکتین تأثیر معناداری نداشت.

### نفوذپذیری به بخار آب (WVP)

ساختار بلوری و کریستالی فیلم بر نفوذپذیری نسبت به بخار آب تأثیرگذار است به طوری که با افزایش ساختار کریستالی فیلم پلی ساکاریدی میزان WVP کاهش می‌یابد. سوزا و همکاران (Souza et al., 2010)، بیان کردند که نفوذپذیری به بخار آب فیلم‌های پلیمری به عوامل بسیاری از جمله ضریب حلالیت، یکپارچگی ماتریس فیلم، آب‌گریزی، سرعت انتشار، نسبت بین مناطق کریستالی و آمورف، ضخامت، تحرک زنجیره پلیمری و برهمکنش بین گروه‌های عاملی پلیمر بستگی دارد. نتایج ارزیابی نفوذپذیری نسبت به بخار آب فیلم‌ها در این مطالعه



شکل ۲- تأثیر افزودن باکتری *L. plantarum* بر نفوذپذیری در برابر بخار آب فیلم آلژینات  
Fig. 2. Effect of addition of *L. plantarum* on water vapour permeability of alginate film

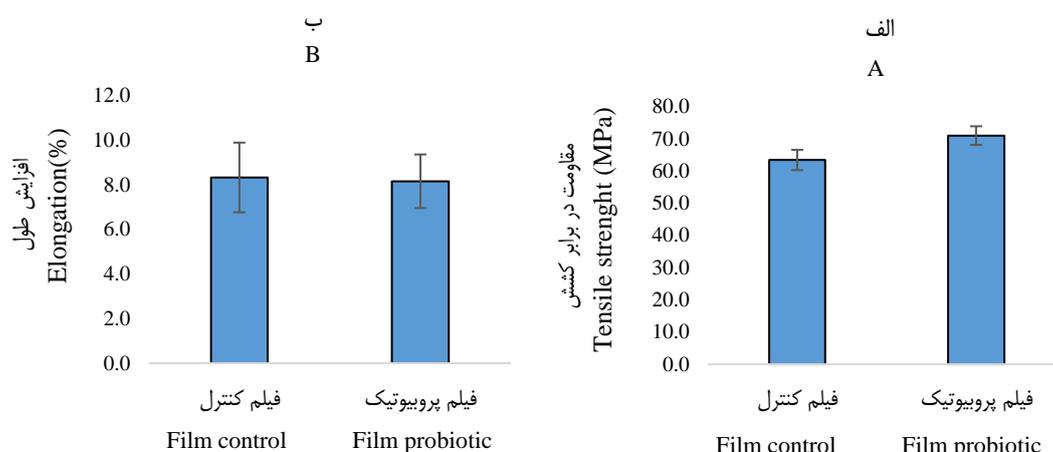
است. خواص مکانیکی فیلم‌های پلیمری تحت تأثیر نوع و غلظت پلیمر، نوع حلال و نرم‌کننده، روش تولید فیلم و شرایط انجام آزمون از نظر دما و رطوبت نسبی قرار دارد. جهت بررسی خواص مکانیکی فیلم‌های

### ویژگی مکانیکی فیلم‌ها

ویژگی مکانیکی بیانگر قابلیت فیلم جهت محافظت از ماده غذایی بسته‌بندی شده در برابر تنش‌های مکانیکی مختلف طی حمل و نقل

(Gialamas *et al.*, 2010) عدم تأثیر افزایش باکتری به محلول فیلم سازی کازئینات سدیم بر ویژگی‌های مکانیکی فیلم گزارش شد. برخلاف این نتایج افزودن باکتری به فیلم‌های پولولان به‌طور قابل ملاحظه‌ای مقاومت کششی و افزایش طول را در مطالعه کنمانی و لیم (Kanmani & Lim, 2013)، کاهش داد. ابراهیمی و همکاران (Ebrahimi *et al.*, 2018) کاهش ویژگی‌های مکانیکی فیلم کربوکسی متیل سلولز را پس از افزودن باکتری‌های پروبیوتیک مختلف را مشاهده کردند. همچنین در بین باکتری‌ها از نظر تأثیر بر خواص مکانیکی فیلم تفاوت معناداری وجود نداشت.

پلیمری معمولاً از آزمون‌های مقاومت کششی و افزایش طول تا نقطه پارگی استفاده می‌شود. در واقع مقاومت کششی، حداکثر نیروی لازم برای غلبه بر نیروی پیوستگی بین زنجیره‌ها را توصیف می‌کند در حالی که افزایش طول تا نقطه شکست، قابلیت گسترش فیلم قبل از پاره شدن را نشان می‌دهد (Da Silva *et al.*, 2009). شکل ۳ ویژگی مکانیکی فیلم‌ها در این مطالعه را نشان می‌دهد. بر این اساس مقاومت در برابر کشش فیلم آلژینات از ۶۳/۴۳ Mpa به ۷۱/۰۱ در فیلم پروبیوتیک افزایش یافت. به‌علاوه افزایش طول فیلم آلژینات تحت تأثیر افزودن باکتری پروبیوتیک قرار نگرفت. در مطالعه ژالاماس و همکاران

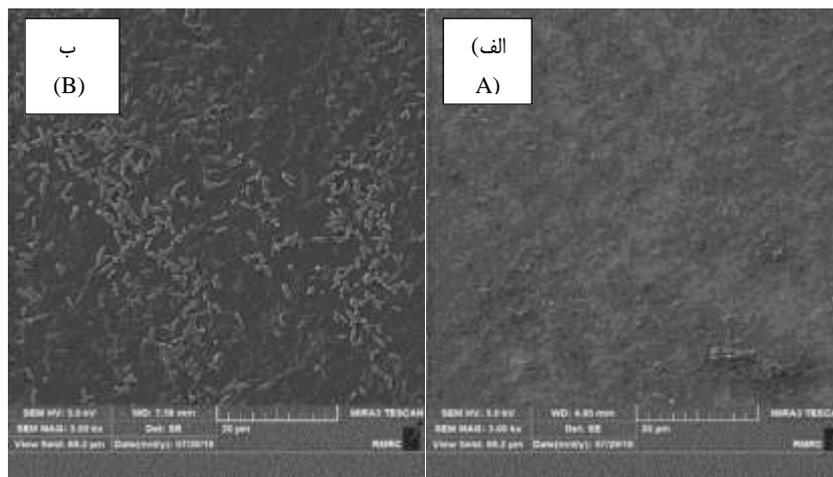


شکل ۳- تأثیر افزودن باکتری *L. plantarum* بر ویژگی‌های مکانیکی فیلم آلژینات. الف) مقاومت در برابر کشش و ب) درصد افزایش طول  
 Fig. 3. Effect of addition of *L. plantarum* on mechanical properties of alginate film. A) Tensile strength, B) Elongation (%)

### ریزساختار فیلم‌ها

آلژینات/کربوکسی متیل سلولز حفظ شد. رومانو و همکاران (Romano *et al.*, 2014) مشاهده کردند که افزودن باکتری پروبیوتیک تأثیری بر ساختار میکروسکوپی فیلم‌های متیل سلولز نداشت و فیلم‌ها همچنان ساختار همگن و متراکم خود را حفظ نمودند. سوکولیس و همکاران (Soukoulis *et al.*, 2017) در مطالعه‌ای، ویژگی ساختاری فیلم‌های پروبیوتیک را بسته به نوع پلی‌مر متفاوت ارزیابی نمودند. به‌طوری‌که نتایج بررسی مقطع عرضی فیلم‌های مختلف نشان داد که فیلم‌های کارائینان به‌ترتیب در مقایسه با آلژینات، پکتین و ژلاتین از بیشترین تراکم ساختاری برخوردار بودند که این موضوع به محافظت از باکتری در ساختار فیلم و زنده‌مانی بیشتر آن کمک نمود.

به‌منظور درک بهتر ساختار فیلم تهیه شده حاوی باکتری *L. plantarum* تصاویر میکروسکوپ الکترونی مورد بررسی قرار گرفتند. برطبق شکل ۴، تصاویر سطحی نشان می‌دهد که تمامی فیلم‌ها ساختاری متراکم عاری از هرگونه شکاف و ترک داشته و باکتری‌ها به خوبی در بستر فیلم قرار گرفتند. علاوه بر این بررسی تصاویر نشان داد که مورفولوژی باکتری *L. plantarum* که به فرم میله‌ای شکل است، پس از قرار گرفتن در ساختار فیلم تغییر نکرده است. به‌طور مشابه ما و همکاران (Ma *et al.*, 2020)، گزارش نمودند که ساختار میکروسکوپی باکتری *L. lactis* پس از قرار گرفتن در بستر فیلم مرکب

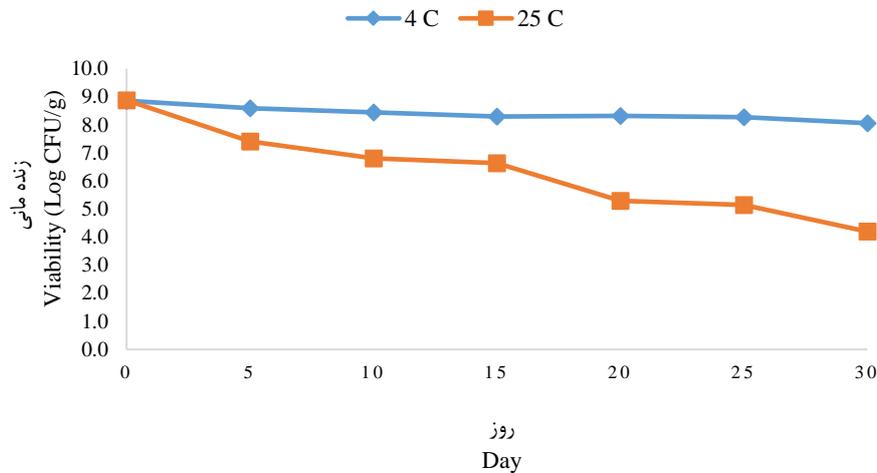


شکل ۴- تصاویر میکروسکوپ الکترونی- گسیل میدانی (SEM) از سطح فیلم‌های آلژینات تولید شده (الف) فیلم بدون باکتری (ب) فیلم حاوی باکتری *L. plantarum* (بزرگنمایی  $\times 3000$ )

Fig. 4. Images of SEM from surface of prepared alginate film A) film without bacteria, B) film containing *L. plantarum* bacteria

آن‌ها نشان داد که زنده‌مانی سه نوع باکتری پروبیوتیک *L. acidophilus* و *L. reuteri rhamnosus GG* در فیلم پولالان نسبت به فیلم‌های مرکب حاوی پولالان و نشاسته به‌خصوص در دمای  $4^{\circ}\text{C}$  بیشتر از دمای  $25^{\circ}\text{C}$  بود. همچنین برخلاف نتایج پژوهش حاضر، باکتری‌ها در هیچ یک از فیلم‌های پولالان/نشاسته پس از ۳۰ روز نگهداری در دمای  $25^{\circ}\text{C}$  قابل تشخیص نبودند. سوکولیس و همکاران (Soukoulis et al., 2017) نیز در بررسی اثر چند نوع ترکیب پری بیوتیک بر زنده‌مانی باکتری *L. rhamnosus GG* در فیلم‌ژلاتین در دو دمای  $4^{\circ}\text{C}$  و  $25^{\circ}\text{C}$  به نتایج مشابه‌ای دست یافتند. سوکولیس و همکاران (Soukoulis et al., 2017) در پژوهش دیگری بیان کردند که نرخ غیرفعال‌سازی باکتری *L. rhamnosus GG* در فیلم‌های پلیمری آبیونی شامل کارائینان، آلژینات، ژلاتین و پکتین با افزایش دما افزایش می‌یابد. علاوه بر این با افزودن کنسانتره پروتئین آب پنیر و افزایش ظرفیت بافری و pH محلول‌های فیلم‌سازی زنده‌مانی باکتری پروبیوتیک افزایش یافت. نتایج متفاوت به‌دست آمده احتمالاً به دلیل تفاوت نوع باکتری پروبیوتیک، نوع پلیمر و شرایط تولید فیلم‌ها می‌باشد. عوامل خارجی مانند فعالیت آبی، درجه حرارت و حضور اکسیژن به‌طور معناداری بر قابلیت زنده‌مانی سلول‌های باکتریایی محصور در ساختار فیلم تأثیر می‌گذارد. علاوه بر این تحرک مولکولی ترکیبات حل شده و انتشارشان از ساختار بستر تثبیت شده فیلم می‌تواند پایداری پروبیوتیک‌ها را تحت تأثیر قرار دهد. به‌دست آوردن بسترهایی با مقدار رطوبت پایین و نفوذپذیری پایین در برابر گازها جهت کنترل اکسیداسیون لیپیدهای غشاء سلولی به‌عنوان یک استراتژی کارآمد برای بهبود پایداری پروبیوتیک‌ها در سیستم‌های غذایی گزارش شده است (Fu & Chen, 2011).

اثر دمای نگهداری فیلم بر زنده‌مانی باکتری *L. plantarum* جهت بررسی اثر دمای بر زنده‌مانی باکتری پروبیوتیک *L. plantarum* محصور در ساختار فیلم آلژینات تولیدی، این فیلم به مدت ۳۰ روز در دو دمای  $4^{\circ}\text{C}$  و  $25^{\circ}\text{C}$  نگهداری و پس از هر ۵ روز جمعیت باکتری در سطح محیط کشت شمارش شد. نتایج نشان داد که کمترین میزان افت جمعیت زنده باکتری پروبیوتیک در دمای  $4^{\circ}\text{C}$  رخ داد. علاوه بر این جمعیت زنده باکتری در فیلم پس از ۳۰ روز نگهداری در  $4^{\circ}\text{C}$  در محدوده پیشنهادی برای محصولات پروبیوتیک یعنی بالاتر از  $10^6$  cfu/ gr بود. این نتایج را می‌توان به کاهش واکنش‌های شیمیایی و آنزیمی و فعالیت متابولیک باکتری در دماهای پایین نسبت داد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، کمترین و بیشترین افت جمعیت باکتری به‌ترتیب به دمای  $4^{\circ}\text{C}$  و  $25^{\circ}\text{C}$  اختصاص داشت. همچنین درصد زنده‌مانی باکتری *L. plantarum* در فیلم آلژینات پس از یک ماه نگهداری در دمای  $4^{\circ}\text{C}$  و  $25^{\circ}\text{C}$  به‌ترتیب  $96/84$  و  $47/29$  % بود. این پدیده را احتمالاً می‌توان به pH بالا و رطوبت پایین فیلم آلژینات ارتباط داد. با توجه به این که در مورد سیستم‌هایی با رطوبت متوسط (از جمله فیلم‌های خوراکی) حضور مقدار زیادی از محلول‌ها موجب تشدید واکنش‌های آنزیمی و شیمیایی و در نتیجه آسیب به ساختار دو لایه غشای فسفولیپیدی سلول باکتری می‌شود (Fu & Chen, 2011). مطابق نتایج حاصل از این پژوهش، ژئالماس و همکاران (Gialamas et al., 2010) در پژوهشی افت جمعیت باکتری *L. sakei* اسپری شده در سطح فیلم سدیم کاربونات را در دمای  $25^{\circ}\text{C}$  بیشتر از  $4^{\circ}\text{C}$  گزارش نمودند. کنمانی و لیم (Kanmani & Lim, 2013) دما را به‌عنوان فاکتور مهمی در زنده‌مانی باکتری‌های محصور شده در ساختار فیلم‌های پولالان/نشاسته معرفی کردند. نتایج مطالعه

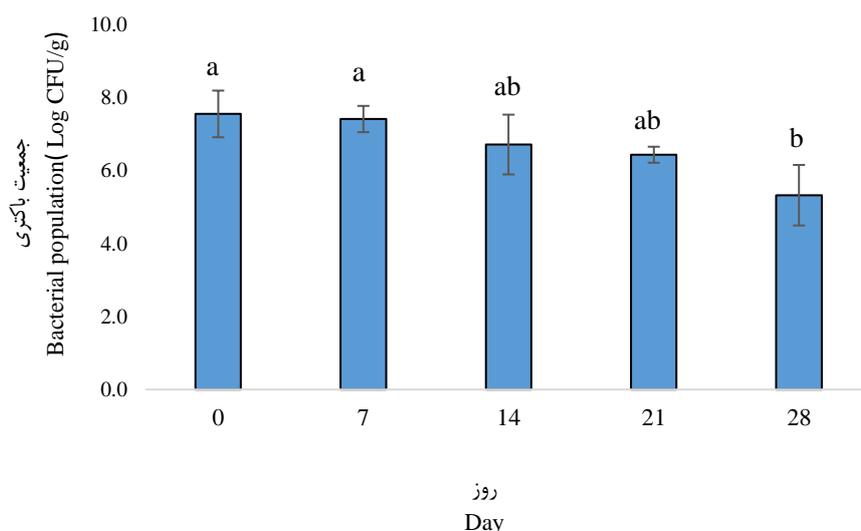


شکل ۵- زنده‌مانی باکتری *L. plantarum* محصور شده در ساختار فیلم آلژینات طی ۳۰ روز نگهداری در دمای ۴°C و ۲۵°C  
 Fig. 5. Viability of embedded *L. plantarum* in alginate film structure during 30 days storage at 25 and 4°C

جمعیت *L. monocytogenes* در سطح گوشت گاو از فیلم سدیم کازئینات حاوی *L. sakei* استفاده نمودند. جمعیت باکتری *L. sakei* پس از ۲۱ روز نگهداری از ۶ سیکل لگاریتمی به ۷ سیکل لگاریتمی در هر سانتی‌متر مربع در گوشت پوشش‌دار در دمای ۴°C افزایش یافت. همچنین بررسی زنده‌مانی باکتری‌های اسیدلاکتیک در فیلم‌های مرکب آلژینات و نشاسته حاوی یا فاقد نایزین در تماس با سطح ماهی نشان داد که جمعیت این باکتری‌ها در طول مدت زمان بررسی نه تنها کاهش نیافت بلکه ۰/۵ cfu/g سیکل لگاریتمی افزایش داشت. این موضوع احتمالاً به دلیل نشت مواد مغذی از سطح ماهی و همچنین جذب رطوبت و به دنبال آن افزایش فعالیت آبی فیلم‌ها و همچنین بالا بودن ظرفیت بافری ماهی و افزایش pH فیلم می‌باشد (Concha-Meyer *et al.*, 2011). تاورا کوپرز و همکاران (Tavera-Quiroz *et al.*, 2015) کاهش ۱/۵ سیکل لگاریتمی جمعیت باکتری *L. plantarum* محصور شده در پوشش متیل سلولز سیب خشک را در طی ۳۰ روز نگهداری در دمای ۲۰°C و رطوبت نسبی ۶۰٪ را مشاهده نمودند که از این حیث با نتایج این تحقیق مطابقت داشت.

#### زنده‌مانی باکتری *L. plantarum* محصور در فیلم آلژینات در سطح ورقه‌های کالباس در طی نگهداری در ۴°C

باتوجه به نتایج فیلم آلژینات به عنوان فیلم پروبیوتیک منتخب با ویژگی‌های مطلوب جهت پوشش‌دهی یک ماده غذایی جامد یخچالی مناسب تشخیص داده شد. از این رو فیلم آلژینات در سطح ورقه‌های کالباس قرار گرفت و زنده‌مانی باکتری در طول مدت نگهداری آن در یخچال بررسی شد. بر طبق شکل ۶، در طی ۳۰ روز نگهداری در ۴°C، ۲/۲۳ سیکل لگاریتمی کاهش جمعیت باکتری مشاهده گردید. این در حالی است که پس از سه هفته نگهداری جمعیت باکتری پروبیوتیک *L. plantarum* همچنان بالاتر از ۱۰<sup>۶</sup> cfu/g بود. این میزان افت جمعیت باکتری پروبیوتیک را می‌توان به مهاجرت رطوبت و همچنین ترکیبات مختلف محلول در آب موجود در ورقه‌های کالباس مانند مواد بازدارنده از رشد باکتری (ادویه‌ها و مواد نگهدارنده) به سطح فیلم، نسبت داد. در مورد استفاده از فیلم و پوشش‌های پروبیوتیک در سطح مواد غذایی گزارشات محدودی موجود است. در همین راستا ژالاماس و همکاران (Gialamas *et al.*, 2010) در مطالعه‌ای باهدف کاهش



شکل ۶- زنده‌مانی باکتری *L. plantarum* محصور در فیلم آلژینات در سطح ورقه کالباس در طی نگهداری در ۴°C (حروف کوچک ناهمسان نوشته شده هر ستون تفاوت معنادار در سطح ۰/۰۵ را نشان می‌دهد.)

Fig. 6. Viability of embedded *L. plantarum* in alginate film on sliced sausage during storage in 4°C (Small letters written on each column indicate a significant difference at the level of 0.05.)

## نتیجه‌گیری

به دام انداختن میکروارگانیسم‌های پروبیوتیک در ساختار پلیمری فیلم‌ها رویکرد جدیدی جهت توسعه محصولات جدید فراسودمند محسوب می‌شود. براساس نتایج حاصل از این مطالعه دما به‌عنوان عاملی مؤثر جهت حفظ جمعیت زنده باکتری پروبیوتیک در طی نگهداری طولانی مدت فیلم پروبیوتیک شناخته شد. بیشترین زنده‌مانی باکتری پروبیوتیک *L. plantarum* محصور در فیلم آلژینات در دمای ۴°C به‌دست آمد. همچنین افزودن باکتری به محلول فیلم‌سازی منجر

به بهبود خصوصیات ممانعت‌کنندگی در برابر بخار آب و مکانیکی فیلم آلژینات پروبیوتیک در مقایسه با فیلم کنترل شد. زنده‌مانی باکتری پروبیوتیک پس از به کارگیری فیلم آلژینات پروبیوتیک در سطح ماده غذایی مدل (کالباس) با گذشت سه هفته نگهداری سرد همچنان در حد مطلوب توصیه شده باقی ماند. بنابراین فیلم آلژینات به‌عنوان حامل مناسب برای میکروارگانیسم‌های پروبیوتیک برای توسعه محصولات غذایی پروبیوتیک پیشنهاد می‌شود. بر این اساس باید پژوهش‌های بیشتری در مورد نوع میکروارگانیسم‌های پروبیوتیک و محصولات غذایی دیگر در آینده نزدیک انجام گیرد.

## References

- Akman, P.K., Bozkurt, F., Dogan, K., Tornuk, F., & Tamturk, F. (2021). Fabrication and characterization of probiotic *Lactobacillus plantarum* loaded sodium alginate edible films. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15(1), 84-92. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00619-6>
- Burgain, J.J., Gaiani, C.C., Linder, M.R., & Scher, J.J. (2011). Encapsulation of probiotic living cells: From laboratory scale to industrial applications. *Journal of Food Engineering*, 104(4), 467-483. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.12.031>
- Concha-Meyer, A., Schöbitz, R., Brito, C., & Fuentes, R. (2011). Lactic acid bacteria in an alginate film inhibit *Listeria monocytogenes* growth on smoked salmon. *Food Control*, 22(3-4), 485-489. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2010.09.032>
- Cook, M.T., Tzortzis, G., Charalampopoulos, D., & Khutoryanskiy, V.V. (2012). Microencapsulation of probiotics for gastrointestinal delivery. *Journal of Controlled Release*, 162(1), 56-67. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2012.06.003>
- Da Silva, M.A., Bierhalz, A.C.K., & Kieckbusch, T.G. (2009). Alginate and pectin composite films crosslinked with Ca<sup>2+</sup> ions: Effect of the plasticizer concentration. *Carbohydrate Polymers*, 77(4), 736-742. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.02.014>
- Ebrahimi, B., Mohammadi, R., Rouhi, M., Mortazavian, A.M., Shojaee-Aliabadi, S., & Koushki, M.R. (2018). Survival of probiotic bacteria in carboxymethyl cellulose-based edible film and assessment of quality parameters. *LWT-Food Science and Technology*, 87, 364-374. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.08.066>

7. Espitia, P.J., Batista, R.A., Azeredo, H.M., & Otoni, C.G. (2016). Probiotics and their potential applications in active edible films and coatings. *Food Research International*, 90, 42-52. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.10.026>
8. FAO/WHO, (2002). Joint FAO/WHO Working Group Report on Drafting Guidelines for the Evaluation of Probiotics in Food London, Ontario, Canada, April 30 and May 1, 2002.
9. Fu, N., & Chen, X.D. (2011). Towards a maximal cell survival in convective thermal drying processes. *Food Research International*, 44(5), 1127-1149. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.03.053>
10. Galus, S., & Lenart, A. (2013). Development and characterization of composite edible films based on sodium alginate and pectin. *Journal of Food Engineering*, 115(4), 459-465. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.03.006>
11. Gialamas, H., Zinoviadou, K.G., Biliaderis, C.G., & Koutsoumanis, K.P. (2010). Development of a novel bioactive packaging based on the incorporation of *Lactobacillus sakei* into sodium-caseinate films for controlling *Listeria monocytogenes* in foods. *Food Research International*, 43(10), 2402-2408. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.09.020>
12. Jankovic, I., Sybesma, W., Phothirath, P., Ananta, E., & Mercenier, A. (2010). Application of probiotics in food products—challenges and new approaches. *Current Opinion in Biotechnology*, 21(2), 175-181. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2010.03.009>
13. Kanmani, P., & Lim, S.T. (2013). Development and characterization of novel probiotic-residing pullulan/starch edible films. *Food Chemistry*, 141(2), 1041-1049. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.03.103>
14. Khodaei, D., Hamidi-Esfahani, Z., & Lacroix, M. (2020). Gelatin and low methoxyl pectin films containing probiotics: Film characterization and cell viability. *Food Bioscience*, 36, 100660. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100660>
15. Ma, D., Jiang, Y., Ahmed, S., Qin, W., & Liu, Y. (2019). Physical and antimicrobial properties of edible films containing *Lactococcus lactis*. *International Journal of Biological Macromolecules*, 141, 378-386. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.09.006>
16. Mahmoudi, M., Khomeiri, M., Saeidi, M., & Davoodi, H. (2020). *Lactobacillus* species from iranian jug cheese: identification and selection of probiotic based on safety and functional properties. *Applied Food Biotechnology*, 8(1), 47-56. <https://doi.org/10.22037/afb.v8i1.29253>
17. Martins, J.T., Cerqueira, M.A., Bourbon, A.I., Pinheiro, A.C., Souza, B.W., & Vicente, A.A. (2012). Synergistic effects between κ-carrageenan and locust bean gum on physicochemical properties of edible films made thereof. *Food Hydrocolloids*, 29(2), 280-289. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.03.004>
18. Mathew, S., Brahmakumar, M., & Abraham, T.E. (2006). Microstructural imaging and characterization of the mechanical, chemical, thermal, and swelling properties of starch–chitosan blend films. *Biopolymers: Original Research on Biomolecules*, 82(2), 176-187.
19. Núñez-Flores, R., Giménez, B., Fernández-Martín, F., López-Caballero, M.E., Montero, M.P., & Gómez-Guillén, M.C. (2012). Role of lignosulphonate in properties of fish gelatin films. *Food Hydrocolloids*, 27, 60–71. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.08.015>
20. Piermaria, J., Diosma, G., Aquino, C., Garrote, G., & Abraham, A. (2015). Edible kefir films as vehicle for probiotic microorganisms. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 32, 193-199. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.09.009>
21. Rhim, J.W., Gennadios, A., Weller, C.L., & Hanna, M.A. (2002). Sodium dodecyl sulfate treatment improves properties of cast films from soy protein isolate. *Industrial Crops and Products*, 15(3), 199-205. [https://doi.org/10.1016/S0926-6690\(01\)00114-5](https://doi.org/10.1016/S0926-6690(01)00114-5)
22. Romano, N., Tavera-Quiroz, M.J., Bertola, N., Mobili, P., Pinotti, A., & Gómez-Zavaglia, A. (2014). Edible methylcellulose-based films containing fructo-oligosaccharides as vehicles for lactic acid bacteria. *Food Research International*, 64, 560-566. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.07.018>
23. Roble, C., Auty, M.A., Brunton, N., Gormley, R.T., & Butler, F. (2010). Evaluation of fresh-cut apple slices enriched with probiotic bacteria. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 11(1), 203-209. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2009.08.016>
24. Sánchez-González, L., Saavedra, J.I.Q., & Chiralt, A. (2013). Physical properties and antilisterial activity of bioactive edible films containing *Lactobacillus plantarum*. *Food Hydrocolloids*, 33(1), 92-98. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.02.011>
25. Shahrapour, D., Khomeiri, M., Razavi, S.M.A., & Kashiri, M. (2019). Development and characterization of alginate/pectin edible films containing *Lactobacillus plantarum* KMC 45. *LWT*, 118, 108758. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108758>
26. Soukoulis, C., Behboudi-Jobbehdar, S., Macnaughtan, W., Parmenter, C., & Fisk, I.D. (2017). Stability of *Lactobacillus rhamnosus* GG incorporated in edible films: Impact of anionic biopolymers and whey protein concentrate. *Food Hydrocolloids*, 70, 345-355. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.04.014>

27. Soukoulis, C., Behboudi-Jobbehdar, S., Yonekura, L., Parmenter, C., & Fisk, I.D. (2014). Stability of *Lactobacillus rhamnosus* GG in prebiotic edible films. *Food Chemistry*, 159, 302-308. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.03.008>
28. Soukoulis, C., Singh, P., Macnaughtan, W., Parmenter, C., & Fisk, I.D. (2016). Compositional and physicochemical factors governing the viability of *Lactobacillus rhamnosus* GG embedded in starch-protein based edible films. *Food Hydrocolloids*, 52, 876-887. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.08.025>
29. Souza, B.W., Cerqueira, M.A., Teixeira, J.A., & Vicente, A.A. (2010). The use of electric fields for edible coatings and films development and production: A review. *Food Engineering Reviews*, 2(4), 244-255.
30. Tavera-Quiroz, M.J., Romano, N., Mobili, P., Pinotti, A., Gómez-Zavaglia, A., & Bertola, N. (2015). Green apple baked snacks functionalized with edible coatings of methylcellulose containing *Lactobacillus plantarum*. *Journal of Functional Foods*, 16, 164-173. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.04.024>



# Evaluation the Performance of Drying Efficiency and Energy Efficiency of a Solar Dryer Quipped with Phase Change Materials and Air Recirculation System

M. Ahmadi<sup>1</sup>, H. Samimi Akhijahani<sup>2\*</sup>, P. Salami<sup>3</sup>

1, 2 and 3- M.Sc. Graduated, Associate Professor and Assistant Professor, Department of Bio Systems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran, respectively.

(\*- Corresponding Author Email: [h.samimi@uok.ac.ir](mailto:h.samimi@uok.ac.ir))

Received: 27.11.2022  
Revised: 10.03.2023  
Accepted: 22.05.2023  
Available Online: 23.05.2023

## How to cite this article:

Ahmadi, M., Samimi Akhijahani, H., & Salami, P. (2024). Evaluation the performance of drying efficiency and energy efficiency of a solar dryer quipped with phase change materials and air recirculation system. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 20(2), 199-216. (In Persian with English abstract).  
<https://doi.org/10.22067/ifstrj.2023.79695.1218>

## Introduction

Solar energy is one of the sources of renewable energy that can be used in both buildings, industry and agriculture in the form of heat or electrical energy. According to previous researches, energy consumption in the world is doubling every 20 years. However, the use of renewable energy is still less than fossil fuels, which has caused environmental problems in the world. In recent decades, the tendency to use renewable energy, especially solar energy, has increased. A significant portion of the world's energy (about 30%) is spent on agriculture, and about 3.62% is used to dry agricultural products (Iranmanesh *et al.*, 2020). However, thermal and drying efficiency of the solar collectors are not in acceptable range. Applying different ways to improve the performance of solar dryers such as using thermal energy storage system, air recirculation mechanism and using desiccant system. In this paper, phase change materials were placed vertically in consecutive rows at different distances inside the collector and the thermal performance of the collector was investigated. Also, the drying process of Oleaster were evaluated using PCM and air recirculation system.

## Materials and Methods

The indirect solar dryer used in this study includes the chassis, flat plate collector, electric fan, drying cabinet, pipes containing PCM and sensors. 25 copper tubes containing PCM are placed on the absorber plate with fixed intervals. The insulated cabinet of the dryer has three trays. A 220 volt 60 W electric fan is placed in the inlet of the collector and causes to flow air inside the system. The process of drying Oleaster in a solar dryer was carried out for 9 consecutive days in August 1401. The drying process was performed at three positions of PCM pipes at 5, 10 and 15 cm intervals with air flow rate of 0.5, 1 and 2 m/s. The drying kinetics of Oleaster was investigated using five mathematical models considering drying time and related constants. The selected model is selected based on the degree of fit (the highest R<sup>2</sup> and the lowest RMSE) on the experimental data. Thermal efficiency was calculated according to ASHRAE standard 2003 (Eltawil *et al.*, 2018). Moreover, to determine the drying efficiency the amount of energy required to heat the dryer and the product and extract water from the Oleaster and the total energy (electrical and thermal) input to the dryer was considered. SCE is defined as the energy required to dry one kilogram of the product.

## Results and Discussion

The drying time of the product by the dryer is reduced from 2.09 to 4.16% on average by changing the position of PCM from 5 cm to 15 cm. On the other hand, with the increase of air velocity from 0.5 to 2 m/s, the drying time decreased from 8.32% to 16.64%. Henderson and Pabis model was the best model to describe and define the drying



process of Oleaster with solar dryer. The curves of the drying rate against the time in different conditions illustrated that in the initial stage of drying of samples. The amount of moisture evaporation is high due to the high water content in Oleaster, and a major part of the drying process took place in this period. The value of SEC for the dryer without PCM was 4.26 MJ/kg, while for the case with PCM, it was 2.04 MJ/kg with a distance of 15 cm. By increasing the distance between the tubes, the drying efficiency increases due to the reduction of drying time and energy consumption. In this case, the consumption of electrical energy by the fan (for fluid flow in the dryer and collector) and the thermal energy input to the dryer are reduced. However, with the increase of air speed from 1 m/s to 2 m/s, there is a significant reduction in drying efficiency. The highest drying efficiency was 36.72% and the lowest was 25.65% for distance 15 cm, air velocity of 1 m/s and distance 5 cm, air speed 2 m/s, respectively. Drying efficiency was improved by at least 12% using PCM.

## Conclusion

In this research, the analysis of the thermal process in the solar dryer system in three positions of the tubes containing PCM inside the flat plate collector for the distances of 5, 10 and 15 cm between the tubes at three air velocities of 0.5, 1 and 2 m/s was investigated. Using the return flow system and the phase changing material at the same time improved the thermal efficiency of the flat plate collector by 19.12%.

**Keywords:** Oleaster, Phase change materials, Recirculation system, Thermal efficiency

## مقاله پژوهشی

جلد ۲۰، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۳، ص. ۱۹۹-۲۱۶

# ارزیابی عملکرد خشک کردن و بازده انرژی خشک کن خورشیدی مجهز به مواد تغییر فاز دهنده و سامانه جریان بازگشتی

محدثه احمدی<sup>۱</sup> - هادی صمیمی اخیجهانی<sup>۲\*</sup> - پیمان سلامی<sup>۳</sup> 

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۰۱

## چکیده

جمع‌کننده خورشیدی تخت یکی از اجزای مهم سامانه‌های جاذب انرژی خورشیدی مانند خشک‌کن‌های خورشیدی است. در این تحقیق در درون جمع‌کننده خورشیدی صفحه تخت از مواد تغییر فاز دهنده به صورت لوله‌ای استفاده شد. این لوله‌ها در پنج ردیف پنج تایی به فواصل ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر روی ردیف‌ها قرار گرفتند. برای ارزیابی عملکرد حرارتی سه سرعت هوا ( $0.5$ ،  $1$  و  $2$ ) و برای ارزیابی عملکرد خشک کردن محصول سنجید در نظر گرفته شد. رطوبت این نمونه‌ها برای آسیاب نمودن بایستی به کمتر از ۱۰ درصد می‌رسید. برای مدلسازی سینتیک خشک شدن، پنج مدل ریاضی به داده‌های خشک شدن برازش شد و مدل هندرسون و پایس با ضریب همبستگی بیشتر از  $0.97$  و ریشه میانگین مربعات خطا کمتر از  $0.05$  به عنوان بهترین مدل انتخاب شد. تأثیر سرعت هوا نسبت به جایگاه قرارگیری مواد تغییر فاز دهنده بر خشک شدن بیشتر بود. با بررسی بازده حرارتی جمع‌کننده خورشیدی این نتیجه حاصل شد که بهترین بازده حرارتی در سرعت هوای  $2 \text{ m.s}^{-1}$  با PCM به فواصل  $15 \text{ cm}$  به میزان  $56/29$  درصد اتفاق می‌افتد. در این حین بیشترین بازده خشک کردن نیز  $36/72\%$  به دست آمد. استفاده از مواد تغییر فاز دهنده به همراه سامانه جریان بازگشتی اثر منفی بر کیفیت محصول خشک شده نداشت.

**واژه‌های کلیدی:** بازده حرارتی، سامانه جریان بازگشتی، سنجید، مواد تغییر فاز دهنده

## مقدمه

منظور نگرانی طولانی مدت محصولات کشاورزی، خشک کردن آنها می‌باشد. حدود ۳۰ درصد از انرژی جهان صرف بخش کشاورزی می‌شود و از این مقدار،  $3/62$  درصد برای فرآیند خشک کردن استفاده می‌شود (Iranmanesh et al., 2017). طبق مطالعات انجام شده ۱۵ درصد جمعیت جهان دچار سوء تغذیه هستند و خشک کردن محصولات کشاورزی که باعث جلوگیری از اتلاف بیش از ۲۳ درصد محصول تولید شده می‌گردد، می‌تواند راه حل مناسبی در جهت مدیریت منابع غذایی باشد (Motahayyer et al., 2019). به دلیل معضلات زیست‌محیطی و تبعات ناشی از استفاده از سوخت‌های فسیلی، تمایل به انرژی‌های تجدیدپذیر و پاک نظیر انرژی خورشیدی در خشک کردن محصولات

یکی از موضوعات مهمی که در دهه‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است، بحث انرژی و نحوه تأمین آن می‌باشد. با توجه به تداوم نرخ جمعیت و افزایش مصرف مواد غذایی و اتمام سوخت‌های فسیلی و همچنین افزایش مشکلات زیست‌محیطی ناشی از مصرف این نوع سوخت‌ها (افزایش آلودگی به میزان  $8 \text{ ppm}$  در سال)، تحقیقات اخیر را به سمت استفاده از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر سوق داده است. اکثر محصولات کشاورزی و بیولوژیکی، دارای رطوبتی در حدود ۲۵ الی ۸۰ درصد می‌باشند و به دلیل رشد باکتری‌ها و قارچ‌ها، برای نگهداری طولانی مدت مناسب نیستند. یکی از روش‌های مناسب و قدیمی به

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانش‌آموخته مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران  
\* - نویسنده مسئول: (Email: [h.samimi@uok.ac.ir](mailto:h.samimi@uok.ac.ir))

سامانه‌های جریان بازگشتی (Gertzos & Caouris, 2007)، استفاده از موانع درون جمع کننده (Salami, 2016) و سامانه‌های جاذب رطوبت (Rashidi et al., 2021; Dorouzi et al., 2018) می‌تواند تا حدودی نقصان مربوط به بازده حرارتی و خشک کردن را جبران نماید. استفاده از سامانه‌های ذخیره کننده حرارتی یکپارچه در کلکتورهای خورشیدی، یک روش مؤثر برای افزایش بهره‌وری اقتصادی سامانه‌های خورشیدی به‌منظور گرم کردن سیال برای مصارف کشاورزی است (Kalogirou et al., 2006). ذخیره‌سازهای انرژی یکی از پرکاربردترین سامانه‌هایی هستند که برای ایجاد تعادل بین ساعات اوج بار و ساعات اوج مصرف انرژی در ادوات تأمین انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Tyagi et al., 2012). تکنیک‌های ذخیره‌سازی انرژی تا حد زیادی می‌توانند عدم تطابق بین عرضه انرژی و تقاضای آن در مدت زمان مصرف را مدیریت نماید (Bhardwaj et al., 2020). یکی از منابع مهم برای ذخیره‌سازی انرژی حرارتی، استفاده از مواد تغییر فازدهنده است که با تغییر فاز در حین گرماگیری و گرمادهی امکان ذخیره‌سازی و آزاد سازی انرژی را افزایش می‌دهد (Ebrahimi et al., 2021).

سامانه‌های انرژی گرمایی شامل یک واحد ذخیره‌کننده انرژی عایق شده و مواد جامد یا مایع هستند که با تغییر حالت این مواد، تغییرات انرژی به‌صورت گرمایی محسوس و گرمای نهان انجام می‌شود. بیشتر تحقیقات انجام شده در مورد ذخیره‌سازی انرژی گرمایی در خشک‌کن های خورشیدی به‌صورت محسوس انجام گرفته است. مواد تغییر فاز-دهنده PCM شامل مواد آلی یا معدنی هستند که مقدار زیادی انرژی حرارتی را به خود جذب کرده و در هنگام تغییر حالت از فاز جامد به مایع انرژی را به‌صورت نهان ذخیره کرده و هنگام تغییر فاز از حالت مایع به جامد انرژی را آزاد می‌کنند. مواد تغییر فازدهنده می‌توانند انرژی گرمایی را بدون هیچ تغییری درون خود ذخیره و یا آزاد کنند. PCM های آلی را می‌توان به گروه پارافین‌ها (ذخیره آلکان‌ها) و غیرپارافین‌ها مانند استرها، اسیدهای چرب، الکل‌ها و گلیکولیک اسیدها طبقه‌بندی کرد. در دهه‌های اخیر با توجه به ویژگی‌های ذخیره انرژی گرمایی به صورت نهان، تحقیقات مهمی به‌صورت تئوری و آزمایشگاهی صورت گرفته است. در یک مطالعه، آزمایش‌هایی روی خشک‌کن خورشیدی کابینتی نوع غیرمستقیم برای ۲/۷ کیلوگرم گوجه‌فرنگی در دو حالت با و بدون مواد تغییر فازدهنده انجام شد. نتایج نشان داد با استفاده از مواد تغییر فازدهنده، زمان خشک شدن تا ۱ ساعت و ۴۸ دقیقه پس از غروب خورشید افزایش می‌یابد و مدت زمان خشک شدن تا ۱۲ ساعت کاهش یافت. کیفیت و بافت گوجه‌فرنگی خشک شده از خشک‌کن خورشیدی دارای مواد تغییر فازدهنده در مقایسه با خشک کردن در معرض آفتاب

کشاورزی در حال افزایش است. انرژی خورشیدی یکی از انرژی‌های تجدیدپذیر رایگان، در دسترس، پاک و فراوان است. انرژی خورشیدی در انواع سامانه‌ها مانند آبگرمکن‌های خورشیدی، نیروگاه‌های حرارتی تولید برق (دودکش‌ها و هیلوستات‌های خورشیدی) و خشک‌کن‌های خورشیدی کاربرد دارد. دستگاه‌های خشک‌کن خورشیدی یکی از سامانه‌های خورشیدی است که به صنایع غذایی بسیار کمک می‌کند تا از طریق کاهش رطوبت و جلوگیری از ایجاد میکروارگانیسم‌ها از مواد غذایی محافظت نماید. انرژی خورشیدی به دلیل در دسترس بودن و فراوانی پایدار با ارزش‌ترین منبع انرژی‌های تجدیدپذیر بوده (Chamoli et al., 2012) و براساس ماهیت استفاده به دو صورت مستقیم و غیرمستقیم مورد استفاده قرار می‌گیرد (Rashidi et al., 2018). در خشک‌کن‌های خورشیدی هر دو روش می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. خشک کردن به روش سنتی، قدیمی‌ترین روش خشک کردن محصولات است که در این نوع خشک کردن، محصولات مستقیماً در معرض نور آفتاب قرار گرفته و با گذشت زمان، رطوبت خود را از دست می‌دهد. این نوع روش خشک کردن دارای معایبی نظیر: زمان طولانی فرآیند خشک کردن، از بین رفتن مقدار زیادی ویتامین و مواد معدنی محصول در اثر تابش مستقیم تشعشع خورشیدی، از بین رفتن بخشی از محصول و آلوده شدن محصول ناشی از آب و هوای نامساعد و پرندگان و حشرات و نیاز به سطح زیاد برای خشک کردن می‌باشد. در این حالت محصول خشک شده پس از جمع‌آوری از مزرعه برای زدودن غبار، گرد و خاک و حشرات دوباره در معرض شستشو قرار گرفته و در نتیجه فرآیند فرآوری طولانی می‌گردد. استفاده و توسعه‌ی خشک‌کن های خورشیدی این محدودیت‌ها را کاهش می‌دهد.

از آنجا که فرآیند خشک کردن به انرژی بالایی نیاز دارد، منابع انرژی جایگزین با قابلیت تجدیدپذیر بودن، بهترین گزینه برای تأمین انرژی در خشک‌کن‌های صنعتی می‌باشد. بنابراین، با توجه به مشکلات موجود در خشک کردن سنتی (طولانی شدن فرآیند خشک شدن و تمیزی محصول) و متداول به روش هوای گرم (هزینه خشک شدن بالا و عدم تأمین انرژی)، خشک‌کن‌های خورشیدی مناسب‌ترین گزینه برای رطوبت‌زدایی محصول می‌باشد.

خشک‌کن‌های خورشیدی علی‌رغم تأمین انرژی رایگان به دلایلی نظیر عدم خشک شدن متعادل محصول و عدم در دسترس بودن در طول شب و روزهای ابری کمتر مورد استقبال تولیدکنندگان محصولات خشک شده قرار می‌گیرد. علاوه بر آن با وجود در دسترس بودن و هزینه‌ی کم خشک‌کن‌های خورشیدی، بازده حرارتی خشک‌کن‌های خورشیدی نسبت به سایر خشک‌کن‌ها پایین است. ارائه تمهیداتی مانند استفاده از سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی (Ebrahimi et al., 2021)،

در این استان‌ها می‌باشد. محتوای رطوبت سنجد به محض برداشت از درخت از ۶۰-۲۰ درصد بسته به تنوع آن متغیر است و بایستی پس از برداشت عملیات خشک کردن بر روی محصول صورت پذیرد. امروزه به دلیل خواص دارویی شناخته شده، بخشی زیادی به صورت پودر شده به فروش رسیده و مورد مصرف قرار می‌گیرد. بنابراین برای آسیاب نمودن این میوه بایستی رطوبت تمام اجزای آن (پوست، آرد و هسته) به کمتر از ۱۰ درصد برسد (Sahan et al., 2015).

با توجه به اینکه در ساعاتی از روز، دمای داخل جمع‌کننده بیش از حد افزایش می‌یابد و انباشت حرارتی درون جمع‌کننده‌های خورشیدی مانند صفحه تخت صورت می‌گیرد، تلفات حرارتی به طور محسوسی افزایش پیدا کرده و در نتیجه بازده حرارتی کاهش می‌یابد. استفاده از ذخیره‌ساز حرارتی، گرمای اضافی در جمع‌کننده در حین گرم‌گیری را جذب کرده و از اتلاف گرما (در اثر همرفت به محیط از طریق بدنه‌ی جمع‌کننده و شیشه) جلوگیری می‌کند. آرایش قرارگیری و ابعاد PCM در درون جمع‌کننده خورشیدی به صورت مستقیم بر بازده حرارتی جمع‌کننده خورشیدی تأثیر دارد. با توجه به مطالعات پیشین، مشاهده گردیده است که لوله‌های حاوی پارافین بیشتر به صورت لایه‌هایی بر روی کف جمع‌کننده قرار داده شده‌اند که این امر باعث می‌گردد بخشی از انرژی ذخیره شده در هنگام آزادسازی از صفحات پشتی جمع‌کننده تلف شود. علاوه بر آن در این نوع خشک‌کن‌ها از سامانه جریان بازگشتی استفاده نمی‌شد که این امر باعث اتلاف بخش اعظمی از انرژی حرارتی از سامانه می‌شد. در این مطالعه مواد تغییر فازدهنده به صورت عمودی در ردیف‌های پشت سر هم و در فواصل مختلف در داخل صفحه‌ی جمع‌کننده قرار گرفتند. همچنین روند خشک شدن سنجد و کیفیت آن با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده و سامانه جریان بازگشتی مورد ارزیابی قرار گرفت.

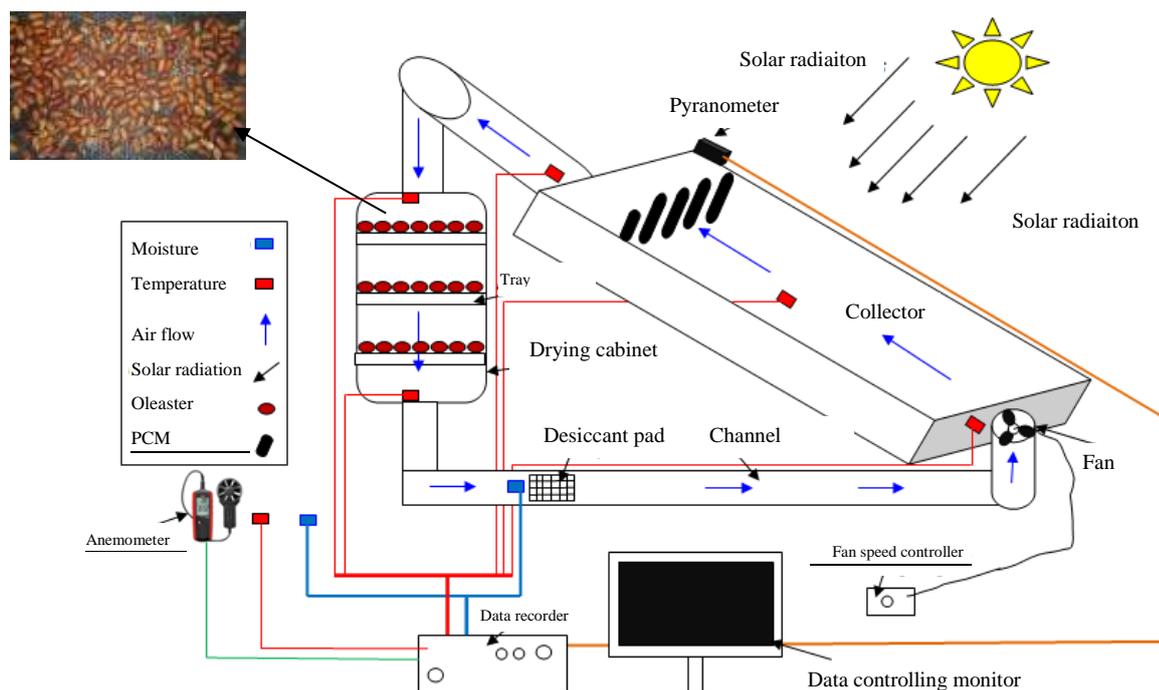
## مواد و روش‌ها

### شرح دستگاه خشک‌کن خورشیدی و متعلقات آن

خشک‌کن خورشیدی غیر مستقیم به طور کلی شامل شاسی دستگاه، جمع‌کننده صفحه تخت، فن الکتریکی، کابینت خشک‌کن، لوله‌های حاوی PCM و حسگرها می‌باشد. اجزای اصلی سامانه خشک‌کن خورشیدی در شکل ۱ نشان داده شده است.

مناسب‌تر ارزیابی شد (Yadav & Ramana, 2020). ارزیابی استفاده از سامانه کمکی حرارتی دارای PCM برای ذخیره انرژی خورشیدی در روز برای یک خشک‌کن نشان داد بازده انرژی روزانه ذخیره‌ساز خورشیدی تا ۳۳/۹ درصد و بازده اکسرژی روزانه تا ۸/۵ درصد افزایش می‌یابد. با استفاده از سامانه ذخیره‌ساز انرژی دمای محفظه خشک‌کن در تمام شب ۴ درجه سلسیوس بالاتر از دمای محیط و رطوبت نسبی در محفظه خشک‌کن ۱۷-۳۴/۵ درصد کمتر از رطوبت نسبی محیط مشاهده شد که این یعنی عملیات خشک شدن حتی در طول شب نیز انجام می‌گرفت (El Khadraoui et al., 2017). در تحقیق دیگر از مواد تغییر فازدهنده در درون سامانه ذخیره‌ساز حرارتی با جمع‌کننده لوله خلا استفاده شد. استفاده از مواد تغییر فازدهنده باعث بهبود کارایی سامانه حداقل به میزان ۲۵ درصد و کاهش مدت زمان خشک شدن ورقه‌های سیب به اندازه ۱۶/۵ درصد شد. علاوه بر آن از روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای بررسی حرکت سیال در سامانه استفاده و نتایج به دست آمده نشان داد که استفاده از روش CFD پیش بینی دقیق‌تری از ذخیره انرژی را نسبت به سایر مدل‌های ریاضی ارائه می‌دهد (Iranmanesh et al., 2020). در تحقیق خشک کردن فلفل سبز به وسیله خشک‌کن خورشیدی با و بدون PCM مورد بررسی قرار گرفت. مواد تغییر فازدهنده درون شیارهایی بر روی صفحه جاذب قرار گرفته بودند. نتایج بررسی‌ها مشخص نمود که استفاده از PCM، زمان خشک کردن را ۲۰-۷ درصد در خشک‌کن با شرایط طبیعی و ۳۸-۳۵ درصد در خشک کردن به صورت همرفت اجباری در مقایسه با شرایط بدون استفاده از PCM، کاهش می‌دهد. رنگ و کیفیت فلفل سبز خشک شده در خشک‌کن با PCM به دلیل کاهش نوسانات شدید دمایی، بسیار مطلوب است (Babar et al., 2021).

سنجد یک محصول کشاورزی خوشمزه بوده و در بیشتر مناطق جهان از جمله روسیه، قزاقستان، ترکیه و ایران کشت می‌شود (Hamidpour et al., 2017; Akbolat et al., 2008). ایران با تولید بیش از ۱۰ هزار تن در سال یکی از تولیدکنندگان عمده سنجد در جهان است. سنجد را می‌توان در هر دو حالت تازه و خشک استفاده نمود. علاوه بر آن می‌توان پس از آسیاب کردن به صورت آرد در شیر مخلوط شده و برای درمان آرتريت روماتوئید و درد مفاصل استفاده می‌شود (Rashidi et al., 2021). این میوه دارای انواع پروتئین‌ها، اسیدهای آمینه، چربی‌ها و قندها مثل فروکتوز و دارای خواص دارویی بسیاری چون پاک‌کننده معده و روده است (Boudraa, 2020). در ایران این محصول در استان‌های آذربایجان شرقی، سمنان، خراسان رضوی، کرمان و کردستان کشت می‌شود. واریته‌های بومی دره‌وار، شاهرودی، حاج حسین، مملی و قزل از مهمترین واریته‌های کشت شده



شکل ۱- شماتیک خشک‌کن خورشیدی استفاده شده

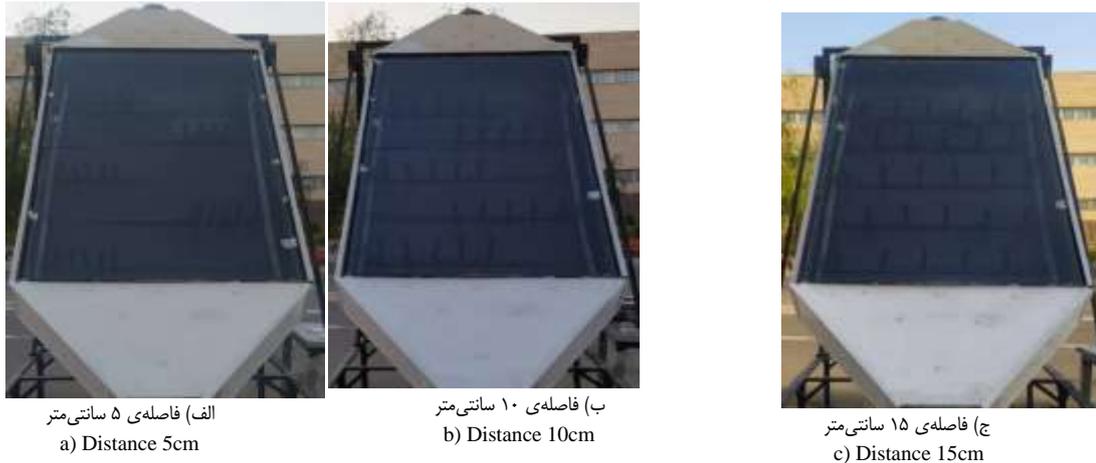
Fig. 1. Schematic of used solar dryer

اجزای مختلف سامانه خشک‌کن همراه با متعلقات و جزئیات (ویژگی‌ها و ابعاد) در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- جزئیات سامانه جمع‌کننده و خشک‌کن خورشیدی

Table 1- Details of the solar collector and dryer system

اجزا Components	جزئیات و ابعاد Details and dimensions
صفه جاذب Absorber plate	ورق گالوانیزه عایق شده با فوم، پوشیده شده با رنگ سیاه مات، با ابعاد ۹۰۰ در ۱۸۰۰ میلی‌متر، و ضخامت ۱ میلی‌متر، زاویه شیب ۴۵ درجه، راستای قرارگیری شمال- جنوب به سمت جنوب Galvanized sheet insulated with foam, covered with matte black color, with dimensions of 900 x 1800 mm, and thickness of 1 mm, inclination angle of 45 degrees, north-south to south direction
پوشش Transparent	شیشه معمولی تک لایه با ضخامت ۴ میلی‌متر، فاصله بین پوشش و سطح صفحه جاذب ۱۸۰ میلی‌متر، با ضرایب عبور، جذب و انعکاس به ترتیب ۰/۰۶ و ۰/۰۸ و ۰/۰۸ Single-layer glass with a thickness of 4 mm, the distance between the cover and the surface of absorber plate is 180 mm, with transmission, absorption and reflection coefficients of 0.89, 0.06 and 0.08, respectively.
جریان دهنده هوا Air circulator	یک فن محوری ۲۲۰ ولت با توان ۶۰ وات (Damandeh, Iran, 2153) A 220V, 60W axial fan (Damandeh, Iran, 2153)
کابینت خشک‌کن Drying cabinet	تخته فیبر (MDF) با ضخامت ۱۰ میلی‌متر با ابعاد ۳۰۰ × ۴۰۰ و ارتفاع ۶۰۰ میلی‌متر Fiberboard (MDF) with thickness of 10 mm, dimensions of 300-400 mm and a height of 600 mm.
سینی Tray	جنس فلزی با حفره‌های دایروی به ابعاد ۳۰۰ × ۴۰۰ میلی‌متر Metal sheet with circular holes of 300-400 mm
ماده تغییر فاز دهنده Phase change material	لوله‌های مسی به قطر ۲۰ میلی‌متر به ضخامت ۱ میلی‌متر، به تعداد ۲۵ عدد، در ۵ ردیف، با فواصل ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر روی ردیف، پر شده با پارافین مدل RT50 Copper tubes with a diameter of 20 mm and a thickness of 1 mm, 25 pieces, in 5 rows, with 5, 10 a۹۸۷۳۵۶۲,۰۱/۳n ۳'d 15 cm intervals on the row, filled with RT50 paraffin
سامانه جریان بازگشتی Air Recirculation system	لوله گالوانیزه به قطر ۱۵۰ میلی‌متر، خروجی از انتهای کابینت و ورودی به جمع‌کننده، با قابلیت کنترل دبی هوا، عایق‌بندی شده با فوم به ضخامت ۳ میلی‌متر Galvanized pipe with a diameter of 150 mm, outlet from the end of the cabinet and inlet to the collector, with the ability to control the air flow, insulated with 3 mm thick foam.



شکل ۲- نحوه قرارگیری لوله‌های حاوی مواد تغییر فاز دهنده به صورت عمود به صفحه جاذب  
 Fig. 2. The place of tubes containing phase change materials perpendicular to the absorber plate

گرم پس از انرژی دهی به کابینت خشک کن و خروج از آن با استفاده از لوله‌های فلزی عایق‌بندی شده دوباره به ورودی جمع‌کننده باز می‌گردد. در اثر بازگشت هوای خروجی از کابینت به درون سامانه، بخشی زیادی از انرژی حرارتی تولید شده، وارد سیکل خشک کردن محصول می‌گردد. **ماده تغییر فاز دهنده:** ماده تغییر فاز دهنده از جنس پارافین RT50 درون لوله‌های مسی با قطر ۲۰ میلی‌متر و طول ۱۷ سانتی‌متر قرار گرفت. داخل هر لوله پس از ذوب شدن به میزان  $30 \pm 2$  میلی‌لیتر پارافین قرار گرفت و برای جلوگیری از نشتی پارافین داخل لوله، دو طرف لوله‌ها با جوش مسی مسدود شد. لوله‌های حاوی ماده PCM برای جذب سریعتر انرژی گرمایی، رنگ لوله‌های مسی به رنگ سیاه مات پوشش داده شد. لوله‌های مسی توسط پروفیل‌های گالوانیزه، در پنج ردیف به صورتی که لوله‌ها با یکدیگر هم‌پوشانی نداشته باشند، قرار گرفت. ویژگی‌های فیزیکی و حرارتی مربوط به پارافین RT50 در **جدول ۲** نمایش داده شده است.

مهم‌ترین بخش هر خشک کن خورشیدی، جمع‌کننده است که کار اصلی آن، جذب تابش خورشیدی و تبدیل آن به انرژی گرمایی و انتقال آن به سیال عامل است. جمع‌کننده صفحه تخت مورد نظر شامل: صفحه جاذب که برای جذب حداکثری و انتشار حداقل انرژی خورشیدی به رنگ سیاه مات پوشش داده شد. یک پوشش شیشه‌ای تک لایه بر روی صفحه جاذب برای عبور پرتوهای خورشید قرار گرفته است. بر روی صفحه جمع‌کننده تعداد ۲۵ لوله‌ی مسی با فواصل معین حاوی PCM قرار داده شده است. نحوه قرارگیری لوله‌های حاوی PCM در **شکل ۲** نشان داده شده است.

کابینت عایق‌بندی شده دارای سه سینی است، که برای سهولت جابجایی سامانه بر روی نبشی آهن که بر روی شاسی دستگاه جوش زده شد، قرار گرفت. در ورودی جمع‌کننده یک فن الکتریکی ۲۲۰ ولت ۶۰ وات قرار می‌گیرد. با شروع به کار فن الکتریکی، هوا درون سامانه جریان پیدا می‌کند. با عبور پرتوهای خورشیدی از شیشه، صفحه‌ی جاذب تشعشع را تبدیل به انرژی گرمایی نموده و هوای جریان‌یافته درون سامانه انرژی حرارتی را به درون کابینت انتقال می‌دهد. هوای

جدول ۲- خواص پارافین واکس مورد استفاده به عنوان PCM داخل جمع‌کننده

Table 2- Properties of paraffin wax used as PCM inside the collector

Property	Liquid temperature (K)	Density (kg.m <sup>-3</sup> )	volumetric expansion Coefficient (1.K <sup>-1</sup> )	Latant heat (kJ.kg <sup>-1</sup> )	Thermal conductivity (W.m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	Specific heat (kJ.kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	Solid temperature (K)
ویژگی	دمای حالت مایع	چگالی	ضریب انبساط حجمی	گرمای نهان	هدایت حرارتی	گرمای ویژه	دمای حالت جامد
Value	325	783	0.000561	166	0.2	2.1	317.3

## خشک کردن سنجد

همان‌طور که اشاره شد برای ارزیابی تأثیر استفاده از مواد تغییر فازدهنده بر روند خشک کردن محصول از سنجد (*Elaeagnus angustifolia*) استفاده گردید. در این مطالعه سنجدها به میزان کافی از بازار خشکبار شهر تبریز خریداری شده و با نگهداری در پلاستیک، بدون هیچ‌گونه پیش‌تیماری آماده‌ی خشک‌شدن شدند. رطوبت اولیه محصول طبق استاندارد AOAC در آون با دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس و به مدت ۵ ساعت به میزان  $1/15 \pm 62/46$  درصد تعیین گردید (Dorouzi et al., 2018).

## طرح آزمایش خشک‌کردن

فرآیند خشک کردن سنجد در دستگاه خشک‌کن خورشیدی به مدت ۹ روز متوالی در مرداد ماه سال ۱۴۰۱ صورت پذیرفت. روند خشک شدن محصول در سه حالت قرارگیری لوله‌های PCM به فواصل ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر با سرعت جریان هوا در سه سطح ۰/۵، ۱ و ۲ متر بر ثانیه صورت پذیرفت. دستگاه در فضای باز و به سمت جنوب قرار گرفت و سپس از ساعت ۸:۰۰ داده‌برداری شروع شد. یک ساعت قبل از داده‌برداری برای گرم شدن اجزای مختلف سامانه، دستگاه در مقابل خورشید قرار می‌گرفت. به‌منظور خشک شدن، محصول سنجد مورد نظر در سینی‌های داخل کابینت قرار داده شد. یک توری کوچک برای کنترل وزن در ساعات مشخص در نظر گرفته شد. برای دقت در داده برداری، وزن نمونه‌ها، در ساعت اولیه داده‌برداری به‌صورت یک ربع یکبار و در بقیه ساعات به‌صورت نیم ساعت یکبار تا ساعت ۲۰:۰۰ انجام گرفت. لازم به ذکر است در حین توزین، دمای نقاط مختلف سامانه، میزان شدت تابش خورشیدی، میزان وزش باد، رطوبت محیط و دمای محیط نیز اندازه‌گیری می‌شد.

## ابزارهای اندازه‌گیری و حسگرها

در این پژوهش برای کنترل و سنجش دمای نقاط مختلف از حس گر دمای DS18B20 استفاده شد که یک حس‌گر دیجیتال است، استفاده گردیده است. مزیت این حس‌گر نسبت به حس‌گر دمای آنالوگ LM35 این است که خروجی حس‌گر DS18B20 دیجیتال و به‌صورت مدولاسیون عرض پالس است و نیازی به مبدل آنالوگ به دیجیتال ندارد و می‌توان مستقیماً آن را به میکروکنترلر وصل نمود. به این منظور دو حسگر درون جمع‌کننده (ورودی و خروجی) و دو حسگر دیگر درون کابینت (ورودی و خروجی) قرار داده شد. حسگر دیگری نیز برای سنجش دمای محیط در نظر گرفته شد. این حسگرها برای نشان دادن دما به برد اندروید (Arduino Uno, Mega-32) متصل شدند. برای اندازه‌گیری سرعت جریان هوا از بادسنج (UNI-T-363, China) با دقت  $0/1 \text{ m/s}$  کنترل شد. برای سنجش رطوبت محیط از رطوبت‌سنج

(HT, 3600, Lutron, Taiwan) با دقت ۱٪ استفاده شد. همچنین برای اندازه‌گیری شدت تابش خورشیدی از پیرانومتر دیجیتالی (TES 1333R, CMP6, Taiwan) با دقت  $1 \text{ m/s}$  استفاده شد. در طی ۹ روز آزمایش، محصول با وزن تقریباً یکسان در ظرفی درون سینی کابینت قرار گرفت و قبل و بعد از هر آزمایش به‌وسیله ترازوی دیجیتال AND مدل FX-3000GD به ظرفیت ۱۵۰۰ گرم با دقت  $0/01$  گرم، وزن آن یادداشت شد.

محاسبات نظری: عملکرد حرارتی جمع‌کننده با سامانه ذخیره‌ساز انرژی

نرخ انرژی جذب شده مفید ( $Q_u$ ) توسط جمع‌کننده صفحه تخت به صورت رابطه (بیان می‌شود):

$$\dot{Q}_u = \dot{m} c_p (T_o - T_i) \quad (1)$$

بخش عمده انرژی خورشیدی دریافتی، از کلکتور تلف شده و انرژی باقیمانده به‌صورت انرژی گرمایی مفید می‌تواند با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شود: ( $\tau\alpha$ ) فاکتور جذب انرژی خورشیدی است)

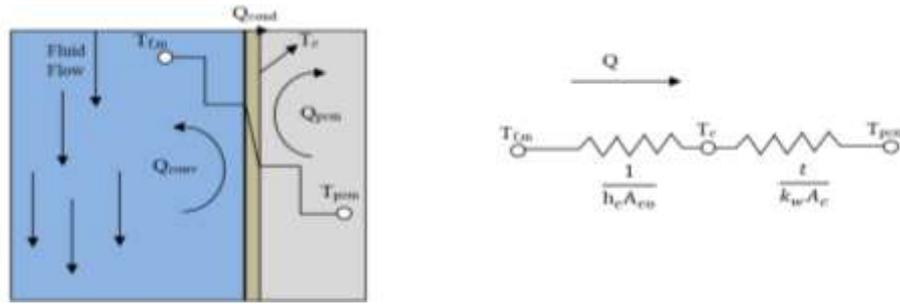
$$\dot{Q}_u = A_c F_R ([I_o (\tau\alpha)] - U_L (T_i - T_o)) \quad (2)$$

بازده گرمایی مطابق با ASHRAE standard 2003 با استفاده از رابطه ۳ محاسبه گردید (Eltawil et al., 2018):

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{A_c I_o} = \frac{\dot{m} c_p (T_{oi} - T)}{A_c I_o} \quad (3)$$

سیستم ذخیره‌سازی شامل لوله مسی، در پنج ردیف بر روی سطح صفحه جاذب قرار گرفته است. لوله با موم پارافین پر شد. در جریان ذخیره‌سازی انرژی (شارژ)، زمانی که شدت تابش در سطح بالایی قرار دارد، سیال گرم شده و پارافین به حالت جامد در داخل لوله ماریچ از طریق جذب گرما از سیال، به حالت مایع تغییر می‌یابد. هنگامی که شدت تابش خورشیدی در سطح پائینی است، دمای سیال داخل کلکتور کمتر از دمای محیط است. بنابراین تغییر فاز بالعکس شده و پارافین انرژی گرمایی را به هوای جریان یافته در داخل کلکتور و محفظه خشک‌کن منتقل می‌نماید.

انرژی جذب شده توسط واحد PCM، مشتمل بر دو بخش اصلی است: پارافین و لوله‌های مسی به‌عنوان پوشش. مدار گرمایی جمع‌کننده صفحه تخت، شامل سیال، دیواره و PCM که به‌عنوان سیستم ذخیره سازی به کار گرفته شده است و عملکرد گرمایی کلکتور می‌باشد. شکل ۳ انرژی گرمایی جذب شده، که از هوا به دیواره مسی، از طریق همرفت منتقل شده است و سپس از دیواره به پارافین هدایت شده است، را نشان می‌دهد (Esakkimuthu et al., 2013). بنابراین، دمای پارافین (PCM) افزایش می‌یابد و در نتیجه فاز PCM در نقطه ذوب تغییر می‌کند (شکل ۳).



شکل ۳- مدار انتقال حرارت برای سیال، لوله مسی و پارافین به عنوان ماده PCM  
Fig. 3. Heat transfer circuit for fluid, copper tube and paraffin as PCM material

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} \quad (8)$$

نرخ خشک کردن در جریان خشک کردن با استفاده از رابطه ۹ در هر لحظه قابل محاسبه است (Reyes et al., 2014).

$$DR = \frac{dM}{dt} = -k (M_t - M_e) \quad (9)$$

سینتیک خشک کردن سنجده، پنج مدل ریاضی با در نظر گرفتن زمان خشک شدن و ثابت‌های مربوطه مورد استفاده قرار گرفت. این مدل‌ها همراه با جزئیات مربوطه در جدول ۳ نشان داده شده‌اند. برای برازش و تحلیل رگرسیون چندگانه از زیر برنامه برازش منحنی در نرم افزار متلب (نسخه ۲۰۱۸) استفاده شد. مدل انتخابی براساس میزان برازش (بیشترین میزان  $R^2$  و کمترین میزان RMSE) بر داده‌های تجربی انتخاب می‌گردد.

انرژی گرمایی ورودی به خشک کن با  $Q_{in,dryer}$  و با استفاده از رابطه ۱۰ بیان می‌شود (Iranmanesh et al., 2020):

$$Q_{in,dryer} = 10^{-6} \left[ \int_0^t \dot{m}(t) \times c_p (T_{in,coil} - T_{out,coil}) dt - \int_0^t \dot{m}(t) \times c_p (T_{in,s} - T_{out,s}) dt \right] \quad (10)$$

انرژی خروجی از خشک کن ( $Q_{o,dryer}$ ) با رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود.

$$Q_{o,dryer} = 10^{-3} \times W \times L_v \quad (11)$$

$W$  و  $L_v$  با استفاده از معادلات ۱۲ و ۱۳ محاسبه می‌شود:

$$W = \frac{W_a (M_o - M_f)}{100 - M_f} \quad (12)$$

$$L_v = 2502.54 - 2.309 T_{ca} \quad (13)$$

گردش جریان هوا از طریق کلکتور و خشک کن جهت تسریع فرآیند خشک کردن، لازم و ضروری است. بنابراین، انرژی مورد استفاده توسط فن، می‌تواند با معادله ۱۴ محاسبه شود.

$$E_{mec} = 10^{-6} \times P_{fan} \times t \quad (14)$$

میزان انرژی گرمایی منتقل شده از کلکتور به سیال، می‌تواند با در نظر گرفتن دمای ورودی ( $T_{f,in}$ ) و خروجی ( $T_{f,out}$ ) با استفاده از رابطه ۴ محاسبه شود (Serale et al., 2016):

$$\dot{Q}_f = \dot{m} c_p (T_{f,in} - T_{f,out}) \quad (4)$$

شار گرمایی همرفتی از سیال با دمای بالاتر به پوشش دیواره PCM ( $Q_{conv}$ ) به میانگین دمای سیال ( $T_{f,m}$ ) و دمای پوشش ( $T_{c,m}$ ) بستگی دارد:

$$\dot{Q}_{conv} = h_c A_{co} (T_{f,m} - T_{c,m}) \quad (5)$$

اعداد ناسلت، رینولدز، پراتنل جهت محاسبه ضریب انتقال گرما در صفحه کلکتور لازم و ضروری هستند.

انتقال گرمایی که به پارافین داخل لوله مسی منتقل شده است، از رابطه ۶ قابل محاسبه است (Koca et al., 2008):

$$\dot{Q}_{cond} = k_w A_{co} \frac{(T_{c,m} - T_{pcm})}{t_c} \quad (6)$$

با توجه به تغییر فاز در PCM، فرآیند ذخیره سازی و تخلیه رخ می‌دهد، انرژی مبادله پذیر کل به صورت معادله ۷ تعریف می‌شود (Goyal et al., 1998):

$$\begin{aligned} Q_{pcm} &= m_{pcm} C_s (T_{pcm} - T_{melt}) & Q_{pcm} &= m_{pcm} C_s (T_{pcm} - T_{melt}) & T_{pcm} < T_{melt} \\ Q_{pcm} &= 0 & & & T_{pcm} = T_{melt} \\ Q_{pcm} &= m_{pcm} C_l (T_{pcm} - T_{melt}) & & & T_{pcm} > T_{melt} \end{aligned} \quad (7)$$

### بازدهی خشک کردن و انرژی مصرفی ویژه

بازدهی خشک کردن باید جهت ارزیابی تأثیر PCM در شرایط مختلف بر فرآیند خشک کردن نمونه‌ها تعیین گردد. به همین دلیل، نمونه‌های سنجده به صورت تک لایه روی سینی‌ها در داخل محفظه قرار گرفت. یک ترازوی دیجیتال با دقت  $0.01 \text{ g}$  (ظرفیت  $1500 \text{ g}$ ) جهت اندازه‌گیری وزن نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. نمونه‌ها، هر ۱۵ دقیقه یکبار در ساعت اول و سپس هر ۳۰ دقیقه یکبار، توزین گردید. نسبت رطوبت نمونه‌ها براساس رابطه ۸ محاسبه شد:

جدول ۳- جزئیات مدل‌های ریاضی اعمال شده برای توصیف سینتیک خشک کردن سنجد  
Table 3- Details of mathematical models applied to describe the drying kinetics of oleaster

Row	Model Name	Mathematical equation	Reference
ردیف	نام مدل	رابطه ریاضی	منبع
1	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Agrawal and Singh (1978)
2	Henderson and pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Westerman et al. (1973)
3	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + b$	Yagcioglu et al. (1999)
4	Midilli et al	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	Henderson (1974)
5	Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	Wang and Singh (1978)

### نتایج و بحث داده‌های محیطی

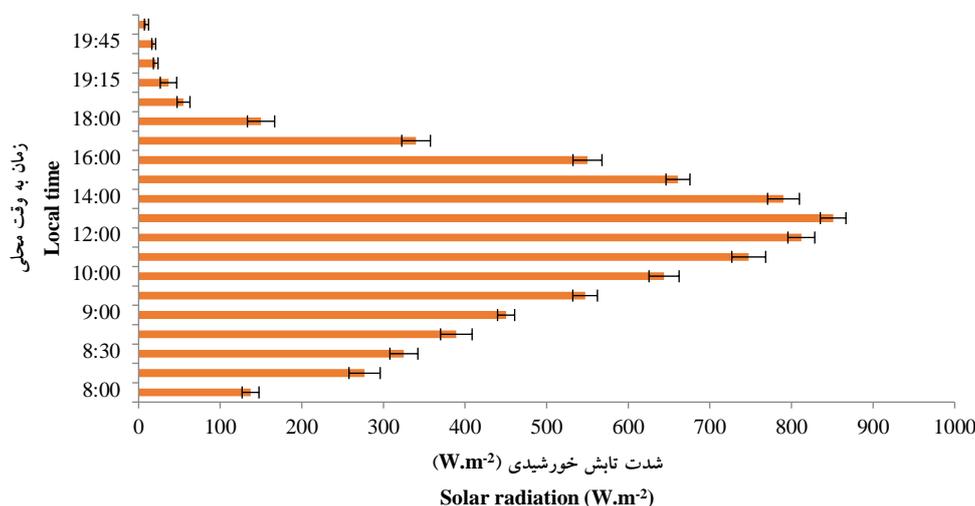
در شکل ۴ میانگین شدت تابش خورشیدی تاییده شده به جمع کننده خورشیدی نشان داده شده است. متوسط تابش خورشیدی در روزهای آزمایش از ساعت ۸:۰۰ افزایش یافته و در ساعت ۱۳:۰۰ تا ۱۴:۰۰ (حدود  $15 \pm 85$  وات بر متر مربع) به حداکثر می‌رسد. سپس به میزان قابل توجهی کاهش یافته و در ساعت ۲۰:۰۰ به حداقل (حدود  $2 \pm 15$  وات بر متر مربع) می‌رسد. نمودار نشان می‌دهد که زمان مناسب برای ذخیره انرژی حرارتی در ساعاتی که شدت تابش خورشیدی بیشینه است. لازم به ذکر است در تمام روزهای آزمایش شرایط محیطی مناسب و آسمان صاف بود.

مقدار انرژی لازم برای گرم کردن خشک کن و محصول و استخراج آب از سنجد و انرژی کل (الکتریکی و گرمایی) ورودی به خشک کن، برای تعیین بازدهی خشک کردن، رابطه ۱۵ لحاظ می‌گردد (Yaseen & Al-Kayiem, 2016).

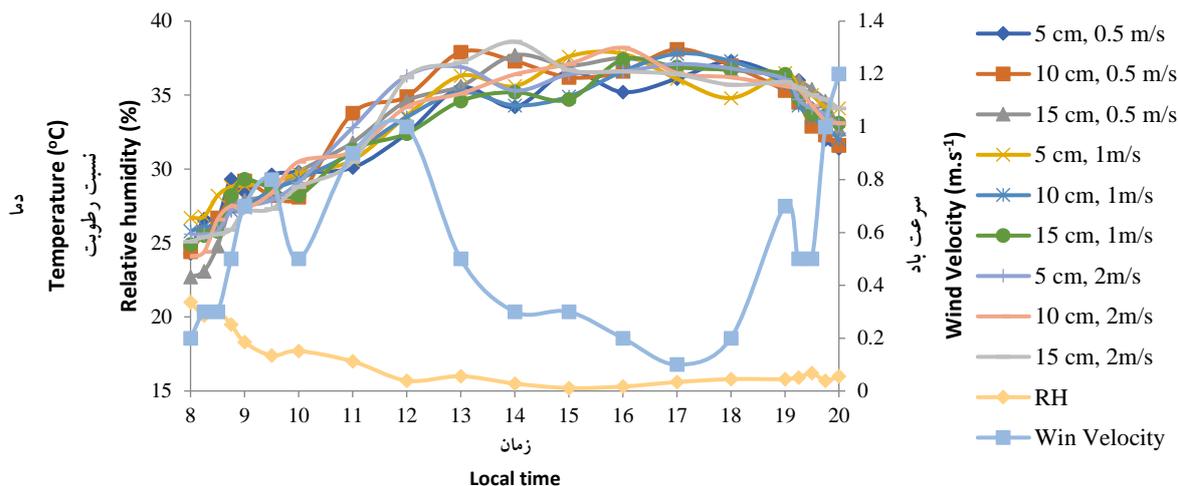
$$\eta_{dryer} = \frac{Q_{out,dryer}}{Q_{in,dryer} + E_{mec}} \quad (15)$$

عملکرد خشک کن خورشیدی با پارامتر مصرف انرژی ویژه (SEC) محاسبه می‌گردد. SCE به صورت انرژی لازم برای خشک کردن یک کیلوگرم از محصول تعریف می‌شود که به صورت ذیل در رابطه ۱۶ نشان داده شده است.

$$SEC = \frac{Q_m}{W_o} \quad (16)$$



شکل ۴- تغییرات میانگین شدت خورشیدی در طول روزهای آزمایش  
Fig. 5. The variations of average solar intensity changes during the test days



شکل ۵- تغییرات دما، رطوبت هوا و سرعت باد محیط در طول روزهای آزمایش  
 Fig. 5. Variation in temperature, air humidity and ambient wind speed during the test days

است. با توجه به شکل مشخص است که از صبح با افزایش دمای محیط و افزایش شدت تابش خورشیدی تمام دماها افزایش پیدا می‌کند. بیشینه دما برای خروجی جمع‌کننده در ساعت ۱۴:۰۰ اتفاق می‌افتد و مقدار آن ۶۵/۲ درجه سلسیوس بود. در این هنگام دمای ورودی به جمع‌کننده، ورودی و خروجی کابینت به ترتیب ۴۵/۶، ۶۳/۲ و ۴۸/۵ درجه سلسیوس بود. این بدان معناست که دمای ورودی و خروجی جمع‌کننده و ورودی و خروجی کابینت خشک‌کن به ترتیب ۱۰/۵، ۲۹/۲، ۲۷/۲، ۱۲/۵ درجه سلسیوس نسبت به دمای محیط بالاتر بود.

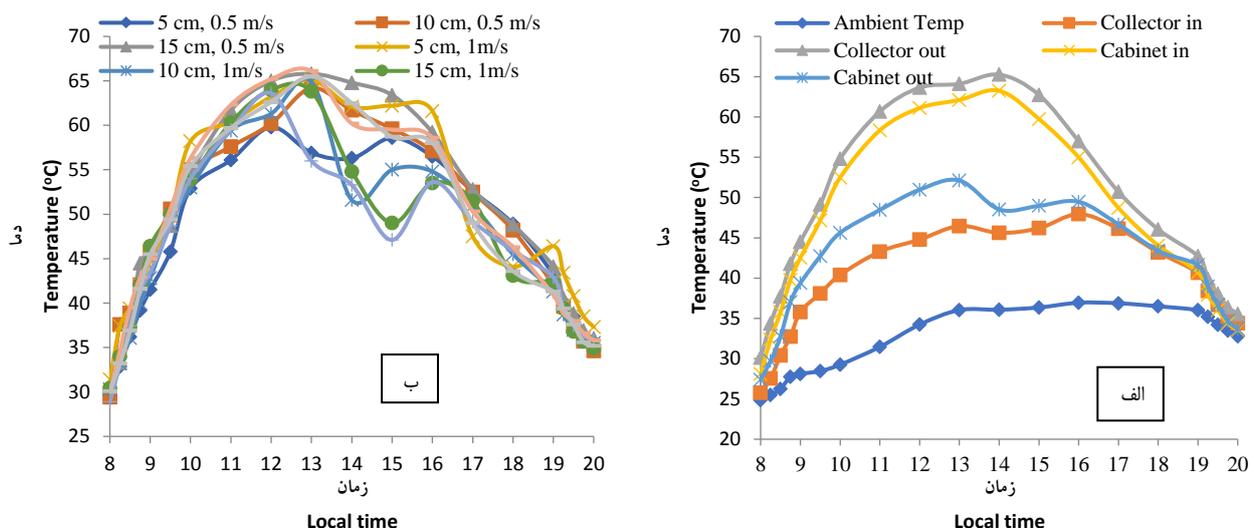
در اثر عدم وجود سامانه جریان بازگشتی هوای ورودی حداقل ۱۰/۵ درجه سلسیوس کمتر از حالت با جریان بازگشتی خواهد بود. دمای خروجی از جمع‌کننده به دلیل وجود ماده تغییر فازدهنده در ساعات ابتدایی پایین‌تر از حالت بدون ماده تغییر فاز دهنده خواهد بود. این به دلیل جذب قسمتی از انرژی تابیده شده به جمع‌کننده است. پس از ساعت ۱۷:۰۰ با کاهش شدت تابش خورشیدی، ماده تغییر فازدهنده انرژی ذخیره شده در خود را از دست داده و باعث افزایش دما به صورت محسوس (۳/۴- ۲/۵ درجه سلسیوس) می‌گردد. این فرآیند برای حالت‌های مختلف در شکل ۶ ب مشخص است. در تحقیقی مشابه دمای هوا در خشک‌کن خورشیدی با سیستم ذخیره‌سازی، بازتابنده‌ها و هوای بازیافتی حدود ۳۰ تا ۴۰ درجه سلسیوس نسبت به دمای محیط در تابستان افزایش یافت (Amer et al., 2018).

میانگین تغییرات دمای محیط و رطوبت نسبی هوا در طول روزهای آزمایش در شکل ۵ نشان داده شده است. دمای هوا با افزایش شدت تابش خورشید افزایش می‌یابد و این نشان می‌دهد که مقداری از انرژی حرارتی دریافتی به زمین به گرما تبدیل می‌شود. این امر توسط پدیده های محیطی از جمله ذرات خاک و مولکول‌های هوا اتفاق می‌افتد که باعث افزایش دمای محیط می‌گردد (Rashidi et al., 2018). اما با افزایش تابش خورشید، در اثر تبخیر مولکول‌های آب (بین مولکول‌های هوا) رطوبت نسبی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.

همانطور که در شکل ۵ مشخص است، دمای هوای محیط به طور میانگین از  $1/15 \pm 25/6$  از صبح افزایش یافته و در ساعات بین ۱۳:۰۰ تا ۱۵:۰۰ به بیشینه مقدار  $1/5 \pm 36/3$  درجه سلسیوس رسیده و سپس کاهش می‌یابد. همزمان رطوبت هوای محیط با افزایش دما نیز از اوایل صبح از ۲۲/۴ درصد کاهش یافته و در اواسط روز به ۱۵/۲ درصد می‌رسد. رطوبت هوا با نزدیک شدن به ساعت ۲۰ افزایشی است. علاوه بر آن میانگین سرعت باد نیز در روزهای داده‌بردی در شکل ۵ گزارش شده است. سرعت وزش باد در طول روز بین ۰/۳ تا ۱/۲ متر بر ثانیه تغییر می‌کرد.

#### دمای هوای ورودی به کابینت خشک‌کن

تغییرات مربوط به دماهای ورودی و خروجی جمع‌کننده و ورودی و خروجی کابینت خشک‌کن نسبت به زمان در شکل ۶ نشان داده شده



شکل ۶- (الف) متوسط تغییرات دمای قسمت‌های مختلف سامانه خشک‌کن خورشیدی نسبت به زمان محلی، (ب) تغییرات دمای هوای خروجی از جمع‌کننده نسبت به زمان محلی در شرایط مختلف

Fig. 6. (a) Average temperature changes of different parts of the solar dryer system relative to local time, (b) temperature changes of the air coming out of the collector against local time at different conditions

متوسط راندمان حرارتی برای فواصل ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر به ترتیب ۵۳/۲۶، ۵۴/۸۹ و ۵۶/۲۹٪ بود. علاوه بر آن اضافه نمودن سامانه جریان بازگشتی باعث بهبود راندمان حرارتی به میزان حداقل ۱۱/۶۵٪ نسبت به حالت بدون جریان بازگشتی شد. به عبارت دیگر استفاده از ماده تغییر فازدهنده و سامانه جریان بازگشتی به صورت هم‌زمان باعث بهبود بازده حرارتی جمع‌کننده صفحه تخت به میزان حداقل ۱۹/۱۲ درصد برای سرعت هوای  $2 \text{ m.s}^{-1}$  بود. نتایج به دست آمده با یافته‌های سایر پژوهش‌ها که از ماده تغییر فازدهنده و سامانه جریان بازگشتی استفاده نمودند، مطابقت داشت (Barghi et al., 2022; Rashidi et al., 2021; Raj et al., 2019).

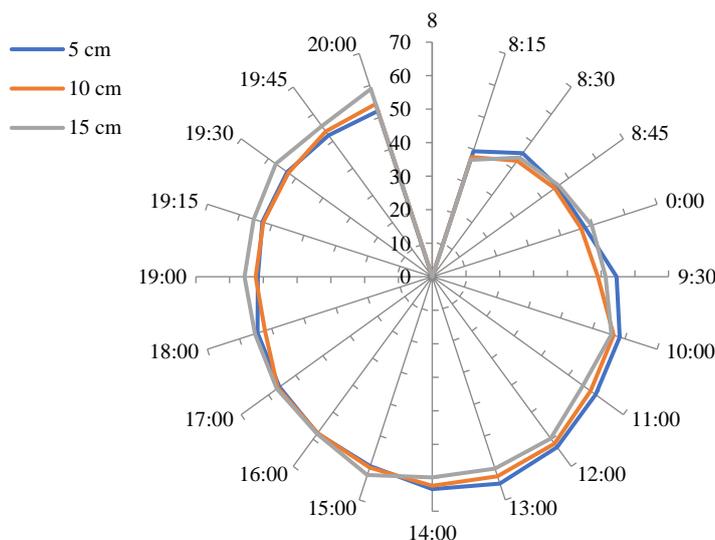
### روند خشک شدن محصول

#### انتخاب مدل ریاضی مناسب

تغییرات MR در مقابل زمان خشک شدن سنج در حالت‌های مختلف برای سرعت هوای جریان یافته در سامانه با موقعیت‌های مختلف از مواد تغییر فاز دهنده درون جمع‌کننده صفحه تخت در شکل ۸ نشان داده است. با توجه به شکل مشخص است که وجود مواد تغییر فاز دهنده در محفظه خشک‌کن کابینتی اثر معنی‌داری در استخراج رطوبت از محصول سنجد دارد ( $P < 0.05$ ) و این بدان معناست که بخش زیادی از انرژی ورودی به جمع‌کننده به وسیله PCM بازیافت می‌شود. بنابراین عملکرد خشک‌کن به دلیل افزایش قابل توجه مقدار انرژی حرارتی مورد نیاز برای افزایش دمای نمونه‌ها برای استخراج رطوبت، بهبود می‌یابد (Aghbashlo et al., 2008).

### بازده حرارتی جمع‌کننده

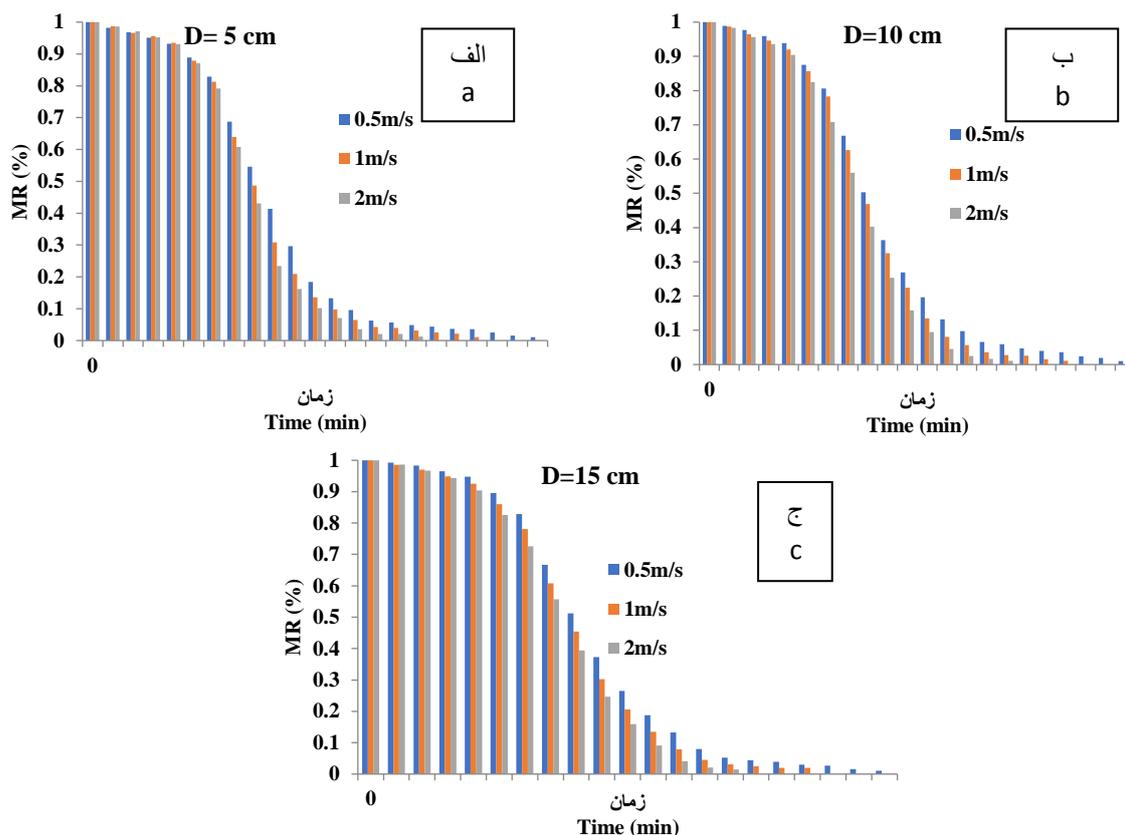
تغییرات بازده حرارتی جمع‌کننده صفحه تخت در فواصل مختلف از مواد تغییر فازدهنده نسبت به زمان به وقت محلی در شکل ۷ نشان داده شده است. بازده حرارتی با افزایش تابش خورشیدی (از ساعت ۸:۰۰ تا ۱۴:۰۰) افزایش یافته و پس از آن روند کاهشی به خود می‌گیرد. به این علت که بخشی از انرژی برای گرم شدن اجزای سامانه و بخشی دیگر از طرق دیواره‌ها تلف می‌شود. به دلیل تلفات کسینوس (Cosine loss) تابش خورشیدی، بازده حرارتی در مواقع صبح (۸:۰۰ تا ۱۰:۰۰) و عصر (۱۶:۰۰ تا ۱۸:۰۰) کمتر است (Wang et al., 2016). برای جبران این کاهش و بهبود راندمان حرارتی استفاده از مکانیزم ردیاب بسیار مؤثر بوده و باعث کاهش تلفات کسینوسی تابش خورشیدی خواهد شد (Kalogirou et al., 2006). راندمان حرارتی برای تمام حالت‌ها با ماده تغییر فازدهنده قبل از ساعت ۱۴:۰۰، کمتر از حالتی است که از این ماده استفاده شده است. در این حالت بخشی از گرما در پارافین جذب می‌شود. بازده حرارتی برای فاصله ۵cm در هنگام انرژی‌گیری بیشتر از فواصل دیگر است. به دلیل عدم در معرض قرار گرفتن PCM در مقابل هوا، انرژی حرارتی با افت کمتری از جمع‌کننده خارج می‌شود. با کاهش شدت تابش خورشیدی، انرژی جذب شده در ماده تغییر فازدهنده به هوای جریان یافته در جمع‌کننده رها شده، و سپس به درون خشک‌کن هدایت می‌شود. به دلیل پراکندگی لوله‌ها درون جمع‌کننده برای فاصله ۱۵ cm، از ساعت ۱۷:۰۰ که آزادسازی انرژی آغاز می‌شود، بازده حرارتی نسبت به بقیه فواصل بیشتر است. این امر به دلیل ذخیره‌سازی متعادل انرژی و آزادسازی آن است.



شکل ۷- تغییرات بازده حرارتی جمع کننده صفحه تخت در فواصل مختلف از مواد تغییر فاز دهنده  
 Fig. 7. Variations of thermal efficiency of flat plate collector at different distances of PCM

زمان خشک شدن را حداقل ۶/۱۱ درصد تسریع کرد (Motahayyer et al., 2019). نتایج خشک کردن گیاه دارویی (Valeriana jatamansi) نشان می‌دهد که اعمال سامانه ذخیره‌سازی حرارتی در خشک کن، زمان خشک کردن نمونه‌ها را حدود ۳/۵٪ کاهش داد (Bhardwaj et al., 2020). علاوه بر این، سایر مطالعات نشان دادند که شیب منحنی‌های نسبت رطوبت به دلیل کاهش آب آزاد در نمونه‌ها به مرور زمان کاهش می‌یابد (Atalay, 2020; Antal et al., 2016). برای توصیف و تعریف فرآیند رطوبت‌زدایی محصولات کشاورزی، مدل‌های ریاضی روش مناسبی است. بنابراین تحلیل رگرسیون چندگانه با ابزار برازش منحنی در نرم‌افزار متلب (Matlab, V.2019) انجام شد. در جدول ۴ مقادیر ثابت معادله ریاضی انتخاب شده ریاضی با پارامترهای آماری شامل  $R^2$  و RMSE فهرست شده است. با توجه به حداکثر مقادیر  $R^2$  (به عنوان همبستگی) و حداقل مقدار RMSE (به عنوان ریشه میانگین مربعات خطاها) بهترین مدل برای توصیف سینتیک خشک کردن فرآیند خشک کردن میوه سنجید انتخاب شد. جدول ۴ نشان می‌دهد که مدل ریاضی هندرسون و پاییس مدل مناسب با داده‌های تجربی مطابقت دارد. علاوه بر این، با توجه به پارامترهای مدل‌های خشک کردن، می‌توان مشاهده کرد که ثابت‌ها با افزایش فاصله بین لوله‌های تغییر فاز دهنده و سرعت جریان هوا، افزایش می‌یابند (Toğrul & Pehlivan, 2002; Rashidi et al., 2021; Blanco-Cano et al., 2016).

اثر مورد ذکر شده زمانی بیشتر می‌شود که شدت تابش افزایش یابد. علاوه بر این، شکل ۸ نشان می‌دهد که سرعت خشک شدن سنجید در شروع دوره خشک شدن به دلیل دمای هوا پایین است. شیب منحنی خشک شدن برای نسبت رطوبت به مرور زمان افزایش می‌یابد و در نهایت به دلیل کاهش رطوبت، کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش سرعت جریان هوا درون سامانه زمان خشک شدن محصول کاهش می‌یابد. اثر سرعت جریان هوا بر کاهش مدت زمان خشک شدن نسبت به تغییر جایگاه قرارگیری مواد تغییر فاز دهنده بیشتر است. با اعمال جریان هوای بازگشتی زمان خشک شدن نسبت به حالتی که از سامانه جریان بازگشتی استفاده نمی‌شود به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد (Motahayyer et al., 2019). زمان خشک شدن محصول توسط خشک کن با تغییر موقعیت ماده تغییر فاز دهنده از ۵ cm تا ۱۵ cm به طور متوسط از ۲/۰۹ تا ۴/۱۶ درصد کاهش می‌یابد. با افزایش فاصله بین لوله‌ها از به دلیل توزیع همگن مواد تغییر فاز دهنده درون محفظه جمع کننده، ذخیره‌سازی انرژی حرارتی در مواقعی که شدت تابش خورشیدی بالا است، بیشتر صورت گرفته و به تبع آن انرژی حرارتی بیشتری وارد خشک کن شده و روند خشک شدن سریع تر صورت می‌گیرد. از طرف دیگر با افزایش سرعت هوا از ۰/۵ تا ۲ متر بر ثانیه مدت زمان خشک شدن از ۸/۳۲ تا ۱۶/۶۴ درصد کاهش یافت. برای خشک کن کابینتی خورشیدی با پارامترهای مشابه بدون فرآیند بازگشت حرارت، مدت زمان خشک شدن ورقه‌های سیب با مواد تغییر فاز دهنده حداقل ۷/۱۴٪ کاهش یافت (Iranmanesh et al., 2020). در بررسی خشک کردن گوجه‌فرنگی، استفاده از مکانیزم متخلخل و گردش مجدد،



شکل ۸- تغییرات نسبت رطوبت MR (%) در مقابل زمان (دقیقه) برای محصول سنجد برای فواصل مختلف از مواد تغییر فاز دهنده (۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر) در سرعت‌های هوای مختلف ۰/۵، ۱ و ۲ متر بر ثانیه

Fig. 8. Variations of MR(%) versus time (minutes) for Oleaster product at different distances of PCM (5, 10 and 15 cm) at different air velocities of 0.5, 1 and 2 m/s

جدول ۴- مقادیر ثابت معادله هندرسون و پابیس به‌عنوان معادله ریاضی انتخاب شده از بین معادلات ریاضی مورد استفاده برای توصیف سینتیک خشک شدن سنجد و مقادیر آماری

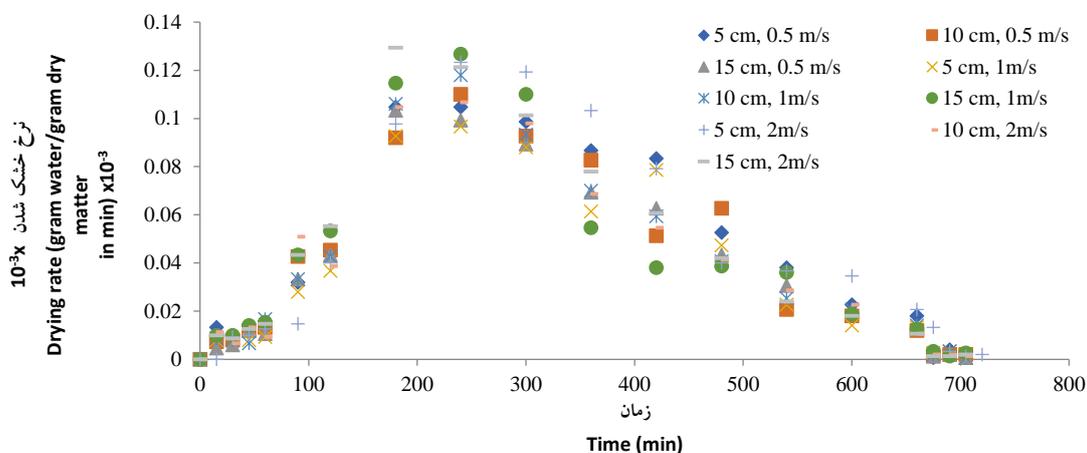
Table 4- Constant values of Henderson and Pabis equation as a mathematical equation selected among the mathematical equations used to describe the drying kinetics of oleaster and statistical values

سرعت جریان هوا Air velocity (m.s <sup>-1</sup> )	فاصله مواد تغییر فاز دهنده Distance between PCM (cm)	ثابت‌ها Constants	R <sup>2</sup>	RMSE
0.5	5	k=0.00019, a=1.905	0.9916	0.03118
	10	k=0.00023, a=1.826	0.9900	0.03145
	15	k=0.00020, a=1.921	0.9906	0.03145
1	5	k=0.0033, a=1.195	0.9957	0.02397
	10	k=0.0036, a=1.193	0.9959	0.02347
	15	k=0.0035, a=1.203	0.9971	0.01946
2	5	k=0.0012, a=1.759, b=-0.67586	0.9842	0.04414
	10	k=0.0014, a=1.650, b=-0.6142	0.9909	0.03721
	15	k=0.0012, a=1.626, b=-0.6201	0.9935	0.03540

### نرخ خشک شدن

نمونه‌ها از بین می‌رود و همین امر باعث تغییر شکل می‌شود. برای مواردی که سرعت خشک شدن بیشتر است، چروکیدگی به سرعت در آخرین دوره اتفاق می‌افتد، به خصوص زمانی که از PCM با گردش هوای بیشتر استفاده می‌شود. علاوه بر این، شکل ۹ نشان داد که سرعت خشک شدن با افزایش سرعت هوا افزایش می‌یابد. با استفاده از PCM و برگرداندن بیشتر جریان هوا، هوا با انرژی حرارتی حجمی بالاتر وارد کابینت شده و در نتیجه رطوبت بیشتری از محصول خارج می‌شود. لازم به ذکر است برای رطوبت‌زدایی از هوای خروجی از کابینت خشک کن از پودر سلیکاژل استفاده گردید که در حین عبور از روی آن رطوبت هوا کاهش یافته و روند رطوبت‌زدایی از محصول انجام می‌گیرد.

تغییر نرخ خشک شدن نسبت به زمان در شرایط مختلف در شکل ۹ نشان داده شده است. در مرحله اولیه خشک شدن محصول نمونه‌های سنجید، میزان تبخیر رطوبت به دلیل محتوای بالای آب در سنجدها زیاد است و بخش عمده‌ای از فرآیند خشک کردن در این دوره اتفاق افتاد. پس از این مدت، رطوبت‌زدایی به دلیل کاهش آب آزاد به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد و با پراکندگی فازهای مایع و بخار، جذب رطوبت اتفاق می‌افتد. عوامل مؤثر در این دوره پدیده مویرگی است که منجر به حرکت مولکول‌های آب به سطح محصول و سپس تبخیر می‌شود (Khazaei *et al.*, 2008). هنگامی که رطوبت‌زدایی نمونه‌ها وارد دوره دوم می‌شود، چروکیدگی رخ می‌دهد. در این صورت رطوبت آزاد از سطح



شکل ۹- تغییرات نرخ خشک شدن میوه سنجید با زمان در فواصل مختلف لوله‌ها با سرعت‌های مختلف

Fig. 9. Variations of the drying rate of Oleaster fruit with time at different distances of the tubes at different air velocities

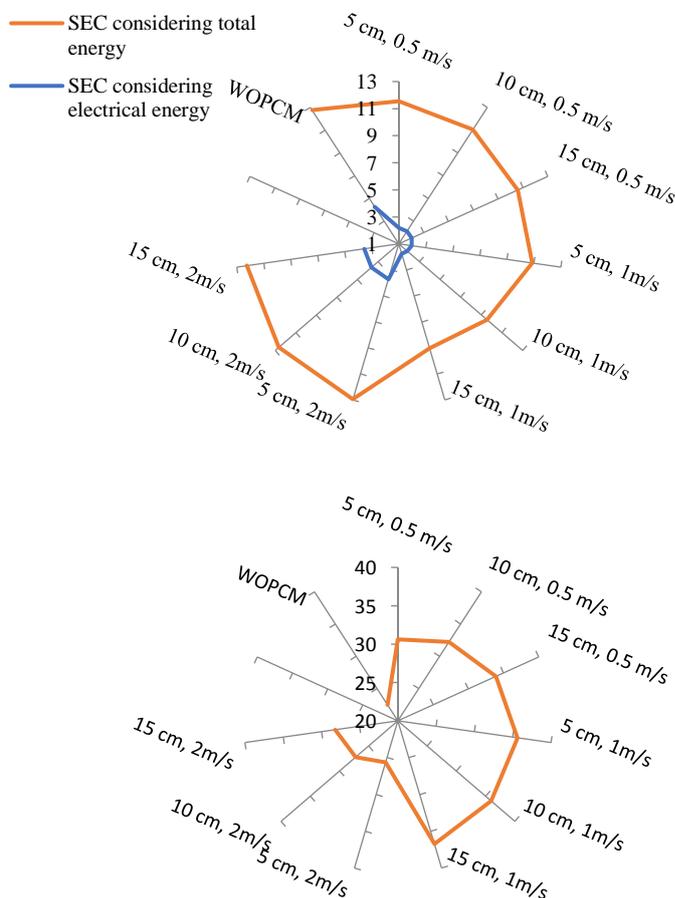
PCM با فواصل لوله ۱۵ cm و سرعت هوای  $1 \text{ m.s}^{-1}$  بود. با افزایش فاصله بین لوله‌ها میزان اتلاف حرارتی در جمع‌کننده کاهش یافته و این انرژی برای خشک شدن محصول وارد کابینت می‌شود. همچنین شکل ۱۰-الف تغییرات SEC را برای سامانه بدون در نظر گرفتن انرژی حرارتی جمع‌آوری شده توسط جمع‌کننده (به‌عنوان انرژی رایگان) برای بررسی تأثیر سایر منابع انرژی بر خشک شدن را نشان می‌دهد. در این حالت، برای شرایط مختلف خشک کردن، مقادیر آن از  $1/75 \text{ MJ.kg}^{-1}$  تا  $3/72$  متغیر است. این مقدار برای حالت بدون مواد تغییر فاز دهنده  $4/26 \text{ MJ.kg}^{-1}$  بود. علاوه بر این، راندمان کلی خشک کن با و بدون PCM در شکل ۱۰-ب نشان داده شده است. مطابق شکل، مشخص است که با افزایش فواصل بین لوله‌ها، بازده خشک کردن به دلیل کاهش زمان و انرژی مصرفی خشک شدن افزایش می‌یابد. در این حالت مصرف انرژی الکتریکی به‌وسیله فن (برای جریان سیال در خشک کن و جمع‌کننده) و انرژی حرارتی ورودی به خشک کن کاهش

### بازده خشک کردن و مصرف انرژی ویژه (SEC)

برای ارزیابی عملکرد سامانه خشک کن خورشیدی مجهز به مواد تغییر فاز دهنده و سامانه جریان بازگشتی از معیارهای مختلفی استفاده می‌شود که مصرف انرژی ویژه SEC و راندمان کلی دو پارامتر معروف برای این منظور هستند. با توجه به شکل ۱۰-الف، واضح است که SEC برای سیستم بدون PCM بیشتر از سایر موارد است و در حالت با ماده تغییر فاز دهنده مقدار آن کاهش می‌یابد. به این معنی که با وجود PCM، انرژی حرارتی و الکتریکی مورد نیاز برای خشک کردن ۱ کیلوگرم سنجید، کاهش محسوسی می‌یابد. علاوه بر آن با افزایش سرعت جریان هوا از  $0/5 \text{ m.s}^{-1}$  به  $1 \text{ m.s}^{-1}$  در سامانه، SEC کاهش می‌یابد. اما با افزایش از  $1 \text{ m.s}^{-1}$  به  $2 \text{ m.s}^{-1}$  مقادیر آن به دلیل مصرف بالای انرژی الکتریکی افزایش می‌یابد. در این حالت با کاهش مدت زمان خشک شدن مقادیر انرژی مصرفی کل تا حدودی نیز کاهش می‌یابد. کمترین مصرف انرژی ویژه ( $9/02 \text{ MJ.kg}^{-1}$ ) مربوط به خشک کن با

۲ بود. بازده خشک شدن با استفاده از ماده تغییر فازدهنده حداقل به میزان ۱۲ درصد بهبود پیدا کرد. نتایج به دست آمده با نتایج تحقیقات دیگر در زمینه استفاده از PCM برای خشک کردن محصولات مختلف تطابقت داشت (Bhardwaj et al., 2020; Barghi et al., 2022).

می‌یابد. هر چند با افزایش سرعت هوا از  $1 \text{ m.s}^{-1}$  به  $2 \text{ m.s}^{-1}$  افت قابل ملاحظه‌ای در بازده خشک کردن به وجود می‌آید. بیشترین بازده خشک کردن به میزان  $36/72\%$  و کمترین آن  $25/65\%$  به ترتیب برای فاصله  $15 \text{ cm}$ ، سرعت هوای  $1 \text{ m.s}^{-1}$  و فاصله  $5 \text{ cm}$ ، سرعت هوای  $2 \text{ m.s}^{-1}$



شکل ۱۰- الف). مقادیر SEC (با در نظر گرفتن انرژی الکتریکی و انرژی کل)، ب) راندمان کلی خشک کردن خورشیدی سنج در شرایط مختلف جریان هوا و فواصل مواد تغییر فازدهنده  
 Fig. 10. a). SEC values (considering electrical energy and total energy), b) overall solar drying efficiency of oleaster at different air flow conditions and phase change material distances

زمان خشک شدن کمتر، راندمان حرارتی بالاتر، بیشترین بازده خشک کردن به میزان  $36/72\%$  و کمترین آن  $25/65\%$  به ترتیب برای فاصله  $15 \text{ cm}$ ، سرعت هوای  $1 \text{ m.s}^{-1}$  و فاصله  $5 \text{ cm}$ ، سرعت هوای  $2 \text{ m.s}^{-1}$  بود. استفاده از PCM منجر به کاهش زمان خشک شدن سنج در حدود  $8/32$  تا  $16/64$  درصد برای موقعیت ماده تغییر فازدهنده  $15 \text{ cm}$  و سرعت  $2 \text{ m.s}^{-1}$  بر ثانیه شد. مصرف انرژی ویژه برای خشک کردن سنج مربوط به خشک‌کن با PCM در حالت قرارگیری ماده تغییر فازدهنده  $15 \text{ cm}$  به اندازه  $14/17$  درصد نسبت به حالت WOPCM کاهش یافت.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق به تجزیه و تحلیل روند حرارتی در سامانه خشک‌کن خورشیدی در سه موقعیت قرارگیری لوله‌های حاوی PCM در داخل جمع‌کننده صفحه تخت برای فواصل  $5$ ،  $10$  و  $15$  سانتی‌متر بین لوله‌ها و سرعت جریان هوا درون سامانه در سه سطح  $0/5$ ،  $1$  و  $2 \text{ m.s}^{-1}$  پرداخته شد. استفاده از سامانه جریان بازگشتی و ماده تغییر فازدهنده به صورت همزمان، باعث بهبود بازده حرارتی جمع‌کننده صفحه تخت به میزان  $19/12$  درصد شد. با توجه به مقدار انرژی حرارتی ذخیره شده و

## References

1. Aghbashlo, M., Kianmehr, H., & Samimi-Akhijahani H. (2008). Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin-layer drying of beriberi fruit (Berberidaceae). *Energy Conversion Management*, 49, 2865–2871. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.03.009>
2. Akbolat, D., Ertekin, C., Menges, H.O., Guzel, E., & Ekinici, K. (2008). Physical and nutritional properties of oleaster growing in Turkey. *Asian Journal of Chemistry*, 20, 2358-2366.
3. Antal, T., Tarek, M., Tarek-Tilistiyak, J., & Kerekes, B. (2016). Comparative effects of three different drying methods on drying kinetics and quality of Jerusalem Artichoke (*Helianthus tuberosus* L.). *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(3), 2374-2385. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12971>
4. Atalay, H. (2020). Assessment of energy and cost analysis of packed bed and phase change material thermal energy storage systems for solar energy-assisted drying process. *Solar Energy*, 198, 124-138. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.01.051>
5. Babar, O., Arora, A.K., Nema, P.K., & Kasara, A. (2021). Effect of PCM assisted flat plate collector solar drying of green chili on retention of bioactive compounds and control of aflatoxins development. *Solar Energy*, 229, 102-111. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.07.077>
6. Barghi, M.S., Iranmanesh, M., & Samimi-Akhijahani, H. (2022). Thermo-economic analysis of solar drying of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) integrated with evacuated tube solar collector and phase change material. *Journal of Energy Storage*, 52, 104688. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104688>
7. Bhardwaj, A.K., Kumar, R., Chauhan, R., & Kumar, S. (2020). Experimental investigation and performance evaluation of a novel solar dryer integrated with a combination of SHS and PCM for drying chilli in the Himalayan region. *Thermal Science and Engineering Progress*, 20, 100713. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100713>
8. Blanco-Cano, L., Soria-Verdugo, A., Garcia-Gutierrez, L.M., & Ruiz-Rivas, U. (2016). Modeling the thin-layer drying process of Granny Smith apples: Application in an indirect solar dryer. *Applied Thermal Engineering*, 108, 1086-1094. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.001>
9. Boudraa, S. (2020). Impact of microwave-grill-drying (MWGD) on functional properties of berry Russian olive (*Elaeagnus angustifolia* L.). *Journal of Bioenergy and Food Science*, 7(1), 1-13. <https://doi.org/10.18067/jbfs.v7i1.275>
10. Chamoli, S., Chauhan, R., Thakur, N.S., & Saini, J.S. (2012). A review of the performance of double pass solar air heater. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 481-492. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.08.012>
11. Dorouzi, M., Mortezapour, H., & Akhavan, H.R. (2018). Tomato slices drying in a desiccant-assisted solar dryer coupled with a photovoltaic-thermal regeneration system. *Solar Energy*, 162, 364-371. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.025>
12. Ebrahimi, H., Samimi Akhijahani, H., & Salami, P. (2021). Improving the thermal efficiency of a solar dryer using phase change materials at different position in the collector. *Solar Energy*, 220, 535-551. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.03.054>
13. El Khadraoui, A., Bouadila, S., Kooli, S., Farhat, A., & Guizani, A. (2017). Thermal behavior of indirect solar dryer: Nocturnal usage of solar air with PCM. *Journal of Cleaner Production*, 148, 37-48. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.149>
14. Eltawil, M., Mostafa, A., Azam, M., & Alghannam, A.O. (2018). Solar PV powered mixed-mode tunnel dryer for drying potato chips. *Renewable Energy*, 116, 594-605. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.007>
15. Esakkimuthu, S., Hassabou, A.H., Palaniappan, C., Spinnler, M., Blumenberg, & Velraj, R. (2013). Experimental investigation on phase change material based thermal storage system for solar air heating applications. *Solar Energy*, 88, 144-153. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.11.006>
16. Gertzos, K.P., & Caouris, Y.G. (2007). Experimental and computational study of the developed flow field in a flat plate integrated collector storage (ICS) solar device with recirculation, Exp. *Thermal Fluid Science*, 31(8), 1133–1145. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2006.12.002>
17. Goyal, R.K., Tiwari, G.N., & Garg, H.P. (1998). Effect of thermal storage on the performance of an air collector: a periodic analysis. *Energy Conversion Management*, 39, 193–202. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(96\)00226-9](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(96)00226-9)
18. Hamidpour, R., Hamidpour, S., Hamidpour, M., Shahlari, M., Sohraby, M., Shahlari, N., & Hamidpour, R. (2017). Russian olive (*Elaeagnus angustifolia* L.): From a variety of traditional medicinal applications to its novel roles as active antioxidant, anti-inflammatory, anti-mutagenic and analgesic agent. *Journal of Traditional and Complementary Medicine*, 7(1), 24-29. <https://doi.org/10.1016/j.jtcme.2015.09.004>
19. Iranmanesh, M., Samimi-Akhijahani, H., & Jahromi, M.S.B. (2020). CFD modeling and evaluation the performance of a solar cabinet dryer equipped with evacuated tube solar collector and thermal storage system. *Renewable Energy*, 145, 1192-1213. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.038>

20. Kalogirou, S.A. (2006). Prediction of flat-plate collector performance parameters using artificial neural networks. *Solar Energy*, 80(3), 248-259. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.03.003>
21. Koca, A., Oztob, H.F., Koyunc, T., & Varol, Y. (2008). Energy and exergy analysis of a latent heat storage system with phase change material for a solar collector. *Renewable Energy*, 33, 567-574. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.03.012>
22. Motahayyer, M., Arabhosseini, A., & Samimi-Akhijahani, H. (2019). Evaluation of solar cabinet dryer equipped heat exchanger and porous plate. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 50, 305-318. <https://doi.org/10.22059/IJBSE.2019.264036.665085>
23. Raj, A.K., Srinivas, M., & Jayaraj, S. (2019). A cost-effective method to improve the performance of solar air heaters using discrete macro-encapsulated PCM capsules for drying applications. *Applied Thermal Engineering*, 146, 910-920. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.10.055>
24. Rashidi, S., Kashefi, M.H., & Hormozi, F. (2018). Potential applications of inserts in solar thermal energy systems – a review to identify the gaps and frontier challenges. *Solar Energy*, 171, 929-52. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.07.017>
25. Rashidi, M., Arabhosseini, A., Samimi-Akhijahani, H., & Kermani, A.M. (2021). Acceleration the drying process of oleaster (*Elaeagnus angustifolia* L.) using reflectors and desiccant system in a solar drying system. *Renewable Energy*, 171, 526-541. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.094>
26. Sahan, Y., Gocmen, D., Cansev, A., Celik, G., Aydin, E., Dunda, N.A., Dugler, D., Kaplan, H.B., Kilci, A., & Guncer, S. (2015). Chemical and techno-functional properties of fours from peeled and unpeeled oleaster (*Elaeagnus angustifolia* L.). *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 88, 34-41. <https://doi.org/10.5073/JABFQ.2015.088.007>
27. Salami, P. (2016). Design and construction of the PVT system to increase the energy efficiency of solar flat plate collector. Ph.D. Thesis, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
28. Serale, G., Goia, F., & Perino, M. (2016). Numerical model and simulation of a solar thermal collector with slurry Phase Change Material (PCM) as the heat transfer fluid. *Solar Energy*, 134, 429-444. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.04.030>
29. Toğrul, I.T., & Pehlivan, D. (2002). Mathematical modeling of solar drying of apricots in thin layers. *Journal of Food Engineering*, 55(3), 209-216. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(02\)00065-1](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00065-1)
30. Tyagi, V.V., Panwar, N.L., Rahim, N.A., & Kothari, R. (2012). Review on solar air heating system with and without thermal storage system. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 16(4), 2289-2303. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.12.005>
31. Wang, Y., Xu, J., Liu, Q., Chen, Y., & Liu, H. (2016). Performance analysis of a parabolic trough solar collector using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/synthetic oil nanofluid. *Applied Thermal Engineering*, 107, 469-78. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.06.170>
32. Yadav, C.O., & Ramana, P.V. (2020). Experimental investigation of the solar dryer using phase-change material. *Renewable Energy and Climate Change*, 161, 185-197. <https://doi.org/10.1007/978-981-32-9578-0.17>



## Investigation of Thermal Stability of Sunflower and Olive Triacylglycerols under the Influence of Gallic Acid and Methyl Gallate

M. Akbari<sup>1</sup>, R. Farhoosh<sup>2\*</sup>, M. Moeenfar<sup>3</sup>

1, 2 and 3- Ph.D. Student, Professor and Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, respectively.

(\*- Corresponding Author Email: [rfarhoosh@um.ac.ir](mailto:rfarhoosh@um.ac.ir))

Received: 15.01.2023  
Revised: 19.06.2023  
Accepted: 25.06.2023  
Available Online: 26.06.2023

### How to cite this article:

Akbari, M., Farhoosh, R., & Moeenfar, M. (2024). Investigation of thermal stability of sunflower and olive triacylglycerols under the influence of gallic acid and methyl gallate. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 20(2), 217-227. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/ifstrj.2023.80273.1228>

### Introduction

Today, many edible oils such as palms, corn, soybeans and sunflowers are used in food preparation. Essential oleic, linoleic and linolenic fatty acids, found abundantly in olive, sunflower and soybean oils, respectively, play an important role in maintaining health. Antioxidant compounds are used to increase the shelf life of oils, which are classified into two groups of natural and synthetic antioxidants based on the source of production. Phenolic acids are a subset of a large group of phenolic compounds that are used as natural antioxidants in industry. Gallic acid is much stronger than protocatechuic acid due to its three hydroxyl groups. However, the presence of more than three hydroxyl groups does not seem to increase the antioxidant effect in oily systems. The position of the hydroxyl group on the aromatic ring also affects the antioxidant activity, so that the replacement of the hydroxyl group in the ortho and para position increases the antioxidant activity of phenolic acids. Methyl gallate, which is widely found in plants and polyphenolic secondary metabolites, is a natural antioxidant. Despite efforts to date, no suitable natural antioxidant has been proposed to control the thermal oxidation of oils at high temperatures. Therefore, due to the widespread use of oils in food, the thermal stability of natural antioxidants gallic acid and methyl-gallate compared to the powerful but synthetic antioxidant TBHQ, depending on the degree of satiety of the lipid system (sunflower oil and olive oil) and 80 degrees Celsius will be evaluated in this study.

### Material and Methods

Samples of sunflower and olive oil were purchased from local stores. All chemicals and solvents were provided by Merck and Charlot. Sunflower and olive oil were purified by column chromatography to remove natural antioxidants. Oxidation of purified sunflower oil (1 g per oil) in the presence of a concentration level of gallic acid, methyl gallate and TBHQ (1.2  $\mu\text{mol/g}$ ) in glass bottles. The rate of progression of oxidative reactions and the evaluation of oil quality during temperature application is possible by measuring the peroxide number. The carbonyl number is determined using 2-propanol as solvent and 2,4 decodenal as standard and absorbance at 420 nm. The effect of antioxidants (InH) on the oxidation of the test samples can be measured based on the kinetic parameters. These parameters are stability factor F, ORR oxidation rate ratio, activity A and average consumption of WInH antioxidants.

### Results and Discussion

The minimum and maximum induction times are related to the control sample and the sample containing the synthetic antioxidant TBHQ, respectively, which, considering the position of the two hydroxyl groups in the para



©2023 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

<https://doi.org/10.22067/ifstrj.2023.80273.1228>

position relative to each other in the TBHQ molecule, make this antioxidant stronger. Justifies. At 80 °C and in sunflower oil, the antioxidant methyl gallate shows a more effective stability factor (F) and antioxidant activity (A), indicating greater antioxidant power than gallic acid. Similarly, F-ORR-A values in methylgallate treatment have a significant effectiveness compared to other treatments. The higher oxidative stability of olive oil against sunflower oils can be attributed to the small amounts of oleic acid and especially the small amounts of linolenic acid in olives. Stability factor (F), is significantly higher for the TBHQ antioxidant than the values obtained for the other two. This factor is affected by the induction period of antioxidants and can be expected due to the effectiveness of antioxidants in increasing the duration of the induction period. The highest value obtained for the ORR oxidation rate parameter, is related to the antioxidant gallic acid. The parameter of antioxidant activity A, in TBHQ is higher than the other two antioxidants. Measurement of carbonyl compounds resulting from the decomposition of hydroperoxides is a good measure of the rate of development of oxidative reactions. In the treatment of gallic acid and TBHQ, the changes in the carbonyl number decrease at the end of the annealing, which is probably due to the decomposition of carbonyl compounds and the production of polymer compounds. Which cannot be measured by carbonyl number test.

## Conclusion

Better efficacy of gallic acid compared to methyl gallate in olive oil and better efficacy of methyl gallate compared to gallic acid in sunflower oil at 80 °C show the composition of fatty acids, the nature of lipid systems and the position of antioxidants in the reaction medium. Have a great effect on improving the performance of antioxidants. Determination of oxidative stability based on carbonyl number shows similar results to peroxide number.

**Keywords:** Oxidative indices, Thermal kinetics, Thermal stability

## مقاله پژوهشی

جلد ۲۰، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۳، ص. ۲۲۷-۲۱۷

# بررسی پایداری حرارتی تری‌آسیل‌گلیسرول‌های آفتابگردان و زیتون تحت تأثیر اسیدگالیک و متیل‌گالات

مژگان اکبری<sup>۱</sup> - رضا فرهوش<sup>۲\*</sup> - مرضیه معین فرد<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۰۴

## چکیده

در پژوهش حاضر، تجزیه و تحلیل سینتیکی رفتار آنتی‌اکسیدانی اسیدگالیک، متیل‌گالات و TBHQ در تری‌آسیل‌گلیسرول‌های روغن‌زیتون و آفتابگردان انجام شد. فرایند اکسایش روغن‌ها در رژیم سینتیکی (غلظت بالای اکسیژن) در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد و در یک سطح غلظتی (۱/۲ میکرو مول بر گرم) در محیط تاریک صورت گرفت. پارامترهای سینتیکی مختلف شامل فاکتور پایداری (F) که نمایانگر میزان کارآمدی، نسبت سرعت اکسایش (ORR) که نمایانگر قدرت، فعالیت آنتی‌اکسیدانی (A) که ترکیب فاکتور پایداری و قدرت مورد بررسی قرار گرفت. پایداری اکسایشی تری‌آسیل‌گلیسرول‌ها به صورت معنی‌داری در حضور آنتی‌اکسیدان‌های افزوده شده در سطح غلظتی و دمایی، نسبت به نمونه کنترل بهبود یافت. در دمای ۸۰ و هر دو نوع تری‌آسیل‌گلیسرید مورد استفاده، قدرت آنتی‌اکسیدانی TBHQ به طور معنی‌داری از اسیدگالیک و متیل‌گالات بیشتر بود. در روغن آفتابگردان، متیل‌گالات قدرت آنتی‌اکسیدانی بیشتری نسبت به اسیدگالیک نشان داد و نتایج به دست آمده با خاصیت حمله بالاتر اسیدگالیک مطابقت نداشت، در حالی که در روغن‌زیتون، اسیدگالیک قدرت آنتی‌اکسیدانی بیشتری نشان داد. زمان لازم برای رسیدن به حد بحرانی عدد کربونیل، برای هر دو نوع تری‌آسیل‌گلیسرول و تمام تیمارها به صورت معنی‌دار نسبت به تیمار کنترل، در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد، بهبود نشان داد و بین دو تیمار اسیدگالیک و متیل‌گالات، متیل‌گالات مؤثرتر بود.

واژه‌های کلیدی: پایداری حرارتی، سینتیک، عددهای اکسیداسیون

## مقدمه

به واکنش‌های اکسایشی از خود نشان می‌دهند (Matalgyto & Al-Khalifa, 1998). اسیدهای چرب ضروری اولئیک، لینولئیک و لینولنیک که به ترتیب در روغن‌های زیتون، آفتابگردان و سویا به فراوانی یافت می‌شوند، نقش مهمی در حفظ سلامت و ادامه حیات دارند و خطر ابتلا به بیماری‌های قلبی-عروقی و سرطان را کاهش می‌دهند. (Matalgyto & Al-Khalifa, 1998). ترکیبات آنتی‌اکسیدانی در جهت افزایش ماندگاری روغن‌ها مورد استفاده می‌باشند، که براساس منشأ تولید به دو گروه آنتی‌اکسیدان‌های طبیعی و سنتزی طبقه‌بندی می‌شوند. آنتی‌اکسیدان‌های به کاررفته در فرآیند مواد غذایی باید ارزان، غیر سمی، مؤثر در غلظت کم، پایدار، و باقی در شرایط فرایند (دارای

امروزه بسیاری از روغن‌های خوراکی نظیر انواع نخل، ذرت، سویا و آفتابگردان صرف آماده‌سازی مواد غذایی می‌شوند. روغن‌های پنبه‌دانه، ذرت، بادام‌زمینی و زیتون حاوی میزان کمی اسیدلینولنیک بوده و منبع مناسبی از نظر اسیدهای چرب چند غیراشباع به شمار می‌روند. روغن‌های خوراکی مختلف حائز درجه سیرناشدگی و ساختار اسیدچربی متفاوتی بوده و کیفیت و کمیت ترکیبات غیرتری‌آسیل‌گلیسرولی آن‌ها نیز باهم فرق دارد (Kamal-Eldin, 2006). برخلاف روغن‌های حیوانی که عمدتاً اشباع هستند و به راحتی با اکسیژن وارد واکنش نمی‌شوند، روغن‌های گیاهی کمتر اشباع‌اند و حساسیت بیشتری نسبت

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی دکتری، استاد و استادیار گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران  
\* - نویسنده مسئول: (Email: [rfarhoosh@um.ac.ir](mailto:rfarhoosh@um.ac.ir))

خصوصیات حملی<sup>۱</sup> باشند. رنگ، طعم و بوی این مواد باید حداقل باشد. انتخاب نوع آنتی‌اکسیدانی که به کار می‌رود به قابلیت محصول و قوانین موجود بستگی دارد (Frankel, 2005). آنتی‌اکسیدان‌ها نه تنها زمان نگهداری محصولات را افزایش می‌دهند بلکه ضایعات مواد خام را نیز کاهش می‌دهند، از بروز افت تغذیه‌ای می‌کاهند و محدوده کاربرد چربی‌ها در محصولات خاص را افزایش می‌دهند. اسیدهای فنلی زیرمجموعه گروه بزرگی از ترکیبات فنلی می‌باشند که به عنوان آنتی‌اکسیدان‌های طبیعی در صنعت کاربرد دارند. ترکیبات فنلی به وسیله‌ی مکانیسم‌های مختلف از قبیل خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد، مهار فلزات و اتصال به پروتئین، خاصیت آنتی‌اکسیدانی خود را اعمال می‌کنند. فعالیت آنتی‌اکسیدانی آن‌ها تنها به خنثی کردن گونه‌های فعال اکسیژن محدود نمی‌شود و اثر سینرژیستی بین آنتی‌اکسیدان‌های مختلف، اثر آنتی‌اکسیدانی آن‌ها را افزایش می‌دهد (Leopoldini, et al., 2004). اسیدگالیک (۳،۴،۵-تری هیدروکسی بنزوئیک اسید)<sup>۲</sup> به عنوان آنتی‌اکسیدان فنلی طبیعی به طور گسترده‌ای در گیاهان از جمله چای و در نوشیدنی‌ها، آجیل، سماق، پوست درخت بلوط و توت‌فرنگی، آناناس، موز، لیمو، انگور قرمز، پوست سیب و سایر گیاهان دارویی مختلف یافت می‌شود (Tanaka, 1999; Borde et al., 2011) و فعالیت ضد باکتری، ضد ویروسی و ضد التهابی آن از طریق مهار فعالیت آنزیم تیروزیناز به اثبات رسیده است (Kim et al., 2006). برخی استرهای اسیدگالیک به موجب خصوصیات آنتی‌اکسیدانی و بیولوژیکی در طیف وسیعی از محصولات غذایی و دارویی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Kanai & Okano, 1998). همچنین مشتقات آسپیل اسیدگالیک در پیشگیری از پراکسایش چربی‌ها در غشاء سلول مؤثر واقع شده‌اند. مکانیسم اصلی آنتی‌اکسیدانی آنتی‌اکسیدان‌های اولیه، گیرندگی رادیکال است. آنتی‌اکسیدان‌های اولیه، مونو و پلی‌هیدروکسی‌فنل‌های حامل استخلاف‌های مختلف هستند. استقرار گروه‌های دهنده الکترون در مواضع اورتو و پارا سبب افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی ترکیب می‌شود. گروه‌های بوتیل و اتیل در مواضع پارا موجب بهبود فعالیت آنتی‌اکسیدانی می‌گردد. به علت ممانعت فضایی، وجود زنجیره‌های بلندتر یا گروه‌های الکیل شاخه‌دار در مواضع پارا بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی اثر منفی می‌گذارد. جانشین شدن گروه‌های الکیل شاخه‌دار در موقعیت اورتو قابلیت آنتی‌اکسیدان‌های فنلی در تشکیل هیبریدهای رزونانسی پایدار را افزایش می‌دهد و به تبع آن شرکت رادیکال آنتی‌اکسیدان را در واکنش‌های انتشار کاهش می‌دهد (Cao et al., 1996; Rice-Evans et al., 1996). متیل‌گالات که به طور گسترده‌ای در گیاهان و متابولیت‌های ثانویه پلی‌فنلی یافت می‌شود به عنوان آنتی‌اکسیدان طبیعی مطرح است. همچنین سایر مشتقات اسیدگالیک نیز در پیشگیری از اکسایش چربی‌ها در غشای سلول مؤثر تشخیص داده شده‌اند.

پروپیل‌گالات (PG) و تریسوبوتیل‌هیدروکینون (TBHQ) است. توکوفرول‌ها و کاروتنوئیدها گروه دیگری از ترکیبات طبیعی هستند که با مکانیسم‌های متفاوتی از فنل‌ها، فعالیت آنتی‌اکسیدانی اولیه دارند. اسیدهای فنلی از جمله آنتی‌اکسیدان‌های طبیعی و مؤثر مطرح در این خصوص محسوب می‌شوند. این ترکیبات از نظر ساختمان شیمیایی از مشتقات اسیدهای بنزوئیک و سینامیک محسوب می‌شوند که ممکن است به شکل آزاد، مزدوج یا استری وجود داشته باشند. وجود یک حلقه فنلی و زنجیره‌های جانبی در ساختمان ملکولی اسیدهای فنلی، توانایی مهار رادیکال‌های آزاد را به آن‌ها بخشیده است (Marinova & Yanishlieva, 1992). توانایی آنتی‌اکسیدانی ترکیبات فنولی به حضور و تعداد گروه‌های هیدروکسیل موجود در آن‌ها بستگی دارد (Pekkarinen et al., 1999; Wanasundara & Shahidi, 2005). پوکورنی (Pokorny, 1988) بیان داشته است اسیدهای فنلی دارای یک عامل هیدروکسیل نسبت به اسیدهای دارای چند عامل هیدروکسیل قدرت آنتی‌اکسیدانی کمتری دارند. اسیدگالیک به دلیل دارا بودن سه گروه هیدروکسیل بسیار قوی‌تر از اسید پروتوکاتچوئیک است. اما به نظر می‌رسد وجود بیش از سه گروه هیدروکسیل اثر آنتی‌اکسیدانی را در سیستم‌های روغنی افزایش نمی‌دهد. موقعیت گروه هیدروکسیل روی حلقه آروماتیک نیز فعالیت آنتی‌اکسیدانی را تحت تأثیر قرار می‌دهد، به طوری که جایگزینی گروه هیدروکسیل در موقعیت اورتو و پارا فعالیت آنتی‌اکسیدانی اسیدهای فنلی را افزایش می‌دهد (Wanasundara & Shahidi, 1998). مرکل و همکاران (Merkl et al., 2010) در بررسی فعالیت آنتی‌اکسیدانی استرهای اسیدپارا هیدروکسی بنزوئیک (پارابن‌ها) در روغن به روش رنسیمت مشاهده کردند فعالیت آنتی‌اکسیدانی با افزایش طول زنجیره استری افزایش می‌یابد. مونو و پلی‌هیدروکسی‌فنل‌های حامل استخلاف‌های مختلف نیز به عنوان آنتی‌اکسیدان‌های اولیه محسوب می‌شوند. گروه‌های بوتیل و اتیل در مواضع پارا موجب بهبود فعالیت آنتی‌اکسیدانی می‌گردند. به علت ممانعت فضایی، وجود زنجیره‌های بلندتر یا گروه‌های الکیل شاخه‌دار در مواضع پارا بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی اثر منفی می‌گذارد. جانشین شدن گروه‌های الکیل شاخه‌دار در موقعیت اورتو قابلیت آنتی‌اکسیدان‌های فنلی در تشکیل هیبریدهای رزونانسی پایدار را افزایش می‌دهد و به تبع آن شرکت رادیکال آنتی‌اکسیدان را در واکنش‌های انتشار کاهش می‌دهد (Cao et al., 1996; Rice-Evans et al., 1996). متیل‌گالات که به طور گسترده‌ای در گیاهان و متابولیت‌های ثانویه پلی‌فنلی یافت می‌شود به عنوان آنتی‌اکسیدان طبیعی مطرح است. همچنین سایر مشتقات اسیدگالیک نیز در پیشگیری از اکسایش چربی‌ها در غشای سلول مؤثر تشخیص داده شده‌اند.

۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ ساعت فعال شده بود به‌طور یکنواخت داخل ستون ریخته شد. مقدار ۹۰ گرم از نمونه‌های روغن به آرامی روی ستون آلومینا منتقل گردید و با برقراری خلأ نمونه‌های روغن از ستون عبور داده شدند. به‌منظور جلوگیری از اکسایش روغن، اطراف ستون کروماتوگرافی و ارلن جمع‌آوری روغن با فویل آلومینیوم کاملاً پوشانده شد (Asnaashari et al., 2014). برای اطمینان از صحت فرایند تخلیص میزان ترکیبات توکوفرولی، فنل و عدد پراکسید روغن‌های تخلیص شده اندازه‌گیری شد.

### آزمون پایداری اکسایشی روغن‌ها در آون

اکسایش روغن تخلیص شده آفتابگردان و زیتون (میزان ۴ گرم از هر روغن) در حضور یک سطح غلظتی اسیدگالیک، متیل‌گالات و TBHQ (۱/۲ میکرو مول بر گرم) در بلیت‌های شیشه‌ای با قطر داخلی ۹ سانتی‌متر و در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد در آون پایش شد. نمونه‌گیری در زمان‌های متوالی (۱۵ دقیقه‌ای) انجام شد و دوره القای تولید هیدروپراکسیدها تعیین گردید. به‌منظور محاسبه دوره القای اکسایش لیپیدی برحسب عدد پراکسید، نمودار تغییرات شاخص‌های مزبور در مقابل زمان ترسیم گردید. سپس، معادلات خطی مرتبط با بخش‌های آغازین و انتشار اکسایش لیپیدی برآزش داده شد و آنگاه دوره‌های القا از تلاقی دادن معادلات خطی یادشده محاسبه گردید. (Farhoosh & Hoseini-Yazdi, 2014).

### عدد پراکسید

میزان پیشرفت واکنش‌های اکسایشی و ارزیابی کیفیت روغن در طی اعمال دما، با اندازه‌گیری فرآورده‌های حاصل از واکنش‌های تخریبی هیدرولیز و اکسایش امکان‌پذیر می‌باشد. در روش مورد استفاده از قابلیت پراکسیدهای لیپیدی در اکسایش یون‌های آهن دو استفاده می‌شود. یون‌های آهن II در شرایط واکنش، کمپلکس رنگی تولید می‌کنند که با روش اسپکتروفتومتری قابل اندازه‌گیری است (Shantha & Decker, 1994).

### عدد کربونیل

عدد کربونیل با استفاده از ۲-پروپانول به‌عنوان حلال و ۲،۴ دکا دی انال به‌عنوان استاندارد و جذب در طول موج ۴۲۰ نانومتر تعیین می‌گردد. در این روش، ترکیبات کربونیلی با ۲، ۴-دی نیتروفیل هیدرازین واکنش داده و مشتقات ۲، ۴-دی نیتروفیل هیدرازون را تشکیل می‌دهد که این ماده به کینوئیدال‌ها تبدیل می‌شود. کینوئیدال‌ها در محلول‌های قلیائی، رنگ شرابی تولید می‌کنند. با اندازه‌گیری جذب

کیکوزاکی و همکاران (Kikuzaki et al., 2002) با بررسی اثر استرهای اسیدگالیک (متیل‌گالات، پروپیل‌گالات، لوریل‌گالات) در متیل‌لینولئات در ۹۰ درجه سانتی‌گراد، به اثربخشی بیشتر متیل‌گالات نسبت به سایر استرهای اسیدگالیک پی بردند. اثنی عشری و همکاران (Asnaashari et al., 2014) نشان دادند پایداری اکسایشی روغن ماهی کیلکا در حضور متیل‌گالات نسبت به اسیدگالیک و توکوفرول در ۵۵ درجه سانتی‌گراد بیشتر می‌باشد. در تحقیقی که قابلیت آنتی‌اکسیدانی اسیدگالیک و متیل‌گالات در برابر تشکیل هیدروپراکسیدهای لیپیدی و ترکیبات قطبی متفاوت در شرایط دمایی ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد، در تری‌آسیل‌گلیسرول‌های روغن آفتابگردان مورد ارزیابی قرار گرفت، مشخص شد ترکیبات فنلی طبیعی اسیدگالیک و متیل‌گالات نسبت به آنتی‌اکسیدان سنتزی و قدرتمند TBHQ در دماهای بالا قابلیت جلوگیری از اکسایش کلی بهتری دارند. علی‌رغم فعالیت آنتی‌اکسیدانی ضعیف‌تر اسیدگالیک در دماهای پائین، در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد فعالیت آنتی‌اکسیدانی بالاتری نشان داد (Farhoosh & Nystrom, 2018). با توجه به اهمیت حفظ کیفیت روغن‌ها در برابر تنش حرارتی، محققان آنتی‌اکسیدان‌های مختلفی را مورد بررسی قرار داده‌اند که از آن جمله می‌توان به استفاده از پلی‌فنل‌ها و فلاونوئیدها اشاره کرد. به‌رغم تلاش‌های صورت گرفته تاکنون آنتی‌اکسیدان طبیعی مناسب برای کنترل اکسایش حرارتی روغن‌ها در دمای بالا پیشنهاد نشده است. لذا با توجه به کاربرد گسترده روغن‌ها در مواد غذایی، پایداری حرارتی آنتی‌اکسیدان‌های طبیعی اسیدگالیک و متیل‌گالات نسبت به آنتی‌اکسیدان قدرتمند اما سنتزی TBHQ به تبعیت از درجه سیرناشدگی سیستم لیپیدی (روغن آفتابگردان و روغن زیتون) و درجه حرارت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد در این تحقیق مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

## مواد و روش‌ها

### مواد اولیه

نمونه روغن آفتابگردان و زیتون از فروشگاه‌های محلی خریداری شدند. تمام مواد شیمیایی و حلال‌های مورد استفاده از قبیل آلومینا ۶۰، در این پژوهش از درجه آنالیتیکال بودند و از شرکت‌های مرک و شارلو تأمین شدند. آزمون‌ها در محل آزمایشگاه تجزیه دانشگاه انجام گرفت.

### تخلیص روغن

به‌منظور حذف آنتی‌اکسیدان‌های طبیعی، روغن آفتابگردان و زیتون به روش کروماتوگرافی ستونی تخلیص گردیدند (Marinova & Yanishlieva, 1995). بدین‌صورت که انتهای ستون شیشه‌ای کروماتوگرافی با قطر داخلی ۲/۵ سانتی‌متر و طول ۵۲ سانتی‌متر به ارلن خلا متصل شد. ۱۰۰ گرم آلومینا ۶۰ (نوع ۱ فعال خنثی) که در دمای

سرعت‌های اکسایش از  $meq\ kg^{-1}h^{-1}$  به  $MS^{-1}$  توسط معادله (۳) مجدداً محاسبه می‌شوند (Marinova & Yanishlieva, 1992). اکتیویته (A) پارامتر معمولی است که پارامترهای F و ORR را به هم مرتبط می‌کند:

$$1meqkg^{-1}h^{-1} = 1.4 \times 10^{-7}MS^{-1} \quad (3)$$

$$A = F/ORR \quad (4)$$

در نهایت با بررسی و تجزیه و تحلیل پارامترهای یاد شده می‌توان روند فعالیت آنتی‌اکسیدان‌های مورد مطالعه در دمای مشخص شده را در سیستم‌های لیپیدی تحت مطالعه تعیین نمود (Denisove & Khudyakov, 1987).

### تجزیه و تحلیل آماری

همه اندازه‌گیری‌ها در ۳ تکرار انجام شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها برای صفات اندازه‌گیری شده بر اساس طرح‌های کاملاً تصادفی انجام شد. میانگین صفات کمی با استفاده از آزمون دانکن در سطح معنی‌داری ۵ درصد مقایسه شدند. تجزیه‌های آماری با استفاده از نرم‌افزارهای SPSS و نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel رسم گردید (Asnaashari et al., 2014).

### نتایج و بحث

پارامترهای سینتیکی اندازه‌گیری شده در روغن آفتابگردان در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد در جدول ۱ و روغن زیتون در جدول ۲ نشان داده شده است.

محلول، ترکیبات کربونیل تعیین مقدار می‌شود. (Endo et al., 2001) حد مجاز عدد کربونیل یک روغن سرخ‌کردنی مستعمل کمتر یا مساوی ۴۳/۵ میکرو مول بر گرم گزارش شده است. (Farhoosh & Tavasoli, 2011)

### پارامترهای سینتیکی اکسایش

اثر آنتی‌اکسیدان‌ها (InH) بر اکسایش نمونه‌های مورد آزمایش بر پایه پارامترهای سینتیکی که اکسایش لیپیدها را در طول مراحل اولیه مشخص می‌کنند، قابل اندازه‌گیری است. این پارامترها عبارت‌اند از فاکتور پایداری (F)، نسبت سرعت اکسایش (ORR)، فعالیت (A) و متوسط مصرف آنتی‌اکسیدان ( $W_{InH}$ ) که نحوه محاسبه آن‌ها در ادامه ذکر شده است (Yanishlieva et al., 1999; Farhoosh, 2005). پارامتر (F) به عنوان احتمال توقف فرآیند رادیکالی زنجیره‌ای به وسیله مهارکنندگی رادیکال‌های پراکسید شناخته می‌شود. این پارامتر مسئول مدت دوره القا (IP) می‌باشد:

$$F = IP_{inh}/IP_0 \quad (1)$$

که  $IP$ ،  $IP_0$  و  $IP_{inh}$  در حضور و غیاب آنتی‌اکسیدان می‌باشند. هر چه مقدار F بیشتر باشد یعنی آنتی‌اکسیدان اثربخش‌تر است. ORR معکوس معیار قدرت است که آن را نسبت سرعت اکسایش نیز می‌نامند و هر چه مقدار آن کمتر باشد آنتی‌اکسیدان قوی‌تر است. اگر مقدار آن از یک بیشتر باشد، آنتی‌اکسیدان یک پراکسیدان محسوب می‌شود:

$$ORR = W_{inh}/W_0 \quad (2)$$

که  $W_0$  و  $W_{inh}$  سرعت اکسایش در حضور و غیاب آنتی‌اکسیدان است (تاژانت مرحله آغازین خطی منحنی سینتیک اکسایش لیپید)

جدول ۱- پارامترهای سینتیکی روغن آفتابگردان در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد\*

Table 1- Kinetics parameter of sunflower oil at 80°C (the mean difference at the 0.05% level is significant)

AH Type	AH (mM) غلظت آنتی اکسیدان	IP (min) دوره القا	$K_{ip}$ (mMh <sup>-1</sup> ) شیب نمودار غلظت هیدروپراکسید نسبت به زمان	[LOOH]m ax (mM) حداکثر غلظت هیدروپراکسید	F فاکتور پایداری	ORR (10 <sup>-3</sup> ) نسبت سرعت اکسایش	A فعالیت
CONTROL	0	265 <sup>a</sup> ±0.44	9.81 <sup>d</sup> ±0.06	196 <sup>d</sup> ±2	0	0	0
GA	1.2	2252 <sup>b</sup> ±3	0.22 <sup>c</sup> ±0.00	131 <sup>b</sup> ±2	8.49 <sup>a</sup> ±0.02	23 <sup>b</sup> ±0.04	368 <sup>a</sup> ±9
MG	1.2	2523 <sup>c</sup> ±3	0.22 <sup>b</sup> ±0.00	159 <sup>c</sup> ±0.4	9.51 <sup>b</sup> ±0.02	22.8 <sup>b</sup> ±0.023	416 <sup>a</sup> ±3
TBHQ	1.2	5402 <sup>d</sup> ±6	0.08 <sup>a</sup> ±0.00	113 <sup>a</sup> ±0.58	20.3 <sup>c</sup> ±0.0	8.1 <sup>a</sup> ±0.35	2501 <sup>b</sup> ±104

\* (اختلاف میانگین‌ها<sup>۱</sup> در سطح ۰/۰۵٪ معنی‌دار است)

جدول ۲- پارامترهای سینتیکی روغن زیتون در دمای ۸۰ درجه سانتی گراد

Table 2- Kinetics parameter of olive oil at 80°C (the mean difference at the 0.05% level is significant)

AH Type نوع آنتی اکسیدان	AH (mM) غلظت آنتی اکسیدان	IP (min) دوره القا	$K_{ip}$ (mMh <sup>-1</sup> ) شیب نمودار غلظت هیدروپراکسید نسبت به زمان	[LOOH]m ax (mM) حداکثر غلظت هیدروپراکسید	F فاکتور پایداری	ORR (10 <sup>-3</sup> ) نسبت سرعت اکسایش	A فعالیت
CONTROL	0	1052 <sup>a</sup> ±0.78	0.61 <sup>d</sup> ±0.01	94.7 <sup>a</sup> ±0.7	0	0	0
GA	1.2	4313 <sup>c</sup> ±8	0.09 <sup>b</sup> ±0.00	111 <sup>c</sup> ±1	4.09 <sup>b</sup> ±0.00	0.15 <sup>b</sup> ±0.00	26.8 <sup>a</sup> ±0.4
MG	1.2	3443 <sup>b</sup> ±10	0.12 <sup>c</sup> ±0.00	120 <sup>d</sup> ±1	3.27 <sup>a</sup> ±0.00	0.19 <sup>c</sup> ±0.00	16.5 <sup>a</sup> ±0.2
TBHQ	1.2	11188 <sup>d</sup> ±44	0.01 <sup>a</sup> ±0.0	104 <sup>b</sup> ±1	10.6 <sup>c</sup> ±0.0	0.02 <sup>a</sup> ±0.00	363 <sup>b</sup> ±10

\* (اختلاف میانگین ها در سطح ۰/۰۵٪ معنی دار است)

از دیدگاه ساختار اسید چربی را می توان به روغن زیتون نسبت داد. پایین بودن پایداری اکسایشی روغن آفتابگردان را می توان به بالا بودن میزان PUFA و نیز پایین بودن میزان تک غیر اشباع (MUFA) آن نسبت داد. بر طبق پایداری اکسایشی تری آسیل گلیسرول ها، روغن زیتون بیشترین پایداری حرارتی در تشکیل محصولات اولیه (هیدروپراکسیدها) و ثانویه اکسایش را داراست و روغن آفتابگردان به طور قابل توجهی ناپایدارتر از زیتون می باشد. پایداری اکسایشی بیشتر روغن زیتون در برابر روغن های آفتابگردان را می توان به مقادیر جزئی بیشتر اسید اولئیک و به ویژه مقادیر جزئی اسید لینولنیک در زیتون مرتبط دانست. سرعت اکسایش نسبی اسیدهای اولئیک، لینولنیک و لینولنیک به ترتیب ۱:۱۲:۲۵ گزارش شده است (Hsieh & Kinsella, 1980). از مقایسه مقادیر زمان القا، شیب نمودار در ناحیه خطی ( $K_{IP}$ ) در دو نمونه روغن آفتابگردان و زیتون، مشاهده می شود روغن زیتون به علت بالا بودن مقدار اسیدهای چرب تک غیر اشباع، پایداری اکسایشی بالاتری نسبت به روغن آفتابگردان نشان می دهد. طول دوره القا (مدت زمان لازم برای انتقال واکنش از فاز آغازین به فاز انتشار) به عنوان معیاری مناسب برای اندازه گیری کمی پایداری اکسایشی سیستم های لیپیدی در نظر گرفته می شود. تغییرات عدد پراکسید در برابر زمان نشان می دهد سرعت تشکیل هیدروپراکسیدها در زمان خاص به یک باره دچار تغییر شده، شروع به افزایش می کند که این بیانگر انتقال واکنش از فاز آغازین به فاز انتشار می باشد (Farhoosh, 2016) هر دو آنتی اکسیدان اسیدگالیک و متیل گالات دارای سه گروه هیدروکسیل متصل به حلقه آروماتیک هستند با این تفاوت که در متیل گالات یک گروه متیل استر جایگزین گروه کربوکسیلی شده است. گروه های هیدروکسیل در متیل گالات به دلیل وجود گروه متیل استر، آنتالپی تفکیک پیوند کمتری دارند و در نتیجه قدرت الکترون دهنده گی بیشتری از خود نشان می دهند (Farhoosh & Nystrom, 2018; Asnaashari et al., 2014) پارامترهای سینتیکی مربوط به اثر آنتی اکسیدان ها بر سرعت تشکیل هیدروپراکسیدها در روغن آفتابگردان در جدول ۱ نشان داده شده اند. فاکتور پایداری (F) که توانایی آنتی اکسیدان ها در متوقف

همان طور که در جدول ۱ و ۲ مشاهده می شود، کمترین و بیشترین زمان القا، به ترتیب مربوط به نمونه کنترل و نمونه حاوی آنتی اکسیدان سنتزی TBHQ می باشد که با عنایت به قرارگیری دو گروه هیدروکسیل در موقعیت پارا نسبت به هم در ملکول TBHQ، قوی تر بودن این آنتی اکسیدان را توجیه می کند. در دمای ۸۰ درجه سانتی گراد و در روغن آفتابگردان، آنتی اکسیدان متیل گالات، فاکتور پایداری (F) و فعالیت آنتی اکسیدانی (A) اثربخش تری را نشان می دهد که نشان دهنده قدرت آنتی اکسیدانی بیشتر از اسیدگالیک، می باشد. وجود گروه متیل استخلافی در کربوکسیل ملکول متیل گالات، منجر به افزایش تشکیل پیوند هیدروژنی درون ملکولی شده و در نتیجه خاصیت آنتی اکسیدانی مناسب تری را به وجود می آورد. هر چند به علت اختلاف کم قدرت آنتی اکسیدانی بین دو ملکول اسیدگالیک و متیل گالات، سرعت اکسایش در حضور این دو آنتی اکسیدان معنی دار نمی باشد. در روغن زیتون، کمترین و بیشترین مقدار غلظت هیدروپراکسید، مربوط به نمونه کنترل و تیمار متیل گالات می باشد. به همین ترتیب مقادیر F-ORR-A در تیمار متیل گالات، اثربخشی قابل ملاحظه ای نسبت به تیمارهای دیگر دارد. در تحقیقات انجام شده مقدار اسیدهای چرب چند غیر اشباع (PUFA) به ترتیب به روغن های آفتابگردان (۵۵/۲۲ درصد) و زیتون (۹/۲۸ درصد) اختصاص داشت. اسیدهای لینولنیک و اولئیک، اسیدهای چند غیر اشباع و تک غیر اشباع عمده روغن آفتابگردان و زیتون بودند (به ترتیب ۵۴/۶۰ و ۲۷/۸۶ درصد و ۸/۶۷ و ۶۸/۰۴ درصد). روغن آفتابگردان حاوی بیشترین میزان اسید چرب چند غیر اشباع لینولنیک در بین روغن های مورد مطالعه بود و پس از آن از این حیث، روغن زیتون قرار گرفت. میزان بالای اسیدهای چرب چند غیر اشباع سبب افزایش اکسایش پذیری روغن ها و در نتیجه کاهش پایداری آن ها می شود. نسبت اسیدهای چرب چند غیر اشباع به اشباع (PUFA/SFA) در روغن آفتابگردان و روغن زیتون، به ترتیب ۳/۳۹ و ۰/۴۸ درصد بود. این نسبت معمولاً به عنوان معیاری از میزان سیرناشدگی روغن ها و چربی ها و نیز تمایل آن ها به خود اکسایش لیپیدی در نظر گرفته می شود (Mendez et al., 1996). از این رو، بیشترین میزان پایداری اکسایشی

کردن زنجیره رادیکالی اکسایش به‌وسیله ایجاد برهمکنش‌های مختلف با رادیکال پراکسید نشان می‌دهد، برای آنتی‌اکسیدان TBHQ به‌طور معنی‌دار، بالاتر از مقادیر به‌دست‌آمده برای دو آنتی‌اکسیدان دیگر می‌باشد. این فاکتور متأثر از دوره القای آنتی‌اکسیدان‌ها می‌باشد و با توجه به اثربخشی آنتی‌اکسیدان‌ها در افزایش طول دوره القا، قابل‌انتظار می‌باشد. بالاترین مقدار به‌دست‌آمده در مورد پارامتر سرعت اکسایش ORR، که شرکت آنتی‌اکسیدان در سایر واکنش‌ها را نشان می‌دهد، مربوط به آنتی‌اکسیدان اسیدگالیک می‌باشد. پارامتر فعالیت آنتی-اکسیدانی A که نشانگر کارایی کلی آنتی‌اکسیدان‌ها است در TBHQ بالاتر از دو آنتی‌اکسیدان دیگر می‌باشد. در خصوص فعالیت اسیدهای دی‌هیدروکسی بنزوئیک در برابر رادیکال‌های پراکسیل به روش انتقال هیدروژن، دو خصوصیت مهم ساختمانی مطرح است: اول این که گروه هیدروکسیلی که قرار است اتم هیدروژن را انتقال دهد باید در موقعیت متا نسبت به گروه کربوکسیل باشد و دوم این که این گروه هیدروکسیل باید در موقعیت پارا یا اورتو نسبت به سایر گروه‌های هیدروکسیل قرار گیرد (Pe´rez-Gonzalez et al., 2014). محققان گزارش نموده‌اند عملکرد آنتی‌اکسیدان‌ها به عوامل مختلفی از جمله برهمکنش آن با محیط اکسایشی، روغن یا امولسیون، بستگی دارد. بر طبق پدیده‌ای که به تناقض قطبی<sup>۱</sup> از آن یاد می‌شود، آنتی‌اکسیدان‌های قطبی در محیط‌های روغنی تا امولسیونی مؤثرتر واقع می‌شوند (Huang et al., 1994; Frankel et al., 1996). تأثیر قطبیت آنتی‌اکسیدان‌ها بر عملکرد آن‌ها در سیستم‌های آبی-لیپیدی توسط پورتر (Porter, 1993) مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاکی از آن بود فعالیت آنتی‌اکسیدان‌های غیر قطبی در مقایسه با آنتی‌اکسیدان‌های قطبی در سیستم‌های پراکنده حاوی فسفولیپید بیشتر است که این اثر را تناقض قطبی نامید. همچنین در مقابل، آنتی‌اکسیدان‌های قطبی عملکرد بهتری در سیستم خالص روغنی تا آنتی‌اکسیدان‌های غیر

قطبی داشتند. اسیدگالیک به‌دلیل دارا بودن تعداد کافی گروه‌های هیدروکسیل تمایل زیادی به فاز آبی نشان می‌دهد که این امر نشان‌دهنده قطبیت بالای آن است (Mattia et al., 2009). در سیستم روغنی، فعالیت آنتی‌اکسیدان‌ها بسته به قطبیت این ترکیبات و نیز توانایی هیدروژن دهنده‌گی آن‌هاست و آنتی‌اکسیدان‌های هیدروفیل در سطح مشترک روغن-هوا قرار می‌گیرند و لذا بهتر قادر به محافظت روغن در مقابل اکسایش می‌باشند، نسبت به آنتی‌اکسیدان‌های غیر قطبی که در فاز روغن پراکنده می‌شوند (Zhu et al., 2013). طبق نظریه تناقض قطبی، متیل‌گالات با وجود قدرت مهارکنندگی ضعیف‌تر رادیکال آزاد نسبت به اسیدگالیک، اما به‌دلیل قطبیت کمتر در مقایسه با اسیدگالیک، در سیستم امولسیونی بهتر از اسیدگالیک عمل نمود (Asnaashari et al., 2014). هیدروپراکسیدها محصولات اولیه اکسایش لیپیدی می‌باشند که به‌دلیل پایداری کم از طریق مکانیسم‌های تجزیه‌ای مختلف، ترکیبات کربونیل با پایداری بالاتر را به وجود می‌آورند. اندازه‌گیری ترکیبات کربونیل حاصل از تجزیه هیدروپراکسیدها، معیار مناسبی برای سنجش میزان توسعه واکنش‌های اکسایشی است. اندازه‌گیری این ترکیبات اهمیت بسیار بالایی در سنجش تندی و ایمنی روغن‌های گیاهی در فرآیندهای حرارتی دارند. تغییرات عدد کربونیل حین آون‌گذاری برای همه نمونه‌های روغن، روند افزایشی نشان داد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود زمان لازم برای رسیدن به عدد کربونیل بحرانی در دو تیمار اسیدگالیک و TBHQ، بیشتر بوده و در نتیجه عملکرد بهتری داشتند. در تیمار اسیدگالیک و TBHQ، تغییرات عدد کربونیل، در انتهای آون‌گذاری با کاهش روبرو می‌شود که احتمالاً ناشی از تجزیه ترکیبات کربونیل و تولید ترکیبات پلیمری است. که با آزمون عدد کربونیل قابل‌اندازه‌گیری نیستند.

جدول ۳- عدد کربونیل روغن آفتابگردان در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد (اختلاف میانگین‌ها در سطح ۰/۰۵٪ معنی‌دار است)  
Table 3- Carbonyl index of sunflower oil at 80°C (the mean difference at the 0.05% level is significant)

AH Type	AH (mM)	IP (min)	T <sub>43.5</sub> (min)	CV <sub>IP</sub> (mMg <sup>-1</sup> )
نوع آنتی‌اکسیدان	غلظت آنتی‌اکسیدان	دوره القا	زمان لازم برای رسیدن به عدد کربونیل ۴۳/۵	عدد کربونیل در دوره القا
CONTROL	0	265 <sup>a</sup> ±0.44	351 <sup>a</sup> ±1	28.8 <sup>c</sup> ±0.0
GA	1.2	2252 <sup>b</sup> ±3	3001 <sup>c</sup> ±16	21.8 <sup>a</sup> ±0.8
MG	1.2	2523 <sup>c</sup> ±3	2936 <sup>b</sup> ±9	29.9 <sup>d</sup> ±0.0
TBHQ	1.2	5402 <sup>d</sup> ±6	6639 <sup>d</sup> ±47	23.2 <sup>b</sup> ±0.7

جدول ۴- عدد کربونیل روغن زیتون در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد (اختلاف میانگین‌ها در سطح ۰/۰۵٪ معنی‌دار است)

Table 4- Carbonyl index of olive oil at 80°C (the mean difference at the 0.05% level is significant)

AH Type	AH (mM)	IP (min)	T <sub>43.5</sub> (min)	CV <sub>IP</sub> (mMg <sup>-1</sup> )
نوع آنتی‌اکسیدان	غلظت آنتی‌اکسیدان	دوره القا	زمان لازم برای رسیدن به عدد کربونیل ۴۳/۵	عدد کربونیل در دوره القا
CONTROL	0	1052 <sup>a</sup> ±0.78	1221 <sup>a</sup> ±10	26.8 <sup>b</sup> ±1.0
GA	1.2	4313 <sup>c</sup> ±8	4932 <sup>c</sup> ±51	26.5 <sup>b</sup> ±1.1
MG	1.2	3443 <sup>b</sup> ±10	4560 <sup>b</sup> ±31	20.5 <sup>a</sup> ±2.8
TBHQ	1.2	11188 <sup>d</sup> ±44	13092 <sup>d</sup> ±143	26.5 <sup>b</sup> ±1.5

### نتیجه‌گیری

اثر بخشی بهتر اسید گالیک در مقایسه با متیل گالات در روغن زیتون و اثر بخشی بهتر متیل گالات در مقایسه با اسید گالیک در روغن آفتابگردان تحت دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد، نشان می‌دهد ترکیب اسید چرب، ماهیت سیستم‌های لیپیدی و موقعیت قرارگیری آنتی‌اکسیدان‌ها

در محیط واکنش، تأثیر بسزایی در بهبود عملکرد آنتی‌اکسیدان‌ها دارند. تعیین پایداری اکسایشی بر اساس عدد کربونیل، نتایج مشابهی با عدد پراکسید نشان می‌دهد و تیمارهای با عملکرد بهتر در به تأخیر انداختن دوره القا، عملکرد به‌مراتب بهتری در کاهش تولید ترکیبات کربونیل از خود نشان دادند.

### References

- Asnaashari, M., Farhoosh, R., & Sharif, A. (2014). Antioxidant activity of gallic acid and methyl gallate in triacylglycerols of Kilka fish oil and its oil-in-water emulsion. *Food Chemistry*, 159, 439-444. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.03.038>
- Baccouri, O., Guerfel, M., Baccouri, B., Cerretani, L., Bendini, A., Lercker, G., Zarrouk, M., & Daoud Ben Miled, D. (2008). Chemical composition and oxidative stability of Tunisian monovarietal virgin olive oils with regard to fruit ripening. *Food Chemistry*, 109, 743-754. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.01.034>
- Becker, E.M., Nissen, L.R., & Skibsted, L.H. (2004). Antioxidant evaluation protocols: food quality or health effects. *European Food Research and Technology*, 219, 561-571. <https://doi.org/10.1007/s00217-004-1012-4>
- Bendary, E., Francis, R.R., Ali, H.M.G., Sarwat, M.I., & Hady, S.EI. (2013). Antioxidant and structure-activity relationships (SARs) of some phenolic and anilines compounds. *Annals of Agricultural Science*, 58, 173-181. <https://doi.org/10.1016/j.aos.2013.07.002>
- Borde, V., UPangrikar, P.P., & Tekale, S.U. (2011). Gallic acid in ayurvedic herbs and formulations. *Recent Research in Science and Technology*, 3(7), 51-54.
- Budilarto, E.S., & Kamal-Eldin, A. (2015). The supramolecular chemistry of lipid oxidation and antioxidation in bulk oils (accepted article). *European Journal of Lipid Science and Technology*, 1-74. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201400200>
- Cao, G., Sofic, E., & Prior, R.L. (1997). Antioxidant and prooxidant behavior of flavonoids: Structure-activity relationships, 22(5), 749-760. [https://doi.org/10.1016/s0891-5849\(96\)00351-6](https://doi.org/10.1016/s0891-5849(96)00351-6)
- Chaiyasit, W., McClements, D.J., & Decker, E.A. (2005). The relationship between the physicochemical properties of antioxidants and their ability to inhibit lipid oxidation in bulk oil and oil-in-water emulsions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(12), 4982-8. <https://doi.org/10.1021/jf0501239>
- Choe, E., & Min, D.B. (2009). Mechanisms of antioxidants in the oxidation of foods. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 8, 345-358. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2009.00085>
- Cuvelier, M.E., Richard, H., & Berset, C. (1992). Comparison of the antioxidative activity of some acid-phenols: structure-activity relationship. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 56(2), 324-325. <https://doi.org/10.1271/bbb.56.324>
- Denisove, E., & Khudyakov, I. (1987). Mechanism of action and reactivities of the free radicals of inhibitors. *Chemical Reviews*, 87, 1313-1357. <https://doi.org/10.1021/cr00082a003>
- Endo, Y., Li, C.M., Tagiri-Endo, M., & Fugimoto, K. (2001). A modified method for the estimation of total carbonyl compounds in heated and frying oils using 2-propanol as a solvent. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 10, 1021-1024. <https://doi.org/10.1007/s11746-001-0381-1>
- Farhoosh, R. (2005). Antioxidant activity and mechanism of action of butein in linoleic acid. *Food Chemistry*, 93, 633-639. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.10.041>
- Farhoosh, R. (2007). The effect of operational parameters of the Rancimat method on the determination of the oxidative stability measures and shelf life of soybean oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 84, 205-209. <https://doi.org/10.1007/s11746-006-1030-4>

15. Farhoosh, R., Niazmand, R., Rezaei, M., & Sarabi, M. (2008). Kinetic parameter determination of vegetable oil oxidation under rancimat test conditions. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 110, 587-592. <https://doi.org/10.1002/ejlt.200800004>
16. Farhoosh, R., & Tavasoli Kafrani, M.H. (2011) Simultaneous monitoring of conventional qualitative indicators during frying of sunflower oil. *Food Chemistry*, 125, 209-213. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.08.064>
17. Farhoosh, R., & Hoseini-Yazdi, S.Z. (2013). Shelf-life prediction of olive oils using empirical models developed at low and high temperatures. *Food Chemistry*, 141, 557-565. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.03.024>
18. Farhoosh, R., & Hoseini-Yazdi, S.Z. (2014). Evolution of oxidative values during Kinetic studies on olive oil oxidation in the Rancimat test. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 91(2), 281-293. <https://doi.org/10.1007/s11746-013-2368-z>
19. Farhoosh, R., Johnny, S., Asnaashari, M., Molaahmadibahraseman, N., & Sharif, A. (2016a). Structure-antioxidant activity relationships of *o*-hydroxyl, *o*-methoxy, and alkyl ester derivatives of *p*-hydroxybenzoic acid. *Food Chemistry*, 194, 128-134. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.08.003>
20. Farhoosh, R., Sharif, A., Asnaashari, M., Johnny, S., & Molaahmadibahraseman, N. (2016b). Temperature-dependent mechanism of antioxidant activity of *o*-hydroxyl, *o*-methoxy, and alkyl ester derivatives of *p*-hydroxybenzoic acid in fish oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 93, 555-567. <https://doi.org/10.1007/s11746-016-2790-0>
21. Farhoosh, R., & Nystrom, L. (2018). Antioxidant potency of gallic acid, methyl gallate and their combinations in sunflower oil triacylglycerols at high temperature. *Food Chemistry*, 244, 29-35. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.10.025>
22. Frankel, E.N. (1980). Lipid oxidation. *Progress in Lipid Research*, 19, 1-22. [https://doi.org/10.1016/0163-7827\(80\)90006-5](https://doi.org/10.1016/0163-7827(80)90006-5)
23. Frankel, E.N. (2005). *Lipid oxidation*. The Oily Press LTD. Dundee, Scotland.
24. Frankel, E.N., Huang, S.W., Kanner, J., & German, J.B. (1994). Interfacial phenomena in the evaluation of antioxidants: bulk oils vs. emulsions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 42, 1054-1059. <https://doi.org/10.1021/jf00041a001>
25. Hsieh, R.J., & Kinsella, J.E. (1980). Oxidation of polyunsaturated fatty acids: mechanisms, products, and inhibition with emphasis on fish. *Advances in Food and Nutrition Research*, 33, 233-341. [https://doi.org/10.1016/S1043-4526\(08\)60129-1](https://doi.org/10.1016/S1043-4526(08)60129-1)
26. Huang, S.W., Frankel, E.N., Schwarz, K., Aeschbach, R., & German, J.B. (1996). Antioxidant activity of carnosic acid and methyl carnosate in bulk oils and oil-in-water emulsions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 44, 2951-2956. <https://doi.org/10.1021/jf960068r>
27. Kamal-Eldin, A. (2003). *Lipid oxidation pathways*. AOCS Press: USA. <https://doi.org/10.1201/9781003040316>
28. Kikuzaki, H., Hisamoto, M., Hirose, K., Akiyama, K., & Taniguchi, H. (2002). Antioxidant properties of ferulic acid and its related compounds, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50, 2161-2168. <https://doi.org/10.1021/jf011348w>
29. Kim, S.H., Jun, C.D., Suk, K., Choi, B.J., Lim, H., Park, S., Lee, S.H., Shin, H.Y., Kim, D.K., & Shin, T.Y. (2006). Gallic acid inhibits histamine release and pro-inflammatory cytokine production in mast cells. *Toxicol Science*, 91, 123-131. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfj063>
30. Leopoldini, M., Pitarch, I.P., Russo, N., & Toscano, M. (2004a). Structure, conformation and electronic properties of apigenin, luteolin, and taxifolin antioxidants. A first principle theoretical study. *The Journal of Physical Chemistry A*, 108, 92-96. <https://doi.org/10.1021/jp035901j>
31. Leopoldini, M., Marino, T., Russo, N., & Toscano, M. (2004b). Antioxidant properties of phenolic compounds: H-atom versus electron transfer mechanism. *The Journal of Physical Chemistry A*, 108, 4916-4922. <https://doi.org/10.1021/jp037247d>
32. Leopoldini, M., Russo, N., & Toscano, M. (2011). The molecular basis of natural polyphenolic antioxidants. *Food Chemistry*, 125, 288-306. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.08.012>
33. Marinova, E.M., & Yanishlieva, N.V. (1992). Effect of temperature on the antioxidative action of inhibitors in lipid autoxidation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 60, 313-318. <https://doi.org/10.1002/JSFA.2740600307>
34. Matalgtyo, F.S., & Al-Khalifa, A.S. (1998). Effect of microwave oven heating on stability of some oil and fats. *Arab Gulf Journal of Scientific Research*, 16, 21-40. <https://doi.org/10.1080/10942912.2016.1152481>
35. Mattia, C.D.D., Sacchetti, G., Mastrocola, D., & Pittia, P. (2009). Effect of phenolic antioxidants on the dispersion state and chemical stability of olive oil O/W emulsions. *Food Research International (Ottawa, Ont.)*, 42(8), 1163-1170. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.05.017>
36. Merkl, R., Hradkova, I., Filip, V., & Smidrkal, J. (2010). Antimicrobial and antioxidant properties of phenolic acids alkylesters. *Czech Journal of Food Sciences*, 28, 275-279. <https://doi.org/10.17221/132/2010-CJFS>

37. Mendez, E., Sanhueza, J., Speisky, H., & Valenzuela, A. (1996). Validation of the Rancimat test for the assessment of the relative stability of fish oils. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 73, 1033-1037. <https://doi.org/10.1007/BF02523412>
38. Pekkarinen, S., Heinonen, M., & Hopia, A. (1999). Flavonoids quercetin, myricetin, kaemferol and (+)-catechin as antioxidants in methyl linoleate. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 79, 499-506. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0010\(19990315\)79:4<499::AID-JSFA204>3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(19990315)79:4<499::AID-JSFA204>3.0.CO;2-U)
39. Pe´rez-Gonz´alez, A., Galano, A., & Alvarez-Idaboy, J.R. (2014). Dihydroxybenzoic acids as free radical scavengers: Mechanisms, kinetics, and trends in activity. *New Journal of Chemistry*, 38, 2639-2652. <https://doi.org/10.1039/C4NJ00071D>
40. Pokorny, J. (1987). Major factors affecting the autoxidation of lipids. In H.W.S. Chan (Ed.), *Autoxidation of Unsaturated Lipids* (pp. 141-205). Academic Press: London.
41. Porter, W.L. (1993). Paradoxical behavior of antioxidants in food and biological systems, in *Antioxidants: Chemical, Physiological, Nutritional and Toxicological Aspects* (William, G.M., ed.), (pp. 93-122). Princeton Scientific, Princeton. <https://doi.org/10.1177/0748233793009001-209>
42. Rice-Evans, C.A., Miller, N.J., & Paganga, G. (1996). Structure-antioxidant activity relationship of flavonoids and phenolic acids. *Free Radical Biology and Chemistry*, 20, 933-956. [https://doi.org/10.1016/0891-5849\(95\)02227-9](https://doi.org/10.1016/0891-5849(95)02227-9)
43. Shahidi, F., Janitha, P.K., & Wanasundara, P.D. (1992). Phenolic antioxidants. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 32, 67-103. <https://doi.org/10.1080/10408399209527581>
44. Wanasundara, P.K., & Shahidi, F. (2005). Antioxidants: science, technology, and applications. In: *Bailey's Industrial Oil and Fat Products*. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey. Pp: 431-489. <https://doi.org/10.1002/047167849X.bio002>
45. Yanishlieva, N.V., & Marinova, E.M. (1992). Inhibited oxidation of lipids I. Complex estimation and comparison of the antioxidative properties of some natural and synthetic antioxidants. *Fats Science Technology*, 94, 374-379. <https://doi.org/10.1002/lipi.19920941004>
46. Yanishlieva, N.V., & Marinova, E.M. (1995). Effects of antioxidants on the stability of triacylglycerols and methyl esters of fatty acids of sunflower oil. *Food Chemistry*, 54, 371-382. [https://doi.org/10.1016/0308-8146\(95\)00061-M](https://doi.org/10.1016/0308-8146(95)00061-M)
47. Yanishlieva, N.V., Marinova, E.M., Gordon, M.H., & Raneva, V.G. (1999). Antioxidant activity and mechanism of action of thymol and carvacrol in two lipid systems. *Food Chemistry*, 64, 59-66. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(98\)00086-7](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(98)00086-7)
48. Zhu, Y., Long, Q.Z., Zhou, B., Prenzler, P.D., & Zhong, H.Y. (2013). Antioxidant activity of phenolic compounds in bulk camellia oil and corresponding oil in water (O/W) emulsions. *Advance Journal of Food Science and Technology*, 5, 1238-1243. <https://doi.org/10.19026/ajfst.5.3089>



## The Effect of Foliar Application of Silicon Fertilizer on Some Qualitative Traits and Mineral Compositions of 'Barhee' Date Fruit under Soil Salinity Conditions

R. Yousefi<sup>1\*</sup>, M.R. Pourghayoumi<sup>1</sup>, S.S. Marashi<sup>1</sup>, A. Ghasemi<sup>2</sup>

1- Assistant Professors, Date Palm and Tropical Fruits Research Center, Horticultural Sciences Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Ahvaz, Iran

(\*- Corresponding Author Email: [r.yousefi66@areeo.ac.ir](mailto:r.yousefi66@areeo.ac.ir))

2- M.Sc Graduated, Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Persian Gulf University, Bushehr, Iran

Received: 01.03.2023  
Revised: 03.06.2023  
Accepted: 04.06.2023  
Available Online: 06.06.2023

### How to cite this article:

Yousefi, R., Pourghayoumi, M.R., Marashi, S.S., & Ghasemi, A. (2024). The effect of foliar application of silicon fertilizer on some qualitative traits and mineral compositions of 'Barhee' date fruit under soil salinity conditions. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 20(2), 229-236. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/ifstrj.2023.81372.1239>

### Introduction

Date palm (*Phoenix dactylifera*) is one of the most important horticultural products in arid and semi-arid regions of Iran. One of the factors affecting the quality and nutritional elements of date fruit- as an important and strategic fruit in the country, with high nutritional and health value- is the proper use of different nutritional elements during its growth and fruiting period. There are many reports of the negative effects of salinity on dates, both in the vegetative and reproductive growth stages. The osmotic effects limiting the absorption of water and nutrients, the specific effect of chlorine and sodium ions, nutritional imbalance and preventing the physiological processes and metabolism of nutrients and the use of high energy in osmotic regulation are some of the negative effects of salinity stress. Salinity stress negatively affected date fruit quality. Silicon is one of the essential nutrients that plays an important role in the growth and development of plants. Silicon reduces the adverse effects of abiotic stresses such as drought and salinity by affecting on the leaf and stem growth, and other plant mechanisms. Therefore, the aim of this study was to investigate the effect of foliar application of silicon on some qualitative characteristics and nutrient elements content of date fruit grown under high salinity soil.

### Materials and Methods

This research was conducted in a randomized complete block design with 7 treatments and 3 replicates in two consecutive years. Silicon foliar spray treatments consisted of: control or no application of foliar spraying (T1), foliar spraying with a concentration of 0.1% in two stages (T2), foliar spraying with a concentration of 0.1% in three stages (T3), foliar spraying with a concentration of 0.2% in two stages (T4), foliar spraying with a concentration of 0.2% in three stages (T5), foliar spraying with a concentration of 0.3% in two stages (T6) and foliar spraying with a concentration of 0.3% in three stages (T7). The treatments were repeated in two consecutive years, and in each fruiting season, fruit quality characteristics including total soluble solids (TSS), acidity (TA), pH and total sugar content were measured. Total sugar was measured according to Iran's national standard method No. 2685 (ISIRI, 2007). The concentrations of potassium, calcium, iron and zinc were also measured at the end of the second year of the experiment. Fruit quality characteristics and concentration of fruit nutrients were measured and statistically analyzed.

### Results and Discussion

Foliar application of silicon fertilizer significantly increased the TSS of 'Barhee' date fruits while it decreased the pH of fruit juice. The lowest amount of total soluble solids was observed in T1 treatment at the rate of 63.69%



©2023 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

<https://doi.org/10.22067/ifstrj.2023.81372.1239>

and the highest amounts of fruit soluble solids were recorded in T5 and T6 treatments with values of 70.07% and 68.59% respectively. Fruit acidity and total sugar were not affected significantly by foliar application of silicon. The application of silicon significantly increased the contents of potassium, calcium, iron and zinc in date fruit, but it had no significant effect on the concentration of phosphorus in the fruit. The highest concentration of fruit potassium was observed in the T6 treatment (spraying with 0.3% silicon solution in two stages) at the amount of 1.54%. The lowest values of potassium concentration were observed in T3, T2 and T1 treatments with values of 0.89%, 1.01% and 1.06% respectively. Overall, Foliar application of silicon fertilizer can improve the quality characteristics and nutrient concentration of date fruit under salinity stress conditions. Among all the treatments, foliar application of silicon fertilizer with a concentration of 0.3% in two stages (three weeks before pollination and at the end of the Hababook stage) improved quality characteristics and the nutrient elements of 'Barhee' date fruit under high salinity soil.

**Keywords:** Acidity, Iron, Potassium, Total soluble solids, Total sugar

## مقاله کوتاه پژوهشی

جلد ۲۰، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۳، ص. ۲۲۹-۲۳۶

# اثر محلول پاشی کود سیلیسیم بر برخی صفات کیفی و عناصر غذایی میوه خرما رقم برحی در شرایط شوری خاک

رحمان یوسفی <sup>۱</sup>ID\* - محمدرضا پورقیومی <sup>۱</sup> - سید سمیح مرعشی <sup>۱</sup> - علی قاسمی <sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۴

### چکیده

این پژوهش به منظور بررسی تأثیر محلول پاشی کود سیلیسیم (سیتام پودری، ۷۰ درصد  $\text{SiO}_2$ ) بر برخی صفات کیفی و غلظت عناصر غذایی میوه خرما رقم برحی در شرایط شوری بالای خاک به صورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۳ تکرار انجام شد. تیمارهای محلول پاشی سیلیسیم در هفت سطح شامل عدم محلول پاشی (T1)، محلول پاشی با غلظت ۱ در هزار دو مرحله (T2)، محلول پاشی با غلظت ۱ در هزار سه مرحله (T3)، محلول پاشی با غلظت ۲ در هزار دو مرحله (T4)، محلول پاشی با غلظت ۲ در هزار سه مرحله (T5)، محلول پاشی با غلظت ۳ در هزار دو مرحله (T6) و محلول پاشی با غلظت ۳ در هزار سه مرحله (T7) اعمال شدند. نتایج نشان داد که با کاربرد کود سیلیسیم مواد جامد محلول میوه و pH آب میوه به ترتیب افزایش و کاهش معنی‌دار داشته است. اسیدیته میوه و قند کل تحت تأثیر تیمارهای آزمایشی قرار نگرفتند و اختلاف معنی‌دار نداشتند. کاربرد سیلیسیم سبب افزایش معنی‌دار غلظت پتاسیم، کلسیم، آهن و روی در میوه خرما شد، اما بر غلظت فسفر میوه اثر معنی‌دار نداشت. در مجموع، محلول پاشی کود سیلیسیم توانست اثرات منفی ناشی از تنش شوری بر ویژگی‌های کیفی و غلظت عناصر غذایی میوه خرما را در شرایط تنش شوری بهبود بخشد.

واژه‌های کلیدی: آهن، اسیدیته، پتاسیم، قند کل، مواد جامد محلول

### مقدمه

مضافتی، زاهدی، کبکاب، ربی، دیری، شاهانی، گنطار و مجول از اهمیت شاخصی برخوردار هستند (Mostaan et al., 2017). سیلیسیم یکی از عناصر غذایی مفید است که نقش‌های مهمی را در رشد و نمو گیاهان بازی می‌کند و اثرات تنش‌هایی مانند خشکی و شوری را با اثر بر رشد برگ، ساقه و دیگر مکانیسم‌های گیاهی کاهش می‌دهد (Epstein & Bloom, 2004). خان و همکاران (Khan et al., 2020) نشان دادند که کاربرد سیلیسیم روی دانه‌های خرما در شرایط تنشی (شوری و کادمیم) باعث بهبود معنی‌دار رشد و فیزیولوژی گیاه شد. جانا و همکاران (Jana et al., 2019) گزارش دادند که کاربرد

نخل خرما (*Phoenix dactylifera*) یکی از مهم‌ترین محصولات باغی ایران در مناطق خشک و نیمه‌خشک است به گونه‌ای که در سال ۱۴۰۰، خرما با تولید حدود ۱/۵ میلیون تن و سهم ۶/۷ درصدی از کل میزان تولید محصولات باغبانی در کشور، حائز رتبه پنجم گردید (Agricultural Statistics, 2022). در سطح جهانی نیز ایران بعد از کشور مصر و عربستان در رتبه سوم میزان تولید و بعد از عراق و الجزایر در رتبه سوم سطح زیر کشت قرار دارد (FAO, 2021). از میان مجموع ارقام خرما در کشور، میوه خرمای ارقام استعمران، پیارم، برحی،

۱- استادیار پژوهش‌کننده خرما و میوه‌های گرمسیری، مؤسسه تحقیقات علوم باغبانی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران  
\* - نویسنده مسئول: (Email: [r.yousefi66@areeo.ac.ir](mailto:r.yousefi66@areeo.ac.ir))

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

شامل سه هفته قبل از شروع گرده افشانی، محلول‌پاشی در اواخر مرحله حبابوک و محلول‌پاشی در اواخر مرحله کیمیری بوده است که برای تیمارهای دو مرحله‌ای (T2، T4 و T6)، فقط در دو مرحله اول یعنی سه هفته قبل از شروع گرده‌افشانی و در اواخر مرحله حبابوک و برای تیمارهای سه مرحله‌ای (T3، T5 و T7) در هر سه مرحله فوق محلول‌پاشی‌ها انجام شد. سایر عملیات باغی اعم از گرده‌افشانی، آبیاری، تغذیه، مبارزه با آفات و بیماری‌ها و ... برای همه تیمارها به‌طور یکسان انجام شد. اعمال تیمارها طی دو سال متوالی تکرار شد و در هر فصل میوه-دهی ویژگی‌های کیفی میوه شامل مواد جامد محلول (TSS)، اسیدیته (TA)، pH و درصد قند کل اندازه‌گیری شد. غلظت عناصر غذایی میوه شامل میزان فسفر، پتاسیم، کلسیم، آهن و روی نیز در پایان سال دوم آزمایش مورد سنجش قرار گرفت.

#### سنجش اسیدیته، قند کل، TSS و pH آب میوه

جهت اندازه‌گیری صفات کیفی میوه مقدار ۲۵ گرم گوشت میوه (۲۵ گرم گوشت میوه از مخلوط ۲۵ عدد میوه که به طور تصادفی از خوشه‌های درخت مربوط به هر تیمار انتخاب شدند تهیه گردید) در بشرهای جداگانه قرار داده شد و به هر نمونه ۱۰۰ سی‌سی آب مقطر اضافه گردید. پس از یک ساعت نمونه‌ها با دستگاه آب میوه‌گیری به خوبی مخلوط و برای عصاره‌گیری مخلوط حاصل، از کاغذ صافی واتمن استفاده شد. برای اندازه‌گیری اسیدیته میوه از روش تیتراسیون با سود ۰/۱ نرمال استفاده شد و با ثبت حجم سود مصرفی میزان اسیدکل براساس اسید غالب (اسید مالیک) محاسبه گردید (Cheraghi & Hamdami, 2012). میزان قند کل، TSS و pH عصاره میوه طبق روش استاندارد ملی ایران به شماره ۲۶۸۵ (ISIRI, 2007) تعیین گردید. برای اندازه‌گیری TSS عصاره میوه از دستگاه رفاکتومتر (ATAGO، RX5000، ژاپن) و برای سنجش میزان pH عصاره میوه نیز از pH متر (DDK.TOA، HM-60G، ژاپن) استفاده گردید.

#### سنجش عناصر غذایی میوه

برای اندازه‌گیری میزان فسفر میوه (Chapman & Pratt, 1961)، مقدار ۵ سی‌سی از محلول عصاره به‌دست آمده به روش هضم در بالن ژوژه با اسید سولفوریک-اسید سالیسیلیک-آب اکسیژنه (Waling et al., 1989) را به داخل بالن ژوژه ۲۵ میلی‌لیتر ریخته و به آن ۵ میلی‌لیتر محلول آمونیوم مولیبدات-وانادات اضافه و به حجم ۲۵ میلی‌لیتر رسانده شد. سپس میزان جذب با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (Cary100، Varian، استرالیا) در طول موج ۴۷۰ نانومتر قرائت گردید و براساس آن میزان فسفر میوه محاسبه شد. برای اندازه‌گیری غلظت پتاسیم، کلسیم، آهن و روی میوه (Waling et al., 1989) ابتدا هضم

سیلیسیم در دانه‌های خرما رقم خلاص تحت شرایط غیر تنش منجر به افزایش رشد گیاه شد و تحت شرایط تنش شوری نیز اثرات منفی ناشی از تنش را اندکی کاهش داد و تجمع پتاسیم در گیاهان را بالا برد. طی تحقیقی که توسط فکری و همکاران (Fekry et al., 2020) صورت گرفت نشان داده شد که کاربرد دو عنصر سلنیوم و سیلیسیم در غلظت ۵۰ پی‌پی‌ام همراه با هیومیک اسید بهترین تیمار در بهبود عملکرد، وزن خوشه و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی میوه خرما رقم برخی بوده است. همچنین ویژگی‌های رشدی مانند مقدار کلروفیل و وضعیت عنصر غذایی برگ‌ها نیز با کاربرد این مواد نسبت به شاهد افزایش یافت. در آزمایشی که توسط کیان و همکاران (Qian et al., 2006) انجام شد گزارش گردید که کاربرد سیلیسیم سبب افزایش انتقال پتاسیم و کاهش جذب کلروپلاستی سدیم در شرایط تنش شوری شد. لذا از آنجایی که تنش شوری اثرات منفی متعددی بر نخل خرما چه در مرحله رشد رویشی و چه در مراحل رشد زایشی دارد (Spurling et al., 2014) و با توجه به نقش مثبتی که عنصر سیلیسیم در کاهش اثرات منفی ناشی از تنش شوری در گیاهان مختلف دارد، هدف این پژوهش بررسی اثر کاربرد سیلیسیم بر برخی ویژگی‌های کیفی و غلظت عناصر غذایی میوه خرما در نخلستانی با درجه شوری بالای خاک می باشد.

#### مواد و روش‌ها

این پروژه در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۷ تیمار و ۳ تکرار طی دو سال زراعی (۱۳۹۹-۱۴۰۱) در محل پژوهشکده خرما و میوه‌های گرمسیری اهواز به طول جغرافیایی ۳۳° ۴۸' شرقی و عرض جغرافیایی ۱۵° ۳۱' شمالی و با ارتفاع ۱۲ متر از سطح دریا روی ۲۱ اصله نخل خرما با بارور رقم برخی اجرا شد. میانگین شوری خاک تشتک‌های درختان در قطعه نخلستان منتخب جهت اعمال تیمارهای کودی ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر بود. در قطعه مورد نظر تیمارهای مختلف کود سیلیسیم شامل عدم کاربرد کود (T1)، محلول‌پاشی با غلظت ۱ در هزار در دو مرحله (T2)، محلول‌پاشی با غلظت ۱ در هزار در سه مرحله (T3)، محلول‌پاشی با غلظت ۲ در هزار در دو مرحله (T4)، محلول‌پاشی با غلظت ۲ در هزار در سه مرحله (T5)، محلول‌پاشی با غلظت ۳ در هزار در دو مرحله (T6) و محلول‌پاشی با غلظت ۳ در هزار در سه مرحله (T7) اعمال شدند. کود سیلیسیم مورد استفاده در این تحقیق، کود پودری سینتام محصول شرکت آریا شیمی (حاوی ۷۰ درصد سیلیسیم کل به فرم SiO<sub>2</sub>) با شماره ثبت کودی ۳۶۴۹۳ بوده است. مراحل رشد و نمو میوه خرما پس از انجام گرده‌افشانی و لقاح تا زمان رسیدگی کامل میوه شامل پنج مرحله حبابوک، کیمیری، خلال، رطب و تمر (میوه رسیده خرما) می‌باشد. در این تحقیق مراحل اعمال تیمارها به‌ترتیب

اسیدهای آلی آب میوه می‌باشد. احتمالاً با کاربرد سیلیسیم، افزایش مواد جامد محلول میوه ناشی از افزایش ذخیره مواد فتوسنتزی و تغلیظ اسیدهای آلی موجود در میوه خرما سبب کاهش میزان pH آب میوه شده است.

### عناصر غذایی میوه (پتاسیم، فسفر، کلسیم، آهن، روی)

اثر تیمارهای سیلیسیم بر غلظت پتاسیم و کلسیم میوه در سطح احتمال ۱٪ و بر غلظت آهن و روی میوه در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار گردید، اما بر غلظت فسفر میوه در هیچ یک از سطوح احتمال ۱٪ و ۵٪ معنی‌دار نگردید. بیش‌ترین غلظت پتاسیم میوه در تیمار T6 (محلول پاشی ۳ در هزار سیلیسیم در دو مرحله) به مقدار ۱/۵۴ درصد مشاهده شد. اختلاف بین بیش‌ترین مقدار ثبت شده در تیمار T6 با کم‌ترین مقادیر ثبت شده در تیمارهای T3، T2 و T1 به لحاظ آماری معنی‌دار بود (جدول ۱). یوسفی (2016) افزایش غلظت پتاسیم در میوه توت‌فرنگی را در نتیجه کاربرد سیلیسیم مشاهده کرد که نتایج این آزمایش با نتایج ایشان مطابقت دارد. لیانگ (1999) بیان کرد که احتمالاً افزایش فعالیت پمپ  $H^+-ATPase$  غشای پلاسمایی در اثر کاربرد سیلیسیم باعث افزایش جذب پتاسیم توسط گیاه می‌شود. فکری و همکاران (2020) گزارش کردند که با کاربرد سیلیسیم، میزان پتاسیم برگ در خرما رقم برخی در شرایط تنش شوری افزایش پیدا کرد. با افزایش جذب پتاسیم توسط گیاه در نتیجه کاربرد سیلیسیم، میزان بیشتری از این عنصر می‌تواند در اختیار میوه قرار بگیرد. کمترین غلظت کلسیم میوه به ترتیب در تیمارهای T2 و T1 با مقادیر ۰/۰۸ و ۰/۱۰ درصد مشاهده گردید. بیشترین غلظت کلسیم میوه نیز در تیمار T4 به مقدار ۰/۳۴ درصد مشاهده شد که اختلاف بین بیشترین مقدار ثبت شده با کمترین مقادیر مشاهده شده به لحاظ آماری معنی‌دار بود (جدول ۱). افزایش مقدار کلسیم در نتیجه استفاده از سیلیسیم توسط یوسفی (2016) در توت‌فرنگی گزارش شده است که نتایج این تحقیق با نتایج ایشان مطابقت دارد. تفاوت در مدل‌های دیواره سلولزی در نتیجه ته‌نشست سیلیسیم ممکن است عدم پراکنش محلول‌های آنیونی که کلسیم را جذب می‌کنند افزایش دهد، در نتیجه به نظر می‌رسد که باید میزان کلسیم در بافت گیاهی افزایش یابد (Epstein & Bloom, 2004). ارتباط بین کلسیم و سیلیسیم در تغذیه گیاهی نیازمند مطالعه و بررسی بیشتری می‌باشد.

نمونه‌های میوه به روش سوزاندن خشک و ترکیب با اسید هیدروکلریک صورت گرفت و اندازه‌گیری عناصر ذکر شده با عصاره حاصله به این روش قرائت گردید. میزان پتاسیم میوه در عصاره حاصله به روش نشر شعله‌ای با استفاده از دستگاه فلیم فوتومتر (Tokyo Photoelectric, Ana-135، ژاپن) و میزان کلسیم، آهن و روی نیز در عصاره حاصله با استفاده از دستگاه جذب اتمی (Spectra220، Varian، استرالیا) مورد اندازه‌گیری قرار گرفت.

### تجزیه و تحلیل آماری

تجزیه واریانس داده‌ها بر اساس طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۷ تیمار و ۳ تکرار به صورت تجزیه مرکب با نرم‌افزار آماری SAS و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن انجام در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

### نتایج و بحث

#### ویژگی‌های کیفی میوه (مواد جامد محلول، pH، اسیدیته و قند کل)

اثر تیمارهای سیلیسیم بر میزان مواد جامد محلول (TSS) و pH آب میوه در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد، اما بر میزان اسیدیته و قند کل میوه در هیچ یک از سطوح احتمال آماری ۱ و ۵ درصد معنی‌دار نگردید. مقایسه میانگین تیمارها (جدول ۱) نشان داد که کمترین میزان مواد جامد محلول میوه در تیمار عدم کاربرد سیلیسیم (T1) به میزان ۶۳/۶۹ درصد و بیشترین مقادیر آن نیز به ترتیب در تیمارهای T5 و T6 با مقادیر ۷۰/۰۷ و ۶۸/۵۹ درصد ثبت گردید. همچنین کمترین میزان pH آب میوه در تیمار T5 به مقدار ۶/۴۶ مشاهده شد و بین باقی تیمارها اختلاف معنی‌دار دیده نشد. کاربرد سیلیسیم سبب افزایش میزان کلروفیل برگ خرما و مواد جامد محلول در خرما رقم برخی گردید (Fekry et al., 2020) که نتایج این تحقیق با یافته‌های آن‌ها مطابقت دارد. قاسمی و همکاران (2019) گزارش نمودند که کاربرد سیلیسیم به‌ویژه در غلظت بالا (۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) باعث کاهش معنی‌دار pH آب میوه توت‌فرنگی شد که نتایج این تحقیق با نتایج آن‌ها مطابقت دارد. سیلیسیم با افزایش میزان کلروفیل و افزایش متابولیسم دی‌اکسید کربن و کارایی تثبیت آن، توان فتوسنتزی برگ‌ها را توسط گیاهان افزایش می‌دهد و در نهایت منجر به بهبود عملکرد و کیفیت میوه حتی در شرایط تنش می‌شود (Cherif & Belanger, 1992). معتمدزادگان و همکاران (2017) طی تحقیقی در خصوص گریپ‌فروت بیان داشتند که کاهش pH آب میوه با افزایش میزان بریکس مواد جامد محلول، ناشی از تغلیظ

جدول ۱- اثرات کاربرد سیلیسیم بر برخی صفات کیفی و غلظت عناصر غذایی میوه

Table 1- The effects of silicon application on some qualitative traits and nutrient elements concentration in fruit

تیمارهای سیلیسیم Silicon Treatment	مواد جامد محلول (%) TSS	اسیدیته (%) TA	pH	قند کل (%) Total Sugar	پتاسیم (%) K	فسفر (%) p	کلسیم (%) Ca	آهن (ppm) Fe	روی (ppm) Zn
T1	63.69d	1.51a	6.69a	45.66a	1.06dc	0.126a	0.10dc	20.46a	12.36b
T2	64.05dc	1.38a	6.63a	43.86a	1.01dc	0.127a	0.08d	23.00a	13.41b
T3	67.78ab	1.65a	6.68a	41.67a	0.89d	0.133a	0.18b	19.66ab	14.13b
T4	64.84bcd	1.38a	6.65a	37.65a	1.40ab	0.128a	0.34a	18.83ab	20.76a
T5	70.07a	1.47a	6.46b	44.68a	1.21bc	0.138a	0.21b	15.70b	15.73ab
T6	68.59a	1.34a	6.57ab	41.16a	1.54a	0.133a	0.20b	21.46a	15.86ab
T7	67.05abc	1.42a	6.66a	42.48a	1.32ab	0.135a	0.16bc	23.10a	14.10b

میانگین‌هایی با حروف مشترک اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد براساس آزمون دانکن ندارند.

The means with common letters according to Duncan test are not significantly different in level 5%.

ناقل‌های پرولین در راستای توزیع و پایداری مناسب آن به‌منظور مبارزه با اثرات کشنده شوری بوده است و کاربرد بیرونی سیلیسیم به شدت بیان Proline transporter 2 را فعال کرد (Khan et al., 2020). فکری و همکاران (Fekry et al., 2020) نیز بیان نمودند که سیلیسیم با افزایش جذب و انتقال آب و مواد غذایی، توسعه ریشه و بهبود سیستم آنتی‌اکسیدانی سبب افزایش تحمل درختان در شرایط تنشی از جمله تنش شوری می‌شود.

### نتیجه‌گیری

در یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان اظهار داشت که کاربرد محلول پاشی کود سیلیسیم دارای اثرات مشهودی بر ویژگی‌های کیفی و غلظت عناصر غذایی میوه خرما می‌باشد. کاربرد سیلیسیم و تأثیر آن بر ویژگی‌های کیفی و غلظت عناصر غذایی، بستگی به غلظت و زمان کاربرد آن دارد. به استناد نتایج این پژوهش می‌توان محلول‌پاشی ۳ در هزار کود سیلیسیم در دو مرحله؛ مرحله اول سه هفته قبل از شروع گرده‌افشانی و مرحله دوم اواخر مرحله حبابوک را به عنوان یک گزینه مطلوب در نظر داشت. پیشنهاد می‌گردد که با توجه به نتایج این تحقیق استفاده از سایر منابع سیلیسیمی همانند سیلیکات پتاسیم نیز در سایر ارقام مهم و تجاری در دیگر مناطق خرماخیز کشور که با مشکل شوری مواجه هستند به‌طور جامع مورد بررسی قرار گیرد.

کمترین غلظت آهن میوه در تیمار T5 به مقدار ۱۵/۷۰ پی‌پی‌ام ثبت شد و بیشترین غلظت آن در تیمار T7 به مقدار ۲۳/۱۰ پی‌پی‌ام مشاهده شد که اختلاف آنان معنی‌دار بود (جدول ۱). پاولویک و همکاران (Pavlovic et al., 2013) بیان کردند که کاربرد سیلیسیم باعث افزایش جذب آهن در گیاه خیار گردید که نتایج این تحقیق با نتایج آنان مطابقت دارد. کاربرد سیلیسیم با تنظیم سطوح بیان ژن پروتئین‌ها و در نتیجه آن افزایش میزان تحرک آهن، باعث افزایش میزان جذب آهن می‌شود. گوتاردی و همکاران (Gottardi et al., 2014) افزایش بالای جذب آهن در گیاهان تیمار شده با سیلیسیم را به افزایش فعالیت و فراوانی رونوشت ژن FRO (Fe(III)-chelate reductase) نسبت دادند. کمترین غلظت روی میوه در تیمار T1 به مقدار ۱۲/۳۶ پی‌پی‌ام و بیشترین غلظت آن در تیمار T4 به مقدار ۲۰/۷۶ پی‌پی‌ام مشاهده شد (جدول ۱). میرزاخانی و همکاران (Mirzakhani et al., 2018) افزایش جذب روی در نتیجه کاربرد سیلیسیم را در گیاه چچم گزارش داد که نتایج این تحقیق با آن مطابقت دارد. افزایش غلظت روی احتمالاً به علت تشکیل ترکیب‌های پیچیده محلول سیلیسیم با این عنصر و در نتیجه افزایش جذب آن باشد (Matichenkov et al., 2015). گزارش شده است که بیان ناقل‌های پرولین در شرایط تنش‌های غیرزیستی از جمله تنش شوری، یک نقش کلیدی برای تحمل شرایط تنشی ایفا می‌کند (Kishor et al., 2015). نشان داده شد که اثرات تخفیف‌دهنده تنش شوری ناشی از کاربرد سیلیسیم در نخل خرما تحت شرایط تنش شوری، در اثر فعال شدن

### References

1. Agricultural Statistics. (2022). Volume 3: *Horticultural and greenhouse Products*. Tehran, Ministry of Jihad Agriculture, Vice President of Statistics, Information and Communication Technology Center. 307p. (In Persian)
2. Chapman, H.D., & Pratt, P.F. (1961). *Methods of analysis for soils, plants and waters*. University of California, Division of Agricultural Sciences, Los Angeles.

3. Cheraghi Dehdezi, S., & Hamdami, N. (2012). Effect of storage at different temperatures on moisture content, total soluble solids, acidity and pH of dates (Kabkab variety). *Journal Food Research*, 22(2), 131-140. (In Persian with English abstract)
4. Cherif, M., & Belanger, R.R. (1992). Use of potassium silicate amendments in recirculating nutrient solutions to suppress *Pythium ultimum* on long English cucumber. *Plant Disease*, 76(10), 1008-1011. [https://doi.org/10.1016/0885-5765\(92\)90053-X](https://doi.org/10.1016/0885-5765(92)90053-X)
5. Epstein, E., & Bloom, A. (2004). *Mineral nutrition of plants: principle and perspectives*. Sinauer Associates Publish, Second Edition, 380p.
6. FAO. (2021). Food and Agriculture Organization of the United Nations. Available at: <https://www.fao.org/faostat/en/#data>
7. Fekry, W.M.E., Rashad, M.A., & Alalaf, A.H. (2020). Attempts to improve the growth and fruiting of barhi date-palms under salinity stress. *Asian Journal of Plant Sciences*, 19(2), 146-151. <https://doi.org/10.3923/ajps.2020.146.151>
8. Ghasemi, K., Ghajar Sepanlou, M., & Haddadinejad, M. (2019). Effect of silicon on nutrient concentration, photosynthetic pigments and fruit quality of strawberry cv. Camarosa. *Journal of Horticultural Plants Nutrition*, 2(1), 85-98. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22070/hpn.2019.4607.1036>
9. Gottardi, S., Iacuzzo, F., Tomasi, N., Cortella, G., Manzocco, L., Pinton, R., Romheld, V., Mimmo, T., Scampicchio, M., Costa, L.D., & Cesco, S. (2014). Beneficial effects of silicon on hydroponically grown corn salad (*Valerianella locusta* (L.) Laterr) plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 56, 14-23. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.04.002>
10. ISIRI. (2007). *Fruit juices – Test methods*. Institute of Standards and Industrial Research of IRAN, Iran National Standard, 2685, 1<sup>st</sup> revision. (In Persian)
11. Jana, G.A., Al Kharusi, L., Sunkar, R., Al-Yahyai, R., & Yaish, M.W. (2019). Metabolomic analysis of date palm seedlings exposed to salinity and silicon treatments. *Plant Signaling & Behavior*, 14(11), 1663112. <https://doi.org/10.1080/15592324.2019.1663112>
12. Khan, A., Bilal, S., Khan, A.L., Imran, M., Al-Harrasi, A., Al-Rawahi, A., & Lee, I. (2020). Silicon-mediated alleviation of combined salinity and cadmium stress in date palm (*Phoenix dactylifera* L.) by regulating phytohormonal alteration. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 188, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109885>
13. Kishor, K.P.B., Kumari P.H., Sunita M.S., & Sreenivasulu, L. (2015). Role of proline in cell wall synthesis and plant development and its implications in plant ontogeny. *Frontiers in Plant Science*, 20(6), 544. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00544>
14. Liang, Y.C. (1999). Effects of silicon on enzyme activity and sodium, potassium and calcium concentration in barely undersalt stress. *Plant Physiology*, 29, 217-224. <https://doi.org/10.1023/A:1004526604913>
15. Matichenkov, V.V., Bocharnikova, E.A., Pahnenko, E.P., Khomiakove, D.M., Matichenkov, I.V., Zhan, Q., & Wei, X. (2015). Reduction of Cd, Cu, Ni, and Pb mobility by active Si in a laboratory study. *Mine Water and the Environment*, 35, 302–309. <https://doi.org/10.1007/s10230-015-0353-5>
16. Mirzakhani, M., Motesharezadeh, B., Mirseyed Hosseini, H., & Malmir, R. (2018). Effect of nano-silicon treatments on some physiological and nutritional responses of *Lolium perenne* in soils contaminated with heavy metals (Pb, Cd and Zn). *Iranian Journal of Horticultural Science*, 49(2), 563-577. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijhs.2018.245896.1348>
17. Mostaan, A., Latifian, M., Torahi, A., Amani, M., Mohebi, A., & Alihour, M. (2017). *Technical guide for cultivation and harvesting date palm*. Publication of agricultural education. 282p. (In Persian)
18. Motamedzadegan, A., Porshayegan, M., Golkar, A., Maghsodi, S., & Bagheri, H. (2017). Effect of concentration on the physicochemical and rheological properties of grapefruit juice (*Citrus paradise*). *Food Processing and Preservation Journal*, 11(1), 131-142. <https://doi.org/10.22069/ejfp.2019.11424.1361>
19. Pavlovic, J., Samardzic, J., Maksimovic, V., Timotijevic, G., Stevic, N., Laursen, K.H., Hansen, T.H., Husted, S., Schjoerring, J.K., Liang, Y., & Nikolic, M. (2013). Silicon alleviates iron deficiency in cucumber by promoting mobilization of iron in the root apoplast. *New Phytologist*, 198(4), 1096–1107. <https://doi.org/10.1111/nph.12213>
20. Qian, Q.Q., Zai, W.S., Zhu, Z.J., & Yu, J.Q. (2006). Effects of exogenous silicon on active oxygen scavenging systems in chloroplasts of cucumber (*Cucumis sativus* L.) seedlings under salt stress. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 32(1), 107–112.
21. Sperling, O., Lazarovitch, N., Schwartz, A., & Shapira, O. (2014). Effects of high salinity irrigation on growth, gas-exchange, and photoprotection in date palms (*Phoenix dactylifera* L., cv. Medjool). *Environmental and Experimental Botany*, 99, 100–109. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.10.014>
22. Waling, I., Vark, W.V., Houba, V.J.G., & Van der Lee, J.J. (1989). *Soil and plant analysis, a series of syllabi. Part 7. Plant analysis procedures*. Wageningen Agriculture University, The Netherlands.

23. Yousefi, R. (2016). *The effect of micro- and nanoparticles of silicon dioxide on some morphological, physiological and biochemical characteristics of strawberry (Fragaria ananassa Duch.)*. Ph.D. Thesis, Bu-Ali Sina University. (In Persian with English abstract)



## The Effect of Edible Coatings on the Quality and Storage Life of Cherry cv. Lambert

A.A. Shokouhian<sup>1\*</sup>, S. Einizadeh<sup>2</sup>, M. Dashti<sup>3</sup>

1, 2 and 3- Associate Professor, Ph.D. Student and M.Sc. Student, Department of Horticultural Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, respectively.

(\*- Corresponding Authors Email: [shokouhiana@yahoo.com](mailto:shokouhiana@yahoo.com))

Received: 07.03.2023  
Revised: 05.06.2023  
Accepted: 01.07.2023  
Available Online: 02.07.2023

### How to cite this article:

Shokouhian, A.A., Einizadeh, S., & Dashti, M. (2024). The effect of edible coatings on the quality and storage life of Cherry cv. Lambert. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 20(2), 237-247. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/ifstrj.2023.81146.1236>

### Introduction

Cherry, with the scientific name *Prunus avium* L., is one of the most important stone fruit trees in temperate regions, belonging to the Rosaceae family and the Prunoideae subfamily. Edible coatings are thin layers of materials that are used on the surface of the product and are an alternative to protective wax coatings. Chitosan is a coating that has a polysaccharide structure and is composed of glucosamine and N-acetylglucosamine units and is obtained from the shell of crustaceans such as crabs and shrimps. Clear, odorless, non-sticky gel with high and firm absorption power is extracted from the inner parts of aloe vera plant leaves. Between this gel and the outer skin of the leaf, there are special cells that contain a yellow liquid and when this liquid dries, aloe vera juice is produced. This gel is completely healthy and compatible with the environment, and its pH is about 4.5, which can replace various fruit coatings in the post-harvest stage. The purpose of this research was to investigate the combined effect of aloe vera gel and chitosan in maintaining the quality characteristics post harvesting and increasing the shelf life of Lombard cherry fruit.

### Materials and Methods

Lambert black cherry fruit was obtained from the garden complex of Moghan Agriculture and Animal Husbandry Company located in Pars Abad city of Ardabil province. They were immediately transferred to the Postharvest Physiology Laboratory, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Mohaghegh Ardabili University, for the desired treatments. This study aimed to extend the shelf life of cherry fruit with two edible chitosan coatings (0, 0.5, 1, 1.5% w/w) and aloe vera gel (0, 15%, 30%, 45% w/w) was performed as factorial in a completely randomized design in three replications. The measured parameters were soluble solids, vitamin C, total acidity, anthocyanin, starch, weight loss and firmness of fruit tissue that were evaluated at harvest time and 45 days after harvest.

### Results and Discussion

The results of analysis variance showed that the effect of time had significant on cherry fruit flavor ( $P < 0.01$ ). The use of Aloe vera gel had a significant effect ( $P < 0.01$ ) on soluble solids, starch, firmness, fruit flavor and also weight loss ( $P < 0.05$ ). The effect of chitosan treatment also were significant on total soluble solids, starch, firmness, and fruit flavor ( $P < 0.01$ ). Moreover, Interaction effect of aloe vera gel and chitosan treatments on total soluble solids, starch, firmness, and fruit flavor were significant ( $P < 0.01$ ) during at storage time. The compare means showed that the ratio of soluble sugars to total acid was increased. The highest soluble solids and their ratio to total acid were obtained as a result of the using of 45% aloe vera gel with 0.5% chitosan coating. Combining of aloe



©2023 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

<https://doi.org/10.22067/ifstrj.2023.81146.1236>

vera gel with 30% and 45% concentrations with chitosan at 1% and 1.5% were able to maintain better firmness of fruit tissue compared to other treatments during storage time. The highest residual starch in the fruit was obtained in using aloe vera gel treatments at concentrations of 15%, 40% and 45% with 1% chitosan during storage. Also, the use of aloe vera gel (all three levels) was exceeded compared to control on fruit weight loss. By reducing the activity of ethylene, chitosan causes a delay in ripening and aging and as a result reduces the firmness of the fruit. Aloe vera gel reduces the activity of pectin methylesterase, poly-galactronase and beta-galactosidase. These enzymes destroy the cell wall and soften the fruit.

## Conclusion

The interest in using edible coatings to maintain the optimum quality of fruits during the marketing and storage process has increased. Edible coatings can act as a barrier, thereby reducing quality loss, inhibiting gas exchange, controlling respiration rates, and preventing the growth of microorganisms that cause fruit decay. The results clearly indicated the preservation of the quality of cherry fruit with the use of edible coatings compared to the control. The use of the treatment combination of chitosan at a concentration of 1.5% with aloe vera at a concentration of 45% has had a positive and significant effect to maintain the quality of cherry fruit after harvesting. Therefore, the use of this treatment combination is recommended to increase the storage life and maintain the quality of Lambert cherry fruit during the storage period.

**Keywords:** Aloe vera, Chitosan, Firmness, Storage period, Weight loss

## مقاله پژوهشی

جلد ۲۰، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۳، ص. ۲۴۷-۲۳۷

# بررسی اثر پوشش‌های خوراکی بر کیفیت و عمر انبارمانی گیلاس رقم لامبرت

علی اکبر شکوهیان<sup>۱\*</sup> - شهریار عینی‌زاده<sup>۲</sup> ID - مهرداد دشتی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۱۰

### چکیده

این بررسی با هدف افزایش عمر انبارمانی میوه گیلاس با استفاده از پوشش خوراکی کیتوزان (در چهار سطح صفر، ۰/۵، ۱، ۱/۵ درصد) و ژل آلوه‌ورا (در چهار سطح صفر، ۱۵، ۳۰، ۴۵ درصد) به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار اجرا شد. صفات اندازه‌گیری شده شامل مواد جامد محلول، ویتامین C، اسیدیته کل، آنتوسیانین، نشاسته، درصد کاهش وزن و سفتی بافت میوه بودند که در زمان برداشت و ۴۵ روز بعد از برداشت مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر زمان بر طعم میوه گیلاس اثر معنی‌داری داشت. کاربرد ژل آلوه‌ورا بر صفات مواد جامد محلول، نشاسته، سفتی بافت، طعم میوه و کاهش وزن میوه و تیمارهای کاربرد کیتوزان نیز بر مواد جامد محلول، نشاسته، سفتی بافت و طعم میوه اثر معنی‌داری داشتند. همچنین اثر متقابل کاربرد توام ژل آلوه‌ورا با کیتوزان بر میزان مواد جامد محلول، نشاسته، سفتی بافت و طعم میوه در طی دوره انبارمانی از نظر آماری معنی‌دار بودند. مقایسه میانگین‌ها نشان دادند که در طی دوره انبارمانی نسبت قندهای محلول به اسید کل افزایش یافت. بیشترین میزان مواد جامد قابل حل و نسبت آنها به اسید کل در نتیجه کاربرد ۴۵ درصد ژل آلوه‌ورا همراه با ۰/۵ درصد پوشش کیتوزان حاصل شد. ترکیب آلوه‌ورا با غلظت‌های ۳۰ و ۴۵ درصد همراه با کیتوزان ۱ و ۱/۵ درصد توانستند سفتی بافت میوه را در طی فرآیند انبارمانی نسبت به سایر تیمارها بهتر حفظ نمایند. بیشترین نشاسته مانده در میوه در طول دوره نگهداری، از کاربرد تیمارهای آلوه‌ورا در غلظت‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درصد همراه با کیتوزان ۱ درصد حاصل شد. کاربرد هر سه سطح ژل آلوه‌ورا بر میزان کاهش وزن میوه نسبت به شاهد برتری داشتند. با توجه به نتایج آزمایش جهت حفظ کیفیت میوه گیلاس در طول انبارمانی استفاده از ترکیب تیماری ۱/۵ درصد کیتوزان و ۴۵ درصد آلوه‌ورا بعنوان پوشش خوراکی توصیه می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** آلوه‌ورا، انبارمانی، سفتی، کاهش وزن، کیتوزان

### مقدمه

یک مانع نیمه تراوا به بخار آب، اکسیژن و دی اکسیدکربن، بین محصول و اتمسفر اطراف آن‌ها، باعث افزایش ماندگاری می‌شوند (Lin & Zhao, 2007). این پوشش‌ها ممکن است از پلی ساکاریدها، پروتئین‌ها، لیپیدها و یا ترکیبی از آن‌ها باشند (Li & Barth, 1998).

گیلاس با نام علمی *Prunus avium* L. از درختان هسته‌دار مهم مناطق معتدله است که متعلق به خانواده Rosaceae و زیر خانواده Prunoideae می‌باشد (Najafzadeh, 2013).

پوشش‌های خوراکی، لایه‌های نازک از مواد هستند که در سطح محصول به کار برده می‌شوند و جایگزینی برای پوشش‌های محافظ واکسی می‌باشند (McHugh & Senesi, 2000). پوشش‌های خوراکی، کیفیت، سلامت و ثبات خواص فیزیکی محصولات را با ایجاد

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشیار، دانشجوی دکتری و دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران  
(\*- نویسنده مسئول: [shokouhiana@yahoo.com](mailto:shokouhiana@yahoo.com) (Email:))

کیفی در رنگ، کاهش اسیدیت قابل تیتراسیون و محتوای ویتامین C در میوه گواوا شد. علاوه بر این موجب تأخیر در کاهش سطوح پلی‌فنل کل، آنتوسیانین و محتوای فلاونوئیدی شد (Hong et al., 2012). پوشش کیتوزان، منجر به تأخیر فعالیت برخی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، قهوه‌ای شدن گوشت و آسیب غشایی شد. کاهش معنی‌دار در پوسیدگی‌های انباری میوه‌های سیب، کیوی، هلو و دیگر میوه‌ها در اثر کاربرد کیتوزان به ثبت رسیده است (Bautista-Baños et al., 2006). از فیلم‌های خوراکی بر پایه مواد سلولزی برای پوشش دهی محصولاتی نظیر هلو، شلیل، زردآلو، فلفل سبز، آووکادو، پرتقال، گریپ‌فروت، توت فرنگی، گوجه‌فرنگی و لوبیای سبز استفاده شده است (Derakhshan et al., 2019; Zapata et al., 2008; Rong-Yu & Yao-Wen, 2003). هدف از این تحقیق بررسی تأثیر پوشش ترکیبی ژل آلوه‌ورا و کیتوزان در حفظ خصوصیات کیفی پس از برداشت و افزایش عمر انبارمانی میوه گیلاس رقم لامبرت بوده است.

### مواد و روش‌ها

میوه‌های گیلاس رقم سیاه لامبرت از مجتمع باغات شرکت کشت و صنعت و دامپروری مغان واقع در شهرستان پارس آباد استان اردبیل تهیه و بلافاصله جهت تیمارهای مورد نظر به آزمایشگاه فیزیولوژی پس از برداشت دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی منتقل شدند. این بررسی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو پوشش خوراکی کیتوزان در چهار سطح (صفر، ۰/۵، ۱، ۱/۵ درصد) و ژل آلوه‌ورا نیز در چهار سطح (صفر، ۱۵، ۳۰، ۴۵ درصد) در سه تکرار اجرا شد. در ضمن هر تیمار متشکل از ۱۰۰ گرم گیلاس بود. ژل آلوه‌ورا از بافت پاراننشیمی برگ به دست آمد. به ترتیب پی‌اچ، درجه بریکس و اسیدیت ژل تقریباً برابر با ۵/۶، ۱/۴ و ۰/۰۵ اسید سیتریک در ۱۰۰ گرم بود. ژل خام با کاهش پی‌اچ به ۳/۷۵ با استفاده از اسید فسفریک تثبیت شد، در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ ثانیه حرارت داده شده و سپس در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد خنک شد (Navaro et al., 2011).

به منظور اعمال تیمارها بعد از غربالگری (از نظر سلامت و اندازه میوه‌ها)، میوه‌ها را ابتدا تحت غلظت‌های مختلف کیتوزان به مدت دو دقیقه در دمای ۲۰ درجه سلسیوس غوطه‌ور کرده و بعد از خشک شدن سطوح میوه‌ها در دمای محیط تیمارهای ژل آلوه‌ورا مدت دو دقیقه در دمای ۲۰ درجه سلسیوس اعمال شدند. پس از اعمال تیمارها میوه‌ها به مدت ۲۰ دقیقه در هوای آزاد اتاق خشک شده در ظروف پلاستیکی و

کیتوزان<sup>۱</sup> پوششی است که ساختمان چند قندی دارد و از واحدهای گلوکزآمین<sup>۲</sup> و ان-استیل گلوکزآمین<sup>۳</sup> (با اتصالات بتا ۱ و ۴) تشکیل شده است و از پوسته سخت‌پوستانی مانند خرچنگ و میگو به دست می‌آید (Bautista-Baños et al., 2006; Coma et al., 2002). کیتوزان، ماده‌ای غیر سمی، زیست‌تجزیه‌پذیر و زیست‌سازگار است (Ardakani et al., 2010).

از قسمت‌های داخلی برگ گیاه آلوه‌ورا ژل شفاف، بی‌بو، بدون چسبندگی و دارای قدرت جذب بالا و سفت استخراج می‌شود. بین این ژل و پوست برگ آلوه‌ورا سلول‌های ویژه‌ای وجود دارد که حاوی مایع زرد رنگ بوده و با خشک شدن این مایع، شیرهای آلوه‌ورا تولید می‌شود. این ژل کاملاً سالم و سازگار با محیط بوده و pH آن حدوداً ۴/۵ است که می‌تواند جایگزین پوشش‌های مختلف میوه در مرحله‌ی بعد از برداشت شود.

میزان تنفس گیلاس در طول نگهداری با بکارگیری پوشش کیتوزان کاهش نشان داده و در نتیجه میزان کل مواد جامد محلول و اسیدیت قابل تیتر بالاتر باقی مانده و کاهش وزن در میوه‌های پوشش‌دار شده با کیتوزان و ناتامیسین-کیتوزان کاهش نشان می‌دهد (Zhang et al., 2022). براساس گزارش دیگری نسبت به میوه‌های شاهد کم‌ترین کاهش وزن در گیلاس پوشش داده شده با کیتوزان در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد بود (Tokatli & Demirdoven, 2020). چین و همکاران (Chien et al., 2007) گزارش دادند که غلظت‌های مختلف کیتوزان باعث تأخیر در کاهش وزن، افزایش میزان اسیدهای آلی و ویتامین C در طی دوره پس از برداشت میوه انبه شد. جیانگ و همکاران (Jiang et al., 2001) نشان دادند که میوه‌های *Dimocarpus longan* (لانگون فروت) تیمار شده با کیتوزان در مقایسه با شاهد آب کمتری از دست داده و تیمارهای کیتوزان باعث حفظ بهتر کیفیت میوه‌ها نسبت به تیمار شاهد شده‌اند (Jiang et al., 2001). استفاده از ژل طبیعی آلوه‌ورا بعنوان پوشش خوراکی در میوه اثرات قابل توجه و مثبتی در کاهش زوال و افزایش امتیاز ویژگی‌های حسی داشته است (Monajem et al., 2022). سوگوار و همکاران (Sogvar et al., 2016) گزارش دادند ترکیب آلوه‌ورا به عنوان پوشش جهت حفظ کیفیت بعد از برداشت در میوه توت‌فرنگی باعث حفظ کیفیت از نظر ویژگی‌هایی مثل سفتی میوه، مواد جامد محلول، اسید قابل تیتراسیون، ویتامین C، آنتوسیانین و آنتی‌اکسیدانی کل و کاهش پوسیدگی و رشد کپک‌ها شده است (Sogvar et al., 2016).

براساس گزارش هانگ و همکاران (Hong et al., 2012) تیمار کیتوزان به طور قابل توجهی موجب از دست دادن آب، ایجاد تغییرات

سانترفیوژ کرده و محلول رویی را با اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۵۰ نانومتر قرائت گردید (Wagner, 1979). برای اندازه‌گیری نشاسته از روش یدید پتاسیم استفاده گردید (Jalili Marandi, 2004). برای اندازه‌گیری وزن، ۶ عدد میوه از هر تکرار توسط ترازوی دیجیتالی مدل EK1200i, Japan اندازه‌گیری شد (Fisk et al., 2008). اندازه‌گیری سفتی بافت میوه‌ها نیز با دستگاه پنترومتر مدل FR-5105 انجام شد. برای ارزیابی کیفیت (بازارپسندی) مزه‌ی و عطر میوه‌ها، از تعداد ۱۰ نفر ارزیاب حسی (داده‌های هر تکرار در تیمار میانگین نمره ۱۰ نفر ارزیاب است) استفاده شد، ارزیاب‌ها، کیفیت میوه‌های موجود را به صورت ثابت، در روزهای نمونه‌برداری، براساس مقیاس هدونیک ۱۰ نقطه‌ای ارزیابی نمودند (Martinez-Romero et al., 2007). تجزیه واریانس داده‌ها با نرم‌افزار MSTATC و مقایسه میانگین با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

### نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۱) نشان داد که زمان نمونه برداری اثر معنی‌داری بر طعم میوه گیلاس داشت. کاربرد ژل آلوه‌ورا بر صفات مواد جامد محلول، نشاسته، سفتی بافت، طعم میوه و کاهش وزن میوه اثر معنی‌داری داشت. کاربرد کیتوزان نیز بر مواد جامد محلول، نشاسته، سفتی بافت و طعم میوه داشت. براساس نتایج این بررسی اثر متقابل کاربرد توام ژل آلوه‌ورا با کیتوزان اثر معنی‌داری بر میزان مواد جامد محلول، نشاسته، سفتی بافت و طعم میوه در طی دوره انبارمانی داشت (جدول ۱). در این بررسی اثر زمان بر طعم میوه گیلاس معنی‌دار بود، مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در ۴۵ روز بعد از انبارمانی نسبت قندهای محلول به اسید کل افزایش یافت (شکل ۱).

در دمای صفر درجه سلسیوس و رطوبت (۹۰ تا ۹۵ درصد) در سردخانه نگهداری شدند.

اندازه‌گیری صفات در دو زمان هنگام انبار و ۴۵ روز پس از آن انجام شد. در این بررسی صفات ویتامین C به روش رانگانا (Ranganna, 1986) انجام شد. بدین صورت که ۱۰ گرم از میوه با مخلوط کن برقی با چند میلی‌لیتر اسید متافسفریک بطور کامل مخلوط شده و سپس با متافسفریک اسید به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد. در نهایت پس از عبور از کاغذ صافی ۱۰ میلی‌لیتر از محلول با معرف رنگی ۶،۲ دی کلروفنول ایندوفنل تا ظهور رنگ ارغوانی و پایداری آن بمدت ۱۰ الی ۵ ثانیه تیتیر گردید و براساس فرمول زیر میزان آسکوربیک اسید (ویتامین ث) در ۱۰۰ گرم میوه تعیین شد (Mostofi & Najafi, 2005).

وزن نمونه / (۱۰۰ × درجه رقت × اکی‌والان رنگ × حجم رنگ مصرفی) = میزان اسید آسکوربیک در ۱۰۰ گرم میوه  
برای اندازه‌گیری مواد جامد محلول از دستگاه رفرنومتر مدل OE-ATC France استفاده شد (Mostofi & Najafi, 2005). اسیدیته کل به روش تیتراسیون با محلول NaOH ۰/۱ نرمال تا pH=۸/۲ بر حسب اسید سیتریک در ۱۰۰ گرم میوه محاسبه شد. برای این منظور پنج میلی‌لیتر آب میوه با ۹۵ میلی‌لیتر آب مقطر مخلوط و سپس تیتیر گردید (Mostofi & Najafi, 2005). اندازه‌گیری آنتوسیانین به روش متانول اسیدی انجام گرفت بدین نحو که یک میلی‌لیتر کلریدریک اسید را با ۹۹ میلی‌لیتر متانول مخلوط کرده ۱۰ میلی‌لیتر محلول بدست آمده را با ۰/۱ گرم بافت میوه را در هاون ساییده و سپس عصاره حاصل را به مدت ۲۴ ساعت در محل تاریکی با دمای ۴ درجه سانتی‌گراد قرار داده و سپس عصاره را بمدت ۱۰ دقیقه در ۴۰۰۰ دور در دقیقه

جدول ۱- تجزیه واریانس اثر ژل آلوه‌ورا و کیتوزان روی انبارمانی گیلاس رقم لامبرت

Table 1- Variation analysis of the effect of aloe vera gel and chitosan on cherry fruit cv. Lambert storage

منابع تغییرات Source of variation	Df	میانگین مربعات Mean of squares								
		مواد جامد محلول TSS	اسید قابل تیتراسیون TA	ویتامین ث Vitamine C	آنتوسیانین Anthocyanin	نسبت مواد جامد محلول به اسید TSS/TA	سفتی Firmness	کاهش آب Water loss	نشاسته Starch	بازاررسانی Marketing
زمان Time (t)	1	0.77 <sup>ns</sup>	0.0003 <sup>ns</sup>	0.053 <sup>ns</sup>	17.5 <sup>ns</sup>	**26.3	0.034 <sup>ns</sup>	0.135 <sup>ns</sup>	3.75 <sup>ns</sup>	0.13 <sup>ns</sup>
آلوه‌ورا Aloe vera (a)	3	**23	0.002 <sup>ns</sup>	0.05 <sup>ns</sup>	20.9 <sup>ns</sup>	0.12 <sup>ns</sup>	**125.8	*1.871	**37.27	3.385 <sup>ns</sup>
کیتوزان Chitosan (b)	3	**11.5	0.0034 <sup>ns</sup>	0.29 <sup>ns</sup>	60 <sup>ns</sup>	*0.68	**36.3	0.939 <sup>ns</sup>	**25.56	0.673 <sup>ns</sup>
a*t	3	1.424 <sup>ns</sup>	0.0001 <sup>ns</sup>	0.006 <sup>ns</sup>	3.78 <sup>ns</sup>	0.77 <sup>ns</sup>	0.018 <sup>ns</sup>	0.298 <sup>ns</sup>	1.58 <sup>ns</sup>	0.51 <sup>ns</sup>
b*t	3	2.39 <sup>ns</sup>	0.0001 <sup>ns</sup>	0.0042 <sup>ns</sup>	2.79 <sup>ns</sup>	0.066 <sup>ns</sup>	0.008 <sup>ns</sup>	0.728 <sup>ns</sup>	7.37 <sup>ns</sup>	0.86 <sup>ns</sup>
b*a	9	**5.36	0.0004 <sup>ns</sup>	0.0143 <sup>ns</sup>	8.13 <sup>ns</sup>	**0.315	**56.6	0.634 <sup>ns</sup>	**17	0.006 <sup>ns</sup>
a*b*t	9	0.431 <sup>ns</sup>	0.0003 <sup>ns</sup>	0.004 <sup>ns</sup>	2.174 <sup>ns</sup>	1.15 <sup>ns</sup>	0.011 <sup>ns</sup>	0.81 <sup>ns</sup>	1.15 <sup>ns</sup>	0.037 <sup>ns</sup>
Error	64	1.5	0.003	0.194	926.9	0.25	0.136	0.538	5.4	1.5
cv %		2.35	2.3	1.2	4.32	2.84	0.83	3.39	4	6.5

غیر معنی‌دار: ns، معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد: \* و معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد: \*\*  
ns- not significant, \*P≤0.05, \*\*P≤0.01



شکل ۱- اثر زمان روی نسبت مواد جامد محلول به اسید قابل تیتراسیون (طعم) میوه گیلاس رقم لامبرت

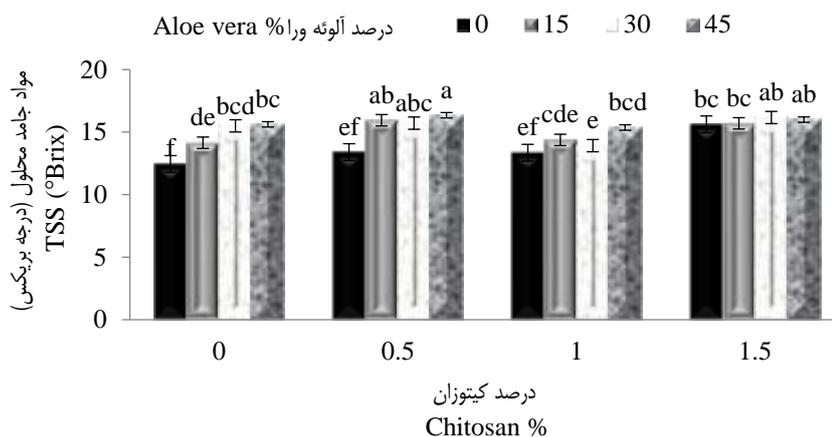
میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد غیر معنی‌دار هستند.

Fig. 1. The effect of time on the ratio of total soluble solids to titratable acidity of cherry fruit cv. Lambert means with same letters in each column have not difference based on LSD test ( $P \leq 0.05$ ).

تیمارهای شاهد و اثر متقابل کاربرد ۴۵ درصد ژل آلوه‌ورا همراه با ۱/۵ درصد کیتوزان و همچنین اثر متقابل کاربرد ۱۵ درصد ژل آلوه‌ورا بدون کیتوزان به‌دست آمد (شکل ۳). تصور می‌شود که دلیل این افزایش آهسته‌تر اسیدیته قابل تیتراسیون در میوه‌های پوشش داده شده با کیتوزان و آلوه‌ورا می‌تواند به‌دلیل کاهش استفاده از اسید آلی در تنفس از طریق پوشش‌ها باشد که به‌عنوان یک مانع عمل می‌کند (Nabifarkhani *et al.*, 2015). نتایج این پژوهش با گزارش توکاتلی و دمیردوون (Tokatli & Demirdoven, 2020) مطابقت دارد و اما در مقابل نیز گزارش کردند که اسیدیته قابل تیتراسیون گیلاس‌های پوشش داده شده با پوشش‌های خوراکی مختلف همیشه بیشتر از شاهد بوده است (Aday & Caner, 2010). افزایش نسبت مواد جامد محلول به اسید قابل تیتراسیون با افزایش زمان نگهداری میوه‌ها از عواملی مثل تجزیه اسیدهای آلی به قند و نیز تبدیل شدن آنزیم‌های پلی‌ساکاریدی نامحلول به محلول، ناشی می‌شود (Cardenas-Perez *et al.*, 2017).

براساس نتایج حاصل میزان مواد جامد محلول تحت تأثیر اثرات متقابل غلظت‌های از کیتوزان و ژل آلوه‌ورا قرار داشت. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیشترین میزان مواد جامد قابل حل (۱۶/۳۵ درجه بریکس) در نتیجه کاربرد ۴۵ درصد ژل آلوه‌ورا همراه با ۰/۵ درصد پوشش کیتوزان حاصل شد که البته این نتیجه با تیمارهای ۱۵ و ۳۰ درصد آلوه‌ورا همراه با کاربرد ۰/۵ درصد کیتوزان و تیمارهای ۴۵ و ۳۰ درصد آلوه‌ورا با کاربرد ۱/۵ درصد از کیتوزان از نظر آماری اختلاف معنی‌داری نداشتند. همچنین در طول انبارمانی، کمترین میزان مواد جامد محلول (۱۲/۴۵ درجه بریکس) در تیمار شاهد مشاهده شد (شکل ۲).

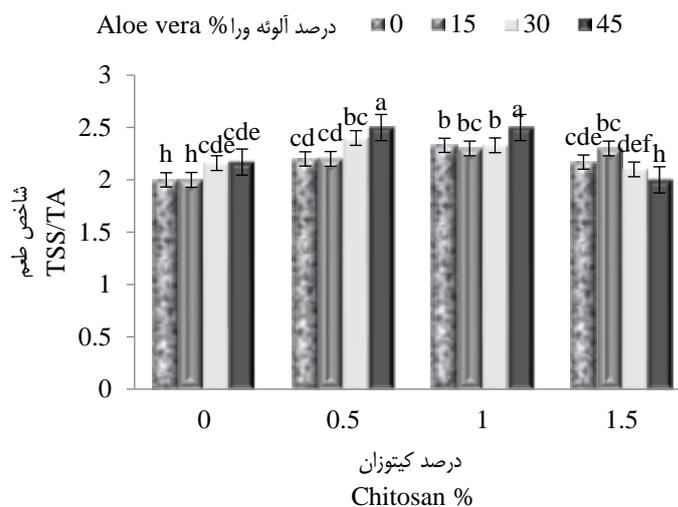
طعم میوه نیز تحت تأثیر اثر متقابل پوشش‌های مورد استفاده قرار گرفت. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بهترین طعم با نسبت ۲/۵ از ترکیب تیماری ژل آلوه‌ورا ۴۵ درصد همراه با کیتوزان ۰/۵ و ۱ درصد حاصل شد. در این صفت کم‌ترین کیفیت (شاخص طعم میوه = ۲) در



شکل ۲- اثر متقابل کیتوزان و آلوه‌ورا روی مواد جامد محلول میوه گیلاس رقم لامبرت

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد غیر معنی‌دار هستند.

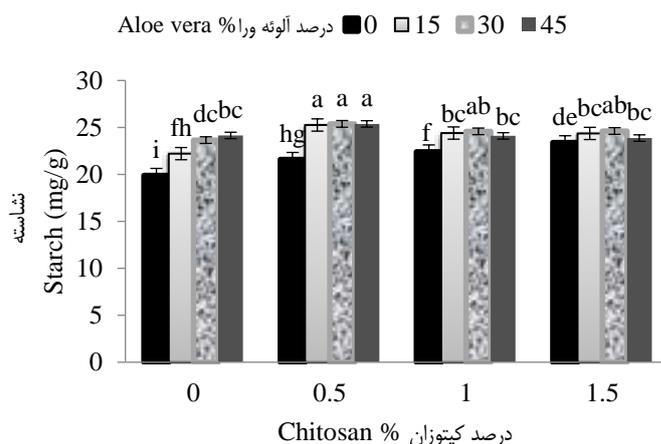
Fig. 2. The interaction of Chitosan and aloe vera gel on the TSS of cherry fruit cv. Lambert means with same letters in each column have not difference based on LSD test ( $P \leq 0.05$ ).



شکل ۳- اثر متقابل کیتوزان و آلوه‌ورا روی نسبت مواد جامد محلول به اسید قابل تیتراسیون میوه گیلاس رقم لامبرت میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد غیر معنی‌دار هستند.  
**Fig. 3. The interaction of Chitosan and aloe vera gel on the TSS/TA of cherry fruit cv. Lambert** means with same letters in each column have not difference based on LSD test ( $P \leq 0.05$ ).

دهیدراسیون و چروکیدگی میوه‌ها جلوگیری کرده و با کاهش تنفس باعث کاهش مصرف مواد ذخیره‌ای در سلول‌ها شده است (Herinandez-Muñoz *et al.*, 2006). براساس گزارش مانوج (Manoj *et al.*, 2016)، لفل تیمار شده با محلول کیتوزان ۱ درصد، کمترین مواد جامد محلول و بالاترین اسید را در پایان دوره نگهداری داشت. پوشش کیتوزان باعث حفظ وزن، عطر، طعم، مواد جامد محلول (TSS)، اسیدیته قابل تیتراسیون (TA) در طول انبارداری میوه انبه شده است (Manoj *et al.*, 2016). براساس گزارش حسن‌پور (Hassanpour, 2015) روی تمشک و فرج پور و شیخاوی روی توت فرنگی (Farajpur & Sheikhlou, 2021) میوه‌های تمشک و توت فرنگی که با ژل آلوه‌ورا پوشش داده شده بودند از کیفیت پس از برداشت بهتری نسبت به شاهد برخوردار بودند. تیمار هلو و آلو با ژل آلوه‌ورا در پس از برداشت باعث شد در هر دو میوه به‌طور قابل‌توجهی تولید اتیلن به تأخیر افتاده و تغییر در صفاتی مثل کیفیت، تغییر رنگ، کاهش اسیدیته، افزایش در شاخص طعم میوه (کل مواد جامد محلول/ کل نسبت اسیدیته) در میوه پوشش داده شده به تأخیر افتاد (Hassanpour, 2015). براساس گزارش درخشان و همکاران (Derakhshan *et al.*, 2019) ترکیب تیماری ژل آلوه‌ورا ۴۵ درصد با پوترسیسین ۲ درصد باعث حفظ درصد بیشتری از مواد جامد محلول در هلو در طول دوره انبارمانی شده بود. این گزارش‌ها با نتایج حاضر در یک راستا می‌باشند.

پوشش خوراکی طبیعی آلوه‌ورا توانایی ایجاد یک مانع مضاعف بر فرآیندهای متابولیکی محصول را دارد و بدلیل محدود ساختن تبادلات گازی مابین میوه و محیط موجب حفظ ویژگی‌های کیفی و حسی محصول می‌شود (Monajem *et al.*, 2022). براساس نتایج حاصل، اثر متقابل تیمارها بر میزان نشاسته موجود در میوه گیلاس در طی فرآیند انبارمانی از نظر آماری دارای اثر معنی داری بودند. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیشترین نشاسته (۲۵/۳۸) مانده در میوه بعد از ۴۵ روز نگهداری، از کاربرد تیمارهای آلوه‌ورا در غلظت‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درصد همراه با کیتوزان ۱ درصد حاصل شد و کمترین مقدار نیز در تیمار شاهد بود (شکل ۴). ژل آلوه‌ورا سبب حفظ محتوای مواد جامد محلول و اسیدهای آلی میوه توت‌فرنگی شد (Farajpur & Sheikhlou, 2021). هر عامل محدود کننده تنفس و تولید اتیلن می‌تواند به واسطه کاهش مصرف قندها از کاهش مواد جامد قابل حل جلوگیری کند. پوشش‌های خوراکی با کاهش تبادل گازها از اتلاف آب جلوگیری کرده و باعث تثبیت اجزای دیواره سلولی مانند پلی‌یورونیدها و همی‌سلولزها و نیز کاهش تنفس و حفظ میزان مواد جامد محلول می‌شوند. پوشش کیتوزان به‌دلیل ایجاد یک لایه نیمه تراوا در اطراف میوه، همچنین ایجاد یک اتمسفر تغییر یافته داخلی موجب کاهش تنفس و تولید اتیلن و جلوگیری از اثر اتیلن شده، در نتیجه باعث حفظ مواد جامد قابل حل و افزایش عمر محصول می‌شود (Bautista-Baños *et al.*, 2006; Jiang *et al.*, 2005). همچنین کیتوزان با ایجاد یک حصار فیزیکی در مقابل تلفات رطوبتی از



شکل ۴- اثر متقابل کیتوزان و آلوه‌ورا روی نشاسته میوه گیلاس رقم لامبرت

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد غیر معنی‌دار هستند

Fig. 4. The interaction of Chitosan and aloe vera gel on the starch of cherry fruit cv. Lambert  
Means with same letters in each column have not difference based on LSD test ( $P \leq 0.05$ ).

و سطوح مختلف ژل آلوه‌ورا اختلاف معنی‌داری بر این صفت نداشتند، درحالی‌که بیشترین کاهش وزن میوه در تیمار شاهد مشاهده شد (شکل ۴). این ژل با ایجاد لایه‌ی حفاظتی روی محصول، محافظت سلول‌های زیر لایه‌ای، کاهش اتلاف آب میوه، کاهش سرعت عبور گازها از پوست از طریق ایجاد پوشش روی عدسک‌ها و روزنه‌ها و در نتیجه تغییر اتمسفر اطراف محصول می‌شود. در واقع استفاده از ژل آلوه‌ورا بعنوان پوشش طبیعی برای میوه ایجاد یک مانع فیزیکی نیمه تراوا در مقابل تبادلات اکسیژن، دی‌اکسید کربن و رطوبت می‌کند که منجر به کاهش از دست‌دهی آب محصول می‌شود (Monajem *et al.*, 2022). بال (Bal, 2013) گزارش داد که پوشش خوراکی کیتوزان در کاهش از دست‌دهی وزن میوه و تنفس و به تأخیر انداختن فساد میوه آلو نقش داشته است. پوشش ژل آلوه‌ورا قادر به بهبود برخی خصوصیات (جلوگیری از افت رطوبت و حفظ سفتی بافت) توت شده است (Farajpur & Sheikhlooui, 2021). کاربرد پوشش‌های خوراکی بر کاهش تنفس، تأخیر در پیری، کاهش وزن در انگور (Shokouhian *et al.*, 2021) و توت فرنگی (Herinandez-Muñoz *et al.*, 2006) گزارش شده است. ژل آلوه‌ورا کیفیت میوه‌های برداشت شده را حفظ و عمر قفسه‌ای آن‌ها را افزایش می‌دهد و سبب حفظ محتوای مواد جامد محلول، اسیدهای آلی میوه شده و از کاهش وزن محصول جلوگیری می‌کند (Bourtoom, 2008) این گزارشات با نتایج این تحقیق همخوانی دارند.

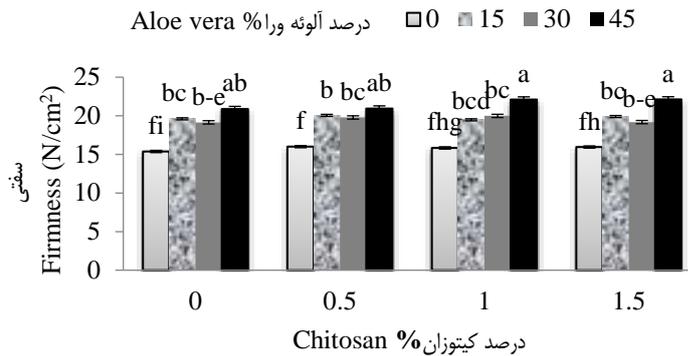
سفتی میوه نیز تحت تأثیر اثرات متقابل تیمارها بود. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که میوه‌های گیلاس تحت تأثیر آلوه‌ورا با عطلت های ۳۰ و ۴۵ درصد همراه با کیتوزان ۱ و ۱/۵ درصد توانستند سفتی بافت خود را در طی فرآیند انبارمانی نسبت به سایر تیمارها بهتر حفظ نمایند. در این صفت تیمار شاهد کم‌ترین سفتی را بعد از ۴۵ روز دوره انبارمانی داشت (شکل ۵). کاهش تولید اتیلن در میوه‌ی تحت پوشش ژل آلوه‌ورا، در نتیجه تغییر اتمسفر درونی است که شامل افزایش  $CO_2$  و کاهش  $O_2$  است. ژل آلوه‌ورا سبب کاهش فعالیت پکتین متیل استراز<sup>۱</sup>، پلی‌گالاکتوزناز<sup>۲</sup> و بتاگالاکتوزیداز<sup>۳</sup> می‌شود. این آنزیم‌ها سبب از بین رفتن دیواره‌ی سلولی گردیده و موجب نرم شدن میوه می‌شوند (Bourtoom, 2008).

دانگ و همکاران (Dong *et al.*, 2004) گزارش کردند که تیمارهای کیتوزان باعث افزایش ماندگاری و افزایش عمر پس از برداشت میوه‌های لیچی بدون پوست شده است و تأثیر کیتوزان ۲ درصد در مقایسه با کیتوزان ۱ و ۳ درصد بیشتر بوده است (Dong *et al.*, 2004). هانگ و همکاران (Hong *et al.*, 2012) نیز گزارش کردند که کیتوزان با کاهش فعالیت اتیلن، باعث تأخیر در رسیدن و پیری و در نتیجه کاهش سفتی میوه گواوا شده است. این گزارش‌ها نتایج تحقیق حاضر را تأیید می‌کنند.

براساس نتایج، وزن میوه در ۴۵ روز دوره انبارمانی تحت تأثیر تیمارهای ژل آلوه‌ورا قرار گرفت. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که کمترین میزان از دست‌دهی وزن میوه با کاربرد ژل آلوه‌ورا به‌دست آمد

3-  $\beta$ -galactosidase

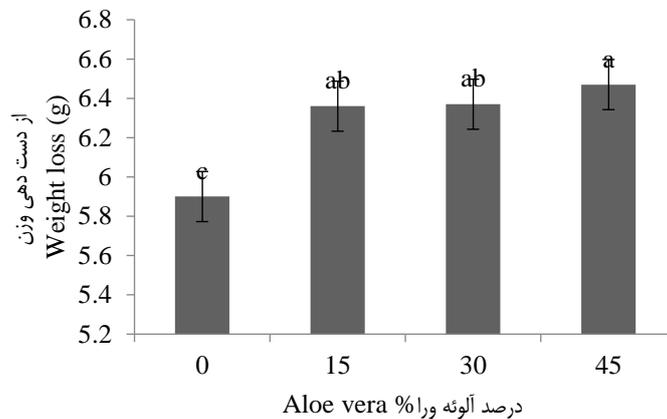
1- Pectin methylesterase  
2- Polygalacturonase



شکل ۵- اثر متقابل کیتوزان و آلوئه‌ورا روی سفتی میوه گیلاس رقم لامبرت

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد غیر معنی‌دار هستند

**Fig. 5. The interaction of Chitosan and aloe vera gel on the firmness of cherry fruit cv. Lambert**  
Means with same letters in each column have not difference based on LSD test ( $P \leq 0.05$ ).



شکل ۶- اثر آلوئه‌ورا روی کاهش وزن میوه گیلاس رقم لامبرت

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد غیر معنی‌دار هستند

**Fig. 6. The effect of aloe vera gel on weight of cherry fruit cv. Lambert**  
Means with same letters in each column have not difference based on LSD test ( $P \leq 0.05$ ).

پوسیدگی میوه می‌شوند را کاهش دهند. نتایج بخوبی نشانگر حفظ کیفیت میوه گیلاس با کاربرد پوشش‌های خوراکی در مقایسه با شاهد بود. استفاده از ترکیب تیماری کیتوزان به غلظت ۱/۵ درصد همراه با آلوئه‌ورا به غلظت ۴۵ درصد برای حفظ کیفیت پس از برداشت میوه گیلاس اثر مثبت و قابل توجهی داشته است. لذا استفاده از این ترکیب تیماری برای افزایش عمر انباری و حفظ کیفیت میوه گیلاس رقم لامبرت در طول دوره انبارداری توصیه می‌گردد.

## نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر، مشتریان توجه زیادی به سمت مواد سازگار با محیط‌زیست داشته‌اند بنابراین، علاقه‌مندی به استفاده از پوشش‌های خوراکی برای حفظ وضعیت بهینه کیفیت میوه‌ها در طول فرآیند بازرسانی و انبارمانی افزایش یافته است. پوشش‌های خوراکی می‌توانند به‌عنوان یک مانع عمل کنند و در نتیجه کاهش افت کیفیت، مهار تبادل گاز، کنترل نرخ تنفس و جلوگیری از رشد میکروارگانیسم‌هایی که باعث

## References

1. Aday, M.S., & Caner, C. (2010). Understanding the effects of various edible coatings on the storability of fresh cherry. *Packag. Technology Science*, 23, 441–456. <https://doi.org/10.1002/pts.910>
2. Ardakani, M.H., Moghadam, M., Saeednia, S., & Pakdin-Parizi, Z. (2010). Epoxidation of alkenes with NaIO<sub>4</sub> catalyzed by an efficient and reusable natural polymer supported ruthenium (III) salophen catalyst. *Journal of the Iranian Chemical Society*, 1-6. <https://doi.org/10.1007/s13738-015-0774-x>
3. Bal, E. (2013). Postharvest application of chitosan and low temperature storage affect respiration rate and quality of plum fruits. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 15(6), 1219-1230.
4. Bautista-Baños, S., Hernandez-Lauzardo, A.N., Velazquez-Del Valle, M.G., Hernández-López, M., Barka, E.A., Bosquez-Molina, E., & Wilson, C.L. (2006). Chitosan as a potential natural compound to control pre and postharvest diseases of horticultural commodities. *Crop Protection*, 25(2), 108-118. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2005.03.010>
5. Bourtoom, T. (2008). Edible films and coatings: characteristics and properties. *International Food Research Journal*, 15(3).
6. Cardenas -Perez, S., Chanona -Perez, J., Mendez -Mendez, J.V., Calderon -Dominguez, G., Lopez -Santiago, R., Perea -Flores, M.J., & Arzate -Vazquez, I. (2017). Evaluation of the ripening stages of apple (Golden Delicious) by means of computer vision system. *Biosystems Engineering*, 159, 46-58. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.04.009>
7. Chien, P.J., Sheu, F., & Yang, F.H. (2007). Effects of edible chitosan coating on quality and shelf life of sliced mango fruit. *Journal of Food Engineering*, 78(1), 225-229. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.09.022>
8. Coma, V., Martial-Gros, A., Garreau, S., Copinet, A., Salin, F., & Deschamps, A. (2002). Edible antimicrobial films based on chitosan matrix. *Journal of Food Science*, 67(3), 1162-1169. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2002.tb09470.x>
9. Derakhshan, N., Shokouhian, A.A., & Fathi achacheloee, B. (2019). Effect of putrescine and aloe vera gel on biochemical indices of peach fruit var. red top during storage life. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 15(1), 159-170. <https://doi.org/10.22067/ifstrj.v0i0.72680>
10. Dong, H., Cheng, L., Tan, J., Zheng, K., & Jiang, Y. (2004). Effects of chitosan coating on quality and shelf life of peeled litchi fruit. *Journal of Food Engineering*, 64(3), 355-358. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2003.11.003>
11. Farajpour, P., & Sheikhloie, H. (2021). Study on edible coating effect, based on aloe vera gel and thymol on the postharvest quality and storage life of strawberry. *Iranian Journal of Food Science and Technology*, 112, 18, 81-95. <https://doi.org/10.52547/fsc.18.112.81>
12. Fisk, C.L., Silver, A.M., Strik, B.C., & Zhao, Y. (2008). Postharvest quality of hardy kiwifruit (*Actinidia arguta* 'Ananasnaya') associated with packaging and storage conditions. *Postharvest Biology and Technology*, 47(3), 338-345. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.07.015>
13. Hassanpour, H. (2015). Effect of aloe vera gel coating on antioxidant capacity, antioxidant enzyme activities and decay in raspberry fruit. *LWT-Food Science and Technology*, 60(1), 495-501. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.07.049>
14. Hernández-Muñoz, P., Almenar, E., Ocio, M.J., & Gavara, R. (2006). Effect of calcium dips and chitosan coatings on postharvest life of strawberries (*Fragaria x ananassa*). *Postharvest Biology and Technology*, 39(3), 247-253. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2005.11.006>
15. Hong, K., Xie, J., Zhang, L., Sun, D., & Gong, D. (2012). Effects of chitosan coating on postharvest life and quality of guava (*Psidium guajava* L.) fruit during cold storage. *Scientia Horticulturae*, 144, 172–178. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.07.002>
16. Jalili Marandi, R. (2004). *Post-Harvest Physiology*. Jihad-Daneshgahi Pub. Urmia, pp, 624.
17. Jiang, Y., & Li, Y. (2001). Effects of chitosan coating on postharvest life and quality of longan fruit. *Food Chemistry*, 73(2), 139-143. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(00\)00246-6](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(00)00246-6)
18. Jiang, Y., Li, J., & Jiang, W. (2005). Effects of chitosan coating on shelf life of cold-stored litchi fruit at ambient temperature. *LWT-food Science and Technology*, 38(7), 757-761. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2004.09.004>
19. Li, P., & Barth, M.M. (1998). Impact of edible coatings on nutritional and physiological changes in lightly-processed carrots. *Postharvest Biology and Technology*, 14(1), 51-60. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(98\)00020-9](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(98)00020-9)
20. Lin, D., & Zhao, Y. (2007). Innovations in the development and application of edible coatings for fresh and minimally processed fruits and vegetables. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 6(3), 60-75. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2007.00018.x>
21. Manoj, H.G., Sreenivas, K.N., Shankarappa, T.H., & Krishna, H.C. (2016). Studies on chitosan and aloe vera gel coatings on biochemical parameters and microbial population of bell pepper (*Capsicum annum* L.) under ambient condition. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 5(1), 399-405. <https://doi.org/10.20546/ijcm.2016.501.039>

22. Martinez-Romero, D., Guillén, F., Valverde, J.M., Bailén, G., Zapata, P., Serrano, M., Castillo, S., & Valero, D. (2007). Influence of "carvacrol" on survival of "Botrytis cinerea" Inoculated in table grapes. *International Journal of Food Microbiology*, 115(2), 144-148. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2006.10.015>
23. McHugh, T.H., & Senesi, E. (2000). Apple wraps: A novel method to improve the quality and extend the shelf life of fresh-cut apples. *Journal of Food Science*, 65(3), 480-485.
24. Monajem, S., Ganjloo, A., & Bimakr, M. (2022). Evaluation and kinetics modelling of some postharvest characteristics changes of cherry tomato coated with fresh aloe vera gel during storage at different temperatures. *Journal of Food Science and Technology (Iran)*, 18(119), 17-33. <https://doi.org/10.52547/fsct.18.119.17>
25. Mostofi, Y., & Najafi, F. (2005). *Laboratory analytical methods of Horticultural Sciences*, Institute of Tehran University Publications and Printing, 136.
26. Nabifarkhani, N., Sharifani, M., Daraei Garmakhany, A., Ganji Moghadam, E., & Shakeri, A. (2015). Effect of nano-composite and Thyme oil (*Tymus vulgaris* L.) coating on fruit quality of sweet cherry (Takdaneh Cv) during storage period. *Food Science & Nutrition*, 3, 349-354. <https://doi.org/10.1002/fsn3.226>
27. Najafzadeh, R. (2013). *Organic culture of cherries*. Sarva Publishing Press, pp. 158.
28. Navarro, D., Díaz-Mula, H., Guillén, F., Zapata, P., Castillo, S., Serrano, M., & Martínez-Romero, D. (2011). Reduction of nectarine decay caused by *Rhizopus stolonifer*, *Botrytis cinerea* and *Penicillium digitatum* with aloe vera gel alone or with the addition of thymol. *International Journal of Food Microbiology*, 151, 241-246.
29. Ranganna, S. (1986). *Handbook of analysis and quality control for fruit and vegetable products*. Tata McGraw-Hill Education.
30. Rong-yu, Z., & Yao-wen, H. (2003). Influence of hydroxypropyl methylcellulose edible coating on fresh-keeping and storability of tomato. *Journal of Zhejiang University Science*, 4(1). <https://doi.org/109-113.10.1631/jzus.2003.0109>
31. Shokouhian A.A., Letafatt F., Fathi-Achachlouei B., Asghari A., & Olfatti R. (2021). Investigation the effect of corn zein and wheat gluten on quality characteristics and storage life of grape cv. rasmi Meshkin. *Journal of Horticultural Science*, 34(4), 693-703. <https://doi.org/10.22067/JHORTS4.V34I4.87246>
32. Sogvar, O.B., Saba, M.K., & Emamifar, A. (2016). Aloe vera and ascorbic acid coatings maintain postharvest quality and reduce microbial load of strawberry fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 114, 29-35. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.11.019>
33. Tokatlı, K., & Demirdöven, A. (2020). Effects of chitosan edible film coatings on the physicochemical and microbiological qualities of sweet cherry (*Prunus avium* L.). *Scientia Horticulturae*, 259, 108656. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108656>
34. Wagner, G.J. (1979). Content and vacuole/extravacuole distribution of neutral sugars, free amino acids, and anthocyanin in protoplasts. *Plant Physiology*, 64(1), 88-93. <https://doi.org/10.1104/pp.64.1.88>
35. Zapata, P.J., Guillén, F., Martínez-Romero, D., Castillo, S., Valero, D., & Serrano, M. (2008). Use of alginate or zein as edible coatings to delay postharvest ripening process and to maintain tomato (*Solanum lycopersicon* Mill) quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 88(7), 1287-1293. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3220>
36. Zhang, C., Gong, H., & Liu, Y. (2022). Effects of postharvest coating using chitosan combined with natamycin on physicochemical and microbial properties of sweet cherry during cold storage. *International Journal of Biological Macromolecules*, 214, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.06.057>



Research Article

Vol. 20, No. 2, May-June 2024, p. 249-266

## Investigating the Effect of Ozone on the Physicochemical, Microbial and Sensory Properties of Brined Ultrafiltered Cheese During Ripening

A.A. Gholamhosseinpour<sup>1\*</sup>, A. Karimi Davijani<sup>2</sup>, M. Karami<sup>3</sup>

1 and 2- Assistant Professor and Former M.Sc. Student, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Jahrom University, Jahrom, Iran, respectively.

(\* - Corresponding Author Email: [ghali@jahromu.ac.ir](mailto:ghali@jahromu.ac.ir))

3- Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Food Science and Technology, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

Received: 26.03.2023  
Revised: 24.06.2023  
Accepted: 01.07.2023  
Available Online: 01.07.2023

### How to cite this article:

Gholamhosseinpour, A.A., Karimi Davijani, A., & Karami, M. (2024). Investigating the effect of ozone on the physicochemical, microbial and sensory properties of brined ultrafiltered cheese during ripening. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 20(2), 249-266. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/ifstrj.2023.81663.1244>

### Introduction

Cheese is the general name of a group of fermented dairy products that are produced all over the world in a variety of flavors, textures, and shapes. This product considered a source of protein, minerals, and vitamins, all of which add to its high nutritional value. White-brined cheeses are soft cheeses that ripen in brine. Brined ultrafiltered cheese, as a popular product, has attracted a broad consumer market in our country. The use of thermal processes to prolong the shelf life of foods has long been considered, but these methods lead to a decrease in nutritional value and product quality. Emerging non-thermal technologies, including ultrasound, pulsed electric field, high hydrostatic pressure, cold plasma and ozone have revolutionized the food processing sector. These processes can improve the safety and quality of food products and increase their shelf life by reducing food spoilage. In addition to expanding food shelf life, these technologies are experiencing more progress in the industry due to reduced energy consumption. Ozone is one of the most effective disinfectants known that does not leave any dangerous residue on food or other surfaces in contact. Ozone treatment does not require heat and therefore saves energy. Ozonation, as a novel technology, is widely used in preserving meat, processing oysters, inhibiting microbial growth, and oxidizing phenolic compounds. Ozone has been mainly used in the dairy industry to reduce or inhibit the growth of pathogenic or spoilage microorganisms. However, its effect on the non-microbial properties of dairy products has not been studied much.

### Materials and Methods

Cheese production was carried out by ultrafiltration technology in the Hamedan Pegah dairy complex (Hamedan, Iran). The starter culture used in cheese production was R708 (containing *Lactococcus lactis* subsp. *cremoris* and *Lactococcus lactis* subsp. *lactis*), which was obtained from Christian Hansen, Denmark. Microbial renin enzyme (Proteria, Handry Company, Belgium) was also used for coagulation. Analytical grade chemicals were also purchased from Merck, Darmstadt, Germany. Ozone gas at concentrations of 2 and 5 ppm was used in different stages of brined ultrafiltered cheese production and then the samples were subjected to physicochemical (total solids (TS), ash, pH, salt, protein, fat, acid degree value (ADV)), microbiological and organoleptic (based on the 5-point hedonic scale) analyses at 35-day intervals during a ripening period of 105 days. The studied treatments were: Ozonization of retentate simultaneously with starter inoculation (OA), Ozonization of retentate before starter inoculation (OB), Ozonization of retentate (before starter inoculation) and brine (OC), Ozonization of brine (OD) and control (C). Statistical analysis (One-way ANOVA and Duncan) was performed at a significance level of 95% by the SPSS package program (v. 20.0, Chicago, IL, USA).



©2023 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

<https://doi.org/10.22067/ifstrj.2023.81663.1244>

## Results and Discussion

Based on the results, the amounts of total solids, ash, salt, ADV and syneresis of cheeses increased significantly ( $p \leq 0.05$ ), while the protein and fat contents of the samples decreased significantly ( $p \leq 0.05$ ) during the ripening period. The pH of the samples decreased from day 0 to 35 and then increased in most samples until the end of the ripening period. The total counts in the samples increased initially until day 70 but then decreased until the end of the ripening period. In general, during the ripening, cheeses treated with 5 ppm ozone had lower microbial load and higher lipolysis compared to samples treated with 2 ppm ozone. In addition, in most treatments, the sensory scores of cheese samples at the end of the ripening period were significantly ( $p \leq 0.05$ ) higher than those at the beginning of the ripening period. The application of ozone treatment was able to improve some of the sensory properties of the cheeses. In general, this improvement was not statistically significant compared to the control, especially at the end of the ripening period.

The positive microbial and physicochemical effects of ozone treatment on cheese samples leading to increase the shelf life of brine cheese up to 105 days (30 days more than usual) without having a negative effect on its sensory properties. Therefore, ozone can be used as a non-thermal treatment to extend shelf life and improve some physicochemical characteristics of cheese.

**Keywords:** Brined cheese, Ozonation, Physicochemical properties, Storage period

## مقاله پژوهشی

جلد ۲۰، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۳، ص. ۲۶۶-۲۴۹

# بررسی اثر ازن بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، میکروبی و حسی پنیر فراپالایش آب‌نمکی طی دوره رسیدگی

علی اکبر غلامحسین پور<sup>۱\*</sup>، علی کریمی داویجانی<sup>۲</sup> - مصطفی کریمی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۱۰

## چکیده

ازن یک فرایند غیرحرارتی است که می‌تواند باعث بهبود کیفیت و ارتقای ایمنی مواد غذایی شده و دوره نگهداری آنها را افزایش دهد. در این پژوهش، از گاز ازن در غلظت‌های ۲ و ۵ ppm، در تولید پنیر فراپالایش آب‌نمکی استفاده گردید و پس از آن نمونه‌ها طی دوره رسیدگی ۱۰۵ روزه مورد آزمایش‌های میکروبی، فیزیکوشیمیایی و حسی قرار گرفتند. ازن‌زنی کنسانتره همزمان با تلقیح آغازگر (OA)، ازن‌زنی کنسانتره قبل از تلقیح آغازگر (OB)، ازن‌زنی کنسانتره (قبل از تلقیح) و آب‌نمک (OC)، ازن‌زنی آب‌نمک (OD) و نمونه شاهد (C) تیمارهای مورد استفاده بودند. طبق نتایج، مقادیر مواد جامد، خاکستر، نمک، عدد اسیدی و آب‌اندازی پنیرها با گذشت زمان رسیدگی به‌طور معنی‌داری ( $p \leq 0.05$ ) افزایش پیدا کرد، درحالی‌که مقادیر پروتئین و چربی نمونه‌ها به‌طور معنی‌داری ( $p \leq 0.05$ ) کاهش یافت. pH نمونه‌ها نیز از روز صفر تا ۳۵ کاهش و پس از آن در اکثر نمونه‌ها تا انتهای دوره رسیدگی افزایش پیدا کرد. شمارش کلی میکروبی نمونه‌ها نیز ابتدا تا روز ۷۰ افزایش یافت، اما در ادامه تا انتهای دوره رسیدگی کاهش پیدا کرد. طی رسیدگی، شمارش کلی پنیرهای تیمار شده با دوز ۵ ppm ازن، کمتر از نمونه‌های تیمار شده با دوز ۲ ppm ازن بود. پنیرهای تیمار شده با دوز ۵ ppm ازن نیز عدد اسیدی بیشتری از نمونه‌های تیمار شده با دوز ۲ ppm ازن داشتند. با افزایش زمان رسیدگی، عدد اسیدی نمونه‌های OD5 و OB5 به‌طور معنی‌داری ( $p \leq 0.05$ ) بیشتر از سایر نمونه‌ها بود. آب‌اندازی نمونه‌های OA5 و OB5 از روز ۷۰ به بعد به‌طور معنی‌داری ( $p \leq 0.05$ ) از دیگر نمونه‌ها بالاتر بود. در بیشتر تیمارها، امتیاز حسی پنیرهای انتهای دوره رسیدگی در مقایسه با پنیرهای ابتدای دوره به‌طور معنی‌داری ( $p \leq 0.05$ ) بالاتر بود و هرچند تیمار ازن توانست برخی از ویژگی‌های حسی پنیرها را ارتقا دهد، اما در کل این افزایش نسبت به نمونه شاهد، خصوصاً در انتهای دوره رسیدگی، معنی‌دار نبود.

**واژه‌های کلیدی:** ازن‌زنی، پنیر آب‌نمکی، دوره نگهداری، ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی

## مقدمه

فساد مواد غذایی، باعث بهبود و ارتقای سطح ایمنی و کیفی مواد غذایی و افزایش ماندگاری آنها شده‌اند (Allai et al., 2022). ازن یکی از مؤثرترین مواد ضد عفونی‌کننده شناخته شده است که هیچ‌گونه باقی‌مانده خطرناکی بر سطوح مواد غذایی و یا سایر سطوح در تماس با آن باقی نمی‌گذارد. تیمار ازن نیاز به گرما نداشته و از این رو باعث صرفه‌جویی در مصرف انرژی می‌شود (Khadre et al., 2001).

استفاده از فرآیندهای حرارتی به‌منظور افزایش ماندگاری مواد غذایی از دیرباز مورد توجه بوده است، اما این روش‌ها منجر به کاهش ارزش غذایی و افت کیفیت محصول می‌شوند. فناوری‌های غیرحرارتی نوظهور از جمله فراصوت، میدان الکتریکی پالسی، فشار هیدرواستاتیک بالا و فناوری ازن بخش فرآوری مواد غذایی را متحول کرده و با کاهش

۱ و ۲- به‌ترتیب استادیار و دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جهرم، جهرم، ایران  
\* نویسنده مسئول: (Email: [ghali@jahromu.ac.ir](mailto:ghali@jahromu.ac.ir))

۳- دانشیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده علوم و صنایع غذایی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

را به مدت صفر (شاهد)، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه تحت تیمار ازن (۰/۷۰۲ میلی گرم در دقیقه) قرار داده و تأثیر آن را بر دانسیته، پروتئین، چربی و شمارش کلی باکتری‌ها بررسی کردند. نتایج نشان داد که تیمار ازن تأثیر معنی‌داری بر دانسیته، پروتئین و چربی شیر نداشت، اما اثر آن بر شمارش کلی باکتری‌ها معنی‌دار بود ( $p \leq 0.05$ ) و تعداد آنها در طول زمان قرار گرفتن در معرض ازن کاهش یافت. در پژوهش دیگری، آب ازنیزه (۲ میلی گرم در لیتر به مدت ۱ تا ۲ دقیقه) برای بهبود کیفیت میکروبی پنیر میناس فرسکال مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که اگرچه ازن تعداد کل مزوفیل‌های هوازی، باکتری‌های اسید لاکتیک، کپک و مخمر را کاهش داد، اما پس از ۳۰ روز نگهداری، بر میزان بقای این میکروارگانیسم‌ها تأثیری نداشت. با این وجود، ازن توانست خصوصیات فیزیکی و شیمیایی اولیه پنیر را حفظ کند (Cavalcante et al., 2013).

در پژوهش حاضر تأثیر ازن بر ویژگی‌های میکروبی، فیزیکوشیمیایی و حسی پنیر فراپالایش آب‌نمکی طی دوره رسیدگی بررسی گردید. به دلیل غیر مداوم بودن خط تولید پنیر فراپالایش آب نمکی امکان بروز آلودگی ثانویه در خط بسیار شایع می‌باشد که یکی از اهداف این پژوهش بررسی قابلیت کاربردی ازن جهت رفع این مشکل می‌باشد. علاوه بر این، پتانسیل ازن در افزایش دوره نگهداری پنیرها نیز مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، با توجه به ضعیف بودن خواص حسی پنیر فراپالایش، یکی دیگر از اهداف، بررسی اثر اکسایشی ازن جهت اصلاح خواص ارگانولپتیک محصول طی دوره رسیدگی بود.

## مواد و روش‌ها

### تولید پنیر

نمونه‌های پنیر در کارخانه پگاه همدان تولید شدند. پس از استانداردسازی و تهیه کنسانتره، عملیات هموزیناسیون و سپس پاستوریزاسیون (۷۵ درجه سانتی‌گراد) انجام گردید. در ادامه کنسانتره جهت تلقیح آغازگر تا دمای ۴۰ الی ۴۵ درجه سانتی‌گراد خنک گردید. پس از تلقیح آغازگر و به منظور تشکیل دلمه اولیه، رنت با کنسانتره مخلوط شد و حلب‌ها به صورت لایه لایه با کنسانتره پر گردیدند. به منظور کاهش pH تا ۴/۸، پنیرها حدود ۱۲ تا ۱۵ ساعت گرمخانه‌گذاری شدند. پس از این مدت، عملیات برش‌زنی دلمه توسط تیغه‌های مخصوص انجام شد و سپس آب‌نمک ۱۰ تا ۱۲ درصد به پنیرها اضافه گردید. در نهایت نیز حلب‌ها دربندی شده و برای انجام آزمون‌های فیزیکوشیمیایی، میکروبی و حسی طی دوره رسیدگی ۱۰۵ روزه به سردخانه ۵ درجه سانتی‌گراد منتقل گردیدند. تیمارهای اعمال شده ازن در مراحل مختلف تولید پنیر عبارت بودند از: ازن‌زنی کنسانتره همزمان با تلقیح آغازگر (OA)، ازن‌زنی کنسانتره قبل از تلقیح آغازگر

ازن، به‌عنوان یک گاز بسیار واکنش‌پذیر، نسبتاً ناپایدار بوده و در محلول آبی (آب مقطر ۲۰ درجه سانتی‌گراد) نیمه عمری حدود ۲۰ تا ۳۰ دقیقه دارد. در صورت وجود مواد آلی در محیط، نیمه عمر ازن کوتاه‌تر خواهد بود (Eglezos & Dykes, 2018). تأثیرات ضد میکروبی ازن بر طیف گسترده‌ای از میکروارگانیسم‌ها از جمله باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی و اسپوره‌های باکتریایی تأیید شده است (Kunicka - Styczyńska & Rajkowska, 2011). ازن کاربردهای بسیاری در زمینه‌های مختلف از جمله نگهداری گوشت، فرآوری صدف، جلوگیری از رشد مخمرها و کپک‌های موجود در میوه‌جات، تخم مرغ و پنیر، اکسایش آهن و منگنز موجود در آب آشامیدنی، اکسایش ترکیبات فنی و سموم دفع آفات و همچنین کنترل رنگ آب‌های سطحی و حضور جلبک‌ها دارد (O'Donnell et al., 2012).

پنیر نام عمومی گروهی از فرآورده‌های لبنی تخمیری است که در سراسر جهان در طعم، بافت و شکل‌های بسیار متنوعی تولید می‌شود. (Gunasekaran & Ak, 2002). پنیرهای سفید تهیه شده در آب نمک اساساً جزء پنیرهای نرم می‌باشند که در آب نمک رسیده و نگهداری می‌شوند. مهمترین دلایل استفاده از آب نمک در این فرآورده‌ها جذب آب اضافی و تکمیل آب‌گیری دلمه، افزایش قوام و استحکام دلمه، جلوگیری از رشد میکروارگانیسم‌های نامطلوب، تعدیل رشد میکروارگانیسم‌های مطلوب از جمله باکتری‌های اسید لاکتیک، کنترل فعالیت آنزیمی طی دوره رسیدگی پنیر و ایجاد عطر و طعم مناسب از طریق کنترل واکنش‌های بیوشیمیایی نظیر پروتئولیز، لیپولیز و گلیکولیز می‌باشند (Dorosti et al., 2011). امروزه پنیر فراپالایش آب‌نمکی، به‌عنوان یک محصول پرفرمدار، بازار مصرف مناسبی را به خود اختصاص داده است.

هدف تیمار محصولات لبنی با ازن، افزایش کیفیت و کاهش آلودگی میکروبی آنها می‌باشد. در یک پژوهش مشخص شد که ازن باعث غیر فعال شدن کامل لیستریا مونوسیتوزنز در شیر خام می‌گردد (Sheelamary & Muthukumar, 2011). در پژوهشی دیگر از ازن برای پیش تیمار شیر خام، قبل از فرآیند حرارتی پاستوریزاسیون، استفاده گردید. این فرآیند باعث ماندگاری طولانی شیر با حفظ محتوای چربی و پروتئین گردید و هیچ اثری از اکسیداسیون مشاهده نشد (Varga & Szigeti, 2016).

سگات و همکاران (Segat et al., 2014)، آب ازنیزه را به‌عنوان یک ضدعفونی‌کننده مؤثر برای سطح پنیر موزارلا پیشنهاد کردند. در مطالعه آنها، پیش تیمار آب با ۲ میلی‌گرم در لیتر ازن منجر به بهبود کیفیت میکروبی و افزایش ماندگاری محصول نهایی گردید. سوپراپتو و همکاران (Suprpto et al., 2021)، تأثیر ازن بر فعالیت فیزیکوشیمیایی و میکروبی شیر تازه را مورد مطالعه قرار دادند. آنها شیر

### عدد اسیدی (لیپولیز)

میزان لیپولیز پنیرهای تولیدی، که به‌صورت مقدار درجه اسیدی (ADV) نشان داده می‌شود، طبق روش نونز-لیسا و داونپورت (Nunez-Elisea & Davenport, 1986)، اندازه‌گیری گردید. بدین منظور ابتدا ۱۰ گرم پنیر با ۶ گرم سولفات سدیم بدون آب مخلوط و سپس ۶۰ میلی‌لیتر حلال دی‌اتیل اتر، جهت استخراج چربی، به ترکیب اضافه شد. برای اختلاط کامل و خروج بهتر چربی از نمونه، از همزن مغناطیسی استفاده گردید. مخلوط حاصله با استفاده از کاغذ واتمن شماره ۴۲ صاف شد. رسوب باقی‌مانده دو بار متوالی و هر بار با ۲۰ میلی‌لیتر دی‌اتیل اتر شسته شد. محلول زیر صافی با محلول پتاس اتانولی ۰/۱ نرمال در حضور معرف فنل‌فتالئین تا ایجاد رنگ ارغوانی پایدار به مدت ۲۰ ثانیه تیتیر گردید. بعد از تیتراسیون، حلال با استفاده از دستگاه اوپراتور چرخان، تبخیر شد. در نهایت چربی باقی‌مانده توزین و مقدار کل اسیدهای چرب آزاد در پنیر بر حسب میلی‌اکی‌والان در ۱۰۰ گرم چربی گزارش شد.

### آب‌اندازی (سینرسیس)

برای تعیین مقدار آب‌اندازی پنیرها، آب نمک خروجی از دلمه، وزن شده و به‌صورت درصدی از وزن کل محتویات درون کاپ بیان گردید (Karimi et al., 2012).

### ارزیابی حسی

ارزیابی خصوصیات حسی نمونه‌ها بر مبنای مقیاس هدونیک ۵ نقطه‌ای صورت گرفت. ارزیابی حسی توسط ۱۰ نفر از ارزیابان آموزش دیده در روزهای اول و آخر دوره نگهداری پنیر انجام شد. در این آزمون مکعب‌های ۲۰ گرمی پنیر در اختیار ارزیابان قرار گرفت و از آنان خواسته شد تا قبل از انجام هر آزمون دهان خود را با آب بشویند. بدین‌منظور، صفات طعم، آروما، بافت، رنگ و پذیرش کلی نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت (Gholamhosseinpour et al., 2022). طعم مجموع کل تأثیرات حسی یا احساسات درک شده هنگام قرار گرفتن ماده غذایی در دهان می‌باشد. آروما درک ما از ترکیبات فرآری است که از غذا آزاد می‌شوند. بافت اصطلاح پیچیده‌ای است که با ساختار ماده غذایی مرتبط بوده و خواص مکانیکی، هندسی و رطوبتی آن را در بر می‌گیرد. رنگ به‌عنوان ادراک ناشی از نور در تعامل با ماده غذایی تعریف می‌شود. پذیرش کلی نیز درک کلی و نهایی ما از ماده غذایی با در نظر گرفتن ویژگی‌های مختلف حسی می‌باشد (Clark et al., 2009).

(OB)، آزن‌زنی کنسانتره (قبل از تلقیح آغازگر) و آب نمک (OC) و آزن‌زنی آب نمک تنها (OD). در تمامی تیمارها از آزن‌گازی در غلظت‌های ۲ و ۵ پی‌پی‌ام استفاده گردید. از این رو، اعداد بعد از کد هر تیمار بیانگر میزان دوز مصرفی آزن می‌باشد. کد C نیز نمونه شاهد یا بدون تیمار آزن می‌باشد.

### شمارش کلی میکروارگانیسم‌ها

جهت شمارش کلی میکروارگانیسم‌ها طبق استاندارد ملی ایران، از روش کشت مخلوط در محیط‌کشت پلیت کانت آگار و گرمخانه‌گذاری به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد استفاده گردید (ISIRI, 2015).

### ماده خشک

اندازه‌گیری ماده جامد براساس روش وزنی انجام پذیرفت (AOAC, 2005).

### خاکستر

مقدار خاکستر نمونه‌ها توسط کوره الکتریکی در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به روش وزنی اندازه‌گیری گردید (AOAC, 2005).

### pH

برای اندازه‌گیری pH، طبق استاندارد ملی ایران، پس از کالیبراسیون pH متر Metrohm سوئیس با بافرهای ۴ و ۷، الکتروود دستگاه به‌طور مستقیم درون قالب پنیر قرار گرفت (ISIRI, 2022).

### نمک

برای اندازه‌گیری مقدار نمک از روش مور استفاده شد. در این روش، از نیترات نقره ۰/۱ نرمال به‌عنوان عامل تیتروکننده و از کرومات پتاسیم به‌عنوان شناساگر استفاده گردید (IDF, 1988).

### پروتئین کل

ازت کل نمونه‌های پنیر به‌روش کلدال اندازه‌گیری شد. مقدار نمونه برای هر یک از پنیرها ۵ گرم بود، مقدار پروتئین کل از حاصل ضرب مقدار ازت اندازه‌گیری شده در ضریب تبدیل ۶/۲۵ محاسبه گردید (AOAC, 2005).

### چربی

مقدار چربی نمونه‌ها به‌روش ژربر و با استفاده از سانتریفیوژ ژربر Funke ساخت کشور آلمان اندازه‌گیری شد (BSI, 1989).

## تجزیه و تحلیل آماری

در این پژوهش، از آزمون فاکتوریل بر پایه طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی استفاده گردید. آنالیز واریانس با استفاده از ANOVA و مقایسه میانگین‌ها با روش دانکن در سطح معنی‌داری ۵ درصد توسط نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۰۱۹ انجام گرفت. رسم منحنی‌ها نیز با استفاده از نرم‌افزار Microsoft Excel 2016 صورت پذیرفت.

## نتایج و بحث

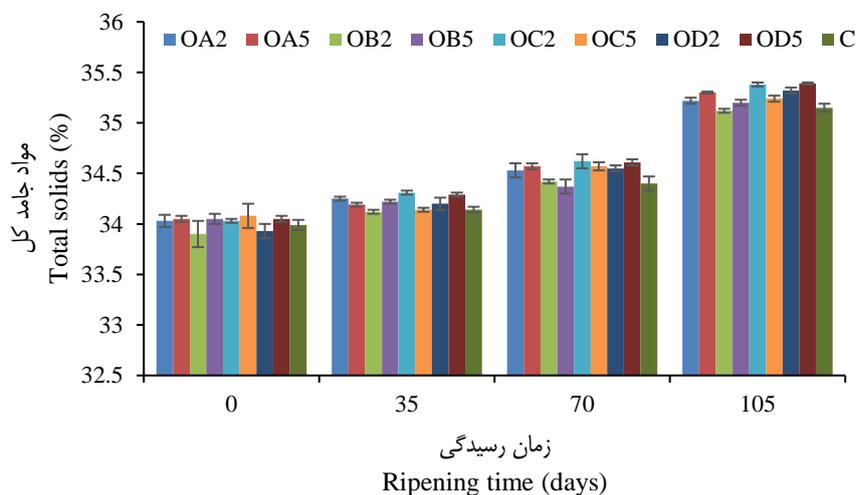
### تأثیر تیمار ازن بر میزان مواد جامد کل پنیر طی دوره رسیدگی

**شکل ۱** اثر تیمار ازن بر میزان مواد جامد کل نمونه‌های پنیر طی دوره رسیدگی را نشان می‌دهد. میزان مواد جامد کل در تمام نمونه‌ها از روز صفر تا ۱۰۵ دوره رسیدگی به‌طور پیوسته و معنی‌داری ( $p \leq 0.05$ ) افزایش یافت. کمترین و بیشترین میزان مواد جامد کل به ترتیب مربوط به نمونه‌های OD2 (۳۳/۹۳٪ در روز صفر) و OD5 (۳۵/۳۹٪ در روز ۱۰۵) بود. بیشتر بودن مواد جامد در نمونه‌های تیمار شده با دوز بالاتر ازن ممکن است به دلیل دناتوراسیون گسترده‌تر پروتئین باشد که نگهداری آب را کاهش داده و باعث خروج بیشتر سرم از دل‌مه و به دنبال آن افزایش ماده خشک پنیر می‌شود. در اکثر زمان‌های رسیدگی، نمونه‌های OC2 و OD5 مواد جامد کل بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها داشتند. در انتهای دوره رسیدگی، مقدار مواد جامد کل نمونه

OD5 به‌طور معنی‌داری ( $p \leq 0.05$ ) از میزان مواد جامد کل سایر نمونه‌ها، به جز نمونه‌های OC2 و OD2 بالاتر بود. میزان مواد جامد کل نمونه شاهد در ۳۵ روز ابتدایی دوره رسیدگی، با اکثر نمونه‌ها تفاوت معنی‌داری نداشت، اما با افزایش زمان رسیدگی این اختلاف بیشتر شد، به‌گونه‌ای که در روز ۱۰۵ دوره رسیدگی به‌طور معنی‌داری از مواد جامد کل سایر نمونه‌ها، به جز نمونه‌های OA2، OB5 و OB2، کمتر بود.

نتایج یافته‌های ذنوبی و گلی (Zonoubi & Goli, 2021) بر روی پنیر فتا نشان داد که مواد جامد کل پنیر طی ۶۰ روز رسیدگی روند افزایشی داشته است. سربازی و همکاران (Sarhazi et al., 2015) در پژوهش خود بر روی پنیر کوزه، دلیل افزایش مواد جامد کل پنیر را افزایش میزان جذب نمک طی دوره رسیدگی عنوان کردند. به‌طور کلی، دمای بالای نگهداری پنیر (با تأثیر بر هیدراسیون کازئین)، افزایش غلظت نمک در دل‌مه (با افزایش میزان آب‌اندازی)، تبخیر آب طی دوره رسیدگی، جذب پایین آب در پنیرهای با pH پایین (به دلیل افزایش سرعت نوآرایی پیوندهای پروتئین-پروتئین در ژل‌های کازئینی با کاهش pH) از جمله دلایل افزایش میزان مواد جامد کل می‌باشند (Gholamhosseinpour et al., 2022).

سرت و مرکان (Sert & Mercan, 2021) در بررسی اثر ازن بر ویژگی‌های میکروبیولوژیک و فاکشنال شیر خشک پس‌چرخ گزارش کردند که این تیمار حتی به مدت ۱۲۰ دقیقه نیز تأثیر معنی‌داری بر محتوای رطوبتی محصول نداشت.



شکل ۱- تأثیر تیمار ازن بر میزان مواد جامد کل پنیر طی دوره رسیدگی

Fig. 1. The effect of ozone treatment on the amount of cheese total solids during ripening

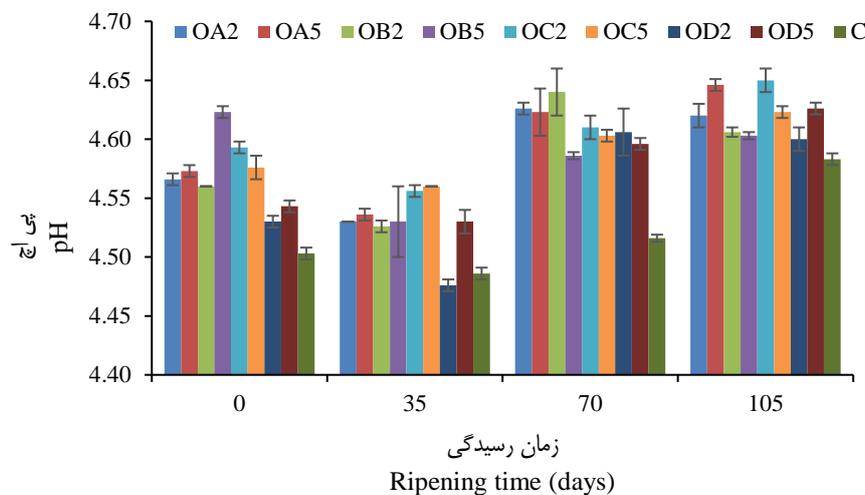
برخی پژوهشگران نیز پس از کاهش اولیه pH، عدم تغییر و یا افزایش pH در انتهای دوره رسیدگی را گزارش کرده‌اند (Özer et al., 2003; Lopez et al., 2007). دلیل افزایش pH در اواخر دوره رسیدگی، تولید محصولات ناشی از پروتولیز یا کاتابولیسم (دکربوکسیلاسیون و دامیناسیون) اسیدهای آمینه نظیر آمونیاک و همچنین متابولیسم اسید لاکتیک توسط مخمرها و کپک‌ها عنوان شده است (Gobbetti et al., 1997; Hayaloglu et al., 2007).

نتایج یافته‌های شانشول (Shanshool, 2020) بر روی شیر تیمار شده با گاز ازن، برای ساخت پنیر نرم، نشان داد که شیرهای تیمار شده با ازن در غلظت ۰/۵ گرم بر ساعت در مدت زمان تماس ۵، ۱۵ و ۳۰ دقیقه، میزان pH بالاتری، مخصوصاً در مدت زمان تماس ۱۵ و ۳۰ دقیقه، نسبت به نمونه شاهد داشتند. پژوهش کاولکاتنه و همکاران (Cavalcante et al., 2013) در مورد تأثیر تیمار ازن بر پنیر میناس فرسکال برزیلی طی دوره نگهداری نیز نشان داد که نمونه‌های تیمار شده به مدت ۱ و ۲ دقیقه، از pH بالاتری نسبت به نمونه شاهد در طول دوره نگهداری برخوردار بودند. علاوه بر این، pH پنیرهای تیمار شده در مدت زمان ۲ دقیقه نیز نسبت به پنیرهایی که ۱ دقیقه در معرض ازن قرار داشتند، بالاتر بود.

گراسو و همکاران (Grasso et al., 2023) با بررسی اثر تیمار ازن گازی (۲۰۰ و ۳۰۰ ppb) بر ویژگی‌های کیفی پنیر پکورینو، در انتهای دوره رسیدگی ۵ ماهه تفاوت معنی‌داری را بین میزان مواد جامد نمونه‌های شاهد و تیمار شده با ۲۰۰ ppb ازن مشاهده نکردند، هر چند میزان مواد جامد نمونه‌های تیمار شده با دوز ۳۰۰ ppb ازن به‌طور معنی‌داری از دو مورد دیگر بیشتر بود.

### تأثیر تیمار ازن بر pH پنیر طی دوره رسیدگی

اثر تیمار ازن بر pH نمونه‌های مختلف پنیر طی دوره رسیدگی در شکل ۲ ارائه شده است. مقدار pH نمونه‌های مختلف طی دوره رسیدگی از ۴/۴۸ در روز ۳۵ برای نمونه OD2 تا ۴/۶۵ در روز ۱۰۵ برای نمونه OC2 متغیر بود. pH نمونه‌ها از روز صفر تا ۳۵ کاهش و پس از آن تا روز ۷۰ دوره رسیدگی افزایش یافت و این روند در اکثر نمونه‌ها تا روز ۱۰۵ ادامه پیدا کرد. برای تمام نمونه‌ها، pH روز ۳۵ به‌طور معنی‌داری ( $p \leq 0/05$ ) پایین‌تر از pH انتهای دوره رسیدگی بود. به‌طور کلی، بین نمونه‌های مختلف، نمونه شاهد کمترین مقدار pH را طی دوره رسیدگی نشان داد، به جز روز ۳۵ که آن هم تفاوت معنی‌داری با نمونه OD2 نداشت.



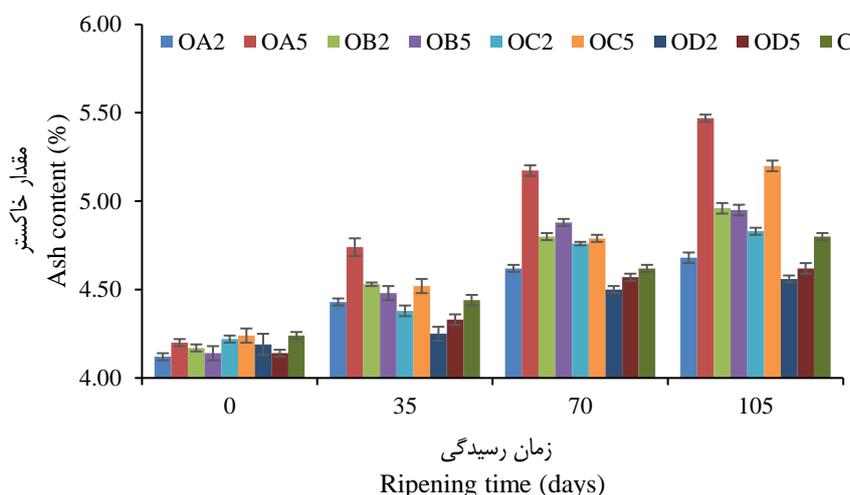
شکل ۲- تأثیر تیمار ازن بر میزان pH پنیر طی دوره رسیدگی  
Fig. 2. The effect of ozone treatment on the pH of cheese during ripening

بیشترین میزان خاکستر را داشتند. میزان خاکستر بیشتر نمونه‌ها در روز صفر تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نداشتند، اما در ادامه میزان خاکستر نمونه OA5 به‌طور معنی‌داری ( $p \leq 0/05$ ) بالاتر از سایر نمونه‌ها بود. نتایج به‌دست‌آمده از مطالعه گراسو و همکاران (Grasso et al., 2023) نشان‌دهنده روند غیر ثابتی در میزان خاکستر پنیرهای شاهد و تیمار

تأثیر تیمار ازن بر میزان خاکستر پنیر طی دوره رسیدگی در شکل ۳ اثر تیمار ازن بر میزان خاکستر نمونه‌های پنیر طی دوره رسیدگی نشان داده شده است. میزان خاکستر نمونه‌ها طی دوره رسیدگی به‌طور معنی‌داری ( $p \leq 0/05$ ) افزایش پیدا کرد. نمونه OA2 با ۴/۱۲٪ در روز صفر کمترین و نمونه OA5 با ۵/۴۷٪ در روز ۱۰۵

شده با ازن بود. به‌طور کلی نمونه‌های تیمار شده با مقدار بالاتر ازن (به استثنای OD5) پس از روز ۳۵ دوره رسیدگی در مقایسه با سایر نمونه‌ها حاوی خاکستر بیشتری بودند. این نتایج با یافته‌های سلیمانی-رامبد و همکاران (Soleimani-Rambod *et al.*, 2015) (پنیر سفید ایرانی) و بیگ‌محمدی و همکاران (Beig Mohammadi *et al.*, 2015) (پنیر لور)، که افزایش میزان خاکستر پنیر طی دوره رسیدگی را گزارش کرده بودند، مطابقت داشت. آنها دلیل این افزایش را به افزایش غلظت نمک طی دوره رسیدگی نسبت دادند.

شکل ۳- تأثیر تیمار ازن بر میزان خاکستر پنیر طی دوره رسیدگی

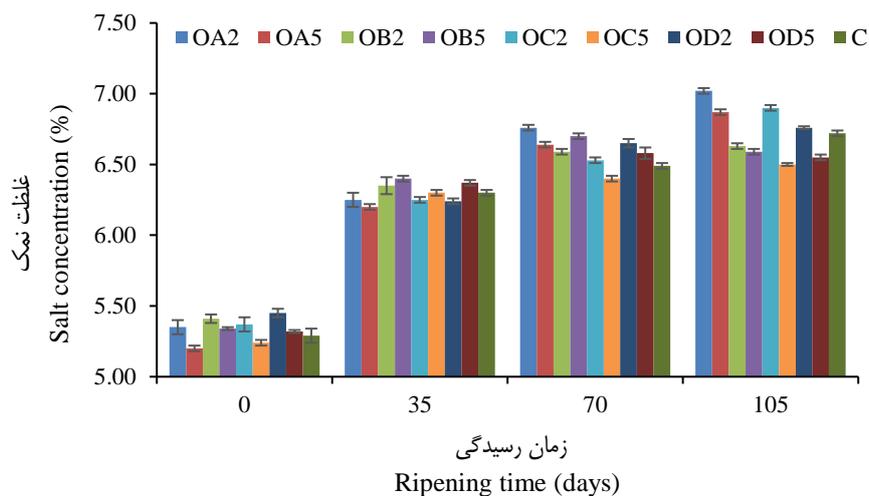


شکل ۳- تأثیر تیمار ازن بر میزان خاکستر پنیر طی دوره رسیدگی  
Fig. 3. The effect of ozone treatment on the amount of cheese ash during ripening

توسط سلیمانی-رامبد و همکاران (Soleimani-Rambod *et al.*, 2015) در مورد پنیر سفید ایرانی، که افزایش میزان نمک طی دوره رسیدگی را گزارش کرده بودند، مطابقت داشت. وقتی پنیر در آب نمک قرار می‌گیرد، مولکول‌های NaCl به‌صورت یون‌های  $Na^+$  و  $Cl^-$  به‌دلیل اختلاف فشار اسمزی بین رطوبت پنیر و آب‌نمک، وارد بافت پنیر شده و در نتیجه میزان نمک تا پایان دوره رسیدگی افزایش می‌یابد (Forouzan *et al.*, 2009). این اختلاف در ابتدای دوره رسیدگی به مراتب بالاتر می‌باشد. افت رطوبت طی دوره رسیدگی نیز باعث افزایش غلظت نمک می‌گردد.

نمک با تحت تأثیر قرار دادن رشد میکروارگانیسم‌ها و در پی آن تولید اسیدلاکتیک، بر pH مؤثر می‌باشد. افزایش غلظت نمک ارتباط مستقیمی با افزایش pH دارد، که دلیل آن می‌تواند کاهش فعالیت میکروارگانیسم‌ها و در نتیجه کاهش اسید لاکتیک تولیدی در غلظت‌های بالای نمک باشد (Dorosti *et al.*, 2011).

تأثیر تیمار ازن بر میزان نمک پنیر طی دوره رسیدگی اثر تیمار ازن بر میزان نمک نمونه‌های پنیر طی دوره رسیدگی در شکل ۴ ارائه شده است. مقدار نمک طی دوره رسیدگی از ۵/۲٪ (نمونه OA5 در روز صفر) تا ۷/۰۲٪ (نمونه OA2 در روز ۱۰۵) متغیر بود. افزایش معنی‌دار ( $p \leq 0/05$ ) غلظت نمک در ۳۵ روز ابتدایی دوره رسیدگی با شیب بالایی صورت گرفت، اما در ادامه این افزایش با شیب ملایم‌تری دنبال شد. معنی‌داری تفاوت بین نمونه‌های مختلف در انتهای دوره رسیدگی ملموس‌تر بود که می‌تواند ناشی از افزایش آباندازی در انتهای دوره رسیدگی باشد. در روز ۱۰۵ دوره رسیدگی، میزان نمک نمونه OA2 به‌طور معنی‌داری ( $p \leq 0/05$ ) بیشتر از سایر نمونه‌ها بود. بین میزان نمک نمونه‌های OA5 و OC2 تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد، در حالی که میزان نمک آنها پس از نمونه OA2 به‌طور معنی‌داری ( $p \leq 0/05$ ) بیش از سایر نمونه‌ها نمود. این نتایج با یافته‌های حاصل از پژوهش کنکرت (Cankurt, 2019) بر روی پنیر سفید ترکیه‌ای و همچنین با نتایج گزارش شده



شکل ۴- تأثیر تیمار ازن بر میزان نمک پنیر طی دوره رسیدگی  
 Fig. 4. The effect of ozone treatment on the salt concentration of cheese during ripening

#### تأثیر تیمار ازن بر میزان چربی پنیر طی دوره رسیدگی

شکل ۶ اثر تیمار ازن بر میزان چربی نمونه‌های پنیر طی دوره رسیدگی را نشان می‌دهد. براساس شکل، مقدار چربی نمونه‌ها بین ۱۴٪ (برای نمونه‌های OB5 و OC2 در روز صفر و نمونه شاهد در روزهای صفر و ۳۵) و ۱۳/۸۷٪ (برای نمونه OA5 در روز ۱۰۵) نوسان داشت. میزان چربی نمونه‌ها طی دوره رسیدگی کاهش یافت و این کاهش از روز ۳۵ تا انتهای دوره رسیدگی معنی‌دار ( $p \leq 0.05$ ) بود. میزان چربی نمونه‌های شاهد و OA5 در طول دوره رسیدگی (به جز روز صفر) به‌طور معنی‌داری ( $p \leq 0.05$ ) به‌ترتیب بیشتر و کمتر از مقدار چربی سایر نمونه‌ها بود.

میلسی و همکاران (Milci *et al.*, 2005) (پنیر هالومی)، کرمی و همکاران (Karami *et al.*, 2009) (پنیر فتای فرآپالایش)، شهاب‌لواسانی (Shahab-Lavasani *et al.*, 2012) (پنیر لیقوان) و غلامحسین پور و همکاران (Gholamhosseinpour *et al.*, 2022) (پنیر فتای فرآپالایش آنالوگ) نیز گزارش کرده‌اند که میزان چربی با افزایش زمان رسیدگی به‌طور معنی‌داری کاهش می‌یابد و دلیل آن را لیپولیز چربی‌ها و در نتیجه تولید گلیسرول و اسیدهای چرب آزاد عنوان نموده‌اند.

در پژوهشی که توسط کاوالکانتی و همکاران (Cavalcante *et al.*, 2013) بر روی پنیر برزیلی میناس فرسکال انجام شد نیز مشخص گردید که نمونه‌های تیمار شده با ازن در مدت زمان ۱ و ۲ دقیقه نسبت به نمونه شاهد در روز اول و آخر دوره رسیدگی مقدار چربی کمتری داشتند. یافته‌های شانشول (Shanshool, 2020) بر روی تیمار شیر توسط گاز ازن برای ساخت پنیر نرم نشان داد که کاهش میزان چربی

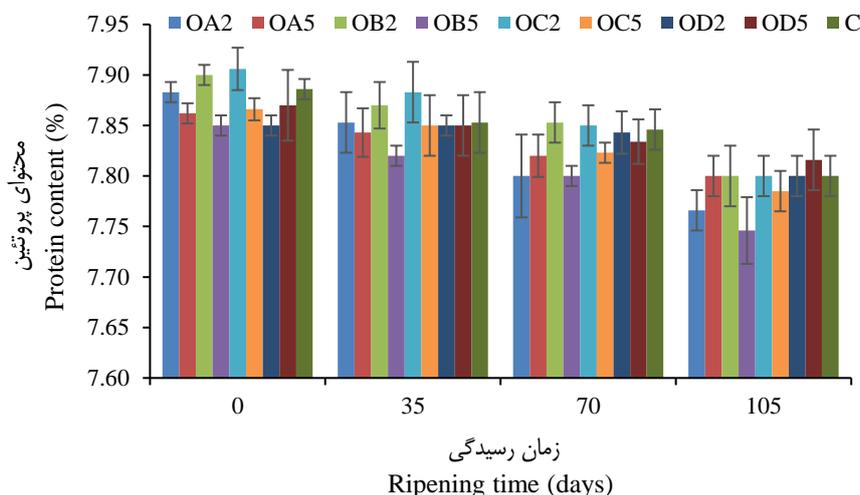
#### تأثیر تیمار ازن بر میزان پروتئین پنیر طی دوره رسیدگی

شکل ۵ اثر تیمار ازن بر میزان پروتئین نمونه‌های پنیر طی دوره رسیدگی را نشان می‌دهد. میزان پروتئین نمونه‌ها طی دوره رسیدگی به‌تدریج کاهش یافت و دامنه تغییرات آن در محدوده ۷/۹۰۶٪ (برای نمونه OC2 در روز صفر) تا ۷/۷۴۶٪ (برای نمونه OB5 در روز ۱۰۵) قرار داشت. مقدار پروتئین نمونه‌ها نیز در انتهای دوره رسیدگی نسبت به ابتدای آن به‌طور معنی‌داری ( $p \leq 0.05$ ) کمتر بود. نمونه‌های OA2 و OD2 با ۱/۴۸٪ و ۰/۶۴٪ به‌ترتیب بیشترین و کمترین درصد کاهش مقدار پروتئین را طی دوره رسیدگی نشان دادند. نمونه شاهد نیز حدود ۱/۰۹٪ کاهش مقدار پروتئین داشت. کمتر بودن کاهش مقدار پروتئین در نمونه OD می‌تواند به خاطر اثر تخریبی کمتر ازن بر روی پروتئین‌ها باشد، چرا که آب نمک ازن شده است و کنسانتره مستقیماً تحت تأثیر ازن قرار نگرفته و از این رو شدت دناتوراسیون می‌تواند کمتر از زمانی باشد که کنسانتره به‌طور مستقیم ازن می‌شود.

این نتایج با یافته‌های گزارش شده توسط کایا (Kaya, 2002) بر روی پنیر آب‌نمکی ایتالیایی، عباس و همکاران (Ayyash *et al.*, 2018) بر روی پنیر کم چرب عکاوای و غلامحسین پور و همکاران (Gholamhosseinpour *et al.*, 2022) در مورد پنیر سفید ایرانی، که کاهش میزان پروتئین طی دوره رسیدگی را گزارش کرده بودند، مطابقت داشت. کاهش میزان پروتئین طی دوره رسیدگی می‌تواند به‌دلیل پروتئولیز پروتئین توسط پروتئازهای طبیعی مانند پلاسمین و پروتئازهای میکروبی و تبدیل آن به پپتیدها و اسیدهای آمینه باشد (Milci *et al.*, 2005).

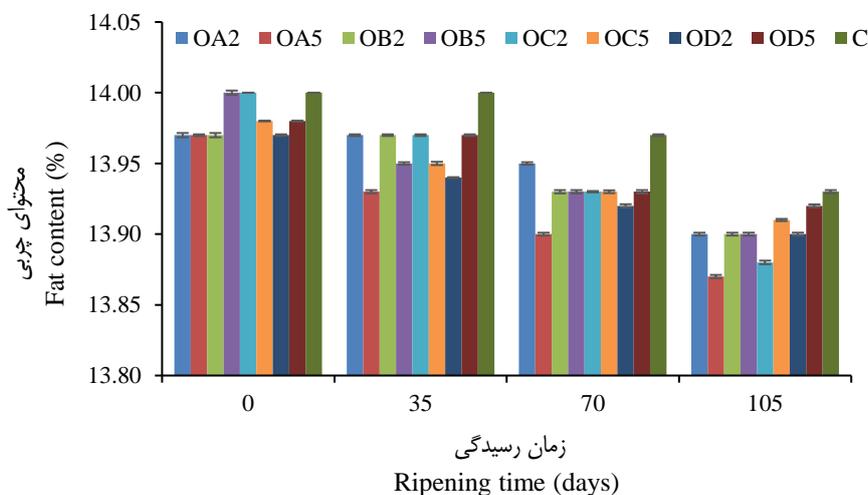
ویژگی‌های کیفی پنیر پکورینو طی ۵ ماه رسیدگی بررسی گردید و نتایج حاکی از عدم تفاوت معنی‌دار بین میزان چربی نمونه‌های شاهد و تیمار شده با ازن بود، هر چند در اواخر دوره نگهداری مقدار چربی نمونه‌های تیمار شده در مقایسه با نمونه شاهد کمتر بود (Grasso et al., 2023).

پنیر می‌تواند ناشی از نقش اکسیدکنندگی ازن بر ساختار چربی و تجزیه آن باشد. تابلا و روا (Tabla & Roa, 2022) با بررسی تاثیر ازن گازی بر نوعی پنیر نرم طی ۶۰ روز رسیدگی عنوان کردند که مقادیر چربی، ماده خشک، نمک و pH پنیر تیمار شده با ازن تفاوت معنی‌داری با نمونه شاهد نداشت. اثر تیمار ازن گازی (۲۰۰ و ۳۰۰ pbb) نیز بر



شکل ۵- تاثیر تیمار ازن بر میزان پروتئین پنیر طی دوره رسیدگی

Fig. 5. The effect of ozone treatment on cheese protein content during ripening



شکل ۶- تاثیر تیمار ازن بر میزان چربی پنیر طی دوره رسیدگی

Fig. 6. The effect of ozone treatment on the fat content of cheese during ripening

بود. کمترین میزان عدد اسیدی (۰/۰۱۹ میلی‌اکی‌والان) مربوط به نمونه شاهد در ابتدای دوره رسیدگی بود، درحالی‌که بیشترین مقدار (۰/۴۴ میلی‌اکی‌والان) برای نمونه OA5 در روز ۱۰۵ به‌دست آمد. در روز صفر دوره رسیدگی تفاوت معنی‌داری میان عدد اسیدی هیچ‌یک از نمونه‌ها وجود نداشت، اما با پیشرفت زمان، عدد اسیدی نمونه‌های OD5 و

تاثیر تیمار ازن بر میزان عدد اسیدی (ADV) پنیر طی دوره رسیدگی

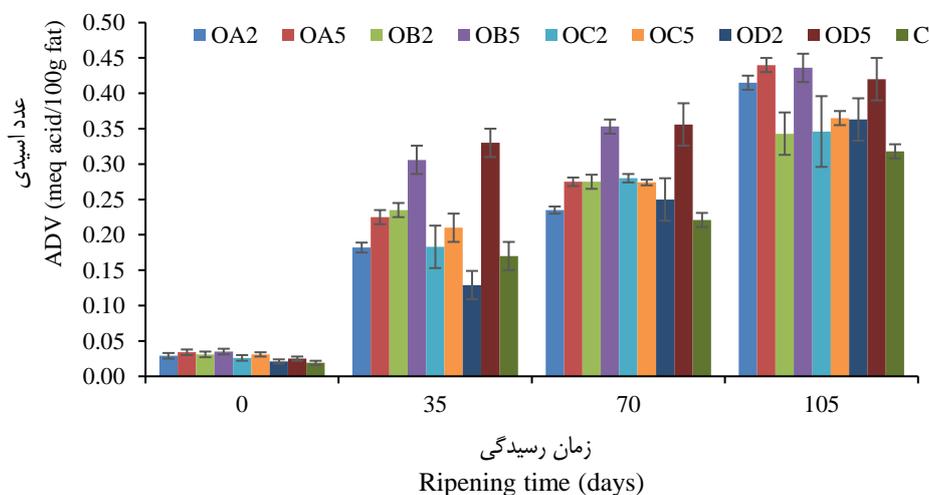
اثر تیمار ازن بر میزان عدد اسیدی (لیپولیز) نمونه‌های پنیر طی دوره رسیدگی در شکل ۷ نشان داده شده است. نتایج حاکی از افزایش معنی‌دار (p ≤ ۰/۰۵) عدد اسیدی تمام نمونه‌ها با افزایش زمان رسیدگی

اسیدی را نشان داد و دلیل آن نقش اکسایشی گاز ازن در لیپولیز چربی عنوان گردید. محمدی و همکاران (Mohammadi et al., 2017) گزارش کردند که تیمار ۱۰ دقیقه‌ای شیر با ازن باعث افزایش معنی‌دار اندیس پراکسید و اندیس آنیزیدین آن در مقایسه با نمونه شاهد و نمونه‌های تیمار شده در زمان‌های کمتر ۱۰ دقیقه گردید. آنها دلیل این افزایش را بروز واکنش‌های اکسایشی و تولید محصولات ناشی از اکسایش در نتیجه مقادیر بالاتر ازن محلول عنوان کردند. سرت و همکاران (Sert et al., 2020) نیز کاهش پایداری اکسایشی کره تولید شده از خامه تیمار شده با ازن را نسبت به نمونه شاهد گزارش کرده و عنوان نمودند که افزایش مدت زمان تیمار باعث کاهش بیشتر پایداری اکسایشی کره تولیدی می‌گردد. آنها دلیل این ناپایداری را اثرات اکسایشی ازن بر چربی شیر بیان کردند. پرنا و همکاران (Perna et al., 2022) با تیمار شیر خامه‌ای با استفاده از ازن طی ۶۰ دقیقه (در بازه‌های ۱۰ دقیقه‌ای) مشاهده کردند که با افزایش زمان تماس میزان اکسایش محصول به‌طور معنی‌داری افزایش پیدا می‌کند. آنها این ناپایداری اکسایشی را به عملکرد سومین اتم اکسیژن مولکول ازن نسبت دادند که اتصال پایداری نداشته و می‌تواند به راحتی جدا شود و یک سیستم اکسیدکننده بسیار واکنشی ایجاد کند که بر یکپارچگی ساختاری مولکول‌های دیگر تأثیر می‌گذارد.

به‌طور معنی‌داری ( $p \leq 0.05$ ) بیشتر از سایر نمونه‌ها بود، هر چند در روز آخر بین عدد اسیدی این دو نمونه و نمونه OA5 نیز تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. افزایش دوز ازن مصرفی در هر تیمار نیز باعث افزایش عدد اسیدی نمونه‌های مربوطه در هر یک از زمان‌های رسیدگی گردید، به‌طوری که پنیرهای تیمار شده با ۵ ppm ازن عدد اسیدی بالاتری نسبت به پنیرهای تیمار شده با ۲ ppm ازن داشتند. دلیل این افزایش را می‌توان به مقدار بالاتر ازن محلول و در نتیجه اثر اکسایشی بالاتر و تولید بیشتر محصولات ناشی از اکسایش نسبت داد.

تحقیقات ذنوبی و گلی (Zonoubi & Goli, 2021) (پنیر فتا)، آتاسوی و تورکوگلو (Atasoy & Türkoğlu, 2008) (پنیر اورفا) و غلامحسین‌پور و همکاران (Gholamhosseinpour et al., 2022) (پنیر فتای فرآپالایش آنالوگ) در ارتباط با لیپولیز انواع مختلف پنیر نیز موید افزایش عدد اسیدی طی دوره رسیدگی می‌باشد. در این پژوهش‌ها، لیپاز طبیعی شیر، لیپاز موجود در برخی از مایه‌های آنزیمی و همچنین آزاد شدن لیپازهای میکروبی از عوامل مهم گسترش لیپولیز پنیر عنوان شده‌اند.

یافته‌های حاصل از پژوهش شانشول (Shanshool, 2020) بر روی تیمار شیر توسط گاز ازن برای تولید پنیر نرم، افزایش میزان عدد



شکل ۷- تأثیر تیمار ازن بر میزان عدد اسیدی (ADV) پنیر طی دوره رسیدگی

Fig. 7. The effect of ozone treatment on the acid degree value (ADV) of cheese during ripening

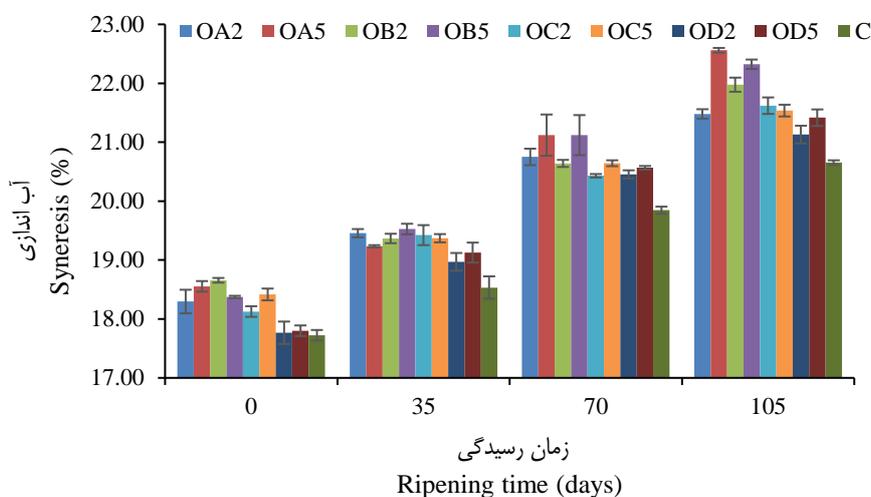
صفر برای نمونه شاهد و بیشترین مقدار آن (۲۲/۵۶٪) برای نمونه OA5 در زمان ۱۰۵ به‌دست آمد. در طول دوره رسیدگی، میزان آب‌اندازی نمونه شاهد به‌طور معنی‌داری ( $p \leq 0.05$ ) کمتر از سایر نمونه‌ها بود. از روز ۷۰ به بعد نیز میزان آب‌اندازی نمونه‌های OA5 و OB5 به‌طور معنی‌داری ( $p \leq 0.05$ ) از دیگر نمونه‌ها بالاتر بود،

تأثیر تیمار ازن بر میزان آب‌اندازی پنیر طی دوره رسیدگی شکل ۸ اثر تیمار ازن بر میزان آب‌اندازی (سینرسیس) نمونه‌های پنیر طی دوره رسیدگی را نشان می‌دهد. مطابق شکل، میزان آب‌اندازی پنیرها با گذشت زمان رسیدگی به‌طور معنی‌داری ( $p \leq 0.05$ ) افزایش پیدا کرد، به‌طوری که کمترین مقدار آب‌اندازی (۱۷/۷۲٪) در زمان

نتایج یافته‌های ذنوبی و گلی (Zonoubi & Goli, 2021)، بر روی پنیر فتا طی دوره ۶۰ روزه رسیدگی نشان داد که آب‌اندازی پنیر از روز اول تا آخر رسیدگی روند افزایشی داشته است. آنها افزایش آب‌اندازی را خروج آب از شبکه ساختاری پنیر به دلیل افزایش جذب نمک در طول دوره رسیدگی عنوان کردند.

نتایج آکسوپولوس و همکاران (Alexopoulos et al., 2017) در ارتباط با تأثیر اُزن بر آب‌اندازی ماست نشان داد که نمونه‌هایی که ۳۰ ثانیه در معرض تیمار اُزن بودند نسبت به نمونه شاهد و تیمار ۱۰ و ۶۰ ثانیه‌ای اُزن، آب‌اندازی بیشتری در طول زمان نگهداری، مخصوصاً در روز آخر، داشتند.

درحالی‌که مقدار آب‌اندازی آنها با یکدیگر تفاوت معنی‌داری نداشت. همچنین، نمونه‌هایی که در آنها تنها آب نمک اُزن شده بود نسبت به سایر تیمارها آب‌اندازی کمتری داشتند. این مساله را می‌توان به افزایش آب‌گریزی پروتئین‌های کنسانتره تحت تأثیر تیمار اُزن نسبت داد، چرا که در نمونه‌هایی که خود کنسانتره تحت تیمار اُزن قرار می‌گیرد (نه آب نمک)، اُزن با دناتوراسیون پروتئین‌ها باعث در معرض قرار گرفتن تعداد زیادی از گروه‌های آب‌گریز در سطح مولکولی شده و به دلیل تغییر قطبیت، توانایی پروتئین‌ها را برای اتصال به آب کاهش می‌دهد. بدین ترتیب در این نمونه‌ها نگهداری آب کاهش و میزان آب‌اندازی افزایش می‌یابد (Segat et al., 2014).



شکل ۸- تأثیر تیمار اُزن بر میزان آب‌اندازی پنیر طی دوره رسیدگی

Fig. 8. The effect of ozone treatment on the syneresis of cheese during ripening

تحت تیمار قرار گرفته و ارگانیسیم‌های درون کنسانتره بر خلاف سایر تیمارها تحت تأثیر مستقیم اُزن قرار نگرفته‌اند. دوز کمتر اُزن نیز اثر بازدارندگی کمتری نسبت به دوز بالاتر آن دارد. شمارش کلی میکروارگانیسیم‌ها در نمونه‌ها ابتدا تا روز ۷۰ به‌طور معنی‌داری ( $p \leq 0.05$ ) افزایش و در ادامه تا انتهای دوره رسیدگی کاهش یافت. دلیل رشد ابتدایی میکروارگانیسیم‌ها فراهم بودن مواد مغذی کافی و در دسترس می‌باشد، اما در ادامه، تجمع اسید لاکتیک به همراه تولید دیگر متابولیت‌های بازدارنده توسط باکتری‌های اسید لاکتیک، مانند دی‌اکسید کربن، دی‌استیل، پراکسید هیدروژن و باکتریوسین‌ها باعث کاهش شمارش کلی میکروارگانیسیم‌ها می‌گردند (Şanlıbaba & Güçer, 2015). شمارش کلی نمونه‌های شاهد و OD2 در مقایسه با سایر تیمارها به‌طور معنی‌داری ( $p \leq 0.05$ ) بیشتر بود، هرچند بین این دو نمونه از این نظر تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (به جز روز صفر و ۷۰). طی دوره رسیدگی نیز شمارش کلی میکروارگانیسیم‌ها در پنیرهای

### تأثیر تیمار اُزن بر شمارش کلی میکروارگانیسیم‌های پنیر طی دوره رسیدگی

تغییرات شمارش کلی میکروارگانیسیم‌ها در نمونه‌های مختلف پنیر تحت تأثیر تیمار اُزن در طول دوره رسیدگی در شکل ۹ ارائه شده است. با توجه به نتایج، کمترین شمارش کلی میکروارگانیسیم‌ها مربوط به نمونه OC5 ( $0.2 \text{ Log (CFU/g)}$  در روز صفر) بود، درحالی‌که نمونه OD2 بیشترین شمارش میکروبی ( $2.63 \text{ Log (CFU/g)}$  در روز ۷۰) را داشت. پایین‌تر بودن شمارش کلی میکروارگانیسیم‌های نمونه OC5 می‌تواند به این دلیل باشد که در این تیمار هم آب‌نمک و هم کنسانتره تحت تیمار اُزن قرار گرفته‌اند و به همین خاطر بار میکروبی بیشتر کاهش یافته است. ضمن آنکه غلظت بالاتر اُزن (۵ ppm) باعث کاهش بیشتر بار میکروبی در مقایسه با غلظت ۲ ppm می‌گردد. بالاتر بودن شمارش میکروبی در نمونه OD2 نیز بدین دلیل است که فقط آب‌نمک

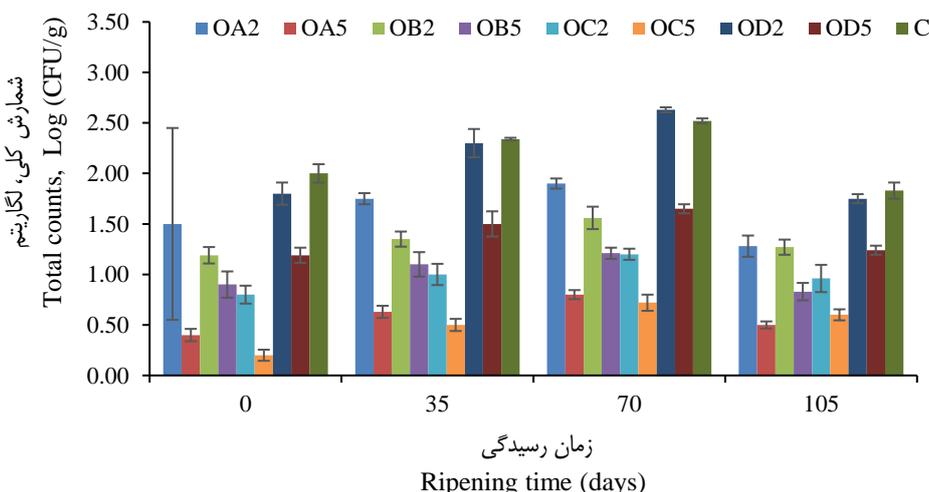
کوآگولاز مثبت در هر گرم نمونه و همچنین تعداد سالمونلا در ۲۵ گرم نمونه نیز می‌بایست منفی باشد (ISIRI, 2019).

بررسی آکسوپولوس و همکاران (Alexopoulos et al., 2017) بر روی تأثیر ازن بر پنیر فتا نشان داد که شمارش کلی نمونه‌ها در ابتدا افزایش و در انتهای دوره نگهداری به حدود  $7 \log \text{CFU/g}$  کاهش یافت. همچنین، نمونه‌های تیمار شده با ازن در زمان‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه شمارش کلی کمتری را نسبت به نمونه شاهد نشان دادند. نتایج کوالکانت و همکاران (Cavalcante et al., 2013) در مورد تأثیر ازن بر روی پنیر برزیلی طی دوره نگهداری نشان داد نمونه‌هایی که یک و دو دقیقه در معرض گاز ازن قرار گرفتند شمارش کلی مزوفیل‌های هوازی اولیه کمتری ( $4/95 \log \text{CFU/g}$ ) نسبت به نمونه شاهد ( $10^2 \text{CFU/g}$ ) داشتند. آنها عنوان کردند که ازن‌زنی فقط تعداد اولیه میکروارگانیسم‌ها را کاهش داد، اما بر سرعت رشد آنها اثر کاهشی نداشت.

تیمار شده با دوز بالاتر (۵ ppm) ازن، به‌طور معنی‌داری ( $p \leq 0/05$ ) کمتر از نمونه‌های تیمار شده با دوز پایین‌تر (۲ ppm) ازن بود که به دلیل مقادیر بالاتر ازن محلول می‌باشد.

نتایج مطالعه ذنوبی و گلی (Zonoubi & Goli, 2021) بر روی پنیر فتا نشان داد که شمارش کلی باکتری‌ها طی ۶۰ روز رسیدگی از  $9/36 \log \text{CFU/g}$  به  $7/77 \log \text{CFU/g}$  کاهش یافت. همچنین یافته‌های دیژاندینو و همکاران (Diezhandino et al., 2015) بر روی پنیر اسپانیایی در طول دوره رسیدگی ۱۲۰ روزه، حاکی از روند کاهشی باکتری‌های مزوفیل هوازی از  $8/52$  به  $6/95 \log \text{CFU/g}$  بود.

هر چند در استاندارد ملی حد مجازی برای شمارش کلی میکروارگانیسم‌ها در پنیر رسیده آب‌نمکی مشخص نشده، اما بیشینه تعداد کلی‌فرم‌ها و کپک و مخمر به ترتیب  $10^2$  و  $10^2 \text{CFU/g}$  تعیین گردیده است. علاوه بر این، تعداد اشریشیاکلی و استافیلوکوکوس‌های



شکل ۹- تأثیر تیمار ازن بر شمارش کلی میکروارگانیسم‌های پنیر طی دوره رسیدگی

Fig. 9. The effect of ozone treatment on the microbial total counts of cheese during ripening

شده گردید، اما این افزایش معنی‌دار نبود. این افزایش امتیاز رنگ را می‌توان به اثر سفیدکنندگی بیشتر غلظت بالاتر ازن نسبت داد. لازم به ذکر است که سفید بودن رنگ پنیرهای آب‌نمکی ایرانی برای مصرف‌کننده اهمیت بالایی دارد. تفاوت امتیاز آرومای پنیرهای روز ۱۰۵ دوره رسیدگی نیز معنی‌دار نبود. نمونه شاهد در هر دو روز رسیدگی آرومای پایین‌تری نسبت به سایر نمونه‌ها داشت. طعم پنیرهای ۱۰۵ روزه نیز با یکدیگر تفاوت معنی‌داری نداشتند و این حالت بین پنیرهای ابتدای دوره رسیدگی نیز مشاهده شد. امتیاز بافت نمونه‌ها در روز ۱۰۵ رسیدگی تفاوت معنی‌داری با هم نداشتند (به جز نمونه‌های OD5 با OB5) و این تفاوت در پنیرهای ابتدای دوره رسیدگی نیز معنی‌دار نبود.

**تأثیر تیمار ازن بر ویژگی‌های حسی پنیر طی دوره رسیدگی**  
در شکل ۱۰ اثر تیمار ازن بر ویژگی‌های حسی (رنگ و ظاهر، آروما، طعم، بافت و پذیرش کلی) نمونه‌های پنیر در ابتدا (روز صفر) و انتهای (روز ۱۰۵) دوره رسیدگی نشان داده شده است. در بیشتر تیمارها، امتیاز حسی پنیرهای ۱۰۵ روزه در مقایسه با پنیرهای ابتدای دوره رسیدگی به‌طور معنی‌داری ( $p \leq 0/05$ ) بالاتر بود که می‌توان آن را به تولید محصولات حاصل از واکنش‌های مهم دوره رسیدگی، به‌ویژه پروتئولیز و لیپولیز، نسبت داد. رنگ و ظاهر پنیرهای ۱۰۵ روزه تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نداشتند. در اکثر تیمارها نیز، هر چند افزایش غلظت ازن از ۲ به ۵ ppm باعث افزایش امتیاز رنگ و ظاهر نمونه‌های تیمار

پژوهش آلکسوپولوس و همکاران (Alexopoulos *et al.*, 2017) بر روی تأثیر اُزن بر محصولات تخمیری نشان داد نمونه‌های ماستی که ۶۰ ثانیه در معرض تیمار اُزن بودند تغییرات طعم، رنگ و پذیرش کلی معنی‌داری نسبت به نمونه شاهد نداشتند، هرچند امتیاز پذیرش کلی نمونه‌های تیمار شده با اُزن نسبت به نمونه شاهد بیشتر بود. نمونه‌های پنیر فتا هم که ۶۰ دقیقه در معرض تیمار اُزن قرار داشتند، تغییرات رنگ معنی‌داری را نشان ندادند، اما امتیازات طعم و پذیرش کلی نمونه‌های پنیر تیمار شده با اُزن نسبت به نمونه شاهد به‌طور معنی‌داری پایین‌تر بود.

در پژوهشی از اُزن در تولید شیر خشک پس‌چرخ استفاده گردید. نتایج حاکی از کاهش امتیازات حسی شیر خشک با افزایش غلظت اُزن از ۲ ppb به ۳۲ ppb بود. همچنین گزارش گردید که امتیاز حسی شیر خشک کامل، به‌دلیل اکسایش لیپیدی و بروز بدطعمی ناشی از واکنش اُزن با چربی، پایین‌تر از امتیاز حسی شیر خشک پس‌چرخ بود (Varga & Szigeti, 2016). محمدی و همکاران (Mohammadi *et al.*, 2017) اثر اُزن بر ویژگی‌های میکروبی و فیزیکیوشیمیایی شیر را مورد بررسی قرار داده و عنوان کردند که اُزن با تخریب و کاهش محتوای کارتنوئیدی شیر، رنگ آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. سرت و همکاران (Sert *et al.*, 2020) خامه را تحت تیمار اُزن قرار داده و مشاهده کردند که سفتی و قوام خامه تیمار شده افزایش یافت. آنها عنوان کردند که این افزایش ممکن است به‌دلیل تجمع یا ادغام جزئی چربی شیر تیمار شده با اُزن باشد. این پژوهشگران کاهش زردی خامه تیمار شده با اُزن را نیز گزارش کرده و آن را ناشی از تخریب کارتنوئیدها تحت تأثیر اُزن بیان کردند. این تخریب مبتنی بر این فرضیه است که همه پیوندهای دوگانه مولکول‌های کارتنوئید مکان‌های بالقوه‌ای برای واکنش شیمیایی اُزن هستند که منجر به تولید طیف گسترده‌ای از محصولات اکسایشی می‌شوند (Perna *et al.*, 2022). تابلا و روآ (Tabla & Roa, 2022) تأثیر اُزن گازی بر کیفیت میکروبی و حسی نوعی پنیر نرم طی دوره رسیدگی دو ماهه را مورد مطالعه قرار داده و مشاهده کردند که پنیر تیمار شده با اُزن از نظر ظاهر، آروما، بافت و مزه تفاوت معنی‌داری با نمونه شاهد نداشت. نتایج گراسو و همکاران (Grasso *et al.*, 2023) نیز در ارتباط با بررسی اثر تیمار اُزن گازی (۲۰۰ ppb و ۳۰۰) بر ویژگی‌های کیفی پنیر پکورینو طی ۱۵۰ روز رسیدگی نشان داد که ویژگی‌های حسی (ظاهر، طعم، مزه، بافت، پذیرش کلی) نمونه‌های تیمار شده تفاوت معنی‌داری با نمونه شاهد نداشت.

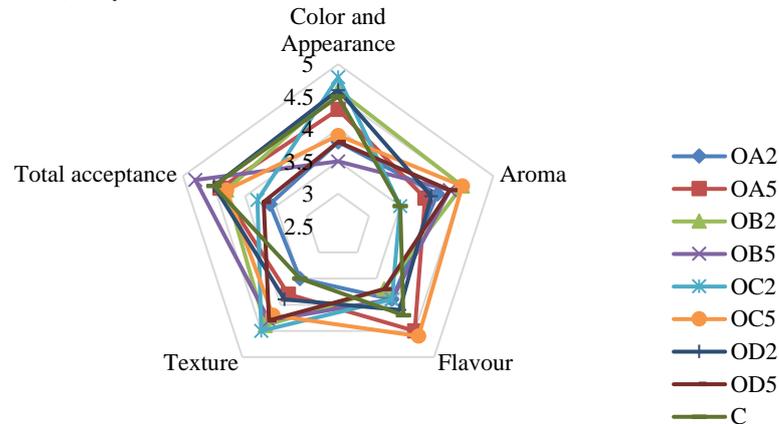
نمونه‌های شاهد و OC5 در روز ۱۰۵ دوره رسیدگی با امتیاز ۴/۹ بالاترین امتیاز پذیرش کلی را داشتند، هر چند این امتیاز تفاوت معنی‌داری با امتیاز سایر نمونه‌ها (به جز نمونه‌های OA2 و OA5 با امتیاز ۴/۴) نداشت. نمونه OA2 با امتیازهای ۴/۴ در روز ۱۰۵ و ۳/۶ در ابتدای دوره رسیدگی کمترین میزان پذیرش کلی را در میان سایر نمونه‌ها داشت. از آنجا که در تیمار OA اُزن همراه با کشت آغازگر استفاده می‌شود، لذا می‌تواند باعث تضعیف رشد و فعالیت آغازگر شده و نقش آغازگر در بهبود ویژگی‌های حسی را تحت تأثیر قرار دهد. به‌طور کلی، نمونه OD5 بیشترین امتیاز رنگ و ظاهر و بافت و نمونه OC5 بالاترین امتیاز آروما و پذیرش کلی (در کنار نمونه شاهد) را کسب کردند، درحالی‌که پایین‌ترین امتیاز آروما و بافت مربوط به نمونه شاهد بود. بنابراین، نتایج ارزیابی حسی نشان داد که هرچند استفاده از تیمار اُزن توانست برخی از ویژگی‌های حسی پنیرها را ارتقا دهد، اما در کل این افزایش نسبت به نمونه شاهد، خصوصاً در انتهای دوره رسیدگی، معنی‌دار نبود.

نتایج پژوهش عیاش و همکاران (Ayyash *et al.*, 2018) بر روی پنیر عکاو نشان داد که طعم و آرومای نمونه‌ها طی ۲۱ روز نگهداری بهبود یافتند. آنها دلیل این امر را تولید پپتیدها عنوان کردند. مطالعه نظری و همکاران (Nazari *et al.*, 2020) بر روی پنیر فتای کم‌چرب نیز نشان داد که ظاهر، مزه و پذیرش کلی نمونه‌ها طی ۶۰ روز رسیدگی به‌طور معنی‌داری بهبود پیدا کرد، اما در آروما و بافت پنیرها تغییر معنی‌داری مشاهده نشد.

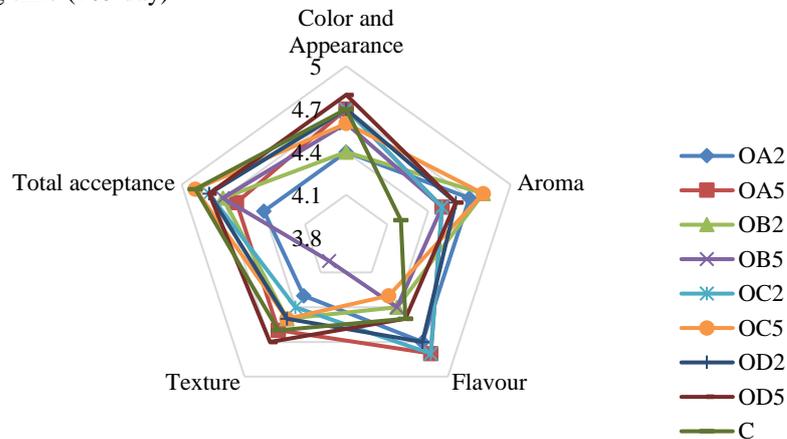
نتایج پژوهش حمدی و همکاران (Hamdy *et al.*, 2021) بر روی پنیر فتای کم‌چرب در طول دوره رسیدگی حاکی از افزایش امتیازات بافت، طعم و پذیرش کلی در انتهای دوران رسیدگی بود. آنها علت بهبود بافت را کاهش رطوبت طی دوره رسیدگی و دلیل ارتقای طعم را فعالیت‌های متابولیکی آغازگرها عنوان کردند.

بررسی مارون و همکاران (Marrone *et al.*, 2014) بر روی خواص فیزیکیوشیمیایی و حسی پنیر ایتالیایی طی دوره رسیدگی نشان داد که تمامی امتیازات حسی در طول دوره رسیدگی افزایش یافتند. این محققین، دلیل ارتقای امتیاز طعم و آرومای پنیرها را آزاد شدن اسیدهای چرب و آمینه طی دوره رسیدگی عنوان کردند. پژوهش هوانگ و همکاران (Hwang *et al.*, 2007) بر روی مقایسه خواص فیزیکیوشیمیایی و حسی شیر تغلیظ شده انجمادی تیمار شده با اُزن با شیر تغلیظ شده تبخیری طی نگهداری نشان داد که پذیرش کلی شیر تغلیظ شده انجمادی بالاتر از شیر تغلیظ شده تبخیری بود. نتایج

زمان رسیدگی (روز صفر)  
Ripening time (0 day)



زمان رسیدگی (روز ۱۰۵)  
Ripening time (105 day)



شکل ۱۰- تأثیر تیمار ازن بر ویژگی‌های حسی پنیر در ابتدا و انتهای دوره رسیدگی

Fig. 10. The effect of ozone treatment on sensory characteristics of cheese at the beginning and end of ripening

را ارتقا دهد، اما در کل این افزایش نسبت به نمونه شاهد، خصوصاً در انتهای دوره رسیدگی، معنی‌دار نبود. به‌طور کلی، پنیرهای تیمار شده با دوز بالاتر ازن، مقادیر عدد اسیدی بیشتری در مقایسه با نمونه‌های تیمار شده با دوز پایین‌تر ازن داشتند. همچنین، در طول دوره رسیدگی، شمارش کلی میکروارگانیسم‌ها در پنیرهای تیمار شده با دوز ۵ ppm ازن، کمتر از نمونه‌های تیمار شده با دوز ۲ ppm ازن بود. تأثیرات مثبت میکروبی و فیزیکوشیمیایی تیمار ازن بر روی نمونه‌های پنیر باعث شد تا ماندگاری این پنیر آب‌نمکی تا ۱۰۵ روز (۳۰ روز بیشتر از حالت معمول) افزایش پیدا کند، بدون آنکه بر خواص حسی محصول اثر منفی داشته باشد. بنابراین، می‌توان از ازن به‌عنوان یک تیمار غیرحرارتی در افزایش ماندگاری و بهبود برخی از ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی پنیر استفاده نمود. هرچند انتخاب تیمار مطلوب بستگی به اهمیت فاکتورهای مورد نظر ما دارد، با اینحال چنانچه پایداری اکسایشی، زنده‌مانی کشت

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر استفاده از گاز ازن در مراحل مختلف تولید بر ویژگی‌های میکروبی، فیزیکوشیمیایی و حسی پنیر فرابالایش آب‌نمکی طی دوره رسیدگی مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج، مقادیر مواد جامد کل، خاکستر، نمک، عدد اسیدی و آب‌اندازی پنیرها با افزایش زمان رسیدگی به‌طور معنی‌داری ( $p \leq 0.05$ ) افزایش یافت، درحالی‌که مقادیر پروتئین و چربی نمونه‌ها به‌طور معنی‌داری ( $p \leq 0.05$ ) کاهش پیدا کرد. شمارش کلی میکروارگانیسم‌های نمونه‌ها نیز ابتدا تا روز ۷۰ افزایش پیدا کرد، اما در ادامه تا انتهای دوره رسیدگی کاهش یافت. در بیشتر تیمارها، امتیاز حسی پنیرهای انتهای دوره رسیدگی در مقایسه با پنیرهای ابتدای دوره رسیدگی به‌طور معنی‌داری ( $p \leq 0.05$ ) بالاتر بود و هرچند استفاده از تیمار ازن توانست برخی از ویژگی‌های حسی پنیرها

آغازگر و آبان‌اندازی را معیارهای مهم در نظر بگیریم تیمار OB2 می‌تواند انتخاب مناسبی باشد.

## References

- Alexopoulos, A., Plessas, S., Kourkoutas, Y., Stefanis, C., Vavias, S., Voidarou, C., Mantzourani, I., & Bezirtzoglou, E. (2017). Experimental effect of ozone upon the microbial flora of commercially produced dairy fermented products. *International Journal of Food Microbiology*, 246, 5-11. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2017.01.018>
- Allai, F.M., Azad, Z.A.A., Mir, N.A., & Gul, K. (2022). Recent advances in non-thermal processing technologies for enhancing shelf life and improving food safety. *Applied Food Research*, 100258. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100258>
- AOAC. (2005). Official Methods of Analysis of the AOAC (Association of Official Analytical Chemists) International, G. W. Latimer and W. Horwitz (Eds.), 18th ed, in total solids (TS) matter (oven-drying method) method 926.08, ash (incineration at 550°C method) method 935.42, protein content (micro-Kjeldahl method) method 920.123, Gaithersburg, MD.
- Atasoy, A.F., & Türkoğlu, H. (2008). Changes of composition and free fatty acid contents of Urfa cheeses (a white-brined Turkish cheese) during ripening: Effects of heat treatments and starter cultures. *Food Chemistry*, 110, 598-604. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.02.046>
- Ayyash, M., Abu-Jdayil, B., Hamed, F., & Shaker, R. (2018). Rheological, textural, microstructural and sensory impact of exopolysaccharide-producing *Lactobacillus plantarum* isolated from camel milk on low-fat akawi cheese. *Lwt*, 87, 423-431. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.09.023>
- Beig Mohammadi, M., Bolandi, M., & Ghodusi, H.B. (2015). Production and physicochemical, rheological, sensory analysis of "Lour" cheese. *Journal of Food Science and Technology (Iran)*, 12, 41-49
- BSI. (1989). Standard no. 696: Gerber method for the determination of fat in milk and milk products. London, UK: British Standards Institution.
- Cankurt, H. (2019). The effects of adding different stabilizers in brine on the physicochemical, sensory, microbiological and textural properties of white cheese. *Foods*, 8, 133. <https://doi.org/10.3390/foods8040133>
- Cavalcante, D., Júnior, B.L., Tribst, A., & Cristianini, M. (2013). Microbiological quality of Minas Frescal cheese treated with ozonated water. *International Food Research Journal*, 20, 2911
- Clark, S., Costello, M., Drake, M., & Bodyfelt, F. (2009). *The sensory evaluation of dairy products*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-77408-4>
- Diezhandino, I., Fernández, D., González, L., McSweeney, P., & Fresno, J. (2015). Microbiological, physicochemical and proteolytic changes in a Spanish blue cheese during ripening (Valdeón cheese). *Food Chemistry*, 168, 134-141. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.07.039>
- Dorosti, S., Bazmi, A., Ghanbarzadeh, B., & Ayaseh, A. (2011). Effect of brine concentration on the physicochemical properties of Iranian White cheese. *Journal of Food Science and Technology (Iran)*, 8, 1-10
- Eglezos, S., & Dykes, G.A. (2018). Reduction of environmental listeria using gaseous ozone in a cheese processing facility. *Journal of Food Protection*, 81, 795-798. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-17-361>
- Forouzan, S., Khosroushahi Asl, A., Taslimi, A., Madadadlou, A., & Mashayekh, M. (2009). Study of the effects of microbial, recombinant and animal rennets on some of the qualitative and quantitative properties of Iranian white cheese. *Journal of Food Science and Technology (Iran)*, 6, 63-72
- Gholamhosseinpour, A., Tehrani, M.M., & Razavi, S.M.A. (2022). The effects of commercial mixed-strain starter cultures on the chemical and sensory characteristics of UF-Feta cheese analogue during ripening. *Iranian Food Science & Technology Research Journal*, 17(6). <https://doi.org/10.22067/ifstrj.2021.70493.1050>
- Gobbetti, M., Burzigotti, R., Smacchi, E., Corsetti, A., & De Angelis, M. (1997). Microbiology and biochemistry of Gorgonzola cheese during ripening. *International Dairy Journal*, 7, 519-529. [https://doi.org/10.1016/S0958-6946\(97\)00047-2](https://doi.org/10.1016/S0958-6946(97)00047-2)
- Grasso, C., Eramo, V., Lembo, M., Forniti, R., Carboni, C., & Botondi, R. (2023). Effects of gaseous ozone treatment on the mite pest control and qualitative properties during ripening storage of pecorino cheese. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103, 2124-2133. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12400>
- Gunasekaran, S., & Ak, M.M. (2002). *Cheese rheology and texture*. CRC press.
- Hamdy, A.M., Ahmed, M.E., Mehta, D., Elfaruk, M.S., Hammam, A.R., El-Derwy, Y.M. (2021). Enhancement of low-fat Feta cheese characteristics using probiotic bacteria. *Food Science & Nutrition*, 9, 62-70. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1889>
- Hayaloglu, A.A., Fox, P.F., Guven, M., Cakmakci, S. (2007). Cheeses of Turkey: 1. Varieties ripened in goat-skin bags. *Le Lait*, 87, 79-95. <https://doi.org/10.1051/lait:2007006>

21. Hwang, J., Lee, S., Park, H., Min, S., & Kwak, H. (2007). Comparison of physicochemical and sensory properties of freeze-concentrated milk with evaporated milk during storage. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 20, 273-282. <https://doi.org/10.5713/ajas.2007.273>
22. IDF. (1988). Cheese and processed cheese-determination of salt content. Standard 12 B. Brussels, Belgium: *International Dairy Federation*.
23. ISIRI. (2015). Microbiology of the food chain, horizontal method for the enumeration of microorganisms, Part 1: colony count at 30 °C by the pour plate technique. *Iran National Standards Organization*, No. 5272-1.
24. ISIRI. (2019). Microbiology of milk and milk products, Specifications and test methods, Amd. No.1. *Iran National Standards Organization*, No. 2406-1.
25. ISIRI. (2022). Milk and milk products, determination of titrable acidity and pH, test method. *Iran National Standards Organization*, 2nd Revision, No. 2852.
26. Karami, M., Ehsani, M., Mousavi, S., Rezaei, K., & Safari, M. (2009). Microstructural properties of fat during the accelerated ripening of ultrafiltered-Feta cheese. *Food Chemistry*, 113, 424-434. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.07.104>
27. Karimi, R., Mortazavian, A., & Karami, M. (2012). Incorporation of *Lactobacillus casei* in Iranian ultrafiltered Feta cheese made by partial replacement of NaCl with KCl. *Journal of Dairy Science*, 95, 4209-4222. <https://doi.org/10.3168/jds.2011-4872>
28. Kaya, S. (2002). Effect of salt on hardness and whiteness of Gaziantep cheese during short-term brining. *Journal of Food Engineering*, 52, 155-159. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(01\)00098-X](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00098-X)
29. Khadre, M., Yousef, A., & Kim, J.G. (2001). Microbiological aspects of ozone applications in food: a review. *Journal of Food Science*, 66, 1242-1252. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2001.tb15196.x>
30. Kunicka-Styczyńska, A., & Rajkowska, K. (2011). Physiological and genetic stability of hybrids of industrial wine yeasts *Saccharomyces sensu stricto* complex. *Journal of Applied Microbiology*, 110, 1538-1549. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2011.05009.x>
31. Lopez, C., Camier, B., & Gassi, J.-Y. (2007). Development of the milk fat microstructure during the manufacture and ripening of Emmental cheese observed by confocal laser scanning microscopy. *International Dairy Journal*, 17, 235-247. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2005.12.015>
32. Marrone, R., Balestrieri, A., Pepe, T., Vollano, L., Murru, N., Michael, J., & Anastasio, A. (2014). Physicochemical composition, fatty acid profile and cholesterol content of "Pecorino Carmasciano" cheese, a traditional Italian dairy product. *Journal of Food Composition and Analysis*, 36, 85-89. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2014.05.006>
33. Milci, S., Goncu, A., AlpKent, Z., & Yaygin, H. (2005). Chemical, microbiological and sensory characterization of Halloumi cheese produced from ovine, caprine and bovine milk. *International Dairy Journal*, 15, 625-630. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2004.10.009>
34. Mohammadi, H., Mazloomi, S.M., Eskandari, M.H., Aminlari, M., & Niakousari, M. (2017). The effect of ozone on aflatoxin M1, oxidative stability, carotenoid content and the microbial count of milk. *Ozone: Science & Engineering*, 39, 447-453. <https://doi.org/10.1080/01919512.2017.1329647>
35. Nazari, S.M., Mortazavi, A., Hesari, J., & Tabatabaei Yazdi, F. (2020). Proteolysis and textural properties of low-fat ultrafiltered Feta cheese as influenced by maltodextrin. *International Journal of Dairy Technology*, 73, 244-254. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12642>
36. Nunez-Elisea, R., & Davenport, T.L. (1986). Abscission of mango fruitlets as influenced by enhanced ethylene biosynthesis. *Plant Physiology*, 82, 991-994. <https://doi.org/10.1104/pp.82.4.991>
37. O'Donnell, C., Tiwari, B.K., Cullen, P., & Rice, R.G. (2012). *Ozone in food processing*. John Wiley & Sons.
38. Özer, B., Robinson, R., & Grandison, A. (2003). Textural and microstructural properties of urfa cheese (a white-brined Turkish cheese). *International Journal of Dairy Technology*, 56, 171-176. <https://doi.org/10.1046/j.1471-0307.2003.00100.x>
39. Perna, A., Gambacorta, E., Simonetti, A., Grassi, G., & Scopa, A. (2022). Effect of ozone treatment exposure time on oxidative stability of cream milk. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 124, 2100238. <https://doi.org/10.1002/ejlt.202100238>
40. Şanlıbaba, P., & Güçer, Y. (2015). Antimicrobial activity of lactic acid bacteria. *Journl International Science Publication*, 3, 451-457.
41. Sarbazi, M., Hesari, J., Azadmard-Damirchi, S., & Rafat, S. (2015). Effect of pasteurization and packaging on the physicochemical and sensory properties of pot (Kope) cheese. *Journal Food Research and Technology*, 24, 507-517.
42. Segat, A., Misra, N., Fabbro, A., Buchini, F., Lippe, G., Cullen, P.J., & Innocente, N. (2014). Effects of ozone processing on chemical, structural and functional properties of whey protein isolate. *Food Research International*, 66, 365-372. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.10.002>

43. Sert, D., & Mercan, E. (2021). Assessment of powder flow, functional and microbiological characteristics of ozone-treated skim milk powder. *International Dairy Journal*, 121, 105121. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105121>
44. Sert, D., Mercan, E., & Kara, Ü. (2020). Butter production from ozone-treated cream: Effects on characteristics of physicochemical, microbiological, thermal and oxidative stability. *LWT*, 131, 109722. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109722>
45. Shahab-Lavasani, A.R., Ehsani, M.R., Mirdamadi, S., & Ebrahim Zadeh Mousavi, M.A. (2012). Changes in physicochemical and organoleptic properties of traditional Iranian cheese Lighvan during ripening. *International Journal of Dairy Technology*, 65, 64-70. <https://doi.org/10.1111/j.1471-0307.2011.00724.x>
46. Shanshool, A. (2020). Study the effect of ozone gas in milk treatment on chemical and microbial properties of soft cheese ozone gas effect on milk. *Indian Journal of Ecology*, 47.
47. Sheelamary, M., & Muthukumar, M. (2011). Effectiveness of ozone in inactivating *Listeria monocytogenes* from milk samples. *World Journal of Young Researchers*, 1, 40-44
48. Soleimani-Rambod, A., Zomorodi, S., Mortazavi, S.A., & Khosroshahi Asl, A. (2015). The effect of direct acidification of milk on the viability of *Bifidobacterium lactis* (B94 LAFTI) during ripening of Iranian white cheese. *Journal of Innovation in Food Science and Technology*, 7, 26-31
49. Suprpto, D., Radiati, L.E., Mahdi, C., & Evanuarini, H. (2021). Physicochemical quality and microbial activity of dairy milk with ozonation. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Hasil Ternak (JITEK)*, 16, 117-124. <https://doi.org/10.21776/ub.jitek.2021.016.02.5>
50. Tabla, R., & Roa, I. (2022). Use of gaseous ozone in soft cheese ripening: Effect on the rind microorganisms and the sensorial quality. *LWT*, 170, 114066. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114066>
51. Varga, L., & Szigeti, J. (2016). Use of ozone in the dairy industry: A review. *International Journal of Dairy Technology*, 69, 157-168. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12302>
52. Zonoubi, R., & Goli, M. (2021). The effect of complete replacing sodium with potassium, calcium, and magnesium brine on sodium-free ultrafiltration Feta cheese at the end of the 60-day ripening period: Physicochemical, proteolysis–lipolysis indices, microbial, colorimetric, and sensory evaluation. *Food Science & Nutrition*, 9, 866-874. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2050>



## Production of Gelatin-Pullulan- Nanofibers Cellulose Film Containing *Salmonella* Phages and Effect Its Anti-*salmonella* Against *Salmonella typhimurium*

A. Entezari<sup>1</sup>, N. Sedaghat<sup>1,2\*</sup>, G. Shakeri<sup>3</sup>

1 and 2- Ph.D. Student and Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad (FUM), Mashhad, Iran, respectively.

(\*- Corresponding Author Email: [sedaghat@um.ac.ir](mailto:sedaghat@um.ac.ir))

3- Fellowship Researcher, German Federal Institute for Risk Assessment (BfR), Department of Chemicals and Product Safety, Berlin, German

Received: 04.05.2023  
Revised: 12.08.2023  
Accepted: 16.08.2023  
Available Online: 19.08.2023

### How to cite this article:

Entezari, A., Sedaghat, N., & Shakeri, G. (2024). Production of gelatin-pullulan-nanofibers cellulose film containing *salmonella* phages and effect its anti-*salmonella* against *Salmonella typhimurium*. *Iranian Food Science and Technology Research Journal* 20(2), 267-279. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/ifstrj.2023.82253.1256>

### Introduction

The main sources of *Salmonella* for humans are pork, beef, chicken, eggs, fruits, vegetables, and their derivatives such as mayonnaise, and peanut butter. Different species of *Salmonella* can adapt, grow or survive at different environmental conditions. *Salmonella enterica* is a major cause of food borne illness in humans, and *Salmonella typhimurium* and *Salmonella enteritidis* serovars are the most prevalent. One strategy is to use active packaging to reduce the microbial load or prevent the growth of microorganisms on food. Recently, antimicrobial active packaging has received much attention due to maintaining food quality, safety, and increasing shelf life. Among the antimicrobials used in the food industry, bacteriophages have a very good efficiency to control pathogenic bacteria. Pullulan has a good ability to form a film, its film has good characteristics such as transparency, odorlessness, tastelessness, solubility in water, and low permeability to oxygen and fat, However, the major obstacle is related to its price. The combination of polysaccharides with proteins has been done in order to improve the performance and reduce the costs of films. Gelatin is a suitable option to combine with pullulan in terms of good mechanical properties, reduced permeability, and its good price. Different ratios of gelatin and pullulan were studied and suitable film selected, but it needed to modify, so nanofibers cellulose was added in order to improve the mechanical properties and water resistance. Adding cellulose nano fiber can be a good and appropriate option. The aim of this research was to evaluate the antibacterial effectiveness of gelatin-pullulan-nanofibers cellulose composite film containing bacteriophage against *Salmonella typhimurium* at two different temperatures.

### Materials and Methods

Gelatin and pullulan powders were weighted separately and mixed together (20gelatin-80pullulan). Nanofiber cellulose was extracted from rice bran and was used at three different levels (1%, 3%, and 5%). Commercial bacteriophage solution was added to each of the films separately and the films were prepared by molding method. Thickness, moisture content, solubility, swelling, tensile strength, and elongation of gelatin-pullulan film containing nanofibers were studied. Zone inhibitory of films containing different percentage of cellulose nanofibers on the agar media against *Salmonella typhimurium* ( $10^4$  CFU.ml<sup>-1</sup>) was evaluated. The antibacterial effect of selected film on the poultry meat inoculated with *S. typhimurium* ( $10^4$  CFU.g<sup>-1</sup>) and several phages on the surface meat at 4 °C and 12 °C was also investigated.



©2023 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

<https://doi.org/10.22067/ifstrj.2023.82253.1256>

## Results and Discussion

The results indicated that gelatin-pullulan films containing different percentages of cellulose were showed approximately 2 mm of zone inhibitory compare to films free of phages. Also, inhibitory among films at different percentage of nanofiber cellulose did not show significant change. Antibacterial effect on poultry meat was dependent on temperature, films loaded with bacteriophages at higher temperature (12 °C) was more effective compare to lower temperature (4 °C). The populations of *S. typhimurium* were decreased 1 log and 0.7 log than control samples at 4 °C after 7 and 9 days respectively, while at 12 °C, 1 log and around 2.55 log decrease was found after 1 and 9 days, respectively. In a study, beef inoculated with salmonella was treated by SALMONELEX™ bacteriophage and resulted in 1.29 log reduction of pathogenic bacteria compared to the control sample (Yeh *et al.*, 2017). In another study, the antibacterial effect of double-layer poly lactic acid/xanthan film at 10 °C compared to 4 °C against pathogenic bacteria of Salmonella and Listeria was determined and found that at 10 °C, the number of pathogenic bacteria was decreased more than at 4 °C (Radford *et al.*, 2017).. Kamali *et al.* (2022b) reported that the release of phages from the film of 30 poly lactic acid/70 whey protein to the meat surface after one hour was 63.22 % and 63.18 % at 4 °C and 10 °C, respectively, which means no significant difference, after one day at both temperatures.

**Keywords:** Bio-control, Composite film, Food safety, Pathogen bacteria



## مقاله پژوهشی

جلد ۲۰، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۳، ص. ۲۶۷-۲۷۹

# تولید فیلم مرکب ژلاتین-پولان-نانوالیاف سلولز حاوی فاز سالمونلا و بررسی اثر ضد سالمونلایی آن علیه سالمونلا تایفی موریوم

اسما انتظاری<sup>۱</sup> - ناصر صداقت<sup>۲\*</sup> - گلشن شاکری<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۵

## چکیده

امروزه به دلیل وجود نگرانی‌های زیست‌محیطی و افزایش تقاضای مصرف‌کنندگان برای محصولات غذایی با کیفیت و ماندگاری بیشتر، استفاده از فیلم‌ها و پوشش‌های زیست‌تخریب‌پذیر مورد توجه بسیاری واقع شده‌اند. در این مطالعه، اثر افزودن در صدهای مختلف نانوالیاف سلولز به فیلم مرکب ژلاتین-پولان و اثر ضدباکتریایی فیلم‌های حاوی باکتریوفاز تو سط روش انتشار دیسک بررسی شد. به علاوه، اثر ضدباکتریایی فیلم مرکب ژلاتین-پولان-نانو فیبر سلولز روی گوشت مرغ در طول دوره نگهداری در دو دمای ۴ و ۱۲ درجه سانتی‌گراد علیه باکتری سالمونلا تایفی موریوم مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش در صد نانوفیبرهای سلولز در فیلم ژلاتین-پولان-ضخامت، حلالیت، تورم، مقاومت کششی، و در صد کشش پذیری فیلم‌ها به ترتیب افزایش، کاهش، افزایش، افزایش، و کاهش یافتند. فیلم‌های حاوی باکتریوفاز روی محیط آگار ناحیه بازدارندگی خوبی داشتند. استفاده از فیلم ضدباکتریایی روی سطح گوشت مرغ در دمای ۱۲ °C بعد از یک روز منجر به کاهش یک سیکل لگاریتمی شد در حالی که در دمای ۴ °C در روز هفتم یک سیکل لگاریتمی کاهش را در جمعیت باکتری سالمونلا منجر شد.

واژه‌های کلیدی: ایمنی غذا، بیوکنترل، پاتوزن، فیلم مرکب

## مقدمه

منابع اصلی سالمونلا شامل گوشت خوک، گاو، مرغ، تخم مرغ، میوه‌جات، سبزیجات، و مشتقات به دست آمده از آن‌ها مانند مایونز، و کره بادام زمینی است. گونه‌های مختلف سالمونلا می‌توانند با شرایط مختلف محیطی سازگار شده، رشد کرده و یا زنده بمانند (Gouvea et al., 2015). سالمونلا اتتریکا به عنوان یک عامل مهم در از بین رفتن مواد غذایی، اقتصاد، و سلامت انسان تلقی می‌شود، که دو سرووار مهم آن سالمونلا تایفی موریوم و سالمونلا انترتییدیس بیشترین شیوع را در بیماری‌های ناشی از مواد غذایی دارند (Shakeri et al., 2021). یک

استراتژی استفاده از بسته‌بندی‌های فعال به منظور کاهش بار میکروبی و یا جلوگیری از رشد میکروارگانیسم‌ها بر روی مواد غذایی است. در سال‌های اخیر بسته‌بندی‌های فعال ضد میکروبی به دلیل حفظ کیفیت، ایمنی غذا، و افزایش ماندگاری مورد توجه زیادی واقع شده اند (Alves et al., 2020; Sezer et al., 2022). در بین ضد میکروب‌های مورد استفاده در صنعت غذا باکتریوفازها کارآمدی بسیار خوبی جهت کنترل باکتری‌های پاتوزن دارا می‌باشند. آن‌ها دارای ویژگی‌هایی از جمله عمل بر روی یک پاتوزن هدف، جداسازی و تولید آسان هستند. فازهای کوکتیل می‌توانند به منظور غلبه بر محدودیت طیف میزبانی فاز مورد استفاده قرار گیرند، فازهای تجاری مختلفی در بازار موجود هستند که

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی دوره دکتری تخصصی و استاد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران  
(\*- نویسنده مسئول: Email: [sedaghat@um.ac.ir](mailto:sedaghat@um.ac.ir))

۳- محقق فلوشیپ، مؤسسه دولتی ارزیابی ریسک آلمان، برلین، آلمان

(۳۷٪) از شرکت سیگما آلدریج، سدیم برمید از Hoynewell آمریکا، هیپوکلریت سدیم (NaClO) از شرکت Panreac تهیه شدند.

### تیتراسیون فاز سالمونلا

به منظور تیتراژ به روش آگار دولایه، ابتدا فاز تجاری سالمونلکس (میکروئوس، هلند) در SM<sup>۲</sup> بافر رقت‌سازی شد، سپس ۱۰۰ میکرولیتر از محیط سالمونلا تایفی موریوم (ATCC 704) ۱۸ ساعت کشت، به تیوب‌های محیط TSB حاوی ۰/۴٪ آگار منتقل و بعد ۱۰۰ میکرولیتر از هر رقت به آن‌ها اضافه و ورتکس گردیدند سپس روی محیط تریپتون سوی آگار<sup>۴</sup> (TSA) ریخته شدند، و در نهایت در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد برای مدت ۲۴ ساعت انکوبه و تعداد پلاک‌ها شمارش گردید (Yeh et al., 2017).

### آماده‌سازی الیاف و نانوفیبر سلولز<sup>۵</sup>

جهت تهیه نانوفیبر سلولز، فرآیند خمیرسازی سبوس برنج در یک دیگ پخت با ظرفیت ۱۵ لیتر انجام شد. دیگ پخت مجهز به یک گرم کننده خارجی، محور افقی چرخان، و سیستم‌های اندازه‌گیری دما و فشار بود که با هیدروکسید سدیم ۷٪ در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد برای مدت زمان ۱۵۰ دقیقه در تماس قرار گرفت. نسبت مایع پخت به وزن خشک نمونه ۸ به ۱ در نظر گرفته شد. پس از زمان مذکور، مخلوط به دست آمده از الک با مش ۰/۱۴ میلی‌متر عبور داده شد. خمیر سلولزی جهت حذف آب اضافه سانتریفیوژ و تا زمان استفاده در دمای محیط قرار گرفته تا خشک شود. از بین رفتن لیگنین موجود در فیبرها با افزودن کلریت سدیم (NaClO<sub>۲</sub>) در شرایط اسیدی در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان یک ساعت انجام شد، به این صورت که ۰/۳ گرم کلریت سدیم به ازای هر گرم فیبر با اسید استیک ۲٪ (حجمی:حجمی) مخلوط تا سوسپانسیون فیبری ۳٪ (وزنی:حجمی) به دست آید. این عمل سه مرتبه تکرار شد تا به‌طور کامل فیبرها رنگ بری شوند (Morcillo-Martín et al., 2022).

دو پیش تیمار مکانیکی و اکسیداسیون به وسیله TEMPO به منظور تسهیل تولید الیاف سلولز به نانو الیاف استفاده شد. در پیش تیمار مکانیکی، الیاف سلولز معلق در آب در پالایشگر پی‌اف‌آی با سرعت ۲۰۰۰۰ دور بر دقیقه قرار گرفت تا به درجه روانی ۹۰ شوپر-ریگلر برسد. در اکسیداسیون به وسیله TEMPO، الیاف سلولز (۱ گرم) در آب (۱۰۰ میلی‌لیتر) حاوی 2,2,6,6-tetramethyl-piperidine-1-oxyl radical (۰/۱۶ گرم، ۰/۱ میلی‌مول) و سدیم برمید (۰/۱ گرم، ۱

از آن جمله می‌توان به فاز سالمونلکس (SALMONELEX<sup>TM</sup>) اشاره کرد (Alves et al., 2019). سالمونلکس یک کوکتیل فاز متشکل از دو باکتریوفاژ S16 و Felix 0-1 می‌باشد که علیه طیف وسیعی از گونه‌های باکتری سالمونلا مورد استفاده است (Yeh et al., 2018). پلوان یک آگزوپلی‌ساکارید است که توانایی خوبی به جهت تشکیل فیلم دارد. فیلم‌های پلوان ویژگی‌های خوبی مانند شفافیت، بی‌بویی، بی‌مزه‌گی، بی‌رنگی، حلالیت در آب، و نفوذپذیری پایین به اکسیژن و چربی دارد اما دارای قیمت بالایی است، بنابراین یک استراتژی ترکیب کردن با دیگر پلی‌مرهاست. مطالعات متعددی به جهت ترکیب پلی‌ساکاریدها با پروتئین‌ها در راستای بهبود عملکرد و کاهش هزینه‌های فیلم‌های تولیدی انجام شده است. ژلاتین یک گزینه مناسب برای ترکیب با پلوان به لحاظ خصوصیات مکانیکی خوب، کاهش نفوذپذیری، و قیمت مناسب است (Zhang et al., 2013). هم‌چنین، به‌منظور بهبود ویژگی‌های مکانیکی و مقاومت به آب افزودن نانوفیبر سلولز می‌تواند یک گزینه خوب و مناسب باشد (Roy et al., 2022). نانوفیبرهای سلولز می‌توانند نیروی بین مولکولی را در ترکیبات تشکیل دهنده افزایش داده و منجر به بهبود خصوصیات عملکردی فیلم‌ها شوند (Wang et al., 2016). مطالعات مختلفی به لحاظ استفاده از باکتریوفاژها در پوشش‌ها و فیلم‌ها به‌عنوان ترکیبات ضدباکتریایی انجام شده است، که به‌عنوان مثال می‌توان به استفاده از آن‌ها در کنسانتره پروتئین آب پنیر، کربوکسی متیل سلولز، کیتوزان، و آلژینات سدیم اشاره کرد (Sezer et al., 2022). هدف از انجام پژوهش حاضر، تولید فیلم فعال و زیست‌تخریب‌پذیر ژلاتین-پلوان-نانوفیبر سلولز حاوی باکتریوفاژ و ارزیابی خواص فیزیکی و ضدباکتریایی آن علیه باکتری سالمونلا تایفی موریوم روی گوشت مرغ در طول دوره نگهداری در دماهای ۴ و ۱۲ درجه سانتی‌گراد بود.

### مواد و روش‌ها

در این مطالعه ژلاتین، گلیسرول، و تریش-بیس از شرکت سیگما آلدریج، و پلوان از شرکت هاباشیبارای ژاپن خریداری شدند. مواد شیمیایی از قبیل زایلوز لیزین دکسیکولات (XLD)، تریپتون سوی برات<sup>۲</sup> (TSB)، و آگار از شرکت اکساید انگلیس، منیزیوم سولفات ۷ به (MgSO<sub>۴</sub>.7H<sub>۲</sub>O) از اوتوگ آلمان، و کلرید سدیم از شرکت لب کم اسپانیا، TEMPO (2,2,6,6-tetramethyl-piperidin-1-oxyl) ۹۹٪، هیدروکسید سدیم (NaOH، > ۹۹٪) و هیدروکلریک اسید

4- Tryptone Soy Agar

5- Nanofibers Cellulose (NFCs)

1- Xylose Lysine Deoxycholate

2- Tryptone Soy Broth

3- Saline Magnesium

ضخامت هر یک از فیلم‌ها توسط میکرومتر دیجیتال (Mitutoyo, No, 293-561, Tokyo, Japan) در ۵ نقطه مختلف از فیلم‌ها انجام و میانگین آن‌ها در به‌عنوان ضخامت نهایی در نظر گرفته شد. به‌منظور تعیین مقدار رطوبت، فیلم‌ها به ابعاد  $2 \times 2 \text{ cm}^2$  برش داده شده و وزن گردیدند ( $W_1$ ) و در آون با دمای  $105^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفتند زمانی که به وزن ثابت رسیدند، وزن نهایی آن‌ها ثبت گردید ( $W_2$ ) و درصد افت وزن نمونه‌ها با توجه به رابطه (۲) محاسبه شد (González et al., 2018):

$$(2) \quad \text{مقدار رطوبت (\%)} = (W_1 - W_2 / W_1) \times 100$$

### حلالیت در آب و تورم

فیلم‌ها به ابعاد  $2 \times 2 \text{ cm}^2$  برش داده شده و وزن شدند ( $M_0$ ) و در آون با دمای  $105^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفتند و وزن آن‌ها یادداشت گردید ( $M_1$ )، سپس فیلم‌ها به‌صورت جداگانه در  $50^\circ\text{C}$  میلی‌لیتر آب مقطر به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط قرار گرفتند و وزن آن‌ها بعد از قرارگیری بر روی کاغذ به‌منظور حذف آب اضافه، ثبت شد ( $M_2$ )، سپس مجدد فیلم‌ها در آون با دمای  $105^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفتند و در نهایت مجدد وزن گردیدند ( $M_3$ )، درصد حلالیت در آب و تورم فیلم‌ها به ترتیب با استفاده از رابطه‌های (۳) و (۴) محاسبه گردید (Kowalczyk et al., 2020):

$$(3) \quad \text{حلالیت در آب (\%)} = (M_1 - M_3 / M_1) \times 100$$

$$(4) \quad \text{تورم (\%)} = (M_1 - M_2 / M_1) \times 100$$

### خصوصیات بافتی

خصوصیات مکانیکی فیلم‌ها توسط روش استاندارد ASTM D638 و دستگاه بافت‌سنج انجام شد (ASTM, 2014). ابتدا فیلم‌ها به ابعاد  $5 \times 1 \text{ cm}^2$  برش داده شدند و بین دو فک دستگاه به فاصله  $65 \text{ mm}$  میلی‌متر و سرعت  $10 \text{ mm/min}$  بر دقیقه قرار گرفتند. ضخامت فیلم‌ها در قسمت‌های مختلف به‌صورت تصادفی توسط یک میکرومتر دیجیتال اندازه‌گیری شدند. آزمایشات در سه تکرار انجام شد. مقاومت کششی و کشش‌پذیری به ترتیب با توجه به رابطه‌های (۵) و (۶) محاسبه شدند:

$$(5) \quad F_{\text{max}} / A = \text{مقاومت کششی (مگاپاسکال)}$$

$$(6) \quad \frac{\Delta L}{L} \times 100 = \text{کشش‌پذیری (\%)}$$

$F_{\text{max}}$  نشان‌دهنده حداکثر نیروی مورد نیاز برای شکست فیلم (N) و  $A$  نشان‌دهنده سطح اولیه (ضخامت  $\times$  عرض،  $\text{m}^2$ ).  $\Delta L$  نشان‌دهنده اختلاف طول هنگام پاره شدن (mm)، و  $L$  هم نشان‌دهنده طول اولیه می‌باشند (mm).

میلی‌مول) قرار گرفتند، سپس محلول NaClO (۱۲٪) با  $\text{pH} = 10$  اضافه شد تا به قدرت اکسیداتیو  $5 \text{ mg/L}$  میلی‌مول در هر گرم فیبر برسد و در دمای محیط با سرعت  $500 \text{ rpm}$  دور بر دقیقه هم زده شد و اسیدیته با افزودن سود ( $0.5 \text{ Molar}$ ) در مقدار  $10$  ثابت نگه داشته شد. در نهایت، زمانی که اسیدیته بدون تغییر باقی ماند واکنش به پایان رسید و سلولز اکسید شده با آب شسته و صاف شد. یک سوسپانسیون از الیاف پیش تیمار شده  $1$  درصد تحت یک فرآیند نانوفیبریلایسیون در یک هموژنایزر فشار بالا قرار گرفت تا نانوالیاف تشکیل دهنده الیاف سلولزی را جدا کند. برای جلوگیری از انسداد هموژنایزر، فیبریلایسیون تدریجی به ترتیب زیر انجام شد:  $4$  مرتبه در  $300$  بار،  $3$  مرتبه در  $600$  بار و  $3$  مرتبه در  $900$  بار (Morcillo-Martín et al., 2022).

### بازده نانوالیاف سلولز

جهت تعیین عملکرد نانوفیبرسلاسیون نانوفیبر سلولز، ژل رقیق شده ( $0.1\%$  ماده خشک) به مدت  $10$  دقیقه با سرعت  $12000 \text{ rpm}$  دور بر دقیقه به‌منظور جداسازی بخش غیرنانوفیبریل شده از ماده نانوفیبریل شده سانتریفیوژ شد. سپس، بخش غیرنانوفیبر جمع‌آوری و در دمای  $90^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد برای مدت  $24$  ساعت در آون قرار داده گرفت تا خشک شده و به وزن ثابت برسد. با توجه به رابطه (۱) بازده بخش نانوفیبریل شده محاسبه گردید (Besbes et al., 2010):

$$100 \times \left\{ \left[ \frac{\text{وزن نمونه رقیق شده} \times \text{مقدار ماده جامد نمونه ژل رقیق شده}}{\text{وزن بخش خشک شده}} \right] - 1 \right\} = \text{بازده (\%)}$$

### تهیه فیلم مرکب ژلاتین-پولان-نانوفیبر سلولز حاوی فاز

$10$  گرم از هر یک از پودرهای ژلاتین و پولان به‌صورت جداگانه به  $100$  میلی‌لیتر آب اضافه شدند، سپس گلیسرول  $20\%$  (وزنی/وزنی) براساس وزن بیوپلیمر افزوده گردید و برای مدت  $30$  دقیقه در دمای  $90^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد توسط گرم‌کن حرارت داده شده و به‌طور پیوسته توسط مگنت هم‌زده شدند و با نسبت  $20\%$  ژلاتین- $80\%$  پولان با یکدیگر در دمای  $50^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد برای مدت  $30$  دقیقه مخلوط شدند. مقادیر  $1$ ،  $3$ ، و  $5\%$  نانو فیبر سلولز (بازده  $96\%$ ) جداگانه به فیلم مرکب حاصل اضافه شدند و مخلوط حاصل برای مدت  $3$  ساعت در دمای  $35^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد هم‌زده شدند و در نهایت محلول فاز اضافه گردید، سپس محلول فیلم‌های تهیه شده قالب‌ریزی شدند و در دمای اتاق برای مدت  $3$  روز خشک گردیدند (Miraghaei & Cheguini, 2014). فیلم‌های تهیه شده قبل از انجام آزمایشات برای مدت  $48$  ساعت مشروط شدند. فیلم‌های بدون فاز به‌عنوان شاهد در نظر گرفته شدند.

### ضخامت و محتوای رطوبت فیلم‌ها

### فاژ بارگذاری شده در فیلم‌ها

به منظور تعیین مقدار باکتریوفاژ بارگذاری شده در فیلم‌ها، ابتدا فیلم‌ها به ابعاد  $2 \times 2 \text{ cm}^2$  برش داده شده و داخل میکروپلیت‌های حاوی ۲ میلی لیتر SM بافر قرار گرفتند و توسط انکوباتور شیکردار به مدت یک ساعت ( $150 \text{ rpm}$ ) در دمای محیط قرار گرفتند. بعد از رقت‌سازی تعداد فاژها به روش آگار دو لایه تعیین شد (Kamali et al., 2022a).

### ناحیه بازدارندگی فیلم‌ها

به منظور بررسی ناحیه بازدارندگی فیلم‌ها، ابتدا باکتری سالمونلا تایفی موریوم (ATCC 704) در مرحله فاز لگاریتمی رشد تا رقت  $10^4$  (CFU. ml<sup>-1</sup>) در تربیتون سوی برات رقیق شد و ۱۰۰ میکرولیتر از آن با محیط TSB حاوی ۰/۴٪ آگار مخلوط و بر روی TSB دارای ۱/۵٪ آگار ریخته شد و صبر کرده تا در دمای اتاق سفت شود. سپس، دیسک‌هایی از فیلم‌های حاوی باکتریوفاژ به قطر ۱۶ میلی‌متر بر روی آن‌ها قرار گرفت. دیسک‌های فیلم بدون باکتریوفاژ به عنوان شاهد در نظر گرفته شدند (Leung et al., 2017).

### تلفیح باکتری سالمونلا به گوشت مرغ

گوشت مرغ از فروشگاه مواد غذایی تهیه و در ظرف حاوی کیسه یخ به سرعت به آزمایشگاه منتقل شد. نمونه‌های گوشت مورد آزمایش میکروبی تشخیص سالمونلا قرار گرفتند تا به لحاظ عدم حضور باکتری پاتوژن سالمونلا بررسی شوند. نتایج نشان داد که گوشت مورد آزمایش عاری از باکتری سالمونلا است. گوشت‌ها در زیر هود لامینار در شرایط استریل به قطعاتی با وزن ۵ گرم برش داده شدند، سپس از سوسپانسیون باکتری که دارای غلظت  $10^8$  (CFU. ml<sup>-1</sup>) بود تا غلظت  $10^5$  (CFU. ml<sup>-1</sup>) رقت‌سازی انجام و مقدار ۵۰ میکرولیتر از آن به سطح گوشت مرغ تلفیح شد و در نهایت غلظت  $10^4$  (CFU. g<sup>-1</sup>) به دست آمد. بعد از ۲۰ دقیقه فیلم حاوی فاژ بر سطح گوشت قرار گرفت. نمونه‌های آماده شده در دماهای ۴ و ۱۲ درجه سانتی‌گراد انکوبه شدند و بعد از ۳۰ دقیقه، ۱، ۳، ۷، و ۹ روز تعداد باکتری‌های پاتوژن و تعداد فاژهای موجود بر سطح گوشت مورد بررسی قرار گرفتند. فیلم بدون فاژ به عنوان شاهد در نظر گرفته شد (Weng et al., 2021).

### شمارش باکتری سالمونلا تایفی موریوم

نمونه‌های گوشت مرغ مورد آزمایش در شرایط استریل داخل کیسه قرار گرفته و توسط ترازوی رقیق‌کننده حجم مناسبی از SM بافر با نسبت ۱ به ۱۰ رقیق‌سازی انجام شد و توسط بلندر مخلوط شدند. سپس جهت شمارش باکتری پاتوژن در محلول کلرید سدیم (۰/۰۸۵٪) رقت

سازی انجام و بر روی محیط XLD آگار کشت خطی داده شده و در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد برای مدت ۲۴ ساعت انکوبه شدند، و در نهایت تعداد باکتری‌ها شمارش گردید (Radford et al., 2017).

### شمارش فاژهای سطح گوشت

جهت شمارش فاژهای موجود در سطح گوشت‌های مرغ، از کیسه های حاوی نمونه گوشت و محلول SM بافر حجمی از بخش مایع برداشته و توسط فیلتر سیرینگ (۰/۲۲ میکرومتر) مخلوط باکتری و فاژ از یکدیگر جدا گردیدند و از بخش مایع فیلتر شده رقت‌سازی در SM بافر انجام و به روش آگار دو لایه تعداد فاژها تعیین گردید (Radford et al., 2017).

### طرح آماری

آزمایشات براساس طرح فاکتوریل در قالب کاملاً تصادفی انجام شدند، و داده‌ها براساس روش تجزیه آنالیز واریانس (ANOVA) با استفاده از نرم‌افزار SPSS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. مقایسه میانگین‌ها توسط آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح آماری ۵ درصد انجام شد. آزمایشات در سه تکرار انجام گرفتند.

### نتایج و بحث

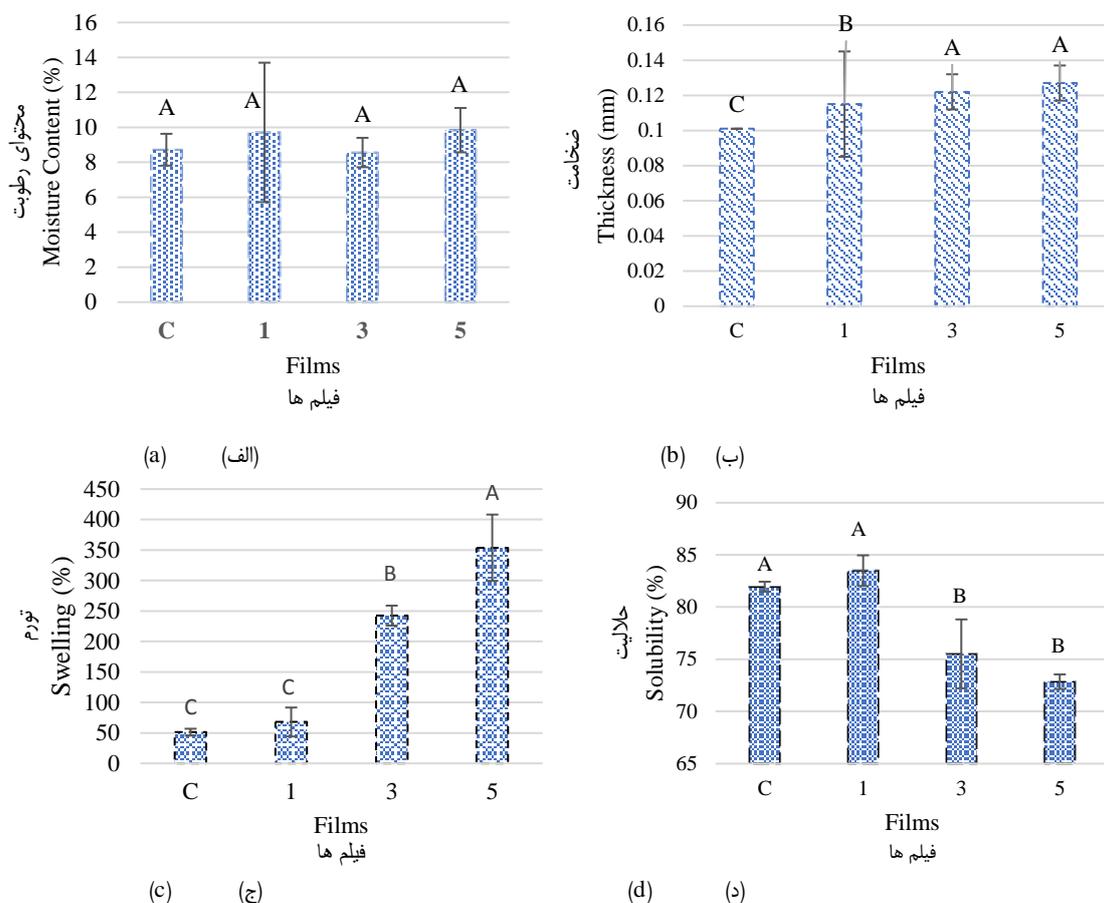
#### ضخامت، محتوای رطوبت، حالیت، و تورم فیلم‌ها

همان‌طور که در شکل ۱ (الف) مشاهده می‌کنید، فیلم ۲۰ ژلاتین-۸۰ پلوان (شاهد) کم‌ترین ضخامت را داشت و استفاده از ۳ و ۵٪ نانوفیبر سلولز در آن ضخامت بیشتری را در مقایسه با فیلم حاوی ۱٪ نانوفیبر سلولز ایجاد کرد ( $P < 0.05$ ) که دلیل این افزایش ضخامت مربوط به افزایش مقدار مواد جامد است (Kassab et al., 2019). محتوای رطوبت فیلم ژلاتین-پلوان حاوی مقادیر مختلف نانوالیاف سلولز در شکل ۱ (ب) نشان داده شده است. افزودن نانوالیاف سلولز تفاوت معناداری در محتوای رطوبت فیلم‌ها نداشت ( $P > 0.05$ ). در یک مطالعه، نتایج نشان داد که افزودن نانوبلور سلولز به فیلم ژلاتین منجر به افزایش ضخامت شد و این افزایش ضخامت با افزایش درصد نانوکریستال‌ها رابطه مستقیمی داشت (Ratna et al., 2022). هم چنین، آن‌ها نشان دادند که افزودن مقادیر مختلف نانوالیاف سلولز به فیلم ژلاتین، محتوای رطوبت فیلم‌ها را تحت تأثیر قرار نداد.

شکل ۱ اثر افزودن درصد‌های مختلف نانوالیاف سلولز را بر حالیت (ج) و تورم (د) فیلم ژلاتین-پلوان نشان می‌دهد. افزودن مقادیر مختلف نانوالیاف سلولز به فیلم ژلاتین-پلوان تفاوت آماری معناداری را در حالیت و تورم فیلم‌ها نشان داد ( $P < 0.05$ ). بالاترین میزان حالیت مربوط به فیلم شاهد و فیلم حاوی ۱٪ نانوفیبر بود و با افزودن

نانوفیبر در فیلم پولان، پایداری در آب بیشتر شد (Yang et al., 2020). همان طور که در شکل ۱ (د) مشاهده می‌کنید، بیشترین و کمترین تورم را به ترتیب فیلم‌های دارای ۵٪ نانوفیبر سلولز و فیلم شاهد نشان دادند. افزودن نانوفیبر تورم را افزایش داد زیرا استفاده از نانوفیبر سلولز تخلخل را در ساختار فیلم افزایش می‌دهد. در یک مطالعه، افزودن نانوفیبرهای سلولز باکتریایی به فیلم ژلاتین ماهی منجر به کاهش شاخص تورم در فیلم‌ها شد (Shabanpour et al., 2018).

۳٪ و ۵٪ نانوفیبر به فیلم شاهد حلالیت کاهش قابل ملاحظه‌ای پیدا کرد که یکی از دلایل آن مربوط به تفاوت در ضخامت فیلم‌ها است زیرا فیلم‌های خوراکی با ضخامت کم‌تر، حلالیت بیشتری را از خود نشان می‌دهند (Khodaei et al., 2020). دلیل دیگر مربوط به ساختار سه بعدی نانوفیبر سلولز است که از حرکت و جابه جایی پلیمر به آب محافظت می‌کند. به علاوه، با ورود نانوفیبر سلولز به فیلم خاصیت کریستالی افزایش می‌یابد که منجر به کاهش نفوذ آب به درون زنجیره های پلیمر می‌شود (Jahed et al., 2019). افزودن نانوفیبر اتیل سلولز به فیلم پولان منجر به افزایش پایداری در آب شد و با افزایش مقدار



شکل ۱- ضخامت (الف)، محتوای رطوبت (ب)، حلالیت (ج)، و تورم (د) فیلم های ژلاتین-پولان حاوی درصد های مختلف نانوفیبر سلولز  
Fig. 1. Thickness (a), moisture content (b), solubility (c), and swelling (d) of gelatin-pullulan films containing at different percentages of NFCs

و شاهد به ترتیب ۳۲/۳، ۲۷/۹۶، ۲۶/۲۷، و ۲۲/۱۷ مگاپاسکال بود. فیلم دارای ۵٪ نانوفیبر استحکام کششی بالاتری نسبت به فیلم شاهد داشت که به برهم کنش های سطحی مناسب بین ماتریس پلیمر و نانوفیبر سلولز می‌تواند مربوط باشد، که منجر به انتقال کارآمد تنش توسط لایه های نانوفیبر-پلیمر می‌شود. فیلم‌های دارای نانوالیاف سلولز دارای درصد کشش پذیری پایین تری نسبت به فیلم شاهد بودند، که دلیل آن

### خصوصیات مکانیکی

جدول ۱ اثر درصد های مختلف نانوفیبر را بر مقاومت کششی و کشش پذیری فیلم مرکب ژلاتین-پولان نشان می‌دهد. افزودن نانوفیبر به فیلم مرکب ژلاتین-پولان منجر به تغییر معناداری در مقاومت کششی و درصد کشش پذیری شد ( $P < 0.05$ ). به طوری که مقدار مقاومت کششی در فیلم ژلاتین-پولان حاوی ۵، ۳، ۱٪ نانوفیبر،

همکاران (Trovatti *et al.*, 2012) نشان دادند که افزودن نانوفیبر به فیلم پلولان منجر به افزایش مقاومت کششی و کاهش کشش پذیری شد.

را می‌توان به افزایش ضخامت در فیلم‌ها مربوط دانست (Roy & Rhim, 2022)، و یا ایجاد باندهای هیدروژنی درون مولکولی بین گروه های ژلاتین-پلولان و نانوفیبر سبب افزایش مقاومت به کشش و کاهش کشش پذیری شده‌اند (Chen & Chi, 2022). تروواتی و

جدول ۱- تأثیر مقادیر مختلف نانوفیبر سلولز بر مقاومت کششی و کشش پذیری فیلم ژلاتین-پلولان  
Table 1- The effect of cellulose nanofibers on tensile strength and elongation of gelatin-pullulan film

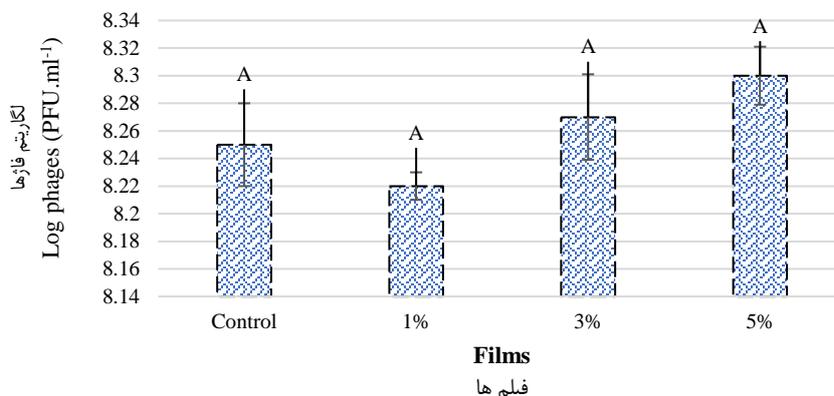
فیلم‌ها Films	مقاومت کششی Tensile strength (MPa)	کشش پذیری Elongation (%)
Control	22.173 ± 6.39 <sup>C</sup>	5.50 ± 3.54 <sup>A</sup>
1%	26.27 ± 1.94 <sup>B</sup>	3.03 ± 0.59 <sup>B</sup>
3%	27.958 ± 3.25 <sup>B</sup>	3.36 ± 0.07 <sup>B</sup>
5%	32.3 ± 5.14 <sup>A</sup>	3.34 ± 0.78 <sup>B</sup>

\* داده‌ها براساس میانگین ± انحراف معیار گزارش شده است. داده‌های دارای حروف مشابه در یک ستون از لحاظ آماری اختلاف معنادار ندارند (P<0.05).  
\*Results are reported as mean ± SD. Mean with different letters in each column present significant difference (P<0.05).

باکتریوفاژ اثری در از بین رفتن فاژها در طی فرآوری و خشک کردن نداشت. درحالی‌که، نتایج آزمایشات فرجی و همکاران (Faraji *et al.*, 2019) نشان داد که تولید فیلم استات سلولز حاوی فاژ بدون تیمار پلاسما، تعداد فاژ بارگذاری شده در فیلم کاهش یافت که این تفاوت مربوط به روش افزودن فاژ به فیلم و نوع فاژ به کار رفته است.

#### فاژ بارگذاری شده در فیلم‌ها

همان‌طور که در شکل ۲ ملاحظه می‌کنید، تفاوت آماری معناداری بین مقدار فاژ بارگذاری شده در فیلم‌های ژلاتین-پلولان حاوی مقادیر مختلف نانوفیبر سلولز وجود ندارد (P>0.05). مطالعات گووا و همکاران (Gouvea *et al.*, 2015) نشان داد که فیلم استات سلولز حاوی



شکل ۲- فاژ بارگذاری شده در فیلم ژلاتین-پلولان حاوی مقادیر مختلف نانوفیبر سلولز  
Fig. 2. Loaded phages in gelatin-pullulan film containing at different percentages of NFCs

های N-استیل گلوکزآمین‌های قرار گرفته در ترمینال زنجیره‌های پلی ساکاریدی تشکیل دهد، که روی مرکز سطح خارجی لیپو پلی ساکارید است و فاژ S16 باندهایی با غشاء خارجی پروتئین C تشکیل می‌دهد، که در نهایت منجر به لیز شدن و مرگ سلول باکتری می‌شود. N-استیل گلوکزآمین و پروتئین C ترکیبات متداول باقی‌مانده روی سطح غشاء باکتری سالمونلا هستند (Yeh *et al.*, 2017).

#### ناحیه بازدارندگی

جدول ۲ ناحیه بازدارندگی فیلم ژلاتین-پلولان حاوی درصدهای مختلف ۱، ۳، و ۵٪ نانوفیبر سلولز را در برابر باکتری سالمونلا تایفی موربوم نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌کنید، تفاوت معناداری بین ناحیه بازدارندگی فیلم‌ها دیده نمی‌شود (P>0.05)، و در فیلم‌های فاقد فاژ (شاهد) ناحیه بازدارندگی صفر بود. مکانیسم عمل آن به صورت خلاصه این چنین است که فاژ Felix 0-1 می‌تواند باندهایی با گیرنده

جدول ۲- ناحیه بازدارندگی فیلم ژلاتین-پولان دارای درصدهای مختلف نانوفیبر سلولز در برابر باکتری سالمونلا تایفی موربوم

Table 2- Zone inhibitory of gelatin-pullulan film at different percentages of NFCs loaded with phages against *S. typhimurium* bacteria

فیلم‌ها Films	ناحیه بازدارندگی Zone inhibitory (cm)
Control+Phage	2.17 ± 0.136 <sup>A</sup>
Control	0 <sup>B</sup>
Control +1%+Phage	2.01 ± 0.369 <sup>A</sup>
Control +1%	0 <sup>B</sup>
Control +3%+Phage	2.23 ± 0.118 <sup>A</sup>
Control +3%	0 <sup>B</sup>
Control +5%+Phage	2.12 ± 0.354 <sup>A</sup>
Control +5%	0 <sup>B</sup>

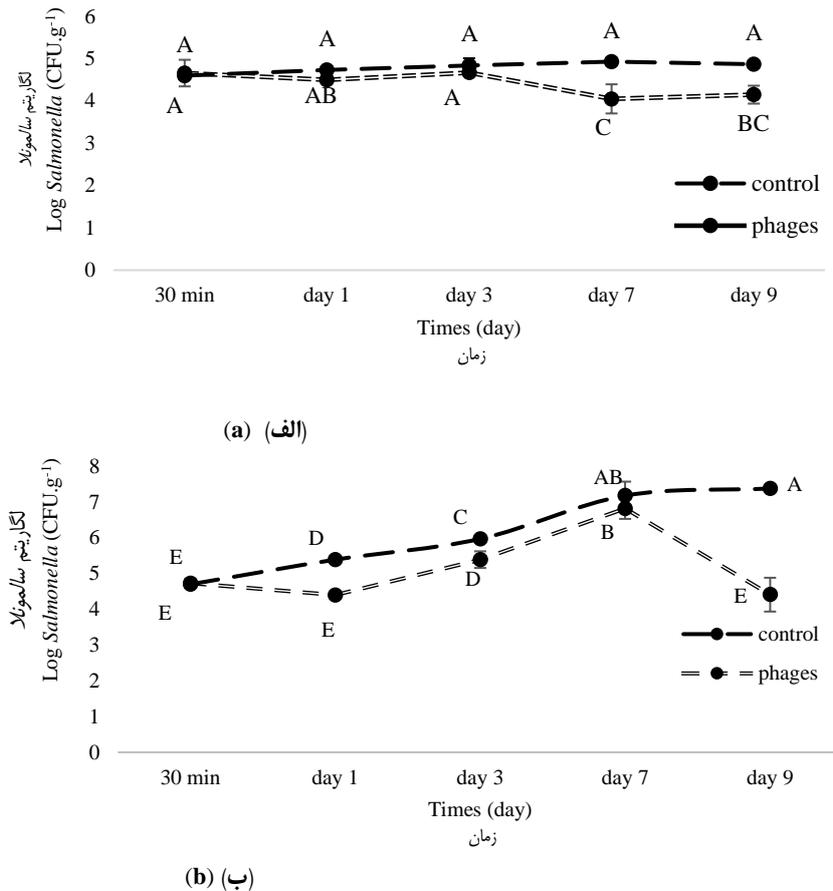
\* داده‌ها براساس میانگین ± انحراف معیار گزارش شده است. داده‌های دارای حروف مشابه در یک ستون از لحاظ آماری اختلاف معنادار ندارند ( $P < 0.05$ ).

\*Results are reported as mean ± SD. Mean with different letters in each column present significant difference ( $P < 0.05$ ).

### شمارش باکتری پاتوژن

فیلم مرکب ژلاتین-پولان دارای ۵٪ نانوفیبر سلولز به دلیل داشتن خصوصیات فیزیکوشیمیایی مناسب‌تری جهت استفاده روی گوشت مرغ تلقیح شده به باکتری سالمونلا انتخاب شد. شکل‌های ۳ (الف) و (ب) اثر ضدباکتریایی فیلم‌های حاوی و فاقد فاز را در طول دوره نگهداری در دو دمای ۴ و ۱۲ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌کنید، در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد فیلم ضدباکتریایی در روزهای اول و سوم تفاوت معناداری در مقایسه با شاهد نداشت ( $P > 0.05$ )، در حالی که در روزهای هفتم و نهم نزدیک به یک و ۰/۷ سیکل لگاریتمی کاهش در مقایسه با نمونه شاهد مشاهده شد ( $P < 0.05$ )، در حالی که در دمای ۱۲ درجه (شکل ۳ ب) فیلم حاوی فاز بعد از یک روز ۱ سیکل لگاریتمی و در روز نهم ۲/۳۵ سیکل لگاریتمی کاهش در مقایسه با شاهد داشت ( $P < 0.05$ ). دمای بهینه برای فازها ۳۰ درجه سانتی‌گراد است بنابراین فاز در دمای بالاتر نسبت به دمای پایین بهتر عمل می‌کند (Dicastillo et al., 2021). هم‌چنین، توزیع یکنواخت و توانایی انتشار کارآمد ذرات فاز، ساختار و ترکیبات شیمیایی غذاهای مختلف بر خاصیت ضد میکروبی فاز تأثیر دارند (Guenther et al., 2012). نتایج رادفورد و همکاران (Radford et al., 2017) نشان داد که اثر ضدباکتریایی فیلم دولایه پلی لاکتیک اسید/ زانتان در دمای ۱۰ درجه نسبت به دمای ۴ درجه سانتی‌گراد در برابر باکتری‌های پاتوژن سالمونلا و لیستریا با یکدیگر تفاوت داشته و در دمای بالاتر تعداد باکتری‌های پاتوژن کاهش بیشتری را داشتند. جمعیت باکتری سالمونلا در نمونه‌های تیمار شده با فیلم حاوی فاز سالمونلا در دمای

۱۰ درجه سانتی‌گراد در روز سوم کاهش معناداری در مقایسه با نمونه‌های شاهد در شرایط هوایی و خلاء بسته‌بندی داشت و حتی در شرایط خلاء در روز ۱۴ کاهش بیشتری مشاهده شد و کاهش جمعیت بیشتری در دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به دمای ۴ درجه با گذشت زمان نشان داد. نتایج ونگ و همکاران (Weng et al., 2021) نشان داد که استفاده از فیلم ژلاتین حاوی فاز استافیلوکوکوس روی نمونه‌های پنیر نگهداری شده در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد در روز سوم منجر به کاهش قابل توجهی در جمعیت باکتری استافیلوکوکوس اورئوس شد که با افزایش میزان فاز بارگذاری شده در فیلم تعداد باکتری کاهش بیشتری داشت (Weng et al., 2021). کمالی و همکاران (Kamali et al., 2022b) گزارش کردند استفاده از فیلم دو لایه پلی لاکتیک اسید/کنسانتره پروتئین آب پنیر حاوی فاز لیستریا روی گوشت مرغ در دماهای ۴ و ۱۰ درجه سانتی‌گراد بعد از ۲۴ ساعت کاهش معناداری را در مقایسه با نمونه شاهد نشان داد و اثر ضدباکتریایی در روز پنجم به حداکثر رسید و بعد از آن تفاوت معناداری نداشت، به علاوه، اثر ضدباکتریایی فیلم فعال علیه باکتری لیستریا در دمای ۴ درجه نسبت به ۱۰ درجه سانتی‌گراد بیشتر بود (Kamali et al., 2022b). در یک مطالعه، گوشت گاو تلقیح شده به باکتری پاتوژن سالمونلا توسط باکتریوفاز سالمونلکس تیمار شد و نتیجه آزمایش بعد از ۲۴ ساعت ۱/۲۹ سیکل لگاریتمی کاهش را در مقایسه با نمونه شاهد نشان داد (Yeh et al., 2017).

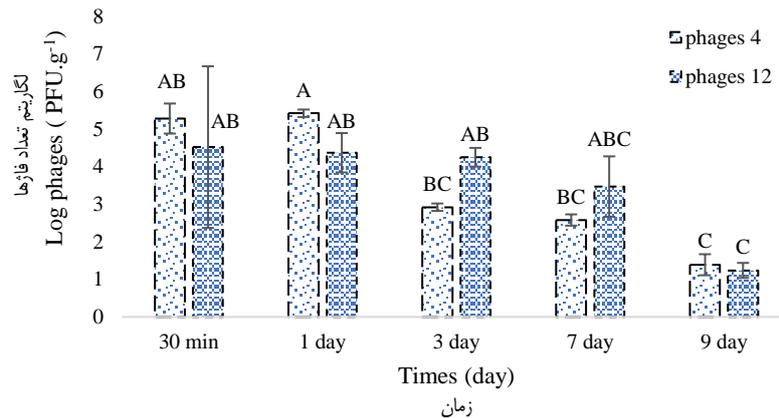


شکل ۳- تعداد باکتری *سالمونلا تایفی موریم* بر روی گوشت مرغ در دماهای ۴ (الف) و ۱۲ (ب) درجه سانتی‌گراد در طی زمان  
 Fig. 3. Numbers of *S. typhimurium* bacteria on the chicken meat at 4 °C (a) and 12 °C (b) temperatures during times

لاکتیک اسید/زانتان حاوی باکتریوفاژهای *سالمونلا* و لیستریا در طی دوره نگهداری در دو دمای ۴ و ۱۰ درجه سانتی‌گراد با یکدیگر تفاوت آماری معناداری ندارند (Radford *et al.*, 2017). نتایج یک مطالعه دیگر نشان داد که رهائش فاژها از فیلم با نسبت ۳۰ پلی‌لاکتیک اسید/ ۷۰ پروتئین آب پنیر به سطح گوشت بعد از یک ساعت ۶۳/۲۲٪ و ۶۳/۱۸٪ به ترتیب در دماهای ۴ و ۱۰ درجه سانتی‌گراد بودند که با یکدیگر تفاوت معناداری نداشتند و در طی دوره ۵ روزه بعد از یک روز در هر دو دما تعداد فاژهای موجود بر سطح گوشت ثابت بود (Kamali *et al.*, 2022b). در مطالعه دیگر، درصد رهائش فاژهای انکپسوله شده در فیلم ایزوله پروتئین آب پنیر به سطح کاهو بعد از ۳ ساعت ۰/۳۷٪ بود. دلیل این تفاوت‌ها را می‌توان به ویژگی‌های فاژهای مختلف و پوشش‌ها مربوط دانست (Vonasek *et al.*, 2014).

#### شمارش فاژهای سطح گوشت

شکل ۴ تعداد فاژهای موجود در بر سطح گوشت مرغ را در دو دمای ۴ و ۱۲ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌کنید، به‌طور کلی با گذشت زمان تعداد فاژها کاهش می‌یابد. تعداد فاژهای موجود بر سطح نمونه‌های گوشت مرغ در دو دما با یکدیگر تفاوت آماری معناداری نداشتند ( $P > 0.05$ ). به‌طور کلی، پایداری فاژها به ماتریس غذایی که به‌عنوان بستر (سوبسترا) استفاده شده بستگی دارد (Robeson *et al.*, 2014). ترکیبات موجود در غذا و فاژ استفاده شده بر پایداری فاژ در سیستم‌های غذایی اثرگذار هستند و هرگونه تغییر می‌تواند نقطه ایزوالکتریک فاژ و مقاومت یونی محیط را تغییر دهد و منجر به تغییر ساختار و عملکرد فاژ شود (C.García-Anaya *et al.*, 2020). نتایج یک مطالعه نشان داد که استفاده از فیلم دو لایه پلی



شکل ۴- تعداد فازهای سالمونلا بر روی گوشت مرغ در دماهای ۴ و ۱۲ درجه سانتی‌گراد در طی زمان  
Fig. 4. Numbers of *Salmonella* phages at 4 °C and 12 °C temperatures on the chicken meat during times

باکتری سالمونلا ۱۰ درجه سانتی‌گراد است تا باکتریوفاژ بتواند اثر آنتی باکتریال خود را بهتر نشان دهد. پیشنهاد ما این است که استفاده از این فیلم ضدباکتریایی در میوه‌ها و سبزیجات که در دمای بالاتری نسبت به گوشت نگهداری می‌شوند، مناسب‌تر است و اثربخشی بیشتری دارد، لذا بایستی مورد مطالعه بیشتر قرار گیرد.

### سپاسگزاری

این پژوهش با کد ۳/۵۲۶۱۴ با حمایت مالی دانشگاه فردوسی مشهد و دانشگاه کوردوبای اسپانیا انجام شده است، بدین‌وسیله از حمایت آنان تقدیر و تشکر می‌گردد.

### نتیجه‌گیری

این مطالعه نشان داد که فیلم مرکب ژلاتین-پولان-نانوفیبر سلولز می‌تواند به‌عنوان یک سیستم حامل باکتریوفاژ روی ماده غذایی می‌تواند کاربرد داشته باشد. اثر آنتی‌باکتریال فیلم‌های ژلاتین-پولان دارای مقادیر مختلف نانوفیبر سلولز حاوی باکتریوفاژ روی محیط آگار با یکدیگر تفاوت معناداری نداشتند. رهائش باکتریوفاژها از فیلم مرکب به سطح گوشت مرغ منجر به کاهش جمعیت باکتری سالمونلا شد. اثر آنتی‌باکتریال فیلم ترکیبی ژلاتین-پولان-نانوفیبر سلولز روی گوشت مرغ علیه باکتری پاتوژن سالمونلا در دمای ۱۲ درجه موفقیت آمیزتر از دمای ۴ درجه سانتی‌گراد بود و در دمای ۴ °C کاهش آهسته تری را در جمعیت سالمونلا شاهد بودیم، زیرا حداقل دمای رشد برای

### References

- Alves, D., Cerqueira, M.A., Pastrana, L.M., & Sillankorva, S. (2020). Entrapment of a phage cocktail and cinnamaldehyde on sodium alginate emulsion-based films to fight food contamination by *Escherichia coli* and *Salmonella enteritidis*. *Food Research International*, 128, 108791. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108791>
- Alves, D., Marques, A., Milho, C., Costa, M.J., Pastrana, L.M., Cerqueira, M.A., & Sillankorva, S.M. (2019). Bacteriophage  $\phi$ IBB-PF7A loaded on sodium alginate-based films to prevent microbial meat spoilage. *International Journal of Food Microbiology*, 291(16), 121-127. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.11.026>
- ASTM. (2014). Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. In *ASTM International* (Vol. ASTM D638-14, pp. 1–15). West Conshohocken: PA, USA.
- Besbes, I., Alila, S., & Boufi, S. (2010). Nanofibrillated cellulose from TEMPO-oxidized eucalyptus fibres: Effect of the carboxyl content. *Carbohydrate Polymers*, 84(3), 975–983. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.12.052>
- Chen, F., & Chi, C. (2022). Development of pullulan/carboxylated cellulose nanocrystal/tea polyphenol bionanocomposite films for active food packaging. *International Journal of Biological Macromolecules*, 186(1), 405–413. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.025>
- C.García-Anaya, M., R.Sepúlveda, D., ClaudioRios-Velasco, B.Zamudio-Flores, P., I.Sáenz-Mendoza, A., & H.Acosta-Muñoz, C. (2020). The role of food compounds and emerging technologies on phage stability. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 64, 102436. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102436>
- Dicastillo, C.L., Settler-Ramírez, L., Gavara, R., Hernández-Muñoz, P., & Carballo, G.L. (2021). Development of biodegradable films loaded with phages withantilisterial properties. *Polymers*, 13(3), 327. <https://doi.org/10.3390/polym13030327>

8. Faraji, S., Maghsoudlou, Y., Khomeiri, M., Kashiri, M., & Babaei, A. (2019). In vitro biocontrol of *Escherichia coli* through the immobilization of its specific lytic bacteriophage on cellulose acetate biodegradable film. *Iranian Journal of Medical Microbiology*, 12(6), 399-408. <https://doi.org/10.30699/ijmm.12.6.399>
9. González, A., Gastelú, G., Barrera, G.N., Ribotta, P.D., & Igarzabal, C.I.Á. (2018). Preparation and characterization of soy protein films reinforced with cellulose nanofibers obtained from soybean by-products. *Food Hydrocolloids*, 89, 758-764. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.11.051>
10. Gouvea, D.M., Mendonça, R.C.S., Soto, M.L., & Cruz, R.S. (2015). Acetate cellulose film with bacteriophages for potential antimicrobial use in food packaging. *LWT - Food Science and Technology*, 63(1), 85-91. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.03.014>
11. Guenther, S., Herzig, O., Fieseler, L., Klumpp, J., & Loessner, M.J. (2012). Biocontrol of *Salmonella typhimurium* in RTE foods with the virulent bacteriophage FO1-E2. *International Journal of Food Microbiology*, 154(1-2), 66-77. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2011.12.023>
12. Jahed, E., Almasi, H., & Khaledabad, M.A. (2019). Producing and optimizing the properties of chitosan-organic nanofiber biodegradable nanocomposite based containing *O. vulgare* subsp. *gracile* and *C. copiticum* essential oils and its application on the oxidative stability of Canola oil. *Iranian Food Science and Technology*, 14(5), 907-927. <https://doi.org/10.22067/ifstrj.v14i5.71229>
13. Kamali, S., Yavarmanesh, M., Najafi, M.B.H., & Koocheki, A. (2022a). Development of whey protein concentrate/pullulan composite films containing bacteriophage A511: Functional properties and anti-Listerial effects during storage. *Food Packaging and ShelfLife*, 33, 100902-100917. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100902>
14. Kamali, S., Yavarmanesh, M., Najafi, M.B.H., & Koocheki, A. (2022b). Poly (lactic acid) and whey protein/pullulan composite bilayer film containing phage A511 as an anti-Listerial packaging for chicken breast at refrigerated temperatures. *LWT- Food Science and Technology*, 170, 114085. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114085>
15. Kassab, Z., Aziz, F., Hannache, H., Youcef, H.B., & Achaby, M.E. (2019). Improved mechanical properties of k-carrageenan-based nanocomposite films reinforced with cellulose nanocrystals. *International Journal of Biological Macromolecules*, 123, 1248-1256. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.12.030>
16. Khodaei, D., Oltroggea, K., & Hamidi-Esfahani, Z. (2020). Preparation and characterization of blended edible films manufactured using gelatin, tragacanth gum and, Persian gum. *LWT- Food Science and Technology*, 117, 108617. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108617>
17. Kowalczyk, D., MonikaKordowska-Wiater, Karas, M., Zięba, E., MonikaMężyńska, & Wiącek, A.E. (2020). Release kinetics and antimicrobial properties of the potassium sorbate-loaded edible films made from pullulan, gelatin and their blends. *Food Hydrocolloids*, 101, 105539. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105539>
18. Leung, V., Szewczyk, A.Y., Chau, J., Hosseini-Doust, Z., Groves, L., Hawsawi, H., Filipe, C.D.M. (2017). Long-term preservation of bacteriophage antimicrobials using sugar glasses. *ACS Biomaterials Science and Engineering*, 4(11), 3802-3808. <https://doi.org/10.1021/acsbomaterials.7b00468>
19. Miraghaei, S., & Cheguini, F.K. (2014). Paper presented at the International Conference on Natural Food Hydrocolloids, Mashhad.
20. Morcillo-Martín, R., Espinosa, E., Rabasco-Vílchez, L., Sanchez, L.M., Haro, J., & Rodríguez, A. (2022). Cellulose nanofiber-based aerogels from wheat straw: influence of surface load and lignin content on their properties and dye removal capacity. *Biomolecules*, 12(2), 32. <https://doi.org/10.3390/biom12020232>
21. Radford, D., Guild, B., Strange, P., Ahmed, R., Lim, L.-T., & Balamurugan, S. (2017). Characterization of antimicrobial properties of *Salmonella* phage Felix O1 and *Listeria* phage A511 embedded in xanthan coatings on Poly (lactic acid) films. *Food Microbiology*, 66, 117-128. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2017.04.015>
22. Ratna, Aprilia, S., Arahman, N., Bilad, M.R., Suhaimi, H., Munawar, A.A., & Nasution, I.S. (2022). Bio-nanocomposite based on edible gelatin film as active packaging from *Clarias gariepinus* fish skin with the addition of cellulose nanocrystalline and nanopropolis. *Polymers*, 14(18), 3738. <https://doi.org/10.3390/polym14183738>
23. Robeson, J., Turra, G., Huber, K., & Borie, C. (2014). A note on stability in food matrices of *Salmonella enterica* serovar Enteritidis-controlling bacteriophages. *Electronic Journal of Biotechnology*, 17(4), 189-191. <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2014.06.001>
24. Roy, S., Biswas, D., & Rhim, J.-W. (2022). Gelatin/cellulose nanofiber-based functional nanocomposite film incorporated with zinc oxide nanoparticles. *Journal Composites Science*, 6(8), 223. <https://doi.org/10.3390/jcs6080223>
25. Roy, S., & Rhim, J.W. (2022). Gelatin/cellulose nanofiber-based functional films added with mushroom-mediated sulfur nanoparticles for active packaging applications. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 12, 979-990. <https://doi.org/10.1007/s40097-022-00484-3>
26. Sezer, B., Tayyarcı, E.K., & Boyacı, I.H. (2022). The use of bacteriophage-based edible coatings for the biocontrol of *Salmonella* in strawberries. *Food Control*, 135(101812). <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.108812>

27. Shabanpour, B., Kazemi, M., Ojagh, S.M., & Pourashouri, P. (2018). Bacterial cellulose nanofibers as reinforce in edible fish myofibrillar protein nanocomposite films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 117(1), 742-751. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.05.038>
28. Shakeri, G., Hammerl, J.A., Jamshidi, A., Ghazvini, K., Rohde, M., Szabo, I., & Kittler, S. (2021). The lytic siphophage vB\_StyS-LmqsSP1 reduces the number of *Salmonella enterica* serovar Typhimurium isolates on chicken skin. *Applied and Environmental Microbiology*, 87(24), e01424-01421. <https://doi.org/10.1128/AEM.01424-21>
29. Trovatti, E., Fernandes, S.C.M., Rubatat, L., Perez, D.S., Freire, C.S.R., Silvestre, A.J.D., & Neto, C.P. (2012). Pullulan-nanofibrillated cellulose composite films with improved thermal and mechanical properties. *Composites Science and Technology*, 72(13), 1556-1561. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.06.003>
30. Vonasek, E., Le, P., & Nitin, N. (2014). Encapsulation of bacteriophages in whey protein films for extended storage and release. *Food Hydrocolloids*, 37, 7-13. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.09.017>
31. Wang, W., Liu, Y., Jia, H., Liu, Y., Zhang, H., He, Z., & Ni, Y. (2017). Effects of cellulose nanofibers filling and palmitic acid emulsions coating on the physical properties of fish gelatin films. *Food Biophysics*, 12, 23-32. <https://doi.org/10.1007/s11483-016-9459-y>
32. Weng, S., Lopez, A., Saez-Orviz, S., Marcet, I., García, P., Rendueles, M., & Díaz, M. (2021). Effectiveness of bacteriophages incorporated in gelatine films against *Staphylococcus aureus*. *Food Control*, 121, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107666>
33. Yeh, Y., Moura, F.H., Broek, K.V.D., & Mello, A.S. (2018). Effect of ultraviolet light, organic acids, and bacteriophage on *Salmonella* populations in ground beef. *Meat Science*, 139, 44-48. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.01.007>
34. Yang, Y., Xie, B., Liu, Q., Kong, B., & Wang, H. (2020). Fabrication and characterization of a novel polysaccharide based composite nanofiber films with tunable physical properties. *Carbohydrate Polymers*, 236(15), 116054. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116054>
35. Yeh, Y., Purushothaman, P., Gupta, N., Ragnone, M., Verma, S.C., & Mello, A.S. (2017). Bacteriophage application on red meats and poultry: Effects on *Salmonella* population in final ground products. *Meat Science*, 127, 30-34. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2017.01.001>
36. Zhang, C., Gao, D., Ma, Y., & Zhao, A.X. (2013). Effect of gelatin addition on properties of pullulan films. *Journal of Food Science*, 78(6), C805-C810. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2012.02925.x>



## Effect of Hydrothermal/dry Heating and Particle Sizes of Rice Flour on Quality of Gluten-free Bread

A. Hashemi Shektai<sup>1</sup>, J. Mohammadzadeh Milani<sup>2\*</sup>, A. Motamedzadegan<sup>2</sup>, S. Haghghat-Kharazi<sup>3</sup>

1, 2 and 3- M.Sc. Graduated Student, Professor and Ph.D. Graduated Student, Department of Food Science and Technology, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran, respectively.

(\*- Corresponding Author Email: [jmilani@sanru.ac.ir](mailto:jmilani@sanru.ac.ir))

Received: 08.06.2023  
Revised: 12.07.2023  
Accepted: 20.07.2023  
Available Online: 22.07.2023

### How to cite this article:

Hashemi Shektai, A., Mohammadzadeh Milani, J., Motamedzadegan, A., & Haghghat-Kharazi, S. (2024). Effect of hydrothermal/dry heating and particle sizes of rice flour on quality of gluten-free bread. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 20(2), 281-293. (In Persian with English abstract).  
<https://doi.org/10.22067/ifstrj.2023.82845.1263>

### Introduction

Due to the low amount of prolamin, rice flour is the most suitable raw material for preparing food for patients with celiac disease. Particle size classification and thermal treatments are among the physical methods to improve the functional characteristics of gluten-free flours and as a result, improve the quality of the products obtained from them. Particle size can increase the quality of gluten-free products by affecting the physicochemical properties of flour during hydration. Dry heat treatment and moist heat treatment are common techniques for physical modification which, depending on the intensity of temperature and storage time, lead to the improvement of gluten-free products by modifying starch grains, aroma, and flavor, and reducing microbial load. Considering that the effect of rice flour particle size on the quality of gluten-free bread has not been studied so far, in the current research, by dividing rice flour into particles with sizes of 180, 150, and 125 microns and using moist and dry heat treatments, The possibility of improving the functional characteristics of rice flour and improving the quality characteristics of gluten-free bread were investigated.

### Materials and Methods

The content of moisture, pH, ash, and protein of rice flour was measured using AACC standard method (2000) and the total amount of starch was measured by the alkaline extraction method and the amount of starch damage was measured by non-enzymatic rapid method. To classify the size of the particles, waxy rice flour was divided by a shaker sieve with different sizes of 180, 150, and 125 microns, then under the influence of dry heat treatment for 2 hours and moist heat treatment with 25% humidity for 5 hours at a 110°C To produce gluten-free bread, the formulation used by Haghghat-Kharazi (2020) was used with a slight change. Ingredients for gluten-free bread formulation for 100 grams of rice flour included 125 ml of water, 4.5 grams of sugar, 2 grams of salt, 6 grams of vegetable oil, 3 grams of yeast, and 2 grams of xanthan gum. Bread characteristics, which include weight loss, specific volume, oven spring, crumb crust ratio, shape index, porosity, crust and crumb color, and bread texture analysis were studied to evaluate the quality of bread. Finally, the factorial test was used to investigate the effects of particle size and heat treatment of rice flour, and Duncan's multiple range test was used to compare the means at the 5% probability level.

### Results and Discussions



©2023 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

<https://doi.org/10.22067/ifstrj.2023.82845.1263>

The results showed that the effect of particle size on weight loss, specific volume, oven spring, crumb to crust ratio, crust, and crumb color parameters, and bread texture was not significant ( $p>0.05$ ). Regarding the sample volume index, C80 and DHT120 significantly had the lowest volume index ( $p<0.05$ ). The HMT80-treated sample significantly increased the weight loss, and the moist heat-treated samples significantly increased the specific volume and the core to shell crumb ( $p<0.05$ ). Sample treated with HMT 120 had the highest volume index. moist heat treatment and dry heat led to significantly decrease in brightness and an increase in the yellowness of the crust and crumb of the bread compared to the control sample, but there was no significant change in the amount of redness ( $p<0.05$ ). Moist heat treatment samples had the lowest hardness and chewiness compared to the control sample and the dry heat treatment sample. In general, the sample obtained from 125-micron flour particle size and moist heat treatment led to the improvement of gluten-free bread quality.

**Keywords:** Celiac disease, Gluten-free bread, Physical modification, Waxy rice

## مقاله پژوهشی

جلد ۲۰، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۳، ص ۲۸۱-۲۹۳

# تأثیر حرارت‌دهی خشک و مرطوب و اندازه ذرات آرد برنج بر کیفیت نان بدون گلوتن

علی هاشمی شکتابی<sup>۱</sup> - جعفر محمد زاده میلانی<sup>۲\*</sup> - علی معتمدزادگان<sup>۲</sup> - سپیده حقیقت خرازی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۹

## چکیده

تیمار حرارتی (خشک و مرطوب) از جمله روش‌های فیزیکی جهت اصلاح ویژگی‌های عملکردی آردهای بدون گلوتن و بهبود کیفیت محصولات حاصل از آن‌ها می‌باشد. طبیعتاً تأثیر حرارت متأثر از اندازه ذرات حرارت‌دهی شده است. در این پژوهش، آرد برنج واکسی در اندازه ذرات مختلف (۱۸۰، ۱۵۰ و ۱۲۵) میکرون تحت تأثیر تیمار حرارتی خشک به مدت ۲ ساعت و تیمار حرارتی مرطوب (رطوبت، ۲۵٪) به مدت ۵ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد مورد مطالعه قرار گرفت. در این بررسی میزان آسیب‌دیدگی نشاسته آرد برنج و خصوصیات کیفی نان بدون گلوتن از قبیل درصد افت وزنی، حجم مخصوص نان، اندیس‌های شکل، آون اسپرینگ، رنگ مغز و پوسته و بافت نان مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد تیمارهای حرارتی خشک و مرطوب بطور معنی‌دار منجر به کاهش میزان آسیب‌دیدگی نشاسته شدند. تأثیر اندازه ذرات بر افت وزنی، اندیس تقارن و یکنواختی، آون اسپرینگ و رنگ مغز و پوسته معنی‌دار نبود، اما تیمار حرارتی مرطوب نمونه حاصل از اندازه ذرات کمتر از ۱۸۰ میکرون افت وزنی را در طی پخت افزایش داد. تیمار حرارتی مرطوب آرد برنج منجر به افزایش حجم مخصوص، نسبت مغز به پوسته، اندیس حجم، تیرگی و زردی پوسته و مغز نان حاصل شد، در حالی که میزان سفتی و قابلیت جویدن نمونه‌ها را کاهش داد. بطور کلی نمونه حاصل از ذرات ۱۲۵ میکرون و تیمار حرارتی مرطوب منجر به بهبود کیفیت نان بدون گلوتن شد.

**واژه‌های کلیدی:** اصلاح فیزیکی، برنج واکسی، بیماری سلیاک، نان بدون گلوتن

## مقدمه

برخوردار نیستند. رویکردهای اعمال شده برای بهبود خواص نان بدون گلوتن را می‌توان به دو روش متفاوت نخست، از دیدگاه علمی با تغییرات در فرمول یا از دیدگاه تکنولوژیکی یا فناوری طبقه‌بندی کرد (Ramos *et al.*, 2021). تغییر در اندازه ذرات از جمله روش ساده‌های تیمار فیزیکی با تأثیر بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آرد مانند جذب آب، احتباس حلال، ته‌نشینی و خواص چسبندگی در بهبود خواص رئولوژیکی آرد مؤثر می‌باشد که سبب افزایش کیفیت محصولات بدون گلوتن می‌شود (Kurek & Sokolova, 2019; Pang *et al.*, 2021). تیمارهای حرارتی معمولاً در آردهای با محتوای چربی بالا، مانند یولاف (جو دو سر) یا آردهای غلات کامل، به‌ویژه آرد برنج، با هدف غیرفعال کردن آنزیم‌های متابولیزه‌کننده چربی مانند لیپازها و

آرد برنج یکی از مناسب‌ترین آردهای غلات برای تهیه غذای بیماران مبتلا به بیماری سلیاک است. مناسب بودن آرد برنج به دلیل سطح پایین پرولامین آن در مقایسه با آرد گندم است (Kim, 2013). برنج واکسی برخلاف سایر انواع برنج دارای بافتی نرم، چسبناک و احساس دهانی بهتر است. آرد برنج واکسی در صنایع غذایی به‌عنوان عامل غلیظ‌کننده سس‌ها، پودینگ‌ها استفاده می‌شود و هنگامی که این محصولات منجمد، ذخیره و متعاقباً ذوب می‌شوند، می‌تواند از سینریزس جلوگیری کند (Bao & Bergman, 2018; Seow *et al.*, 2019). محصولات بدون گلوتن به دلیل عدم حضور گلوتن از کیفیت خوبی

۲، ۱ و ۳- به ترتیب دانش‌آموخته مقطع کارشناسی ارشد، استاد و دانش‌آموخته مقطع دکتری گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران  
\* - نویسنده مسئول: (Email: [jmilani@sanru.ac.ir](mailto:jmilani@sanru.ac.ir))

با توجه به اینکه تاکنون تأثیر برهمکنش اندازه ذرات و تیمار حرارتی آرد برنج بر ویژگی کیفی نان بدون گلوتن مورد مطالعه قرار نگرفته است در این پژوهش با تقسیم‌بندی آرد برنج به ذرات با اندازه‌های ۱۸۰، ۱۵۰ و ۱۲۵ میکرون و استفاده از تیمار حرارتی مرطوب و خشک امکان اصلاح ویژگی‌های عملکردی آرد برنج و بهبود ویژگی‌های کیفی نان بدون گلوتن مورد بررسی قرار گرفت.

### مواد و روش‌ها

مواد مورد استفاده جهت تهیه نان بدون گلوتن شامل آرد برنج زرک (بازار محلی در شهرستان ساری) بود که جهت تعیین اندازه ذرات مقدار ۱۰۰ گرم آرد برنج بروی الک‌هایی با مش ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ که به ترتیب از بزرگ به کوچک روی شیکر الک قرار گرفته بود ریخته شد، بعد از ۱۰ دقیقه لرزش آرد حاصل به سه قسمت به ترتیب با اندازه ذرات ۱۸۰، ۱۵۰، ۱۲۵ میکرون تقسیم شد. سایر مواد شامل صمغ زانتان (از شرکت فوفنگ چین)، روغن مایع گیاهی آفتابگردان (از شرکت لادن، ایران)، مخمر نانویایی فوری (از شرکت رضوی، ایران) شکر، و نمک بود.

### تعیین ترکیبات شیمیایی آرد برنج

محتوای رطوبت، pH، خاکستر، پروتئین آرد برنج با استفاده از روش استاندارد (AACC (۲۰۰۰ و مقدار کل نشاسته به روش استخراج قلیایی اندازه‌گیری شد (Lawal et al., 2011).

### عملیات حرارتی خشک

نمونه‌های آرد برنج الک شده به میزان ۱۰۰ گرم در فلاسک حجمی شیشه‌ای (۵۰۰ میلی‌لیتر) به مدت ۲ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد جهت انجام عملیات حرارتی خشک در آون (Memmert، مدل UFLLO، آلمان) گرم شدند (Bae & Lee, 2018).

### عملیات حرارتی مرطوب

جهت تنظیم رطوبت آرد برنج زرک به ۲۵ درصد مقدار آب مورد نیاز از اختلاف بین رطوبت نمونه و محتوای رطوبت مورد نظر محاسبه شد، سپس آب روی ۱۰۰ گرم نمونه در فلاسک حجمی شیشه‌ای (۵۰۰ میلی‌لیتر) ریخته و مخلوط شد و به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط نگهداری شد. تیمار حرارتی در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵ ساعت در آون (Memmert، مدل UFLLO، آلمان) انجام شد (Ruiz et al., 2018).

لیپوکسیژنازها ضروری هستند، همچنین بسته به شدت دما و زمان نگهداری با اصلاح دانه‌های نشاسته، عطر و طعم و کاهش بار میکروبی منجر به بهبود کیفیت محصولات بدون گلوتن می‌گردد. تیمار حرارتی مرطوب یکی از روش‌هایی است که در دمای بالاتر از نقطه ژلاتینه شدن (۹۰-۱۲۰ درجه سانتی‌گراد)، در رطوبت کم معمولاً کمتر از ۳۵٪ به مدت مشخص (۱۵ دقیقه تا ۱۶ ساعت) خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نشاسته را بدون از بین بردن ساختار گرانول آن تغییر می‌دهند، و سبب افزایش دمای ژلاتینه شدن، ظرفیت اتصال آب و در بیشتر موارد حساسیت گرانول به هیدرولیز آنزیمی می‌شود که برای نان و سایر اقلام نانویایی بدون گلوتن، ژلاتینه شدن تأخیری ممکن است دوره انبساط نان را طولانی کند و سبب افزایش حجم نان‌ها و بهبود ویژگی بافتی و کیفیت آنها می‌شود (Gomez & Martinez, 2016).

مطالعات انجام شده جهت بهبود خصوصیات نان بدون گلوتن بیشتر به تغییرات در فرمول پرداخته است و تحقیقات معدودی مبتنی بر تکنولوژی یا فناوری صورت گرفته است، به‌عنوان مثال دلاهر و همکاران (De la Hera et al., 2013)، در مطالعه‌ای تأثیر نوع برنج، اندازه ذرات آرد و محتوای آب خمیر را در تهیه نان بدون گلوتن گزارش کردند نان‌های دارای ۱۱۰ گرم آب به ازای هر ۱۰۰ گرم آرد، نوع برنج مورد استفاده بیشتر از حجم مخصوص بر روی بافت نان‌ها اثر داشت. کین و همکاران (Qin et al., 2021)، در مطالعه‌ای تأثیر اندازه ذرات بر خواص آرد و نان برنجی بدون گلوتن مشاهده کردند با کاهش اندازه ذرات، دمای ژلاتینه شدن کاهش، ویسکوزیته چسبندگی و هیدراتاسیون آرد برنج افزایش یافت، همچنین نان برنج ساخته شده از ذرات بزرگتر دارای حجم قابل توجهی کمتر، بافت سفت‌تر نسبت به نان تهیه شده از اندازه ذرات کوچکتر بود. رزنتی و همکاران (Renzetti et al., 2022)، مشاهده کردند آرد لوبیا چشم بلبلی تحت عملیات حرارتی خشک در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت، نانی با بالاترین نرمی، انسجام و انعطاف‌پذیری به همراه داشت. خوانچای و فونگ (Khwanchai & Fong., 2022)، گزارش کردند جایگزینی جزئی آرد برنج شکسته در تولید نان گندم تحت فرآیند حرارتی خشک در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت، نانی با بیشترین حجم مخصوص (۲/۸ سانتی‌متر مکعب بر گرم) تولید کرد و در مقایسه با نان آرد گندم تفاوت معنی‌داری در فنریته نداشت و بیشترین نمره پذیرش کلی را به خود اختصاص داد. استفاده از برنج و آرد ذرت تیمار شده با هیدروترمال جهت تولید نان‌های مبتنی بر برنج و بلغور نشان داد، حجم ویژه نان‌های بدون گلوتن بهبود یافت، علت آن ویسکوزیته اولیه بالاتر آردهای تیمار شده می‌باشد که این امر می‌تواند امکان به دام افتادن حباب‌های حاصل از تخمیر را افزایش دهد (Naqash et al., 2017).

## تعیین نشاسته آسیب‌دیده

جهت اندازه‌گیری آسیب‌دیدگی نشاسته از روش غیرآنزیمی سریع استفاده گردید. محلول استخراج‌کننده در این روش شامل ۱/۶۷ درصد اسید تری‌کلرواستیک ۰/۵ درصد تیوسیانات پتاسیم، محلول رنگ‌کننده شامل ۰/۲ درصد کریستالید و ۲ درصد یدور پتاسیم بود. به ۰/۵ گرم آرد، ۲۰ میلی‌لیتر محلول استخراج‌کننده اضافه گردید و عمل استخراج طی ۱۵ دقیقه انجام شد. صاف کردن محلول با کاغذ واتمن شماره یک انجام شد و مقدار ۲ میلی‌لیتر محلول صاف شده به بالن ۲۵ میلی‌لیتر منتقل شد و ۱ میلی‌لیتر محلول رنگ‌کننده به آن اضافه گردید، سپس بالن به حجم رسانیده شد و پس از ۱۰ دقیقه سکون مقدار جذب محلول در طول موج ۶۰۰ نانومتر خوانده شد و با فرمول زیر مقدار آسیب‌دیدگی نشاسته برحسب واحد فاردن به دست آمد (McDermott, 1980).

$$(1) \quad 2/1 + 0/97 \times (10 \times \text{میزان جذب}) = \text{آسیب دیدگی نشاسته}$$

## فرمول نان بدون گلوتن

نان‌های بدون گلوتن پخته شده در این پژوهش با استفاده از روش حقیقت و همکاران (Haghighat-Kharazi et al., 2020)، با کمی تغییر تهیه شدند. جهت تولید خمیرآبه ابتدا آرد برنج (۱۰۰ گرم)، شکر (۴/۵ گرم)، نمک (۲ گرم)، مخمر (۳ گرم) و صمغ زانتان (۲ گرم) با هم مخلوط شدند، سپس آب (۱۲۵ میلی‌لیتر) و روغن (۶ گرم) اضافه شد و با استفاده از همزن مخلوط شدند. خمیرآبه در قالب پخت ریخته شد و به مدت ۲۵ دقیقه با رطوبت ۸۵٪ استراحت داده شد، سپس به مدت ۱۵ دقیقه در یک آون برقی نیمه صنعتی (صنایع پخت مشهد، ساخت ایران) با درجه حرارت (بالای ۱۹۰، پایین فر ۲۳۰ درجه سانتی‌گراد) پخته شد. نمونه‌ها پس از پخت، تا دمای محیط خنک و در کیسه‌های پلی اتیلن جهت انجام آزمایشات بعدی نگهداری شدند.

## درصد افت وزنی

افت وزنی با وزن کردن نان طی ۲۴ ساعت پس از پخت با استفاده از رابطه فرمول زیر محاسبه شد (De la Hera et al., 2013).

$$(2) \quad \text{درصد افت وزنی} = \frac{\text{وزن نان-وزن خمیرآبه}}{\text{وزن خمیرآبه}} \times 100$$

## حجم مخصوص نان

حجم مخصوص نان ( $\text{cm}^3/\text{g}$ ) با تقسیم کردن حجم نمونه به وزن آن تعیین شد. حجم نمونه با روش جابجایی دانه کلزا و وزن نمونه با استفاده از ترازوی با دقت ۰/۰۱ گرم دیجیتال اندازه‌گیری شد (AACC, 2000).

## آون اسپرینگ

آون اسپرینگ از اختلاف ارتفاع خمیرآبه تخمیر شده و نان بلافاصله پس از پخت محاسبه شد (Shittu et al., 2008).

## نسبت مغز به پوسته

جهت ارزیابی نسبت مغز به پوسته با استفاده از تیغ تیز پوسته از مغز جدا شد، سپس هر قسمت بصورت جداگانه وزن شده و نسبت وزنی آنها بر پایه وزن خشک محاسبه شد (Haghighat-Kharazi et al., 2020).

## اندیس‌های حجم، تقارن و یکنواختی

اندیس‌های حجم، تقارن و یکنواختی نان با استفاده از روش مرجع ۱۰-۹۰ AACC محاسبه شد.

## ارزیابی رنگ مغز و پوسته

جهت آنالیز رنگ مغز و پوسته تصاویر تهیه شده توسط نرم‌افزار Image J مورد پردازش قرار گرفت. سه پارامتری که در آنالیز رنگ مورد ارزیابی قرار گرفت شامل مقادیر روشنایی (L)، قرمزی-سبزی (a) و آبی-زردی (b) بود.

## ارزیابی بافت نان

ارزیابی بافت نمونه‌های نان بدون گلوتن بوسیله دستگاه بافت‌سنج (Brookfield, USA) انجام شد. جهت انجام این آزمون نمونه با ابعاد  $25 \times 25 \times 25$  میلی‌متری از قسمت مرکزی نان برش داده شد، سپس پروپ با سرعت ۱ میلی‌متر بر ثانیه تا ۴۰ درصد ارتفاع اولیه مورد ارزیابی قرار گرفت. فاکتورهای مورد ارزیابی شامل سفتی، ارتجاعیت، بهم پیوستگی، فنریت و قابلیت جویدن بود (Lazaridou et al., 2007).

## ارزیابی حسی نان‌های بدون گلوتن

ارزیابی حسی نان‌های بدون گلوتن توسط ۷ نفر افراد نیمه آموزش دیده که به بیماری سلیاک مبتلا نبودن با استفاده از روش هدونیک ۵ نقطه‌ای که از امتیاز ۱ (نامطلوب) تا ۵ (مطلوب) انجام گرفت. ویژگی‌هایی نظیر فرم و شکل، خصوصیات پوسته و سطح رویی و زیرین، تخلخل، سفتی و نرمی بافت، قابلیت جویدن و طعم (بو و مزه) نان بدون گلوتن در این پژوهش مورد بررسی ارزیاب‌ها قرار گرفتند.

## آنالیز آماری

تمام داده‌های پارامترهای آرد برنج و نان حاصل با استفاده از آزمون فاکتوریل، جهت بررسی اثرات اندازه ذرات (سه سطح: ۱۸۰، ۱۵۰، ۱۲۵ میکرون) و تیمار حرارتی آرد برنج (سه سطح: حرارت خشک، حرارت مرطوب، حرارت دهی نشده یا شاهد) بوسیله نرم‌افزار SPSS ورژن ۲۶ حداقل در دو تکرار تجزیه و تحلیل شدند. جهت مقایسه میانگین‌ها از آزمون چند دامنه دانکن در سطح احتمال ۵٪ استفاده گردیده شد.

## نتایج و بحث

### ترکیب شیمیایی آرد برنج

میزان پروتئین ۸/۷٪، خاکستر ۰/۳۸٪، رطوبت ۱۱/۴۶٪، نشاسته ۷۸/۴۸٪ بر مبنای وزن مرطوب آرد برنج با pH برابر با ۶/۶ بود. در مطالعه حاضر مقدار نشاسته کمتر و مقدار پروتئین و رطوبت آرد برنج بیشتر از نتایج بدست آمده توسط کین و همکاران (Qin et al., 2016) بود این تفاوت می‌تواند به علت پارامترهایی نظیر موقعیت‌های جغرافیایی، آب، خاک، هوا و وارپته باشد.

### میزان آسیب دیدگی نشاسته

نتایج مربوط به میزان آسیب دیدگی نشاسته در جدول ۱ نشان داده شده است. تیمار حرارتی و اندازه ذرات آرد برنج و اثر متقابل آنها تأثیر معنی‌داری بر میزان آسیب دیدگی نشاسته نشان دادند ( $p < 0/05$ ). نمونه

های تیمار حرارتی خشک و تیمار حرارتی مرطوب از میزان آسیب دیدگی نشاسته کمتری نسبت نمونه شاهد برخوردار بودند. نمونه‌های تیمار حرارتی مرطوب کاهش بیشتری را نسبت به تیمار حرارتی خشک نشان دادند که این امر به دلیل بازآرایی بیشتر ناحیه آمورف در دانه‌های نشاسته آسیب‌دیده توسط فرآیند تیمار حرارتی مرطوب نسبت داده می‌شود (Hong et al., 2019). نمونه تیمار حرارتی مرطوب با اندازه ذرات کمتر از ۱۲۵ میکرون کمترین میزان سطح آسیب دیدگی نشاسته را به خود اختصاص داد. در طول تیمار حرارتی مرطوب تجمع و همجوشی قابل توجهی گرانول‌های نشاسته رخ می‌دهد که میزان آن به نوع کریستالیت نشاسته مرتبط است. علت بازآرایی بیشتر نمونه‌های حاصل از تیمار حرارت مرطوب به شکل، اندازه ذرات، دمای ژلاتینه شدن و محتوای رطوبت وابسته است (Liu et al., 2020). محتوای رطوبت بیشتر نمونه‌های تیمار حرارت مرطوب نسبت به نمونه‌های تیمار حرارت خشک همچنین نشاسته ریزتر اندازه ذرات ۱۲۵ میکرون سبب نفوذ بیشتر مولکول‌های آب به داخل گرانول‌های نشاسته می‌شود، این امر در نهایت منجر به بازآرایی بیشتر و کاهش میزان آسیب دیدگی نشاسته در طول تیمار حرارتی مرطوب می‌شود. لیو و همکاران (Liu et al., 2020)، در بررسی مورفولوژی، ساختار و خواص فیزیکی و شیمیایی نشاسته آسیب‌دیده ماش، سیب‌زمینی، ذرت و ذرت مومی قبل و بعد از عملیات حرارتی گزارش کردند محتوای نشاسته آسیب‌دیده نمونه‌ها پس از عملیات حرارتی کاهش یافت.

جدول ۱- میزان آسیب دیدگی نشاسته در تیمارهای مختلف آرد برنج واکسی  
Table 1- The extent of starch damage in different treatments of waxy rice flour

تیمارها Treatments	درصد آسیب دیدگی نشاسته Starch damage
C 80	3.98± 0.01 <sup>c</sup>
DHT 80	3.77± 0.01 <sup>c</sup>
HMT 80	2.86± 0.02 <sup>e</sup>
C 100	4.69± 0.09 <sup>a</sup>
DHT 100	4.25± 0.07 <sup>b</sup>
HTT 100	2.64± 0.01 <sup>f</sup>
C 120	4.77± 0.04 <sup>a</sup>
DHT 120	3.52± 0.02 <sup>d</sup>
HTT 120	2.30± 0.02 <sup>g</sup>

حروف متفاوت در هر ستون نشان دهنده وجود اختلاف معنی‌دار بین نمونه‌ها است ( $p < 0/05$ ).

Different letters in each column indicate significant differences between samples ( $p < 0.05$ ).

نسبت به تمام نمونه‌ها افت وزنی بیشتری را نشان داد. هرچه اندازه ذرات درشت‌تر باشد به دلیل کمتر بودن نسبت سطح به حجم گروه‌های عاملی موجود در سطح که بتوانند وارد واکنش با آب و هیدراته شدن شوند کمتر و جذب آب کمتر است در نتیجه منجر به کاهش وزن بالا می‌شود (De La Hera et al., 2014). احتمالاً توسعه بیشتر خمیرآبه

### درصد افت وزنی

نتایج حاصل از درصد افت وزنی در جدول ۲ ارائه شده است. تأثیر اندازه ذرات و حرارت خشک بر افت وزنی معنی‌دار نبود ( $p > 0/05$ ). تیمار حرارتی مرطوب منجر به تفاوت معنی‌داری شد، بطوری‌که در بین نمونه‌های تیمار حرارتی مرطوب نمونه HMT 80 بطور معنی‌داری

ذرات بر افت وزنی معنی دار نبود نمونه تیمار HMT 120 نسبت به نمونه DHT 120 بطور معنی داری از آون اسپرینگ بیشتری برخوردار بود ( $p < 0.05$ ). احتمالاً ویسکوزیته بیش از حد خمیرآبه حاصل تیمار حرارت خشک با اندازه ذرات کمتر از ۱۲۵ میکرون مانع ور آمدن خمیرآبه شده است، همچنین تأثیر اندازه ذرات بر میزان آون اسپرینگ معنی دار نبود ( $p > 0.05$ ). رمزی و پوترا (Ramzy & Putra, 2021)، در پژوهشی که بر خصوصیات فیزیکی نان سفید جایگزین آرد لوبیا قرمز با اندازه ذرات مختلف داشتند مشاهده کردند، اندازه ذرات متفاوت لوبیا قرمز منجر به تغییر معنی داری در آون اسپرینگ نمونه‌ها نشد.

#### نسبت مغز به پوسته

نتایج مربوط به نسبت مغز به پوسته در جدول ۲ ارائه شده است. طبق نتایج بدست آمده نمونه‌های تیمار حرارتی مرطوب بطور معنی داری بیشترین نسبت مغز به پوسته را به خود اختصاص دادند ( $p < 0.05$ ). نمونه‌های تیمار حرارتی خشک و نمونه‌های شاهد از لحاظ آماری تفاوت معنی داری نداشتند، همچنین تأثیر اندازه ذرات بر نسبت مغز به پوسته معنی دار نبود ( $p > 0.05$ ). بیشترین نسبت مغز به پوسته مربوط به نمونه نان حاصل از تیمار حرارتی مرطوب با اندازه ذرات کمتر از ۱۲۵ میکرون بود. احتمالاً تیمار حرارتی مرطوب با کاهش میزان پیش سازهای واکنش مایلارد منجر به ایجاد پوسته با ضخامت کمتر می‌شود و سبب افزایش نسبت مغز به پوسته می‌گردد.

ذرات درشت حاصل از آرد تیمار حرارتی مرطوب و دمای چسباندن دیر هنگام این خمیرآبه منجر می‌شود مدت زمان طولانی‌تری در معرض کم‌آبی در فر قرار بگیرد و افت وزنی بیشتر شود (Villanueva et al., 2019).

#### حجم مخصوص

نتایج مربوط به حجم مخصوص نان‌های بدون گلوتن مختلف در جدول ۲ آورده شده است. تیمار حرارتی مرطوب آرد برنج تأثیر معنی داری بر حجم مخصوص نان بدون گلوتن داشت ( $p < 0.05$ ). نمونه‌های تیمار حرارتی مرطوب بدون تفاوت معنی داری نسبت به هم بیشترین حجم مخصوص را به خود اختصاص دادند. تغییر در اندازه ذرات و تیمار حرارتی خشک آرد برنج تفاوت معنی داری بر حجم مخصوص نمونه‌ها نداشتند. بنابراین تیمار حرارتی مرطوب آرد نسبت به تغییر اندازه ذرات و حرارت خشک بر حجم مخصوص نان مؤثرتر بود. ویلانویا و همکاران (Villanueva et al., 2019)، گزارش کردند نان حاصل از آرد برنج اصلاح شده تیمار حرارتی مرطوب توسط میکروویو تأثیر معنی داری بر حجم مخصوص نان دارد بطوری که منجر به نان با بالاترین حجم مخصوص می‌شود.

#### آون اسپرینگ

نتایج حاصل از اندازه‌گیری آون اسپرینگ نمونه‌های مختلف در جدول ۲ ارائه شده است. همانطور که نتایج نشان می‌دهد تأثیر اندازه

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نان های بدون گلوتن

Table 2- Physicochemical characteristics of gluten-free breads

انواع نان Breads	افت وزنی Weight loss (%)	حجم مخصوص نان (cm <sup>3</sup> /gr) Loaf specific volume	آون اسپرینگ Oven Spring (mm)	نسبت مغز به پوسته Crumb/crust ratio
C 80	25.19± 0.63 <sup>a</sup>	2.14± 0.01 <sup>bc</sup>	0.45± 0.05 <sup>ab</sup>	1.63± 0.01 <sup>b</sup>
DHT 80	24.90± 0.14 <sup>a</sup>	2.13± 0.00 <sup>bc</sup>	0.45± 0.05 <sup>ab</sup>	1.67± 0.03 <sup>b</sup>
HMT 80	28.91± 0.10 <sup>b</sup>	2.56± 0.03 <sup>a</sup>	0.5± 0.14 <sup>ab</sup>	1.82± 0.07 <sup>a</sup>
C 100	25.43± 0.47 <sup>a</sup>	2.17± 0.03 <sup>b</sup>	0.5± 0.00 <sup>ab</sup>	1.64± 0.01 <sup>b</sup>
DHT 100	24.11± 0.25 <sup>a</sup>	2.17± 0.04 <sup>b</sup>	0.45± 0.05 <sup>ab</sup>	1.68± 0.01 <sup>b</sup>
HMT 100	26.16± 0.50 <sup>a</sup>	2.59± 0.02 <sup>a</sup>	0.55± 0.07 <sup>ab</sup>	1.84± 0.01 <sup>a</sup>
C 120	24.56± 0.13 <sup>a</sup>	2.19± 0.01 <sup>b</sup>	0.5± 0.14 <sup>ab</sup>	1.67± 0.01 <sup>b</sup>
DHT 120	24.08± 0.48 <sup>a</sup>	2.07± 0.03 <sup>c</sup>	0.4± 0.00 <sup>b</sup>	1.70± 0.01 <sup>b</sup>
HMT 120	24.99± 0.51 <sup>a</sup>	2.61± 0.03 <sup>a</sup>	0.6± 0.00 <sup>a</sup>	1.87± 0.05 <sup>a</sup>

حروف متفاوت در هر ستون نشان دهنده وجود اختلاف معنی دار بین نمونه‌ها است ( $p < 0.05$ ).

Different letters in each column indicate significant differences between samples ( $p < 0.05$ ).

C 100 و C 120 از اندیس حجم کمتری برخوردار بود، همچنین بین نمونه‌های تیمار حرارت مرطوب نمونه HMT 80 نسبت به نمونه HMT 100 و HMT 120 اندیس حجم کمتری داشت، بطور کلی تیمار حرارتی مرطوب نسبت به تغییر اندازه ذرات و تیمار حرارتی خشک

#### اندیس‌های حجم، تقارن و یکنواختی

نتایج حاصل از اندازه‌گیری اندیس‌های شکل نان در جدول ۳ ارائه شده است. تأثیر اندازه ذرات و تیمار حرارتی بر اندیس حجم نمونه‌ها معنی دار بود، بطوری که نمونه C 80 بطور معنی داری نسبت به نمونه

(Fathi et al., Villanueva et al., 2019). فتحی و همکاران (2016)، در بررسی تأثیر تیمار حرارتی مرطوب در آرد ارزن پروسو بر حجم کیک گزارش کردند کیک‌های حاوی آرد تیمار شده در رطوبت ۳۰ درصد و دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد همچنین با رطوبت ۲۰ درصد و دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد دارای حجم بیشتر بودند.

اثر مطلوب‌تری بر اندیس حجم نمونه‌ها داشت، زیرا تمام نمونه‌های تیمار حرارتی مرطوب نسبت به نمونه شاهد از اندیس حجم بیشتری برخوردار بودند. تأثیر تیمار حرارتی مرطوب بر آرد برنج احتمالاً با ژلاتینه جزیی مولکول نشاسته و ایجاد قوام مناسب منجر به حفظ گاز تولید شده در طول تخمیر شده و از ادغام و از بین رفتن آن در حین تخمیر و پخت جلوگیری می‌کند و منجر به افزایش حجم نان می‌شود

جدول ۳- اندیس‌های شکل نان‌های بدون گلوتن  
Table 3- Shape indexes of gluten-free breads

انواع نان Breads	اندیس Index		
	حجم Volume	یکنواختی Uniformity	تقارن Symmetry
C 80	9.50± 0.00 <sup>c</sup>	0.16± 0.05 <sup>a</sup>	0.13± 0.05 <sup>a</sup>
DHT 80	9.60± 0.30 <sup>c</sup>	0.10± 0.00 <sup>a</sup>	0.20± 0.10 <sup>a</sup>
HMT 80	9.90± 0.10 <sup>b</sup>	0.13± 0.05 <sup>a</sup>	0.16± 0.05 <sup>a</sup>
C 100	9.85± 0.20 <sup>b</sup>	0.16± 0.05 <sup>a</sup>	0.23± 0.05 <sup>a</sup>
DHT 100	9.70± 0.00 <sup>bc</sup>	0.10± 0.05 <sup>a</sup>	0.26± 0.05 <sup>a</sup>
HMT 100	10.35± 0.15 <sup>a</sup>	0.06± 0.05 <sup>a</sup>	0.33± 0.11 <sup>a</sup>
C 120	9.95± 0.15 <sup>b</sup>	0.13± 0.05 <sup>a</sup>	0.20± 0.10 <sup>a</sup>
DHT 120	9.50± 0.10 <sup>c</sup>	0.10± 0.00 <sup>a</sup>	0.16± 0.05 <sup>a</sup>
HMT 120	10.65± 0.26 <sup>a</sup>	0.13± 0.15 <sup>a</sup>	0.40± 0.26 <sup>a</sup>

حروف متفاوت در هر ستون نشان دهنده وجود اختلاف معنی‌دار بین نمونه‌ها است ( $p < 0.05$ ).

Different letters in each column indicate significant differences between samples ( $p < 0.05$ ).

شاخص‌های رنگ مغز و پوسته نان بدون گلوتن معنی‌دار نبود ( $p > 0.05$ ). تیمار حرارتی مرطوب و حرارت خشک بطور معنی‌دار منجر به کاهش روشنی و افزایش زردی پوسته و مغز نان نسبت به نمونه شاهد شدند، اما تغییری بر میزان قرمزی نداشتند ( $p < 0.05$ ). میزان روشنی پوسته نان حاصل از تیمار حرارت خشک بطور معنی‌دار نسبت به نمونه تیمار حرارت مرطوب کمتر بود. کمترین میزان روشنی (L) را نمونه‌های حاصل از تیمار حرارت خشک در این پژوهش به خود اختصاص دادند، در سایر شاخص‌ها تفاوتی با نمونه تیمار حرارت مرطوب نداشتند. عوامل مختلفی بر رنگ پوسته مؤثر می‌باشد که می‌توان به رطوبت پوسته و شدت واکنش مایلارد اشاره کرد (Hoseney, 1994). احتمالاً تیمار حرارتی مرطوب با حفظ متناسب رطوبت پوسته در طول پخت و کاهش نشاسته آسیب دیده منجر به کاهش واکنش مایلارد در سطح پوسته می‌شود که در نتیجه موجب بهبود رنگ پوسته نان می‌شود. در مورد شاخص رنگ مغز کمترین میزان روشنی و بیشترین میزان زردی مربوط به نمونه‌های حاصل از تیمار حرارتی مرطوب بود، احتمالاً فرآیند شدیدتر تیمار حرارتی مرطوب بروی آرد منجر به چنین تغییرات شده است. زردی بیشتر نمونه‌های تیمار حرارتی نسبت به نمونه شاهد به دلیل تغییرات رنگ آرد در طول تیمار حرارتی است و رنگ مغز نان عمدتاً به رنگ مواد تشکیل دهنده مواد مرتبط است (Villanueva et al., 2019).

نمونه‌های تیمار حرارت خشک نسبت به هم تفاوت معنی‌داری نداشتند، اما تأثیر تیمار حرارتی خشک بر اندازه ذرات کمتر ۱۲۵ میکرون منجر به کاهش حجم نان شد. گلولتین جزء اصلی پروتئین در آرد برنج است که توسط پیوند دی سولفیدی زیر واحدهای کوچک به هم متصل می‌شود که به حجم خوبی از نان کمک می‌کند. در طول عملیات حرارت خشک گروه‌های سولفیدریل گلولتین احتمالاً در معرض قرار می‌گیرند که منجر به آبریزی سطح پروتئین‌ها در نتیجه تغییر پروتئین‌ها از حالت آب دوست به آبریزی می‌شود که این امر در اندازه ذرات ریزتر به دلیل محتوای پروتئین بالا بیشتر مشهودتر است (Tabara et al., 2015). ناکاگوا و همکاران (Nakagawa et al., 2016)، در بررسی تیمار حرارت خشک آرد برنج در تولید نان برنج مخلوط با گلوتن، شاهد کاهش حجم نان بودند. آنها اذعان داشتند گروه‌های سولفیدریل جدید در سطح گلولتین آرد برنج تیمار حرارت خشک می‌تواند پیوند دی سولفیدی گلولتین را کاهش دهند که این امر نمی‌تواند اجازه به دام افتادن گاز CO<sub>2</sub> و جلوگیری از خروج گاز شود و حجم نان کاهش می‌یابد.

### رنگ پوسته و مغز نان بدون گلوتن

نتایج حاصل از شاخص‌های رنگ (L, a و b) برای پوسته و مغز نان بدون گلوتن در جدول ۴ و ۵ آورده شده است. تأثیر اندازه ذرات بر

جدول ۴- پارامترهای رنگ پوسته نان‌های بدون گلوتن  
Table 4- Crust color parameters of gluten-free breads

انواع نان Breads	L	a	b
C 80	69.25± 0.39 <sup>a</sup>	10.35± 0.28 <sup>a</sup>	36.97± 0.60 <sup>d</sup>
DHT 80	66.06± 0.48 <sup>c</sup>	10.10± 0.32 <sup>a</sup>	40.22± 0.60 <sup>abc</sup>
HMT 80	67.10± 0.20 <sup>b</sup>	9.83± 0.16 <sup>a</sup>	41.01± 0.48 <sup>a</sup>
C 100	69.50± 0.21 <sup>a</sup>	10.29± 0.55 <sup>a</sup>	36.83± 0.38 <sup>d</sup>
DHT 100	66.20± 0.50 <sup>c</sup>	9.90± 0.21 <sup>a</sup>	40.02± 0.16 <sup>bc</sup>
HMT 100	67.34± 0.01 <sup>b</sup>	9.71± 0.18 <sup>a</sup>	40.74± 0.31 <sup>ab</sup>
C 120	69.98± 0.31 <sup>a</sup>	10.12± 0.37 <sup>a</sup>	36.24± 0.42 <sup>d</sup>
DHT 120	66.30± 0.10 <sup>c</sup>	9.98± 0.16 <sup>a</sup>	39.69± 0.18 <sup>c</sup>
HMT 120	67.47± 0.38 <sup>b</sup>	9.62± 0.16 <sup>a</sup>	40.52± 0.21 <sup>abc</sup>

حروف متفاوت در هر ستون نشان دهنده وجود اختلاف معنی‌دار بین نمونه‌ها است ( $p < 0.05$ ).  
Different letters in each column indicate significant differences between samples ( $p < 0.05$ ).

جدول ۵- پارامترهای رنگ مغز نان‌های بدون گلوتن  
Table 5- Crumb color parameters of gluten-free breads

انواع نان Breads	L	a	b
C 80	88.07± 0.20 <sup>a</sup>	1.74± 0.40 <sup>a</sup>	13.32± 0.11 <sup>c</sup>
DHT 80	86.06± 0.06 <sup>c</sup>	2.02± 0.25 <sup>a</sup>	15.15± 0.35 <sup>b</sup>
HMT 80	81.45± 0.32 <sup>d</sup>	2.03± 0.25 <sup>a</sup>	17.31± 0.52 <sup>a</sup>
C 100	88.96± 0.83 <sup>a</sup>	1.95± 0.21 <sup>a</sup>	12.85± 0.50 <sup>c</sup>
DHT 100	86.13± 0.68 <sup>b</sup>	1.97± 0.18 <sup>a</sup>	15.12± 0.37 <sup>b</sup>
HMT 100	82.04± 0.25 <sup>cd</sup>	2.40± 0.14 <sup>a</sup>	16.80± 0.42 <sup>a</sup>
C 120	89.16± 0.87 <sup>a</sup>	2.25± 0.07 <sup>a</sup>	12.37± 0.39 <sup>c</sup>
DHT 120	85.38± 0.01 <sup>b</sup>	2.20± 0.57 <sup>a</sup>	14.65± 0.78 <sup>b</sup>
HMT 120	82.70± 0.05 <sup>c</sup>	2.17± 0.39 <sup>a</sup>	16.43± 0.18 <sup>a</sup>

حروف متفاوت در هر ستون نشان دهنده وجود اختلاف معنی‌دار بین نمونه‌ها است ( $p < 0.05$ ).  
Different letters in each column indicate significant differences between samples ( $p < 0.05$ ).

### آنالیز پروفایل بافت نان بدون گلوتن

نتایج حاصل از آنالیز پروفایل نان بدون گلوتن در جدول ۶ آورده شده است. تأثیر اندازه ذرات و تیمار حرارتی خشک منجر به تغییر در سفتی، ارتجاعیت، بهم‌پیوستگی، فنریت و قابلیت جویدن نمونه‌ها نگردید ( $p > 0.05$ ). نمونه‌های تیمار حرارتی مرطوب نسبت به نمونه شاهد و تیمار حرارت خشک بطور معنی‌داری کمترین میزان سفتی و قابلیت جویدن را دارا بودند ( $p < 0.05$ ). مقادیر سفتی و قابلیت جویدن کمتر برای نمونه‌های تیمار حرارتی مرطوب می‌تواند به بازآرایی ساختاری نشاسته آرد در طول تیمار حرارتی مرطوب همراه باشد. نمونه حاصل از تیمارهای HMT 80 و HMT 100 نسبت به نمونه شاهد و تیمار حرارتی خشک بطور معنی‌داری فنریت کمتری را داشتند ( $p < 0.05$ ). کاهش فنریت نمونه‌های تیمار حرارتی مرطوب می‌تواند به علت قدرت کم پیوندهای داخلی و ساختار ضعیف بافت مغز نان نمونه

های تیمار شده حاصل از ذرات درشت باشد، که نمی‌تواند الاستیسیته بالاتر نان برنج را القا کند. بورکا و همکاران (Bourekoua *et al.*, 2016)، در بررسی که بر تأثیر تیمار هیدروترمال برنج و ذرت در کیفیت نان بدون گلوتن انجام دادند گزارش کردند تیمار هیدرو ترمال برنج و ذرت منجر به بهبود کیفیت نان بدون گلوتن شد، بطوری‌که از نظر خصوصیات بافتی نان حاصل قابلیت جویدن و سفتی کمتری را نسبت به نمونه‌های شاهد نشان داد، درحالی‌که تیمار هیدرو ترمال برنج و ذرت منجر به کاهش فنریت نان شد و در مورد به هم پیوستگی، اثر منفی نشان داد. کیم و همکاران (Kim *et al.*, 2017) اثر تیمار حرارتی مرطوب آرد برنج قهوه‌ای را بر کیفیت کیک برنجی مورد بررسی قرار دادند، آنها گزارش کردند کیک حاصل از آرد برنج تیمار حرارتی مرطوب نسبت به نمونه شاهد سفتی، فنریت، بهم پیوستگی، جویدن کمتری را نشان داد.

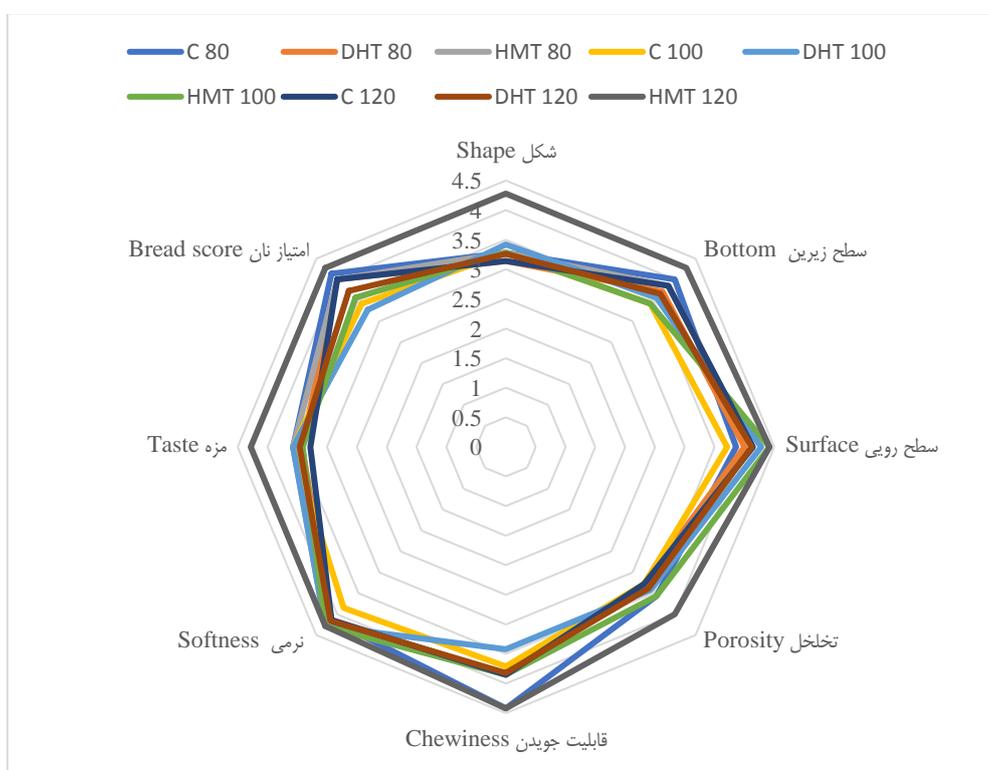
جدول ۶- نتایج آنالیز پروفایل بافت نان‌های بدون گلوتن

Table 6- Results of texture profile analysis of gluten-free breads

انواع نان Breads	سفتی Hardness (kg)	ارتجاعیت Resilience (g)	بهم پیوستگی Cohesiveness	فنریت Springiness (mm)	قابلیت جویدن Chewiness (mj)
C 80	0.383± 0.39 <sup>b</sup>	0.395± 0.03 <sup>a</sup>	0.610± 0.04 <sup>a</sup>	8.025± 0.17 <sup>ab</sup>	16.450± 1.76 <sup>ab</sup>
DHT 80	0.371± 0.08 <sup>b</sup>	0.307± 0.05 <sup>a</sup>	0.435± 0.03 <sup>a</sup>	8.125± 0.38 <sup>a</sup>	16.125± 0.36 <sup>ab</sup>
HMT 80	0.209± 0.03 <sup>a</sup>	0.285± 0.07 <sup>a</sup>	0.360± 0.15 <sup>a</sup>	6.315± 0.50 <sup>c</sup>	6.650± 1.27 <sup>c</sup>
C 100	0.385± 0.07 <sup>b</sup>	0.380± 0.11 <sup>a</sup>	0.605± 0.07 <sup>a</sup>	8.615± 0.65 <sup>a</sup>	19.635± 0.40 <sup>a</sup>
DHT 100	0.390± 0.42 <sup>b</sup>	0.310± 0.05 <sup>a</sup>	0.615± 0.19 <sup>a</sup>	8.585± 0.44 <sup>a</sup>	18.540± 1.07 <sup>ab</sup>
HMT 100	0.216± 0.05 <sup>a</sup>	0.320± 0.03 <sup>a</sup>	0.510± 0.98 <sup>a</sup>	6.955± 0.80 <sup>bc</sup>	7.750± 2.05 <sup>c</sup>
C 120	0.377± 0.30 <sup>b</sup>	0.410± 0.50 <sup>a</sup>	0.590± 0.06 <sup>a</sup>	8.730± 0.22 <sup>a</sup>	19.900± 0.42 <sup>a</sup>
DHT 120	0.435± 0.09 <sup>b</sup>	0.325± 0.02 <sup>a</sup>	0.565± 0.09 <sup>a</sup>	8.265± 0.29 <sup>a</sup>	19.500± 0.98 <sup>ab</sup>
HMT 120	0.225± 0.07 <sup>a</sup>	0.328± 0.06 <sup>a</sup>	0.55± 0.12 <sup>a</sup>	7.745± 0.14 <sup>ab</sup>	8.100± 1.06 <sup>c</sup>

حروف متفاوت در هر ستون نشان دهنده وجود اختلاف معنی‌دار بین نمونه‌ها است ( $p < 0.05$ ).

Different letters in each column indicate significant differences between samples ( $p < 0.05$ ).



شکل ۱- نتایج ارزیابی حسی تیمارهای مختلف نان بدون گلوتن

Fig. 1. Sensory evaluation results of different gluten-free bread treatments

رطوبت بیشتر و نرم‌تر شدن محصول نسبت به نمونه‌های تیمار حرارتی خشک و شاهد شد که این امر سبب شده تا بافت محصول نیز سفتی کمتری را نشان دهد و قابلیت جویدن آسان‌تر ایجاد کند، همچنین رنگ ظاهری مطلوب‌تر، وجود حفرات و ترک خوردگی کمتر در سطح نان و طعم مطلوب این نمونه‌ها سبب شد تا بالاترین امتیاز را در این پژوهش به خود اختصاص دهند. فتیحی و همکاران (Fathi *et al.*, 2016) در بررسی تأثیر تیمار حرارتی مرطوب آرد ارزن بر کیفیت کیک گزارش

### ارزیابی حسی نان بدون گلوتن

نتایج حاصل از ارزیابی حسی نان‌های بدون گلوتن در شکل ۱ آورده شده است. نتایج حاکی از آن است که استفاده از آرد برنج حاصل از تیمار حرارتی در تولید نان بدون گلوتن منجر به بهبود کیفیت نمونه‌ها حاصل نسبت به نمونه شاهد شد که امتیاز نهایی نان بدون گلوتن را افزایش داد. بیشترین امتیاز مربوط به نمونه‌های تیمار حرارتی مرطوب البته بدون تفاوت آماری نسبت به هم بود ( $p > 0.05$ ). تیمار حرارتی مرطوب آرد برنج به دلیل ژلاتینه شدن نشاسته موجود در آرد سبب حفظ

دار بود، بنابراین تیمار حرارتی مرطوب در این صفت بهترین تیمار بود ( $p < 0.05$ ). تیمار حرارتی مرطوب و حرارت خشک بطور معنی‌دار منجر به کاهش روشنی و افزایش زردی پوسته و مغز نان شدند، بطوری‌که نمونه تیمار حرارتی مرطوب با روشنی بیشتر رنگ پوسته و زردی بیشتر رنگ مغز نسبت به تیمار حرارت خشک بهترین تیمار بود ( $p < 0.05$ ). نمونه‌های تیمار حرارتی مرطوب به دلیل افزایش نسبت مغز به پوسته نان بهترین تیمار بودند از طرفی آرد تیمار حرارتی مرطوب به دلیل تعویق در قدرت تورم مولکول‌های نشاسته و ژلاتینه شدن تأخیری، سبب طولانی شدن دوره انبساط و توسعه بیشتر خمیرآبه در حین پخت گردد، که این امر سبب افزایش اندیس حجم و حجم مخصوص نان شد و با کاهش سفتی و قابلیت جویدن منجر به بهبود ویژگی بافتی و کیفیت نان گردید، همچنین از نظر ویژگی‌های حسی تیمار حرارتی مرطوب بهترین نمونه بود. بطور کلی نتایج پژوهش حاضر نشان داد در مجموع صفات اندازه‌گیری شده بکارگیری آرد حاصل از تیمار حرارتی مرطوب نسبت به آرد تیمار حرارت خشک همچنین آرد با اندازه ذرات کمتر از ۱۲۵ منجر به بهبود ویژگی‌های کیفی نان بدون گلوتن شد.

کردند تیمار حرارتی مرطوب تأثیر مثبتی بر پذیرش کلی نمونه حاصل نسبت به نمونه شاهد داشت.

## نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد تغییر اندازه ذرات تأثیری بر افت وزنی، اندیس تقارن و یکنواختی، آون اسپرینگ، رنگ مغز و پوسته، نسبت مغز به پوسته و آنالیز بافت نمونه‌ها نداشت ( $p > 0.05$ ). تغییر اندازه ذرات و تیمار حرارتی به ترتیب منجر به افزایش و کاهش میزان آسیب‌دیدگی نشاسته شد و نمونه تیمار حرارتی مرطوب با اندازه ذرات کمتر از ۱۲۵ میکرون کمترین میزان آسیب‌دیدگی نشاسته را به خود اختصاص داد. استفاده از آرد با اندازه ذرات کمتر از ۱۸۰ میکرون و آرد تیمار حرارتی مرطوب با اندازه ذرات کمتر از ۱۸۰ میکرون به ترتیب منجر به کاهش اندیس حجم و افزایش افت وزنی نان شد، بنابراین در صفت افت وزنی تیمار حرارتی خشک بهترین تیمار بود. تأثیر تیمار حرارتی خشک و مرطوب بر آون اسپرینگ نمونه‌های حاصل از اندازه ذرات ۱۲۵ میکرون معنی

## References

1. AACC (2000). American Association of cereal chemists. Approved methods of the AACC, 10<sup>th</sup> ed. American Association of cereal chemists, St Paul, USA.
2. Bae, I.Y., & Lee, H.G. (2018). Effect of dry heat treatment on physical property and in vitro starch digestibility of high amylose rice starch. *International Journal of Biological Macromolecules*, 108, 568-575. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.11.180>
3. Bao, J., & Bergman, C.J. (2018). Rice flour and starch functionality. In *Starch in Food*, 373-419. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100868-3.00010-X>
4. Bourekoua, H., Benatallah, L., Zidoune, M.N., & Rosell, C.M. (2016). Developing gluten free bakery improvers by hydrothermal treatment of rice and corn flours. *Lwt*, 73, 342-350. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.06.032>
5. De la Hera, E., Martinez, M., & Gómez, M. (2013). Influence of flour particle size on quality of gluten-free rice bread. *LWT-Food Science and Technology*, 54(1), 199-206. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.04.019>
6. De La Hera, E., Rosell, C.M., & Gomez, M. (2014). Effect of water content and flour particle size on gluten-free bread quality and digestibility. *Food Chemistry*, 151, 526-531. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.11.115>
7. Fathi, B., Aalami, M., Kashaninejad, M., & Mahoonak, A.S. (2016). Utilization of heat-moisture treated proso millet flour in production of gluten-free pounq cake. *Journal of Food Quality*, 39(6), 611-9. <https://doi.org/10.1111/jfq.12249>
8. Gomez, M., & Martinez, M.M. (2016). Changing flour functionality through physical treatments for the production of gluten-free baking goods. *Journal of Cereal Science*, 67, 68-74. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2015.07.009>
9. Haghighat-Kharazi, S., Reza Kasaai, M., Milani, J.M., & Khajeh, K. (2020). Antistaling properties of encapsulated maltogenic amylase in gluten-free bread. *Food Science & Nutrition*, 8(11), 5888-5897. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1865>
10. Hong, J., Li, L., Li, C., Liu, C., Zheng, X., & Bian, K. (2019). Effect of heat-moisture treatment on physicochemical, thermal, morphological, and structural properties of mechanically activated large A-and small B-wheat starch granules. *Journal of Food Science*, 84(10), 2795-2804. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14745>
11. Hosney, R.C. (1994). *Principles of cereal science and technology* (No. Ed. 2). American Association of Cereal Chemists (AACC).
12. Khwanchai, P., & Fong-In, S. (2022). Effect of heat treatment of broken rice flour as partial substitution of wheat flour on the qualities of bread. *Burapha Science Journal*, 27(1), 171-187.
13. Kim, M.J., Oh, S.G., & Chung, H.J. (2017). Impact of heat-moisture treatment applied to brown rice flour on the quality and digestibility characteristics of Korean rice cake. *Food Science and Biotechnology*, 26(6), 1579-1586. <https://doi.org/10.1007/s10068-017-0151-x>

14. Kim, M.H. (2013). Review on rice flour manufacturing and utilization. *Journal of Biosystems Engineering*, 38(2), 103-112. <http://dx.doi.org/10.5307/JBE.2013.38.2.103>
15. Kurek, M.A., & Sokolova, N. (2019). Optimization of bread quality with quinoa flour of different particle size and degree of wheat flour replacement. *Food Science and Technology*, 40, 307-314. <https://doi.org/10.1590/fst.38318>
16. Lawal, O.S., Lapasin, R., Bellich, B., Olayiwola, T.O., Cesaro, A., Yoshimura, M., & Nishinari, K. (2011). Rheology and functional properties of starches isolated from five improved rice varieties from West Africa. *Food Hydrocolloids*, 25, 1785-1792. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.04.010>
17. Lazaridou, A., Duta, D., Papageorgiou, M., Belc, N., & Biliaderis, C.G. (2007). Effects of hydrocolloids on dough rheology and bread quality parameters in gluten-free formulations. *Journal of Food Engineering*, 79, 1033-1047. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.03.032>
18. Liu, C., Song, M., Liu, L., Hong, J., Guan, E., Bian, K., & Zheng, X. (2020). Effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of ball mill damaged starches from different botanical sources. *International Journal of Biological Macromolecules*, 156, 403-410. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.04.043>
19. McDermott, E.E. (1980). The rapid non-enzymic determination of damaged starch in flour. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 31(4), 405-413. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740310411>
20. Nakagawa, M., Tabara, A., Ushijima, Y., Matsunaga, K., & Seguchi, M. (2016). Hydrophobicity of stored (15, 35°C), or dry-heated (120°C) rice flour and deteriorated breadmaking properties baked with these treated rice flour/fresh gluten flour. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 80(5), 983-990. <https://doi.org/10.1080/09168451.2015.1136875>
21. Naqash, F., Gani, A., Gani, A., & Masoodi, F.A. (2017). Gluten-free baking: Combating the challenges-A review. *Trends in Food Science & Technology*, 66, 98-107. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.06.004>
22. Pang, J., Guan, E., Yang, Y., Li, M., & Bian, K. (2021). Effects of wheat flour particle size on flour physicochemical properties and steamed bread quality. *Food Science & Nutrition*, 9(9), 4691-4700. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.06.004>
23. Qin, W., Lin, Z., Wang, A., Chen, Z., He, Y., Wang, L., & Tong, L.T. (2021). Influence of particle size on the properties of rice flour and quality of gluten-free rice bread. *LWT*, 151, 112236. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112236>
24. Qin, Y., Liu, C., Jiang, S., Cao, J., Xiong, L., & Sun, Q. (2016). Functional properties of glutinous rice flour by dry-heat treatment. *Plos One*, 11(8). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0160371>
25. Ramos, L., Alonso-Hernando, A., Martinez-Castro, M., Moran-Perez, J.A., Cabrero-Lobato, P., Pascual-Mate, A., & Mujico, J.R. (2021). Sourdough biotechnology applied to gluten-free baked goods: Rescuing the tradition. *Foods*, 10(7), 1498. <https://doi.org/10.3390/foods10071498>
26. Ramzy, R.A., & Putra, A.B.N. (2021). Evaluation of white bread physical characteristics substituted by red kidney bean flour with different particle sizes and concentrations. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 2021, 610-615. <https://doi.org/10.15414/jmbfs.2019/20.9.3.610-615>
27. Renzetti, S., Heetesonne, I., Ngadze, R.T., & Linnemann, A.R. (2022). Dry heating of cowpea flour below biopolymer melting temperatures improves the physical properties of bread made from climate-resilient crops. *Foods*, 11(11), 1554. <https://doi.org/10.3390/foods11111554>
28. Ruiiz, E., Srikaeo, K., & de la Revilla, L.S. (2018). Effects of heat moisture treatment on physicochemical properties and starch digestibility of rice flours differing in amylose content. *Food and Applied Bioscience Journal*, 6(3), 140-153. <https://doi.org/10.14456/fabj.2018.13>
29. Seow, E.K., Gan, C.Y., Tan, T.C., Lee, L.K., & Easa, A.M. (2019). Influence of honey types and heating treatment on the rheological properties of glutinous rice flour gels. *Journal of Food Science and Technology*, 56(4), 2105-2114. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03691-z>
30. Shittu, T.A., Dixon, A., Awonorin, S.O., Sanni, L.O., & Maziya-Dixon, B. (2008). Bread from composite cassava-wheat flour. II: Effect of cassava genotype and nitrogen fertilizer on bread quality. *Food Research International*, 41(6), 569-578. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2008.03.008>
31. Tabara, A., Nakagawa, M., Ushijima, Y., Matsunaga, K., & Seguchi, M. (2015). Effects of heat treatment on oil-binding ability of rice flour. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 79(10), 1629-1634. <https://doi.org/10.1080/09168451.2015.1039479>
32. Villanueva, M., Harasym, J., Munoz, J.M., & Ronda, F. (2019). Rice flour physically modified by microwave radiation improves viscoelastic behavior of doughs and its bread-making performance. *Food Hydrocolloids*, 90, 472-481. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.12.048>



## Using Microwave Pretreatment in the Enzymatic Hydrolysis of Pumpkin Seed Protein (*Cucurbita maxima* L.) by Alcalase and Investigating Its Antioxidant Properties

Z. Nooshi Manjili<sup>1</sup>, A. Sadeghi Mahoonak<sup>1,2\*</sup>, V. Erfani-Moghadam<sup>3,4</sup>, M. Ghorbani<sup>2</sup>, H. Shahriri Tabarestani<sup>5</sup>

1, 2 and 5- Ph.D. Student of Food Chemistry, Professor and Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Food Industry, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, respectively.

(\*- Corresponding Author Email: [sadeghiaz@gau.ac.ir](mailto:sadeghiaz@gau.ac.ir)

3- Cancer Research Center, Golestan University of Medical Sciences, Gorgan, Iran

4- Assistant Professor, Department of Medical Nanotechnology, School of Advanced Technologies in Medicine, Golestan University of Medical Sciences, Gorgan, Iran

Received: 12.06.2023  
Revised: 06.12.2023  
Accepted: 09.12.2023  
Available Online: 09.12.2023

### How to cite this article:

Nooshi Manjili, Z., Sadeghi Mahoonak, A., Erfani-Moghadam, V., Ghorbani, M., & Shahriri Tabarestani, H. (2024). Using microwave pretreatment in the enzymatic hydrolysis of pumpkin seed protein (*Cucurbita maxima* L.) by alcalase and investigating its antioxidant properties. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 20(2), 295-308. (In Persian with English abstract).  
<https://doi.org/10.22067/ifstrj.2023.82861.1264>

### Introduction

Seeds and nuts have received increasing attention due to their nutritional value and the high therapeutic properties of their bioactive compounds. Most of the seeds are used as nuts, and some of them are considered agricultural waste. Pumpkin seeds have a high content of protein (30–40% in terms of dry matter). Proteins are among the vital health-giving components that provide nitrogen, essential amino acids and energy necessary for normal cells. Pumpkin seeds are a good source of amino acids such as valine, histidine, isoleucine, leucine, threonine and methionine. Protein hydrolysate is a mixture of peptides and amino acids that can show antioxidant, antimicrobial, anticancer, antidiabetic and antihypertensive properties. During hydrolysis, proteins are broken into small peptides and amino acids. Since enzymatic hydrolysis is performed in relatively mild conditions and no amino acid damage occurs, this type of hydrolysis is preferred over acid and alkaline hydrolysis. Hydrolysates obtained from pumpkin seed protein have bioactive properties, especially antioxidant activity. Pretreatment of proteins before enzymatic hydrolysis acts to improve the release of bioactive peptides from different proteins. Pretreatment can facilitate the unfolding the structure of proteins and thus increase the access of enzymes to peptide bonds. The main properties of microwaves usually show three characteristics: penetration, reflection and absorption. Microwave assisted enzymatic hydrolysis can shorten the time and improve the speed of the reaction. The purpose of this research was to investigate the antioxidant activity of pumpkin seed protein hydrolysates (*Cucurbita maxima* L.) by alcalase enzyme in two conditions: without pretreatment and using microwave pretreatment.

### Material and Methods

In this study, Pumpkin (*Cucurbita maxima* L.) was purchased from the local market of Astane Ashrafieh in Gilan province. The seeds were scooped manually and then dried in an oven at 50°C for 72 hours. After the production of protein concentrate from pumpkin seeds, the chemical properties of the concentrate, such as the amount of fat, protein, ash and moisture, were measured. The isolated pumpkin seed solution was exposed to



©2023 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

<https://doi.org/10.22067/ifstrj.2023.82861.1264>

microwave energy with a power of 450-900 watts for 30–90 seconds and was used as a substrate solution in enzymatic hydrolysis experiments. It should be noted that after measuring the total antioxidant activity for different powers and times of microwave pretreatment, the power of 600 watts for 60 seconds was selected and applied before enzymatic hydrolysis. Enzymatic hydrolysis was done by alcalase enzyme with a concentration of 0.5 to 2.5% compared to the protein substrate during 20 to 190 minutes, and the optimum temperature and pH of alcalase were determined in order to produce hydrolysates with antioxidant activity. Antioxidant activity was measured by using DPPH free radical inhibition, total antioxidant activity and iron chelation activity methods.

## Result and Discussion

Bioactive peptides produced by the enzymatic hydrolysis of proteins have significant antioxidant properties. Pumpkin seeds can be used as a rich source of nutrients and bioactive compounds in various food industries. The results showed that the maximum amount of antioxidant activity without pre-treatment was achieved in 165 minutes with a 2.2% ratio of E/S by using DPPH free radical scavenging activity (40.5%), total antioxidant power (0.79), and iron chelation activity (96.2%) methods. By using microwave pre-treatment, the maximum amount of antioxidant activity was achieved in a shorter time and with less enzyme (105 minutes and E/S ratio 1.5%) using DPPH free radical scavenging (52%), total antioxidant power (0.711), and iron chelation activity (93%). Therefore, it can be concluded that using microwave assisted enzymatic hydrolysis, in addition to achieving hydrolysates with proper antioxidant activity, is a suitable method to save time and reduce enzyme concentrations used in enzymatic hydrolysis.

**Keywords:** Antioxidant activity, Microwave pretreatment, Protein hydrolysates, Pumpkin seeds



## مقاله پژوهشی

جلد ۲۰، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۳، ص. ۲۹۵-۳۰۸

# استفاده از پیش‌تیمار مایکروویو در هیدرولیز آنزیمی پروتئین دانه کدو (*Cucurbita maxima* L.) توسط آلکالاز و بررسی خواص آنتی‌اکسیدانی آن

زینب نوشی منجیلی<sup>۱</sup> - علیرضا صادقی ماهونک<sup>۲\*</sup> - وحید عرفانی مقدم<sup>۳</sup> - محمد قربانی<sup>۲</sup> - هدی شهیری طبرستانی<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۱۸

## چکیده

دانه کدو دارای محتوای پروتئین بالایی (۳۰-۴۰ درصد برحسب ماده خشک) است. بخش اعظم دانه‌ها به شکل آجیل مورد استفاده قرار می‌گیرند و بخشی از آن نیز جزو ضایعات کشاورزی محسوب می‌شوند. هیدرولیز شده‌های حاصل از پروتئین دانه کدو دارای خواص زیست‌فعال، بویژه فعالیت آنتی‌اکسیدانی می‌باشند. در این پژوهش محلول محتوی ایزوله پروتئین دانه کدو در معرض پیش‌تیمار مایکروویو با توان ۹۰۰-۴۵۰ وات به مدت ۹۰-۳۰ ثانیه قرار گرفت و به‌عنوان محلول سوبسترا در آزمایشات هیدرولیز آنزیمی استفاده شد. هیدرولیز آنزیمی توسط آلکالاز، با غلظت ۲/۵-۰/۵ درصد وزنی نسبت به سوبسترای پروتئینی، در بازه زمانی ۲۰ تا ۱۹۰ دقیقه، در دما و pH اپتیمم آلکالاز، به‌منظور تولید هیدرولیز شده‌هایی با پتانسیل آنتی‌اکسیدانی انجام گرفت. قدرت آنتی‌اکسیدانی با استفاده از روش‌های مهار رادیکال آزاد DPPH، قدرت آنتی‌اکسیدانی کل و فعالیت شلاته‌کنندگی آهن اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد، بیشینه فعالیت آنتی‌اکسیدانی در شرایط بدون پیش‌تیمار، طی زمان ۱۶۵ دقیقه و نسبت E/S ۲/۲ درصد با قابلیت مهار رادیکال آزاد DPPH (۴۰/۵ درصد)، قدرت آنتی‌اکسیدانی کل (۰/۷۹) و شلاته‌کنندگی آهن (۹۶/۲ درصد) بدست آمد. درحالی‌که با اعمال پیش‌تیمار مایکروویو، بیشینه فعالیت آنتی‌اکسیدانی در زمانی کوتاه‌تر و غلظت آنزیم کمتر (۱۰۵ دقیقه و نسبت E/S ۱/۵ درصد) با قابلیت مهار رادیکال آزاد DPPH (۵۲ درصد)، قدرت آنتی‌اکسیدانی کل (۰/۷۱۱) و شلاته‌کنندگی آهن (۹۳ درصد) بدست آمد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از پیش‌تیمار مایکروویو در هیدرولیز آنزیمی، علاوه بر دستیابی به هیدرولیز شده‌هایی با قابلیت آنتی‌اکسیدانی مناسب، موجب صرفه‌جویی در زمان و غلظت آنزیم مورد استفاده در طی هیدرولیز نیز می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** پروتئین هیدرولیز شده، پیش‌تیمار مایکروویو، دانه کدو، فعالیت آنتی‌اکسیدانی

## مقدمه

منبع خوبی از پروتئین (۳۰-۴۰ درصد برحسب ماده خشک) می‌باشد. پروتئین دانه کدو سرشار از اسیدهای آمینه ضروری نظیر والین، هیستیدین، ایزولوسین، لوسین، ترئونین و متیونین می‌باشد (Lu et al., 2021). طی هیدرولیز، پروتئین‌ها به پپتیدهای کوچک و آمینواسیدها

دانه‌ها و آجیل‌ها، به‌دلیل ارزش تغذیه‌ای و خواص درمانی بالایی اجزای زیست‌فعال آن‌ها، مورد توجه روزافزون قرار گرفته‌اند (Shandilya & Sharma, 2017; Yang et al., 2019). دانه کدو<sup>۶</sup>

۱، ۲ و ۵- به‌ترتیب دانشجوی دکتری شیمی مواد غذایی، استاد و استادیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

\*- نویسنده مسئول: (Email: [sadeghiaz@gau.ac.ir](mailto:sadeghiaz@gau.ac.ir))

۳- مرکز تحقیقات سرطان، دانشگاه علوم پزشکی گلستان، گرگان، ایران

۴- استادیار گروه نانوتکنولوژی پزشکی، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه علوم پزشکی گلستان، گرگان، ایران

هیدرولیز و پایداری هیدرولیز شده‌های پروتئین آب‌پنیر می‌شود. گازیکالوویچ و همکاران (Gazikalović *et al.*, 2021) بیان کردند که مایکروویو تأثیر قابل توجهی بر ساختار گلوتن و آلرژی‌زایی دارد و در ترکیب با هیدرولیز آنزیمی، هیدرولیز شده‌های پروتئینی با ویژگی آنتی‌اکسیدانی مناسب تولید می‌کند. هدف از این پژوهش بررسی کارایی فعالیت آنتی‌اکسیدانی هیدرولیز شده‌های پروتئین دانه کدو توسط آلکالاز در شرایط بدون پیش‌تیمار و با استفاده از پیش‌تیمار مایکروویو می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

### مواد

ابتدا میوه کدو (*Cucurbita maxima* L.) از بازار محلی آستانه اشرفیه در استان گیلان تهیه شد و پس از جداسازی دانه‌ها به صورت دستی، در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت در آن خشک شدند (Sitohy *et al.*, 2020). آنزیم آلکالاز با اکتیویته ۲/۹۷ U/ml، اسید سولفوریک، سود، اسید بوریک، اسید کلریدریک، معرف متیل‌رد، هگزان،  $\text{Na}_2\text{HPO}_4\text{-NaH}_2\text{PO}_4$ ، متانول،  $\text{FeCl}_2$ ، فروزین و آمونیوم مولبیدات مورد استفاده در آزمایشات از شرکت‌های معتبر مرک آلمان، سیگما آلدريج آمریکا و مجللی ایران خریداری شدند.

### روش‌ها

#### تولید کنسانتره پروتئینی

دانه‌های خشک‌شده، بدون پوست‌گیری، توسط آسیاب (500 A چین) کاملاً پودر شده و از الک با مش ۴۰ عبور داده شد. حلال هگزان به نسبت ۱۰ به ۱ وزنی/حجمی به پودر اضافه شد و توسط شیکر (نورصنعت فردوس، ایران) با سرعت ۴۴۰ دور در دقیقه به مدت ۴ ساعت مخلوط شدند. عمل حذف روغن تا کاهش آن به حدود ۵ درصد ادامه یافت. حلال باقیمانده در کنجاله در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت توسط آن تحت خلأ (Memmert، آلمان) جدا شد. کنجاله به نسبت ۱ به ۱۰ وزنی/حجمی در آب مقطر پخش شده و pH محلول به منظور باز شدن ساختمان پروتئین، توسط سود ۱ نرمال به ۱۱ رسانیده شد و سپس به مدت ۱ ساعت در دمای آزمایشگاه توسط همزن مغناطیسی (Jenway، انگلستان) مخلوط شد. پس از آن عمل سانتریفیوژ به مدت ۲۰ دقیقه با سرعت ۵۰۰۰ دور در دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد توسط سانتریفیوژ یخچال‌دار (Combi-514R، کره جنوبی) انجام شد و با جمع‌آوری محلول رویی یا سوپرناتانت، باقی‌مانده در آب مقطر حل شده و استخراج سوپرناتانت دوباره تکرار شد. سوپرناتانت‌ها جمع‌آوری و با استفاده از اسید کلریدریک ۱ نرمال، pH آن روی ۴ تنظیم شد، عمل سانتریفیوژ مجدداً به مدت ۲۰ دقیقه در

شکسته می‌شوند. از آنجا که هیدرولیز آنزیمی در شرایط نسبتاً ملایمی انجام می‌شود و هیچ‌گونه آسیبی به ساختار آمینواسیدها وارد نمی‌شود، این نوع هیدرولیز به هیدرولیز اسیدی و قلبیایی ترجیح داده می‌شود (Taha *et al.*, 2013). مطالعات نشان می‌دهد که پروتئین‌های حاصل از دانه کدو، مشابه سویا، دارای مقادیر بالای فراهمی‌زیستی آمینواسیدها می‌باشند (Rezigi *et al.*, 2013). یانگ و همکاران (Yang *et al.*, 2019) بیان کردند که ساختار گلوبولین پروتئین دانه کدو مشابه دانه حبوبات است. این نکته مهم در مورد شباهت تغذیه‌ای، ممکن است اثرات مخرب مرتبط با سوء تغذیه پروتئینی را کاهش دهد. علاوه بر این، پروتئین‌های جداشده از دانه‌های کدو دارای خواص آنتی‌اکسیدانی و شلاته‌کنندگی مناسبی هستند (Nkosi, 2007; Sarkar *et al.*, 2007; Yang *et al.*, 2019). مطالعات اخیر نشان دادند که هیدرولیز شده‌های حاصل از پروتئین دانه کدو دارای خواص آنتی‌اکسیدانی بوده (Mazloomi-Kiyapey *et al.*, 2019; Sitohy *et al.*, 2020) و همچنین زیست‌دسترس‌پذیری روی را افزایش می‌دهند (Lu *et al.*, 2021). هیدرولیز شده‌های حاصل از منابع پروتئینی مختلف، دارای ویژگی‌های زیست‌فعالی متنوعی می‌باشند. دانه کدو دارای خواص آنتی‌اکسیدانی (Nourmohammadi *et al.*, 2016)، دانه بامیه دارای پتانسیل آنتی‌اکسیدانی و شلاته‌کنندگی (Nnamezie *et al.*, 2021)، دانه چیا دارای ویژگی‌های ضد فشار خون و آنتی‌اکسیدانی (Villanueva-Lazo *et al.*, 2021) و "سایر دانه‌های روغنی" با خواص آنتی‌اکسیدانی، ضد فشار خون و ضد دیابت (Han *et al.*, 2021) می‌باشند. پپتیدهای زیست‌فعالی که از منابع مختلف طی هیدرولیز آنزیمی به دست می‌آیند دارای ویژگی‌های امولسیون‌کنندگی و تشکیل کف (به‌عنوان مثال، سویا) (Horax *et al.*, 2017)، فعالیت آنتی‌اکسیدانی بالا (پپتیدهای سویا، گندم سیاه، پنبه‌دانه، تخمه آفتابگردان، بادام‌زمینی و کدو) (Samaranayaka & Li-Chan, 2011)، کاهش کلسترول (هیدرولیز شده‌های ماهی) (Drotningvik *et al.*, 2016)، محافظت‌کننده عصبی و آنتی‌اکسیدانی (پپتیدهای گردو) (Wang *et al.*, 2021)، فعالیت ضد سرطانی (Fan *et al.*, 2022)، ضد التهابی (پپتیدهای خیار دریایی) (Zhang *et al.*, 2021) می‌باشند. پیش‌تیمار پروتئین‌ها، قبل از هیدرولیز آنزیمی، جهت بهبود آزادسازی پپتیدهای زیست‌فعال از پروتئین‌های مختلف عمل می‌کند. استفاده از پیش‌تیمار ماکروویو امکان کنترل دقیق دما، گرم شدن یکنواخت نمونه‌ها و کاهش واکنش‌های جانبی نامطلوب را فراهم می‌کنند. پیش‌تیمار مایکروویو سبب باز شدن ساختار سه‌بعدی پروتئین شده و به افزایش دسترسی آنزیم‌ها به پیوندهای پپتیدی کمک می‌کند (Uluko *et al.*, 2015). اولوکو و همکاران (Uluko *et al.*, 2015) گزارش کردند که استفاده از پیش‌تیمار مایکروویو باعث افزایش درجه

ساعت انتقال یافت و حرارت دهی تا سفید شدن رنگ خاکستر ادامه یافت. در نهایت بعد از ۱۵ دقیقه خنک شدن بوته در دسیکاتور، توزین انجام شد. میزان خاکستر از طریق معادله ۳ محاسبه شد (Horwitz & Latimer, 2000).

(۳)

۱۰۰×وزن نمونه/(وزن بوته چینی-وزن بوته و خاکستر)=درصد خاکستر

### محتوای چربی

۳ گرم از نمونه روی کاغذ صافی توزین و در داخل کارتوش گذاشته شد. کارتوش به قسمت استخراج دستگاه سوکسله انتقال یافت. بالن با وزن مشخص تا نیمه با حلال هگزان پر شد و سپس به دستگاه متصل شد. عملیات استخراج به مدت ۴ ساعت انجام شد. در نهایت برای خارج کردن حلال باقیمانده، بالن محتوی نمونه به آون با دمای ۴۰ درجه سانتیگراد انتقال یافت سپس بالن مجدداً توزین شد. درصد چربی با معادله ۴ محاسبه شد (Horwitz & Latimer, 2000).

۱۰۰×وزن نمونه/(وزن بالن-وزن بالن و نمونه)=درصد چربی (۴)

### پیش تیمار مایکروویو

محلول پروتئینی از کنسانتره پروتئین دانه کدو با نسبت ۵ درصد در بافر فسفات ۰/۱ مولار ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ - pH=۷/۴) ( $100 \text{ gr L}^{-1}$ ) ( $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ ) تهیه شد. محلول به مدت ۳۰ دقیقه جهت هیدراته شدن کامل، هم زده شد و سپس در معرض امواج مایکروویو (Daewoo، کره جنوبی) با توان ویژه ۹۰۰-۴۵۰ وات به مدت ۹۰-۳۰ ثانیه قرار گرفت. محلول پروتئینی پیش تیمار شده با مایکروویو به عنوان محلول سوبسترا در آزمایشات هیدرولیز آنزیمی مورد استفاده قرار گرفت (Gohi et al., 2019). لازم به ذکر است پس از اندازه گیری قدرت آنتی اکسیدانی کل، در توان ها و زمان های مختلف پیش تیمار مایکروویو، توان ۶۰۰ وات به مدت ۳۰ ثانیه انتخاب و قبل از هیدرولیز آنزیمی اعمال شد.

### هیدرولیز آنزیمی

آنزیم آلكالاز در غلظت های ۲/۵-۰/۵ درصد وزنی نسبت به سوبسترای پروتئینی اضافه شد و زمان هیدرولیز به عنوان یک فاکتور مستقل برای هر یک، طی ۲۰ تا ۱۹۰ دقیقه در انکوباتور شیکردار (VS-8480، کره جنوبی) با سرعت ۲۰۰ دور در دقیقه انجام گرفت. دما و pH هیدرولیز، مطابق دمای ایتیمم (۵۰ درجه سانتیگراد) و pH ایتیمم (pH=۸) آنزیم در نظر گرفته شد. به منظور غیرفعال کردن آنزیم، محلول پروتئینی به مدت ۱۵ دقیقه در حمام آبگرم (WNB 22، آلمان) با دمای ۸۵ درجه سانتیگراد قرار داده شد. سپس هیدرولیز شده ها (مایع رویی) با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه در دمای ۴ درجه سانتیگراد به

دمای ۴ درجه سانتیگراد با سرعت ۵۰۰۰ دور در دقیقه تکرار شد. در نهایت رسوب حاصل توسط خشک کن انجمادی (FDB 5503، کره جنوبی) خشک شده و در ظروف در بسته، محیط خشک و خنک نگهداری شد (Mazloomi-Kiyapey et al., 2019).

### آزمون های شیمیایی

#### محتوای پروتئین

۲ گرم از نمونه به همراه ۲۰ میلی لیتر اسید سولفوریک غلیظ و یک عدد قرص کلدال (کاتالیزور) به درون لوله هضم افزوده شد و بعنوان شاهد، از یک لوله هضم بدون نمونه و فقط حاوی اسید و کاتالیزور استفاده شد. عملیات هضم با توان ۸۰ (وات) دستگاه به مدت ۱۲۰ دقیقه تا شفاف شدن محتویات دستگاه (InKjel 625 P، آلمان) انجام شد. بعد از خنک شدن و خارج شدن بخارات اسیدی با استفاده از دستگاه تقطیر، توسط سود ۴۰ درصد و اسید بوریک ۴ درصد، تقطیر (-FX118، 30، آلمان) انجام شد و سپس تیتراسیون نمونه به کمک اسید کلریدریک ۰/۱ نرمال تا ارغوانی شدن نمونه در حضور معرف متیل رد ادامه یافت. درصد ازت نمونه با استفاده از معادله ۱ محاسبه شد (Horwitz & Latimer, 2000).

(۱)

۱۰۰×وزن نمونه/(حجم اسید مصرفی شاهد-حجم اسید مصرفی نمونه)×نرمالیت اسید مصرفی×۱/۴=درصد ازت نمونه  
برای محاسبه درصد پروتئین نمونه، ازت کل را در فاکتور پروتئینی (۶/۲۵) ضرب می کنیم (Salo-väänänen et al., 1996).

#### محتوای رطوبت

مقدار ۵ گرم از نمونه در ظرف آلومینیومی مخصوص اندازه گیری رطوبت توزین شد و در داخل آون (Memmert، آلمان) با دمای ۱۰۵ درجه سانتیگراد به مدت ۶۰ دقیقه قرار گرفت و پس از ۱۵ دقیقه سرد شدن در داخل دسیکاتور، توزین انجام شد. این عمل چندین بار تکرار شد تا محتوای رطوبت نمونه به مقدار ثابتی رسید. سپس مقدار رطوبت طبق معادله ۲ محاسبه شد (Horwitz & Latimer, 2000).

(۲)

۱۰۰×وزن نمونه/(وزن ظرف و نمونه بعد از خشک کردن-وزن ظرف و نمونه قبل از خشک کردن)=درصد رطوبت

#### محتوای خاکستر

در بوته چینی با وزن مشخص مقدار ۲ گرم نمونه توزین شد. ابتدا روی هیتر سوزانده شد و پس از آن بوته حاوی نمونه به کوره الکتریکی (Nabertherm، آلمان) با دمای ۶۰۰-۵۵۰ درجه سانتیگراد، به مدت ۶

پس از سرد شدن، جذب نمونه‌ها در ۶۹۵ نانومتر خوانده شد. از آب مقطر دوبار تقطیر به‌عنوان نمونه شاهد استفاده شد. جذب بیشتر نشان دهنده‌ی ظرفیت آنتی‌اکسیدانی کل بالاتر بود (Prieto et al., 1999).

### بهینه‌سازی فرآیند

شرایط هیدرولیز، با استفاده از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت نسخه ۱۱ و روش سطح پاسخ، در قالب طرح مرکب مرکزی بهینه‌سازی شد. فاکتورهای مستقل، نسبت غلظت آنزیم به سوبسترا ( $X_1$ ) و زمان هیدرولیز ( $X_2$ ) در پنج سطح (+۱، ۰، -۱، -۲) و سه نقطه مرکزی آزمایش شدند. پاسخ‌های مورد بررسی، شامل فعالیت آنتی‌اکسیدانی کل، شلاته‌کنندگی یون آهن و مهار رادیکال آزاد DPPH بود. اثر متغیرهای مستقل بر ویژگی‌های آنتی‌اکسیدانی، با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ ارزیابی شد. میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح اطمینان ۹۵ درصد مقایسه شدند. آزمون‌ها با ۳ تکرار انجام شد و متوسط نتایج گزارش گردید. سطوح مختلف متغیرهای مستقل در جدول ۱ ارائه شده است.

### نتایج و بحث

میزان رطوبت، خاکستر، پروتئین و چربی در جدول ۲ نشان داده شده است. با توجه به جدول ۲، میزان چربی دانه کامل نسبت به کنسانتره پروتئین دانه، کاهش قابل توجهی داشت که دلیل آن، استفاده از حلال هگزان جهت چربی‌زدایی از کنجاله و کارایی بالای حلال هگزان در چربی‌زدایی، استخراج پروتئین در محلول قلیایی و ترسیب پروتئین‌ها در نقطه ایزوالکتریک می‌باشد. کمترین میزان رطوبت مربوط به کنسانتره پروتئینی است که دلیل آن استفاده از آون با دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد جهت حذف هگزان باقیمانده پس از فرآیند چربی‌زدایی و استفاده از خشک‌کن انجمادی به‌منظور خشک کردن رسوب پروتئینی بعد از فرآیند استخراج می‌باشد. مقدار پروتئین و چربی در دانه کامل مشابه گزارشات دوی و همکاران (Devi et al., 2018) و همچنین رزیگ و همکاران (Devi et al., 2018; Rezig et al., 2012) بود. مقدار پروتئین و چربی کنسانتره کمی متفاوت از مقدار گزارش داده شده توسط ذاکری و همکاران (Zakeri et al., 2019) بود. لازم به ذکر است که این اختلافات ناشی از تفاوت در گونه‌های مورد استفاده است. با توجه به جدول ۲، کمترین میزان خاکستر مربوط به کنسانتره پروتئینی می‌باشد که دلیل آن فرایند استخراج پروتئین در pH ۱۱ و حذف مقادیر زیادی ترکیبات غیرپروتئینی است.

مدت ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ شدند. سوپرناتانت حاصل با خشک‌کن انجمادی (FDB 5503، کره جنوبی) برای به‌دست آوردن پودر پروتئین هیدرولیز شده، خشک شد و تا زمان استفاده در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد نگهداری شد (Nourmohammadi et al., 2016; Sitohy et al., 2020).

### اندازه‌گیری قدرت آنتی‌اکسیدانی

#### مهار رادیکال آزاد DPPH

هیدرولیز شده‌ها، در آب مقطر با غلظت بهینه (۴۰ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر) حل شدند. سپس به ۲۰۰ میکرولیتر از نمونه، ۶۰۰ میکرولیتر متانول و ۲۰۰ میکرولیتر DPPH (۰/۱۵ میلی‌مولار در متانول) اضافه و به مدت ۲ دقیقه به‌شدت تکان داده شد و بعد از قرار گرفتن در تاریکی به مدت ۳۰ دقیقه، جذب در طول موج ۵۱۷ نانومتر با استفاده از اسپکتروفتومتر UV-vis (مدل T80، انگلستان) اندازه‌گیری شد. شاهد، حاوی ۸۰۰ میکرولیتر متانول و ۲۰۰ میکرولیتر DPPH (۰/۱۵ میلی‌مولار) بود. توانایی مهار رادیکال آزاد DPPH با استفاده از معادله ۵ محاسبه شد (Kanbargi et al., 2017).

جذب شاهد/(جذب نمونه-جذب شاهد) = درصد مهار رادیکال DPPH  $\times 100$  (۵)

#### فعالیت شلاته‌کنندگی آهن

۲۰۰ میکرولیتر از نمونه بهینه (۴۰ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر)، با ۱۰ میکرولیتر  $FeCl_2$  (۲ میلی‌مولار) و ۶۰۰ میکرولیتر آب مقطر، مخلوط شد و پس از افزودن ۲۰ میکرولیتر محلول فروزین<sup>۱</sup> (۵ میلی‌مولار)، به مدت ۲ دقیقه به‌شدت تکان داده شد. مخلوط به مدت ۱۰ دقیقه در دمای اتاق نگهداری شد. کاهش رنگ، به دلیل شلاته‌شدن آهن، با اندازه‌گیری جذب در ۵۶۲ نانومتر اندازه‌گیری شد. نمونه شاهد حاوی ۸۰۰ میکرولیتر آب مقطر، ۱۰ میکرولیتر  $FeCl_2$  و ۲۰ میکرولیتر محلول فروزین (۵ میلی‌مولار) بود. درصد شلاته‌کنندگی با استفاده از معادله ۶ محاسبه شد (Kanbargi et al., 2017).

(۶)  $\times 100$  جذب شاهد/(جذب نمونه - جذب شاهد) = درصد شلاته‌کنندگی

#### ظرفیت آنتی‌اکسیدانی کل

۰/۱ میلی‌لیتر از نمونه بهینه (۴۰ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر) با ۱ میلی‌لیتر از معرف (اسیدسولفوریک ۰/۶ مولار، فسفات سدیم ۲۸ میلی‌مولار و آمونیوم مولیبدات ۴ میلی‌مولار) در لوله اپندورف ریخته و به مدت ۹۰ دقیقه در حمام آب (WNB 22، آلمان) ۹۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت.

جدول ۱- سطوح متغیرهای مستقل مورد استفاده برای بهینه‌سازی فعالیت آنتی‌اکسیدانی پروتئین دانه کدو

Table 1- Levels of independent variables used to optimize the antioxidant activities of pumpkin seed protein

متغیرهای مستقل Independent variables	-α	-1	0	+1	+α
سوبسترا/آنزیم E/S	0.5	0.8	1.5	2.2	2.5
زمان Time	20	45	105	165	190

جدول ۲- ترکیبات شیمیایی موجود در دانه کامل، کنجاله چربی‌گیری شده و کنسانتره پروتئین کدو

Table 2- Chemical compounds present in whole grain, defatted flour and pumpkin protein concentrate

نمونه Sample	رطوبت (درصد) Moisture	خاکستر (درصد) Ash	چربی (درصد) Fat	پروتئین (درصد) Protein
دانه کامل Whole grain	8.46	6.9	31.57	33.92
کنجاله چربی‌گیری شده Defatted flour	7.65	4.65	5.12	59.5
کنسانتره پروتئین کدو Pumpkin protein concentrate	5.45	1.45	2.29	65.62

جدول ۳- تیمارهای تصادفی و فعالیت آنتی‌اکسیدانی پروتئین هیدرولیز شده دانه کدو بدون پیش تیمار

Table 3- Random treatments and antioxidant activity of hydrolyzed pumpkin seed protein without pretreatment

تیمار Treatment	زمان Time	سوبسترا/آنزیم E/S	آنتی‌اکسیدانی کل Total anti-oxidant	DPPH %	درصد شلاته‌کنندگی Chelation activity %
1	20	1.5	0.654	25.2	79.6
2	45	0.8	0.625	22.3	76.5
3	45	2.2	0.684	26.5	83.6
4	105	0.5	0.637	23.6	81.1
5	105	1.5	0.714	31.2	89.2
6	105	1.5	0.72	32.8	88.5
7	105	1.5	0.725	33.5	87.8
8	105	2.5	0.764	37.5	90.5
9	165	0.8	0.658	25.5	84.6
10	165	2.2	0.79	40.5	96.2
11	190	1.5	0.725	33.5	89.5

جدول ۴- تیمارهای تصادفی و فعالیت آنتی‌اکسیدانی پروتئین هیدرولیز شده دانه کدو تحت پیش تیمار مایکروویو

Table 4- Random treatments and antioxidant activity of hydrolyzed pumpkin seed protein under microwave pretreatment

تیمار Treatment	زمان Time	سوبسترا/آنزیم E/S	آنتی‌اکسیدانی کل Total anti-oxidant	DPPH %	درصد شلاته‌کنندگی Chelation activity %
1	20	1.5	0.654	25.7	84.8
2	45	0.8	0.625	23.1	80.2
3	45	2.2	0.665	28.3	86
4	105	0.5	0.613	22.5	80
5	105	1.5	0.688	51	93
6	105	1.5	0.711	50.8	91
7	105	1.5	0.701	52	92
8	105	2.5	0.691	35	89
9	165	0.8	0.632	26	81
10	165	2.2	0.688	40.2	89.7
11	190	1.5	0.642	37	84.3

می‌گذارند ( $p < 0/05$ ). متغیر  $A^2$ ، نسبت به سایر متغیرها تأثیرگذارتر می‌باشد. معنی‌دار نشدن فاکتور عدم برازش ( $0/05 < p$ )، بیانگر مناسب بودن مدل برای پیش‌بینی دامنه متغیرهای مورد بررسی است. رابطه شلاته‌کنندگی یون آهن با متغیرهای مستقل، بصورت درجه دوم و با ضریب همبستگی  $R^2 = 0/9679$  توانایی خوب مدل در پیش‌بینی تأثیر متغیرهای مستقل بر متغیرهای وابسته را نشان می‌دهد که از معادله ۷ پیروی می‌کند.

$$88.50 - 1.96 A^2 + 4.00 B + 4.34 A \quad (7)$$

### بهینه‌سازی هیدرولیز کنسانتره پروتئین کدو

تأثیر متغیرهای مستقل زمان و نسبت آنزیم به سوبسترا تحت پیش‌ تیمار مایکروویو بر درصد شلاته‌کنندگی، آنتی‌اکسیدانی کل و مهار رادیکال آزاد DPPH با تجزیه و تحلیل ضرایب رگرسیونی و واریانس ذکر شده در **جدول ۳** و **جدول ۴** مورد بررسی قرار گرفت.

### تأثیر زمان و E/S بر فعالیت شلاته‌کنندگی بدون استفاده از پیش‌ تیمار

با توجه به عدد P بدون پیش‌ تیمار **جدول ۵**، استنباط می‌شود، مقادیر  $A^2$ ، A و B تأثیر معنی‌داری بر روی فعالیت شلاته‌کنندگی آهن

جدول ۵- آنالیز واریانس فعالیت شلاته‌کنندگی پروتئین هیدرولیز شده دانه کدو توسط آلکالاز

Table 5- Variance analysis of chelation activity of pumpkin seed protein hydrolysate by alcalase

	ضریب رگرسیونی		ارزش P		درجه آزادی	
	Regression coefficient		P Value		df	
	P	BP	P	BP	P	BP
مدل	92.00	88.50	0.0006	0.0010	5	5
Model						
A	0.4741	4.34	0.2741	0.0004	1	1
B	3.40	4.00	0.0003	0.0005	1	1
AB	0.7250	1.13	0.2416	0.1769	1	1
$A^2$	-3.80	-1.96	0.0004	0.0225	1	1
$B^2$	-3.82	-1.34	0.0004	0.0771	1	1
$R^2$ -پیش‌بینی شده	0.8576	0.7865				
Pred- $R^2$						
$R^2$ -تعیین شده	0.9480	0.9358				
Adj- $R^2$						
عدم تناسب			0.4583	0.1399	3	3
Lack of fit						

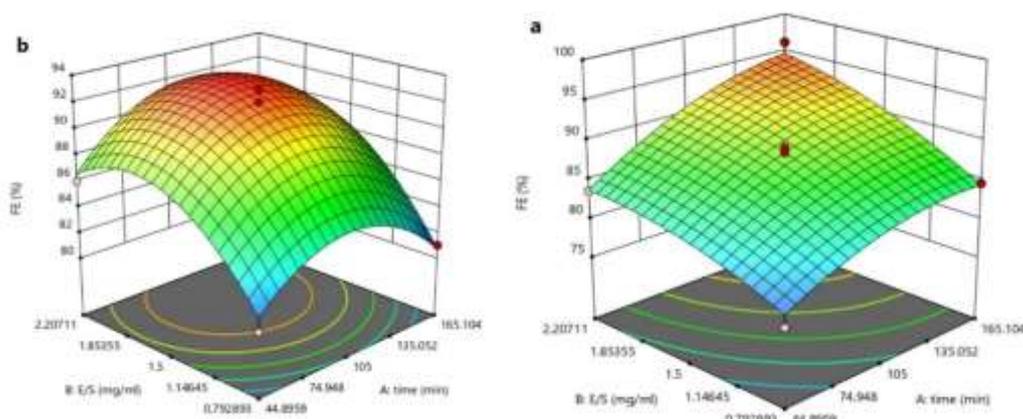
A: زمان، B: E/S، BP: بدون پیش‌ تیمار و P: با پیش‌ تیمار مایکروویو

هیدرولیز سوبسترا و شکسته شدن پیوندهای پپتیدی بیشتر است که در نتیجه، فعالیت آنتی‌اکسیدانی افزایش می‌یابد.

### تأثیر زمان و E/S بر فعالیت شلاته‌کنندگی با اعمال پیش تیمار

نتایج بدست آمده از **شکل ۱ ب**، حاکی از آن است که بیشترین فعالیت شلاته‌کنندگی مربوط به زمان ۱۰۵ دقیقه و E/S ۱٫۵ درصد می‌باشد. این مقدار بیشینه، نسبت به شرایط بدون پیش‌ تیمار، در زمانی کوتاه‌تر و غلظت پایین‌تر آنزیم اتفاق افتاده است. احتمالاً، بدلیل اینکه مایکروویو می‌تواند تغییراتی در ساختارهای دوم و سوم پروتئین‌ها ایجاد کند، با باز کردن ساختار پروتئین‌ها، دسترسی آنزیم به پیوندهای پپتیدی را افزایش می‌دهد (Li et al., 2013). گوهی و همکاران (Gohi et al., 2019) گزارش کردند که مایکروویو همراه با پائین می‌تواند عملکرد تولید پپتیدهای زیست‌فعال از دانه نیلوفر را بهبود بخشد.

با توجه به **شکل ۱ الف**، در نسبت ۲/۲ درصد E/S و زمان ۱۶۵ دقیقه بیشترین فعالیت شلاته‌کنندگی (۹۶٫۲٪) را خواهیم داشت و کمترین میزان فعالیت شلاته‌کنندگی (۷۶٫۵٪) مربوط به زمان ۴۵ دقیقه و نسبت ۰٫۸ درصد E/S می‌باشد. بطور کلی میزان فعالیت شلاته‌کنندگی تا زمان ۱۶۵ دقیقه افزایش و پس از آن کاهش یافته است که احتمالاً به دلیل تولید پپتیدهای کوتاه زنجیری است که توانایی کمی در فعالیت شلاته‌کنندگی آهن از خود نشان می‌دهند (Maqsoudlou et al., 2018). عبارت دیگر، هیدرولیز محدود، منجر به تولید توالی‌های پپتیدی می‌شود که توانایی بالاتری در مهار یون آهن از خود نشان می‌دهند. مشابه یافته‌های کاوه و همکاران (Kaveh et al., 2019) که تأثیر منفی افزایش زمان و درجه هیدرولیز بر فعالیت شلاته‌کنندگی پروتئین هیدرولیز شده شناسایی شده را مشاهده کردند. از طرف دیگر، با افزایش نسبت E/S، میزان فعالیت شلاته‌کنندگی نیز افزایش یافت. این افزایش، احتمالاً بدلیل ازدیاد تعداد جایگاه‌های فعال در دسترس برای



شکل ۱- تأثیر زمان و E/S بر روی فعالیت شلاته کنندگی بدون پیش تیمار (الف) و تأثیر زمان و E/S بر روی فعالیت شلاته کنندگی با اعمال پیش تیمار (ب)

Fig. 1. Effect of time and E/S on chelation activity without pretreatment (a) and Effect of time and E/S on chelation activity with pretreatment (b)

با توجه به مقادیر عدد P بدون پیش تیمار جدول ۶، مقادیر  $A^2$ ، A، B و AB بر فعالیت DPPH تأثیر گذار می باشند ( $p < 0/05$ ). نسبت به سایر متغیرها تأثیر گذارتر است. معنی دار نشدن فاکتور عدم برآزش ( $0/05 < p$ )، بیانگر این موضوع است که مدل به خوبی با داده های مربوط به فعالیت مهار رادیکال آزاد DPPH مطابقت دارد. رابطه مهار رادیکال آزاد DPPH با متغیرهای مستقل، بصورت درجه دوم و با ضریب همبستگی  $R^2 = 0/9728$  می باشد که نشان می دهد مدل توانسته ۹۷/۲۸ درصد از کل تغییرات در دامنه مقادیر مورد مطالعه را پیش بینی کند. معادله ۸، روابط بین متغیرهای واکنش و فعالیت مهار رادیکال آزاد DPPH را نشان می دهد.

$$32.50 + 2.70AB - 1.89A^2 + 3.62A + 4.86B \quad (8)$$

گازیکالوویچ و همکاران (Gazikalović et al., 2021) بیان کردند، در مقایسه با عملیات حرارتی، به نظر می رسد که پیش تیمار مایکروویو بر ساختار گلوتن و آلرژی زاوی تأثیر می گذارد و در ترکیب با هیدرولیز آنزیمی، پروتئین هیدرولیز شده با خواص آنتی اکسیدانی و عملکردی مناسب تولید می کند. نگوین و همکاران (Nguyen et al., 2017) بیان کردند که هیدرولیز آنزیمی به همراه پیش تیمار مایکروویو روشی مناسب برای تولید هیدرولیز شده های پروتئین ماهی با ویژگی های آنتی اکسیدانی مناسب می باشد.

تأثیر زمان و نسبت E/S بر فعالیت مهار رادیکال آزاد DPPH بدون پیش تیمار

جدول ۶- آنالیز واریانس مهار رادیکال آزاد DPPH پروتئین هیدرولیز شده دانه کدو توسط آلكالاز

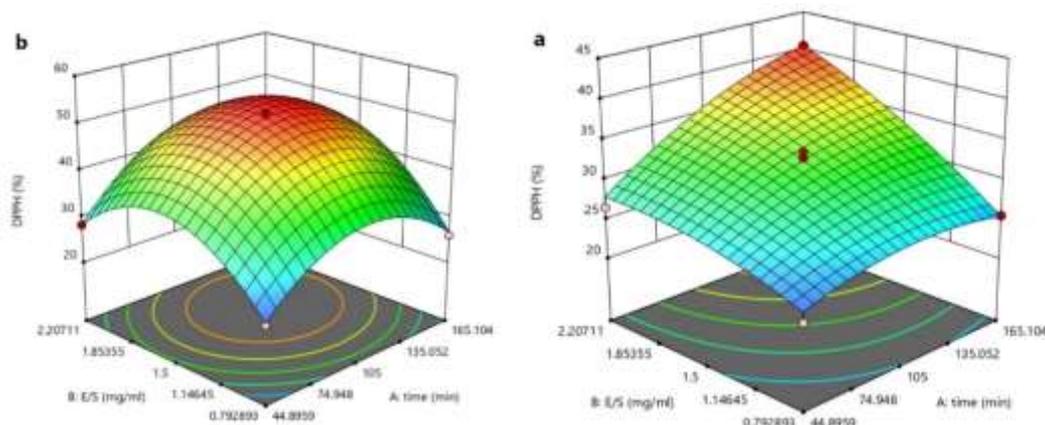
Table 6- Variance analysis of free radical scavenging activity DPPH of pumpkin seed protein hydrolysate by alcalase

	ضریب رگرسیون		ارزش P		درجه آزادی	
	Regression coefficient		P Value		df	
	P	BP	P	BP	P	BP
مدل	51.27	32.50	<0.0001	0.0006	5	5
Model						
A	3.85	3.62	<0.0001	0.0007	1	1
B	4.63	4.86	<0.0001	0.0002	1	1
AB	2.25	2.70	0.0011	0.0116	1	1
$A^2$	-10.12	-1.89	<0.0001	0.0233	1	1
$B^2$	-11.42	-1.29	<0.0001	0.0790	1	1
$R^2$ -پیش بینی شده	0.9912	0.8448				
Pred- $R^2$						
$R^2$ -تعیین شده	0.9967	0.9457				
Adj- $R^2$						
عدم تناسب			0.5034	0.3989	3	3
Lack of fit						

A: زمان، B: E/S، BP: بدون پیش تیمار و P: با پیش تیمار مایکروویو

اختلاف در گزارشات ناشی از تفاوت در ماده اولیه، نوع آنزیم و شرایط هیدرولیز می‌باشد. در مطالعه حاضر، افزایش غلظت آنزیم تا ۲/۲ درصد منجر به افزایش مهار رادیکال آزاد DPPH شد و در غلظت بالاتر منجر به کاهش فعالیت شد. علت این امر را می‌توان به هیدرولیز بیش از حد پروتئین نسبت داد که منجر به رهائش کامل آمینواسیدهای هیدروفیل شده و سبب دشوار شدن واکنش آمینواسیدهای فعال با رادیکال DPPH محلول در چربی می‌شود (Zhu et al., 2008). نورمحمدی و همکاران (Nourmohammadi et al., 2016) گزارش کردند افزایش غلظت آنزیم از ۱/۵ تا ۲ درصد، منجر به افزایش فعالیت مهار رادیکال آزاد DPPH در هیدرولیز شده‌های پروتئین کدو شد و در غلظت‌های کمتر از ۱/۵ درصد، این فعالیت کاهش یافت. باتیستا و همکاران (Batista et al., 2010) گزارش کردند در هیدرولیز آنزیمی پروتئین ماهی "گونه‌ای از ماهی" توسط آنزیم پروتامکس، افزایش غلظت آنزیم و افزایش درجه هیدرولیز، منجر به افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی می‌شود که دلیل این امر، افزایش پپتیدهای دهنده هیدروژن به دلیل افزایش درجه هیدرولیز پروتئین می‌باشد.

مطابق شکل ۲ الف، می‌توان بیان نمود که طی زمان ۱۶۵ دقیقه و نسبت ۲/۲ درصد E/S، بیشترین میزان فعالیت مهار رادیکال آزاد DPPH را خواهیم داشت و ادامه فرایند هیدرولیز منجر به کاهش قابلیت مهار رادیکال آزاد DPPH خواهد شد. احتمالاً پیشرفت هیدرولیز و تأثیر آنزیم بر پپتیدهای تولید شده در مراحل اولیه منجر به تخریب پپتیدهایی با قابلیت آنتی‌اکسیدانی بالا شده است (Meshginfar et al., 2014). شعبان پور و همکاران (Shaban Pour et al., 2017) گزارش کردند که قابلیت مهار رادیکال آزاد DPPH پپتیدهای حاصل از پروتئین میگو، با افزایش زمان هیدرولیز، کاهش می‌یابد. در گزارشی دیگر باتیستا و همکاران (Batista et al., 2010) گزارش کردند، افزایش زمان هیدرولیز منجر به افزایش فعالیت مهار رادیکال آزاد DPPH می‌شود. اویسی‌پور و همکاران (Ovissipour et al., 2009) به بررسی تأثیر زمان بر فعالیت مهار رادیکال آزاد DPPH پپتیدهای "گونه‌ای از ماهی" پرداختند و گزارش آنها حاکی از آن بود که با افزایش زمان هیدرولیز تا ۱۸۰ دقیقه، بالاترین میزان فعالیت مهار رادیکال آزاد DPPH را خواهیم داشت و با افزایش بیشتر زمان، این فعالیت کاهش خواهد یافت. این



شکل ۲- تأثیر زمان و E/S بر فعالیت مهار رادیکال آزاد DPPH بدون پیش تیمار (الف) و تأثیر زمان و E/S بر روی فعالیت مهار رادیکال آزاد DPPH با اعمال پیش تیمار (ب)

Fig. 2. The effect of time and E/S on DPPH free radical inhibition activity without pretreatment (a) and The effect of time and E/S on DPPH free radical inhibition activity with pretreatment (b)

"بر روی هیدرولیز شده‌های پروتئین شیر" را مورد مطالعه قرار دادند و بیان کردند توان‌های مختلف پیش تیمار مایکروویو انجام گرفته بر روی هیدرولیز شده‌های پروتئین شیر، فعالیت مهار رادیکال آزاد DPPH بالاتری را در مقایسه با شاهد نشان دادند و فعالیت مهار رادیکال آزاد DPPH با مایکروویو با توان ۳۰۰ وات، بالاترین مقدار می‌باشد. دنگ و همکاران (Dong et al., 2015) گزارش کردند پیش تیمار مایکروویو با توان ۴۰۰ وات، سبب بیشترین فعالیت آنتی‌اکسیدانی در هیدرولیز شده‌های کنجاله آفتابگردان می‌شود. این تفاوت در توان‌های مورد

### تأثیر زمان و نسبت E/S بر فعالیت مهار رادیکال آزاد DPPH با اعمال پیش تیمار

با توجه به شکل ۲ ب، با اعمال فرایند پیش تیمار مایکروویو، بیشترین میزان فعالیت مهار رادیکال آزاد DPPH در زمان ۱۰۵ دقیقه و نسبت E/S ۱/۵ درصد اتفاق افتاد یعنی در مقایسه با شرایط بدون پیش تیمار، در زمان کمتر و غلظت پایین‌تر آنزیم به بیشینه فعالیت مهار رادیکال آزاد DPPH دست یافتیم. یانگ و همکاران (Yang et al., 2022) تأثیر پیش تیمار مایکروویو بر فعالیت مهار رادیکال آزاد DPPH

است. معنی دار نشدن فاکتور عدم برازش ( $p < 0/05$ )، بیانگر این موضوع است که مدل به خوبی با داده‌های مربوط به فعالیت آنتی‌اکسیدانی کل مطابقت دارد. رابطه آنتی‌اکسیدانی کل با متغیرهای مستقل، بصورت درجه دوم و با ضریب همبستگی  $R^2 = 0/9881$  می‌باشد که نشان می‌دهد مدل توانسته ۹۸٫۸۱ درصد از کل تغییرات در دامنه مقادیر مورد مطالعه را پیش‌بینی کند. معادله ۹ روابط بین متغیرهای واکنش و فعالیت آنتی‌اکسیدانی کل را نشان می‌دهد.

$$0.7197 + 0.0182AB - 0.0165A^2 - 0.0110B^2 + 0.0299A + 0.0463B \quad (9)$$

استفاده در مطالعات مختلف، ممکن است به میزان حلالیت مواد پروتئینی مرتبط باشد. هیدرولیز شده‌های پروتئین شیر در مقایسه با پروتئین نامحلول، با قدرت مایکروویو کمتری تحت تأثیر قرار می‌گیرند (Yang et al., 2022).

### تأثیر زمان و نسبت E/S بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی کل بدون پیش‌تیمار

با توجه به مقادیر عدد P بدون پیش تیمار جدول ۷، می‌توان بیان کرد که مقادیر  $A^2$ ،  $B^2$ ، A، B و AB بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی کل تأثیر گذار می‌باشند ( $p < 0/05$ ).  $A^2$  نسبت به سایر متغیرها تأثیر گذارتر

جدول ۷- آنالیز واریانس فعالیت آنتی‌اکسیدانی کل پروتئین هیدرولیز شده دانه کدو توسط آلكالاز  
Table 7- Variance analysis of total antioxidant activity of pumpkin seed protein hydrolysate by alcalase

	ضریب رگرسیون		ارزش P		درجه آزادی	
	Regression coefficient		P <sub>Value</sub>		df	
مدل	P	BP	P	BP	P	BP
Model	0.7000	0.7197	0.0031	<0.0001	5	5
A	0.0016	0.0299	0.6866	0.0001	1	1
B	0.0258	0.463	0.0011	<0.0001	1	1
AB	0.0040	0.0182	0.4910	0.0064	1	1
A <sup>2</sup>	-0.0254	-0.0165	0.0025	0.0047	1	1
B <sup>2</sup>	-0.0234	-0.0110	0.0036	0.0233	1	1
R <sup>2</sup> -پیش‌بینی شده	0.7470	0.9263				
Pred-R <sup>2</sup>						
R <sup>2</sup> -تعیین شده	0.8963	0.9763				
Adj-R <sup>2</sup>						
عدم تناسب			0.6018	0.2633	3	3
Lack of fit						

A : زمان، B: E/S، BP: بدون پیش تیمار و P: با پیش تیمار مایکروویو

پانکراتین در زمان ۱۸۰ دقیقه بالاترین میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی کل را از خود نشان می‌دهد.

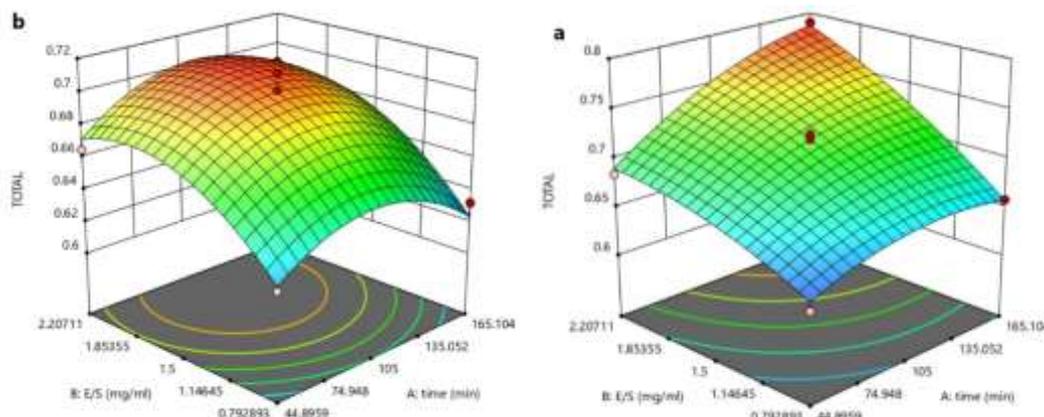
### تأثیر زمان و نسبت E/S بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی کل با اعمال پیش تیمار

شکل ۳ ب، بیانگر بالاترین میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی کل در زمان ۱۰۵ دقیقه و نسبت E/S ۱/۵ درصد می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌شود با اعمال فرآیند پیش تیمار میتوان در زمان کوتاه‌تر و غلظت آنزیم پایین‌تر نسبت به شرایط بدون پیش تیمار به بیشینه فعالیت آنتی‌اکسیدانی کل دست یافت. یانگ و همکاران (Yang et al., 2022) تأثیر پیش تیمار مایکروویو بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی و پایداری محصولات آنزیمی پروتئین شیر را مورد بررسی قرار دادند و بیان کردند که توان ۳۰۰ وات باعث بالاترین میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی کل می‌شود. داروزا و همکاران (da Rosa et al., 2019) به بررسی فعالیت آنتی‌اکسیدانی برگ زیتون با استفاده از پیش تیمار مایکروویو و فراصوت

طبق شکل ۳ الف، در زمان ۱۶۵ دقیقه و نسبت ۲/۲ درصد E/S، بیشترین میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی کل را خواهیم داشت و افزایش بیشتر زمان و غلظت آنزیم، بر قدرت آنتی‌اکسیدانی کل تأثیر منفی خواهد گذاشت. نتایج نشان می‌دهد که آنزیم آلكالاز با شکستن زنجیره پروتئینی توانسته است پپتیدهایی با خاصیت الکترون‌دهندگی تولید کند که منجر به تبدیل رادیکال‌های آزاد به ترکیبات پایدارتر شده که در نتیجه قدرت آنتی‌اکسیدانی کل افزایش یافته است. بنابراین زمان بالاتر و غلظت بیشتر آنزیم، سبب هیدرولیز پپتیدهای با خاصیت الکترون‌دهندگی شده و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی کل کاهش یافت. کاوه و همکاران (Kaveh et al., 2019) با هیدرولیز پروتئین شنبلیله بیان کردند با افزایش زمان و دما، میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی کل به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. الوند و همکاران (Alvand et al., 2022) به بررسی تأثیر زمان و نوع آنزیم بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی کل پروتئین هیدرولیز شده خربزه ترکمنی پرداختند و بیان کردند آنزیم

است با میزان حلالیت مواد پروتئینی، مرتبط باشد (Yang et al., 2022).

پرداختند و دریافتند که بالاترین میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی با پیش تیمار مایکروویو در دمای ۸۶ درجه سانتی‌گراد و زمان ۳ دقیقه بدست می‌آید. تفاوت در توان و زمان مورد استفاده در مطالعات مختلف ممکن



شکل ۳- تأثیر زمان و E/S بر روی فعالیت آنتی‌اکسیدانی کل بدون پیش تیمار (الف) و تأثیر زمان و E/S بر روی فعالیت آنتی‌اکسیدانی کل با اعمال پیش تیمار (ب)

Fig. 3. Effect of time and E/S on total antioxidant activities without pretreatment (a) and Effect of time and E/S on total antioxidant activities with pretreatment (b)

میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی با استفاده از پیش تیمار مایکروویو در زمان کوتاه‌تر و غلظت آنزیم کمتر (۱۰۵ دقیقه و E/S ۱٫۵ درصد) نسبت به شرایط بدون پیش تیمار (زمان ۱۶۵ دقیقه و نسبت E/S ۲٫۲ درصد) بدست آمده است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از پیش تیمار مایکروویو، روشی مناسب برای صرفه‌جویی در زمان و غلظت آنزیم مورد استفاده در هیدرولیز آنزیمی می‌باشد.

## نتیجه‌گیری

پپتیدهای زیست‌فعالی که از طریق هیدرولیز آنزیمی پروتئین‌ها تولید می‌شوند، دارای خواص آنتی‌اکسیدانی قابل توجهی می‌باشند. دانه کدو می‌تواند بعنوان منبعی غنی از مواد مغذی و ترکیبات زیست‌فعال در صنایع غذایی گوناگون کاربرد داشته باشد. نتایج نشان داد که بالاترین

## References

- Alvand, M., Sadeghi Mahoonak, A., Ghorbani, M., Shahiri Tabarestani, H., & Kaveh, S. (2022). Comparison of the antioxidant properties of hydrolyzed Turkmen melon seed protein by Pancreatin and Alcalase. *Food Engineering Research*, 21(2), 75-90. <https://doi.org/10.22092/fooder.2023.354314.1303>
- Batista, I., Ramos, C., Coutinho, J., Bandarra, N., & Nunes, M. (2010). Characterization of protein hydrolysates and lipids obtained from black scabbardfish (*Aphanopus carbo*) by-products and antioxidative activity of the hydrolysates produced. *Process Biochemistry*, 45(1), 18-24.
- da Rosa, G.S., Vanga, S.K., Garipey, Y., & Raghavan, V. (2019). Comparison of microwave, ultrasonic and conventional techniques for extraction of bioactive compounds from olive leaves (*Olea europaea* L.). *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 58, 102234. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102234>
- Devi, N.M., Prasad, R., & Palmei, G. (2018). Physico-chemical characterisation of pumpkin seeds. *International Journal of Chemical Studies*, 6(5), 828-831.
- Dong, C., Li, F., Wang, L., Ma, X., Xu, J., & Kong, L. (2015). Microwave pretreatment of sunflower meal protein preparation of antioxidant peptides. *Science Technology Food Industry*, 36, 308-311.
- Drotningvik, A., Mjøs, S.A., Pampanin, D.M., Slizyte, R., Carvajal, A., Remman, T., Høggøy, I., & Gudbrandsen, O.A. (2016). Dietary fish protein hydrolysates containing bioactive motifs affect serum and adipose tissue fatty acid compositions, serum lipids, postprandial glucose regulation and growth in obese Zucker fa/fa rats. *British Journal of Nutrition*, 116(8), 1336-1345. <https://doi.org/10.1017/S0007114516003548>
- Fan, X., Guo, H., Teng, C., Zhang, B., Blecker, C., & Ren, G. (2022). Anti-colon cancer activity of novel peptides isolated from in vitro digestion of quinoa protein in Caco-2 cells. *Foods*, 11(2), 194.

8. Gazikalović, I., Mijalković, J., Šekuljica, N., Jakovetić Tanasković, S., Đukić Vuković, A., Mojović, L., & Knežević-Jugović, Z. (2021). Synergistic effect of enzyme hydrolysis and microwave reactor pretreatment as an efficient procedure for gluten content reduction. *Foods*, *10*(9), 2214.
9. Gohi, B.F.C.A., Du, J., Zeng, H.-Y., Cao, X.-J., & Zou, K.M. (2019). Microwave pretreatment and enzymolysis optimization of the Lotus seed protein. *Bioengineering*, *6*(2), 28.
10. Han, R., Álvarez, A.J.H., Maycock, J., Murray, B.S., & Boesch, C. (2021). Comparison of alcalase-and pepsin-treated oilseed protein hydrolysates—experimental validation of predicted antioxidant, antihypertensive and antidiabetic properties. *Current Research in Food Science*, *4*, 141-149.
11. Horax, R., Vallecios, M.S., Hettiarachchy, N., Osorio, L.F., & Chen, P. (2017). Solubility, functional properties, ACE- I inhibitory and DPPH scavenging activities of Alcalase hydrolysed soy protein hydrolysates. *International Journal of Food Science & Technology*, *52*(1), 196-204. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13267>
12. Horwitz, W., & Latimer, G. (2000). Association of official analytical chemists. *Gaithersburg, MD, USA*.
13. Kanbargi, K.D., Sonawane, S.K., & Arya, S.S. (2017). Encapsulation characteristics of protein hydrolysate extracted from *Ziziphus jujube* seed. *International Journal of Food Properties*, *20*(12), 3215-3224.
14. Kaveh, S., Sadeghi, M.A., Ghorbani, M., Jafari, M., & Sarabandi, K. (2019). Optimization of factors affecting the antioxidant activity of fenugreek seed's protein hydrolysate by response surface methodology. *Iranian Journal of Nutrition Sciences & Food Technology*, *14*(1).
15. Li, D., Wang, J., Wu, X., Feng, C., & Li, X. (2013). Ultraviolet-assisted synthesis of hourglass-like ZnO microstructure through an ultrasonic and microwave combined technology. *Ultrasonics Sonochemistry*, *20*(1), 133-136. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2012.05.017>
16. Lu, D., Peng, M., Yu, M., Jiang, B., Wu, H., & Chen, J. (2021). Effect of enzymatic hydrolysis on the zinc binding capacity and in vitro gastrointestinal stability of peptides derived from pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) seeds. *Frontiers in Nutrition*, *8*, 647782.
17. Maqsoodloua, S., Mahoonak, R., & Mohebodini, A. (2018). Evaluation of the antioxidant properties Hydrolyzed protein of bee pollen. *Food Science and Technology*, *14*(12), 227-240.
18. Mazloomi-Kiyapey, S.N., Sadeghi-Mahoonak, A., Ranjbar-Nedamani, E., & Nourmohammadi, E. (2019). Production of antioxidant peptides through hydrolysis of medicinal pumpkin seed protein using pepsin enzyme and the evaluation of their functional and nutritional properties. *Arya Atherosclerosis*, *15*(5), 218.
19. Meshginfar, N., Sadeghi, M.A., Ziaifar, A., Ghorbani, M., & Kashaninejad, M. (2014). Optimization of the production of protein hydrolysates from meat industry by products by response surface methodology. *Journal of Food Research (University of Tabriz)*.
20. Nguyen, E., Jones, O., Kim, Y.H.B., San Martin-Gonzalez, F., & Liceaga, A.M. (2017). Impact of microwave-assisted enzymatic hydrolysis on functional and antioxidant properties of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* by-products. *Fisheries Science*, *83*, 317-331.
21. Nkosi, C.Z. (2007). *Effect of pumpkin seed (Cucurbita pepo) protein isolate on the antioxidant enzymes in ccl4-induced liver injury in low-protein fed rats*.
22. Nnamezie, A.A., Famuwagun, A.A., & Gbadamosi, S.O. (2021). Characterization of okra seed flours, protein concentrate, protein isolate and enzymatic hydrolysates. *Food Production, Processing and Nutrition*, *3*, 1-14.
23. Nourmohammadi, E., Sadeghi, M.A., Ghorbani, M., Alami, M., & Sadeghi, M. (2016). Identification of the optimum conditions to anti-oxidative peptides production through the enzymatic hydrolysis of pumpkin oil cake protein by pepsin.
24. Ovisipour, M., Abedian, A., Motamedzadegan, A., Rasco, B., Safari, R., & Shahiri, H. (2009). The effect of enzymatic hydrolysis time and temperature on the properties of protein hydrolysates from Persian sturgeon (*Acipenser persicus*) viscera. *Food Chemistry*, *115*(1), 238-242.
25. Prieto, P., Pineda, M., & Aguilar, M. (1999). Spectrophotometric quantitation of antioxidant capacity through the formation of a phosphomolybdenum complex: specific application to the determination of vitamin E. *Analytical Biochemistry*, *269*(2), 337-341.
26. Rezig, L., Chibani, F., Chouaibi, M., Dalgalarondo, M.L., Hessini, K., Guéguen, J., & Hamdi, S. (2013). Pumpkin (*Cucurbita maxima*) seed proteins: sequential extraction processing and fraction characterization. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *61*(32), 7715-7721. <https://doi.org/10.1021/jf402323u>
27. Rezig, L., Chouaibi, M., Msaada, K., & Hamdi, S. (2012). Chemical composition and profile characterisation of pumpkin (*Cucurbita maxima*) seed oil. *Industrial Crops and Products*, *37*(1), 82-87.
28. Samaranyaka, A.G., & Li-Chan, E.C. (2011). Food-derived peptidic antioxidants: A review of their production, assessment, and potential applications. *Journal of Functional Foods*, *3*(4), 229-254. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2011.05.006>

29. Sarkar, S.K., Hossain, M.T., Uddin, M.B., & Absar, N. (2007). Purification, characterization and physico-chemical properties of three galactose-specific lectins from pumpkin (*Cucurbita maxima*) seed kernels. *Journal of the Chinese Chemical Society*, 54(6), 1433-1442.
30. Shaban Pour, B., Kord Jazi, M., Nazari, K., & Esmaeeli Khariki, M. (2017). Effect of enzymatic hydrolysis time, temperature and enzyme to substrate ratio on antioxidant properties of prawn bioactive peptides. *Journal of Food Science and Technology (Iran)*, 14(62), 45-31.
31. Shandilya, U., & Sharma, A. (2017). Functional foods and their benefits: an overview. *Journal Nutrition Health Food Engineering*, 7(4), 353-356.
32. Sitohy, M.Z., Desoky, E.S.M., Osman, A., & Rady, M.M. (2020). Pumpkin seed protein hydrolysate treatment alleviates salt stress effects on *Phaseolus vulgaris* by elevating antioxidant capacity and recovering ion homeostasis. *Scientia Horticulturae*, 271, 109495. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109495>
33. Taha, F.S., Mohamed, S.S., Wagdy, S.M., & Mohamed, G.F. (2013). Antioxidant and antimicrobial activities of enzymatic hydrolysis products from sunflower protein isolate. *World Applied Science Journal*, 21(5), 651-658.
34. Uluko, H., Zhang, S., Liu, L., Tsakama, M., Lu, J., & Lv, J. (2015). Effects of thermal, microwave, and ultrasound pretreatments on antioxidative capacity of enzymatic milk protein concentrate hydrolysates. *Journal of Functional Foods*, 18, 1138-1146.
35. Villanueva-Lazo, A., Paz, S. M.-d. l., Rodriguez-Martin, N. M., Millan, F., Carrera, C., Pedroche, J. J., & Millan-Linares, M. d. C. (2021). Antihypertensive and antioxidant activity of Chia protein techno-functional extensive hydrolysates. *Foods*, 10(10), 2297.
36. Wang, S., Su, G., Zhang, X., Song, G., Zhang, L., Zheng, L., & Zhao, M. (2021). Characterization and exploration of potential neuroprotective peptides in walnut (*Juglans regia*) protein hydrolysate against cholinergic system damage and oxidative stress in scopolamine-induced cognitive and memory impairment mice and zebrafish. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 69(9), 2773-2783. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c07798>
37. Yang, C., Wang, B., Wang, J., Xia, S., & Wu, Y. (2019). Effect of pyrogallol (1, 2, 3-benzenetriol) polyphenol-protein covalent conjugation reaction degree on structure and antioxidant properties of pumpkin (*Cucurbita* sp.) seed protein isolate. *Lwt*, 109, 443-449. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.04.034>
38. Yang, X., Ren, X., & Ma, H. (2022). Effect of microwave pretreatment on the antioxidant activity and stability of enzymatic products from milk protein. *Foods* 2022, 11, 1759. In: s Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published.
39. Zakeri, K., Ghorbani, M., Mahoonak, A.S., Moayedi, A., & Maghsoudlou, Y. (2019). Determination of optimum conditions for the production of peptides with antioxidant and nitric-oxide inhibition properties from protein hydrolysis of pumpkin seed meals using pepsin enzyme. *Iranian Journal of Nutrition Sciences & Food Technology*, 14(3).
40. Zhang, X., Li, H., Wang, L., Zhang, S., Wang, F., Lin, H., Gao, S., Li, X., & Liu, K. (2021). Anti-inflammatory peptides and metabolomics-driven biomarkers discovery from sea cucumber protein hydrolysates. *Journal of Food Science*, 86(8), 3540-3549. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15834>
41. Zhu, L., Chen, J., Tang, X., & Xiong, Y.L. (2008). Reducing, radical scavenging, and chelation properties of in vitro digests of alcalase-treated zein hydrolysate. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(8), 2714-2721.
42. Salo-Viiinhen, P.P., & Koivistoinen, P.E. (1996). Determination of protein in foods: comparison of net protein and crude protein (Nx 6.25) values. *Food Chembtry*, 57(1), 27-31.



## Comparison Astaxanthin Extraction of *Fenneropenaeus merguensis* and *Pontogammarus maeoticus* by Using Organic Solvent, Sunflower Oil and Ionic Liquid Micro Emulsion

P. Feizi<sup>1</sup>, Y. Maghsoudlou<sup>2\*</sup>, H. Shahiri Tabarestani<sup>3</sup>, S.M. Jafari<sup>2</sup>, A.H. Bahri<sup>4</sup>

1, 2 and 3- Ph.D. Student of Food Technology, Professor and Assistant Professor, Department of Food Science & Technology, College of Food Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources, Gorgan, Iran, respectively.

(\*- Corresponding Author Email: [y.maghsoudlou@gau.ac.ir](mailto:y.maghsoudlou@gau.ac.ir))

4- Department of Fisheries, Marine Technology and Fisheries Science Research Center, Bandar Abbas Branch, Islamic Azad University, Bandar Abbas, Iran

Received: 18.06.2023

Revised: 21.08.2023

Accepted: 28.09.2023

Available Online: 30.09.2023

### How to cite this article:

Feizi, P., Maghsoudlou, Y., Shahiri Tabarestani, H., Jafari, S.M., & Bahri, A.H. (2024). Comparison astaxanthin extraction of *Fenneropenaeus merguensis* and *Pontogammarus maeoticus* by using organic solvent, sunflower oil and ionic liquid micro emulsion. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 20(2), 309-321. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/ifstrj.2023.82949.1265>

### Introduction

Astaxanthin is a widely used carotenoid pigment in the food industry which is extracted from various natural and synthetic sources. Nowadays, due to the adverse effects of organic solvents green solvents which are non-toxic, non-volatile and environmentally friendly have been proposed. Therefore, this study focuses on comparison of the extraction of astaxanthin from shrimp (*Fenneropenaeus merguensis*) and Gammarus (*Pontogammarus maeoticus*) under soaking conditions for 24 hours with organic solvent (combination of ethanol with ethyl acetate), green solvent (microemulsion of ionic liquid in water) and vegetable oil (sunflower oil). Ionic liquid microemulsion in water is considered a new solvent for astaxanthin extraction. Determination of density, conductivity and diameter were the characteristics of microemulsion test. In extraction, solvent to sample ratios of 5x, 12.5x and 20x were used for the extraction and compared with the control sample.

### Materials and Methods

*F. merguensis* and *P. maeoticus* With species approval were procured from Persian Gulf Ecology Research Institute (Iran). Commercial astaxanthin (>98 % purity),  $\alpha$ -diphenyl- $\beta$ -picrylhydrazyl (DPPH), and butylated hydroxytoluene (BHT) were procured from Sigma-Aldrich (USA). The HPLC grade ethanol, propanol, ethyl acetate, tributyl octyl phosphonium bromide, Triton X-100, and n-butanol were obtained from Merck Chemicals Co. (Germany). Refined sunflower oil which was antioxidant-free, was also purchased from Hayat Company (Iran). The shell of *F. merguensis* and *P. maeoticus* were carefully washed with distilled water, then freeze-dried (Christ-Alpha 1-4, LD freeze dryer, Germany) for 48 h at -50 °C. After sieving the powders with a laboratory sieve with a mesh smaller than 15  $\mu$ m. The obtained powders were kept at Refrigerator. All experiments were done in the Food and Drug Administration Department of Hormozgan University of Medical Sciences.

### Results and Discussion

According to the results, the density of the microemulsion was determined in the range of 0.97151 g/cm<sup>3</sup>, its diameter was 15.8 nanometers and the conductivity was 312 microsiemens at 27.1°C. The results of astaxanthin extraction with different solvents in the comparison with control solvent were statistically significant (p< 0.05). According to the results obtained from the extraction of astaxanthin from two sources of shrimp and gammarus, shrimp was selected as the source with the highest amount of extracted astaxanthin. The use of green solvent (ionic liquid



microemulsion in water) in a ratio of 12.5 times solvent to sample was also chosen as the optimal method. The amount of astaxanthin extracted under optimal conditions was  $77.44 \pm 1.09$  mg/ml. The results of DPPH radical inhibition by extracted astaxanthin using ionic, oily and organic solvents compared to synthetic antioxidant BHT showed that the antioxidant activity increased with increasing the concentration of astaxanthin, but this increase was always lower than BHT.

### Conclusion

In general, the results of this research show that the use of microemulsion based on ionic liquids is a suitable alternative to conventional methods in extracting and recovering astaxanthin from natural biological sources.

### Acknowledgement

We are grateful to the Honorable Vice-Chancellor of Hormozgan Food and Drug Administration for the help in using the Hormozgan Food and Drug Laboratory to conduct the experiments of this doctoral thesis.

**Keywords:** Astaxanthin, Ionic liquid micro emulsion, *Fenneropenaeus merguensis*, *Pontogammarus maeoticus*

## مقاله پژوهشی

جلد ۲۰، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۳، ص. ۳۰۹-۳۲۱

# مقایسه استخراج آستاگزانتین از میگوی موزی (*Fenneropenaeus merguensis*) و سخت پوست گاماروس (*Pontogammarus maeoticus*) به کمک حلال آلی، روغن آفتابگردان و میکروامولسیون مایع یونی در آب

پریسا فیضی<sup>۱</sup> - یحیی مقصدلو<sup>۲\*</sup> - هدی شهری طبرستانی<sup>۳</sup> - سید مهدی جعفری<sup>۲</sup> - امیر هوشنگ بحری<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۰۶

## چکیده

آستاگزانتین رنگدانه‌ی کاروتنوئیدی پر کاربرد در صنایع غذایی است که از منابع مختلف طبیعی و سنتزی به روش‌های گوناگون استخراج می‌شود. امروزه با توجه به اثرات نامطلوب حلال‌های آلی استفاده از حلال‌های سبز رایج شده است. زیرا این حلال‌ها نسبت به حلال‌های آلی دوستدار محیط‌زیست بوده و ویژگی‌هایی مانند فراریت و سمی بودن را ندارند. بنابراین این پژوهش با هدف استخراج آستاگزانتین تحت شرایط خیس‌اندن به مدت ۲۴ ساعت با حلال آلی (مخلوط اتانول: اتیل استات (۱:۲))، حلال سبز (میکروامولسیون مایع یونی در آب) و روغن گیاهی (روغن آفتابگردان) از پوسته میگوی موزی (*Fenneropenaeus merguensis*) و سخت پوست گاماروس (*Pontogammarus maeoticus*) انجام شد. میکروامولسیون مایع یونی در آب به‌عنوان حلالی جدید برای استخراج آستاگزانتین در نظر گرفته شد. تعیین چگالی، رسانایی و قطر از جمله ویژگی‌های مورد آزمون میکروامولسیون بودند. بهترین شرایط برای استخراج، بیشترین میزان آستاگزانتین است که با به کارگیری حلال‌ها و نسبت‌های حلال به نمونه ۵ برابر، ۱۲/۵ برابر و ۲۰ برابر تعیین شد. میزان آستاگزانتین، کاروتنوئید کل، درصد بازیافت و فعالیت مهار رادیکال DPPH آزمون‌هایی بودند که برای بررسی آستاگزانتین استخراجی انجام شدند. طبق نتایج چگالی میکروامولسیون در محدوده ۰/۹۷۱۵۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب، قطر آن ۱۵/۸ نانومتر و رسانایی ۳۱۲ میکروزیمنس در دمای ۲۷/۱ درجه سانتی‌گراد تعیین شد. نتایج حاصل از استخراج آستاگزانتین با حلال‌های مختلف در مقایسه با حلال اتانول بعنوان شاهد از لحاظ آماری معنی‌دار بود. با توجه به نتایج بدست آمده از استخراج آستاگزانتین از دو منبع میگوی موزی و سخت‌پوست گاماروس، میگوی موزی به‌عنوان منبع با بالاترین میزان آستاگزانتین استخراجی انتخاب شد. استفاده از حلال سبز (میکروامولسیون مایع یونی در آب) در نسبت ۱۲/۵ برابر حلال به نمونه نیز به‌عنوان بهترین روش انتخاب شد. مقدار آستاگزانتین استخراج شده در بهترین شرایط  $17.09 \pm 77.44$  میلی‌گرم بر میلی‌لیتر بود. نتایج حاصل از مهار رادیکال DPPH توسط آستاگزانتین استخراج شده به کمک حلال‌های ذکر شده در مقایسه با آنتی‌اکسیدان سنتتیک BHT نشان داد که با افزایش غلظت آستاگزانتین فعالیت آنتی‌اکسیدانی افزایش می‌یابد. اما این افزایش همواره کمتر از فعالیت آنتی‌اکسیدانی BHT بود. به‌طور کلی نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که استفاده از میکروامولسیون مبتنی بر مایع یونی جایگزین مناسبی برای روش‌های مرسوم در استخراج و بازیابی آستاگزانتین از منابع زیستی طبیعی است.

**واژه‌های کلیدی:** آستاگزانتین، سخت پوست گاماروس، میکروامولسیون مایع یونی، میگوی موزی

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی دکتری فناوری مواد غذایی، استاد و استادیار، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

\*- نویسنده مسئول: (Email: [y.maghsoudlou@gau.ac.ir](mailto:y.maghsoudlou@gau.ac.ir))

۴- گروه شیلات، مرکز تحقیقات فناوری‌های دریایی و شیلاتی، واحد بندرعباس، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس، ایران

## مقدمه

رنگ‌ها، یکی از مهم‌ترین افزودنی‌های مواد غذایی می‌باشند که تأثیر بسزایی بر بازارپسندی محصول تولید شده، دارند. به همین دلیل، استفاده از ترکیبات مولد رنگ در صنایع مختلف از جمله صنعت غذا از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. کاروتنوئیدها، یکی از مهم‌ترین رنگ‌های طبیعی، هستند که به‌طور طبیعی در کلروپلاست و یا کروموپلاست گیاهان و برخی از ارگانسیم‌های فتوسنتزکننده مثل جلبک‌ها وجود دارند (Norshazila, Irwandi, Othman, & Zuhani, 2012). آستاگزانتین<sup>۱</sup> (کتوکاروتنوئیدی از گروه گزانوفیل‌ها و یکی از معروف‌ترین رنگدانه‌های کاروتنوئیدی می‌باشد، که در حالت آزاد به رنگ‌های صورتی تا قرمز دیده می‌شود. این کاروتنوئید رنگدانه محلول در چربی است و در حلال‌هایی مانند استون، اتانول و کلروفرم حل می‌شود. آستاگزانتین حاوی زنجیره بلند از پیوند دوگانه مزدوج و گروه‌های کتونی می‌باشد. این ویژگی در آستاگزانتین موجب می‌گردد که فعالیت آنتی‌اکسیدانی آن افزایش یابد و بتواند رادیکال‌های آزاد را به‌سرعت غیر فعال کند. در مقایسه فعالیت آنتی‌اکسیدانی آستاگزانتین با سایر آنتی‌اکسیدان‌های طبیعی، محققان به این نتیجه رسیدند که آستاگزانتین در خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد مطلوب‌تر از سایر کاروتنوئیدها نظیر بتاکاروتن عمل می‌کند و در جلوگیری از پراکسیداسیون استرهای متیلی اسیدهای چرب اشباع نشده مؤثرتر است (Ambati, Siew Moi, Ravi, & Aswathanarayana, 2014). مطالعات نشان داده است که قدرت آنتی‌اکسیدانی کاروتنوئید آستاگزانتین ۱۰ برابر بیشتر از سایر کاروتنوئیدها (مانند زئاگزانتین، لوتئین، کانتاگزانتین، بتاکاروتن) و ۱۰۰ برابر بیشتر از آلفاتوکوفرول می‌باشد (Silva, Rodrigues, Silva, & Rodrigues, 2018). آستاگزانتین از منابع مختلف طبیعی و سنتزی به روش‌های گوناگون قابل استخراج است. آستاگزانتین سنتتیک از منابع پتروشیمی تولید می‌شود که به‌دلیل ارزان‌تر بودن (هر کیلوگرم حدود ۱۰۰۰ دلار) بیش از ۹۵٪ از این بازار را به خود اختصاص داده است. اما به‌دلیل مسائل مربوط به ایمنی مواد غذایی (مسمومیت بالقوه در محصول نهایی) و آلودگی، تا به امروز فقط به‌عنوان یک افزودنی برای تغذیه ماهی (برای اهداف رنگدگی) استفاده شده است و برای مصرف مستقیم انسانی در غذاها یا مکمل‌ها تأیید نشده است (Pérez-López et al., 2014). آستاگزانتین طبیعی از برخی جلبک‌ها، ماهی قزل‌آلا، پوسته میگو و غیره استحصال می‌شود و قابلیت استفاده در صنایع غذایی (نوشیدنی‌ها، بستنی، دسر، آب‌نبات و تولیدات گوشتی) علاوه بر مصارف تغذیه حیوانات آبی و حیوانات خانگی را دارد (Delgado-Vargas & Paredes, 2002). تحقیقات مختلف اثرات درمانی و دارویی آستاگزانتین

را بررسی و نتایج مثبتی گزارش کرده‌اند. این رنگدانه دارای فعالیت ضد سرطانی است و در پیشگیری از بیماری‌های قلبی و التهابی و بهبود سلامت چشم نیز کارایی دارد. اثرات ضد التهابی و ضد دیابتی آستاگزانتین نیز ثابت شده است (Brandão, Coêlho, Souza, & Silva, 2019). با توجه به خواص مذکور در آستاگزانتین، استخراج آن از منابع طبیعی جهت کاربرد در آبی‌پروری و صنایع غذایی ضرورت می‌یابد. برای استخراج آستاگزانتین از میگو تحقیقات بسیاری از جمله استخراج به‌وسیله حلال‌های مختلف با کمک فراصوت، تخمیر میکروبی، استخراج با روغن، مایع یونی، خیساندن، سوکسله و فراصوت، سیال فوق بحرانی، فراصوت به روش حلال سبز و روش‌های استخراج آنزیمی، مایکروویو و پالس الکتریکی مورد مطالعه قرار گرفته است (Saini & Keum, 2018). به‌طور کلی، چندین فناوری می‌تواند در فرآیند استخراج کارآمد آستاگزانتین مورد استفاده قرار گیرد. هوشمند و همکاران (Hooshmand, Shabanpour, Moosavi-Nasab, Alishahi, & Golmakani, 2021)، در بررسی بهینه‌سازی استخراج رنگدانه‌های کاروتنوئیدی از ضایعات خرچنگ آبی (*Portunus pelagicus*) و میگوی ببری سبز (*Penaeus semisulcatus*) به کمک امواج فراصوت و مایکروویو نشان دادند، ضایعات خرچنگ و میگو می‌توانند به‌عنوان ارزان‌ترین مواد اولیه جهت استخراج رنگدانه‌های کاروتنوئیدی و جایگزینی با رنگ‌های مصنوعی استفاده شوند (Hooshmand et al., 2021). مایعات یونی دارای خواص فیزیکوشیمیایی منحصر به فردی مانند فشاربخار ناچیز، غیرقابل اشتعال بودن، پایداری حرارتی بالا و تجدیدپذیری هستند (مشابه مایع یونی مورد استفاده در این تحقیق). از سوی دیگر، دوزهای پایین مایعات یونی در آزمایشات حیوانی و آزمایشگاهی منجر به آسیب سلولی نشده است. در نتیجه، مایعات یونی جایگزین‌های بالقوه‌ای برای حلال‌های آلی فرار در صنایع غذایی هستند (Martins, Braga, & de Rosso, 2017). با این حال، ویسکوزیته اکثر مایعات یونی بیشتر از حلال‌های آلی است که در نتیجه منجر به کاهش نرخ انتقال جرم می‌شود. میکروامولسیون روشی امیدورکننده است که امکان استخراج انتخابی مولکول‌های زیستی را در صنایع غذایی و شیمیایی فراهم می‌کند (Amiri-Rigi & Abbasi, 2019). از لحاظ تعریف، امولسیون یک سامانه نامتجانس از دو مایع غیرقابل امتزاج است که در چنین سامانه‌ای یکی از مایع‌ها در مایع دیگر به صورت قطره‌هایی با قطر بیش از ۰/۱ میکرون پراکنده می‌شود. در سامانه‌های غذایی این دو مایع اغلب روغن و آب هستند؛ در صورت پراکنده شدن قطرات روغن در فاز آب (به‌عنوان فاز پیوسته) امولسیون از نوع روغن در آب (O/W) تشکیل می‌شود و اگر قطرات آب در روغن پراکنده شوند، امولسیون از نوع آب در روغن

استفاده از آنها بصورت میکروامولسیون در جریان فرآیندهای استخراجی کاملاً نوآورانه می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

### مواد اولیه

میگوی موزی و سخت‌پوست گاماروس با تأیید نوع گونه از پژوهشکده اکولوژی خلیج فارس تهیه شدند. آستاگزانتین تجاری با خلوص  $< 98\%$ ، DPPH<sup>۱</sup> و BHT<sup>۲</sup> از شرکت سیگما آلد ریچ خریداری شدند. اتانول، پروپانول و اتیل استات با خلوص کروماتوگرافی و تری بوتیل اکتیل فسفونیوم بروماید<sup>۳</sup> و تریتون ایکس ۱۰۰<sup>۴</sup> با خلوص  $< 98\%$  و نرمال بوتانول با خلوص  $99/9\%$  از شرکت سیگما آلد ریچ تهیه شدند. روغن آفتابگردان تصفیه شده بدون آنتی‌اکسیدان نیز از شرکت حیات خریداری شد. کلیه آزمایشات در معاونت غذا و داروی دانشگاه علوم پزشکی هرمزگان انجام گرفت.

### آماده‌سازی نمونه‌ها

پوسته میگوی موزی و سخت‌پوست گاماروس با آب مقطر به خوبی شسته شدند و در خشک کن انجمادی (Christ-Alpha-LD freeze dryer، آلمان)، در  $50^{\circ}\text{C}$  - درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت خشک و سپس پودر شدند. پودرهای حاصل را با الک آزمایشگاهی دارای مش کوچکتر از ۱۵ میکرومتر الک کرده و در یخچال نگهداری شدند (Gao et al., 2020).

### آماده‌سازی حلال

حلال سبز مورد استفاده میکروامولسیون مایع یونی در آب است که با توجه به تشکیل خود به خودی میکروامولسیون و عدم نیاز به صرف انرژی زیاد فقط با هم زدن و به روش زیر تهیه شد (Gao et al., 2020). تری بوتیل اکتیل فسفونیوم بروماید: تریتون ایکس ۱۰۰ - نرمال بوتانول (۳ به ۱): آب، با نسبت جرمی  $0/13 : 0/25 : 0/62$  مخلوط شد. این ترکیبات به ترتیب فاز غیر قطبی، سورفاکتانت-کمک سورفاکتانت و فاز قطبی میکروامولسیون را شامل می‌شوند. این حلال در دمای اتاق قابل نگهداری است. برای نمونه شاهد از اتانول استفاده شد.

### نحوه استخراج

حلال‌ها در دمای محیط به نسبت‌های ۵ برابر، ۱۲/۵ برابر و ۲۰ برابر (که با بررسی پژوهش‌های پیشین استخراج آستاگزانتین از منابع

(W/O) خواهد بود، در حالی که میکروامولسیون‌ها نوعی سامانه امولسیونی هستند که برخلاف امولسیون‌ها از لحاظ ترمودینامیکی پایدارند و اندازه فاز پراکنده در آن‌ها حدود  $100-10$  نانومتر است. اصولاً برای تهیه یک سامانه میکروامولسیونی به سه جزء اساسی شامل آب، روغن و سورفاکتانت (معمولاً همراه با یک کوسورفاکتانت) نیاز است؛ با مخلوط کردن نسبت‌های مناسب از این اجزاء، سامانه میکروامولسیون به خودی خود شکل می‌گیرد. در نتیجه، میکروامولسیون‌ها سامانه‌هایی با ظاهری شفاف، با گرانیوی کم، و بسیار پایدارند و برخلاف امولسیون‌ها، با مصرف مقدار بسیار کم انرژی یا بدون مصرف انرژی شکل می‌گیرند (Radi & Abbasi, 2013). میکروامولسیون‌ها ویژگی‌های مطلوبی از جمله پایداری کامل، ویسکوزیته کم و ظرفیت انحلال‌پذیری زیاد برای ترکیبات آبدوست و چربی دوست دارند (Amiri-Rigi, Abbasi, & Scanlon, 2016). تا به امروز، میکروامولسیون‌ها برای استخراج پروتئین‌ها، رنگدانه‌ها و عناصر کمیاب استفاده شده‌اند. گائو و همکاران (Gao et al., 2020)، مطالعه‌ای با هدف بازیابی آستاگزانتین از ضایعات میگو و استخراج به کمک فراصوت با استفاده از میکروامولسیون مایع یونی در آب (متشکل از مایع یونی، آب، تریتون ایکس ۱۰۰ و نرمال بوتانول) انجام دادند. نتایج نشان داد که در مقایسه با حلال‌های آلی (اتانول، استون و دی‌متیل سولفوکسید)، میکروامولسیون مایع یونی در آب به دلیل فعل و انفعالات الکترواستاتیک قوی‌تر و برهمکنش‌های پیوند هیدروژنی باعث افزایش قابل توجه استخراج آستاگزانتین شدند. به‌طور کلی میکروامولسیون مبتنی بر مایع یونی جایگزین مناسبی برای روش‌های مرسوم در استخراج و بازیابی آستاگزانتین از منابع زیستی طبیعی است (Gao et al., 2020). این پژوهش با هدف مقایسه استخراج آستاگزانتین تحت شرایط خیس‌اندن به مدت ۲۴ ساعت با حلال آلی (ترکیب اتانول با اتیل استات)، حلال سبز (میکروامولسیون مایع یونی تری بوتیل اکتیل فسفونیوم بروماید بعنوان بخش هیدروفوب در آب که فسفونیوم بخش کاتیونی و بروماید بخش آنیونی را تشکیل می‌دهند) و روغن گیاهی (روغن آفتابگردان) از پوسته میگوی موزی (Fenneropenaeus merguensis) و سخت‌پوست گاماروس (Pontogammarus maeoticus) انجام گرفت. علاوه بر این استفاده از این منابع برای استخراج آستاگزانتین برای اولین بار مورد مطالعه قرار می‌گیرد و در صورت حصول آستاگزانتین از آن‌ها، به‌عنوان منابع نوین استخراج معرفی می‌گردند. همچنین به دو حلال کم عارضه (روغن آفتابگردان و مایع یونی) برای مصارف غذایی پرداخته می‌شود. ضمن اینکه استفاده از مایع یونی به‌عنوان حلال سبز در سال‌های اخیر مطرح گردیده و

### آنالیز آستاگزانتین با اسپکتروفوتومتر

منحنی استاندارد آستاگزانتین با تهیه رقت‌های مختلف آستاگزانتین خالص در غلظت‌های ۰-۱ میکروگرم بر میلی لیتر با استفاده از ۲- پروپانول بعنوان حلال رنگدانه خالص آستاگزانتین رسم گردید. جذب آستاگزانتین عصاره‌ها در طول موج ۴۷۸ نانومتر (OD<sub>478</sub>) دستگاه اسپکتروفوتومتر UV-VIS اندازه‌گیری شد و با آزمایش الکل حاوی آستاگزانتین، جذب در سه تکرار ثبت شد. میزان آستاگزانتین عصاره‌ها با استفاده از معادله (۲) محاسبه گردید (Khoo et al., 2020).

$$C(mg/ml) = \frac{OD_{478}}{1.97} \quad (2)$$

C: غلظت آستاگزانتین در ۲-پروپانول

DO: جذب در ۴۷۸ نانومتر

$$y = 1.97X \quad (3)$$

y: میزان جذب در ۴۷۸ نانومتر

X: غلظت بر حسب میلی گرم بر میلی لیتر

### محاسبه درصد بازیافت آستاگزانتین

برای این منظور عصاره‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. درصد بازیافت آستاگزانتین با محاسبه درصد آستاگزانتین استخراج شده تحت هر یک از شرایط استخراج از مقدار آستاگزانتین کل نمونه با توجه به معادله (۴) حاصل شد (Ruen-ngam, Shotipruk, & Pavasant, 2010).

$$\% \text{بازیابی} = \frac{\text{عصاره آستاگزانتین}}{\text{آستاگزانتین کل}} \times 100 \quad (4)$$

### فعالیت مهاررادیکال ۲،۲-دیفنیل-۱-پیکریل هیدرازیل (DPPH)

آستاگزانتین‌های استخراج شده را در یخچال نگهداری کرده تا جهت بررسی خاصیت آنتی‌اکسیدانی آستاگزانتین مورد استفاده قرار گیرند. محلول اتانولی DPPH در غلظت ۰/۲ میلی‌مولار تهیه شد. ۲ میلی‌لیتر از غلظت‌های مختلف عصاره‌ها (۰/۷۵-۰/۰۵) جهت بررسی روند تغییرات در سه نوع حلال مورد استفاده با ۲ میلی‌لیتر از محلول اتانولی DPPH ترکیب شدند. جذب نمونه‌ها پس از ۳۰ دقیقه نگهداری در دمای محیط و شرایط تاریکی در ۵۱۷ نانومتر و بعد از صفر کردن جذب دستگاه برای هر نمونه از حلال‌ها اندازه‌گیری و فعالیت مهاررادیکال DPPH براساس معادله (۵) محاسبه شد. این آزمون با قابلیت آنتی‌اکسیدانی، آنتی‌اکسیدان سنتزی BHT بعنوان شاهد در غلظت‌های مشابه مقایسه شد (X. Zhao, Zhang, Fu, Zhu, & Zhang, 2016).

دیگر تعیین گردید) با پودر نمونه‌ها مخلوط شد و به مدت ۲۴ ساعت تحت روش خیساندن بدون هم زدن در دمای محیط قرار گرفت. سپس مخلوط حاصله را به مدت ۱۰ دقیقه با ۸۵۰۰ دور در دقیقه تحت دمای محیط سانتریفیوژ (سانتریفیوژ یخچال دار (Eppendorf، آلمان)) کرده، قسمت بالایی نمونه را جدا کرده و قسمت ته‌نشین شده به شیوه قبل مجدداً تحت استخراج قرار گرفت (جهت در نظر گرفتن بقایای احتمالی در قسمت ته‌نشین شده) و پس از سانتریفیوژ، بخش بالایی آن با مقدار قبل ترکیب شده و با فیلتر ۰/۴۵ میکرومتری از جنس تفلون فیلتر شد تا برای آنالیز آماده گردد (Parjikolaie et al., 2016).

### آزمون‌ها

#### ارزیابی خواص فیزیکی میکرو امولسیون

برای اندازه‌گیری رسانایی میکروامولسیون از دستگاه هدایت‌سنج inoLab ساخت کشور آلمان استفاده شد. برای اندازه‌گیری چگالی میکرو امولسیون از چگالی‌سنج ۵۰<sup>۱</sup> میکرولیتر ساخت کشور آلمان استفاده شد. قطر میکروامولسیون بادستگاه پراکنش دینامیکی نور<sup>۲</sup> (DLS) (Horiba، ژاپن) تعیین شد.

#### ارزیابی محتوای کل کاروتنوئیدها (آستاگزانتین کل)

محتوای کاروتنوئید کل با استفاده از اندازه‌گیری‌های اسپکتروفوتومتری طبق روش گزارش شده توسط هاو و همکاران (Haque, Dutta, Thimmanagari, & Chiang, 2016) تعیین شد. جهت تعیین محتوای کل کاروتنوئیدها، جذب ۴ میلی‌لیتر از محلول‌های استخراج شده توسط اسپکتروفوتومتر<sup>۳</sup> (دستگاه اسپکتروفوتومتر UV-Vis (Shimadzu، ژاپن)) در طول موج ۴۵۰ نانومتر پس از صفر کردن جذب دستگاه برای هر نوع حلال اندازه‌گیری شد و از ضریب خاموشی ویژه آستاگزانتین ۲۱۰۰ استفاده شد. براساس مطالعات پیشین انجام شده در این رابطه، محتوای کاروتنوئید کل در این طول موج، آستاگزانتین کل در نظر گرفته شد. بازده محتوای آستاگزانتین کل<sup>۴</sup> (TAC) با استفاده از معادله (۱) برآورد شد (Haque et al., 2016).

$$TAC = \frac{V \times A \times 100}{21 \times W} \quad (1)$$

V: حجم حلال مورد استفاده (ml)

A: جذب در طول موج ۴۵۰ نانومتر

W: وزن خشک ماده (g)

3- Spectrophotometry

4- total astaxanthin content

1- Pycnometer

2- Dynamic Light Scattering (DLS)

### ارزیابی محتوای کل کاروتنوئیدها

نتایج مربوط به محتوای کل کاروتنوئید استخراج شده از نمونه‌های میگوی موزی و سخت‌پوست گاماروس با استفاده از حلال‌های متفاوت (اتانول، مخلوط اتانول: اتیل استات (۱:۲)، میکرومولسیون مایع یونی در آب، حلال روغنی) در نسبت‌های مختلف (۵، ۱۲/۵ و ۲۰ برابر) حلال به نمونه در **جدول ۱**، نشان داده شده است. طبق نتایج بدست آمده از **جدول ۱**، تفاوت در محتوای کل کاروتنوئید استخراج شده از میگوی موزی و سخت‌پوست گاماروس در نسبت‌های متفاوت حلال به نمونه معنی‌دار بود ( $p < 0/05$ ). در بین حلال‌های مختلف استفاده شده برای استخراج کاروتنوئید موجود در میگوی موزی و سخت‌پوست گاماروس حلال میکرومولسیون مایع یونی در آب بیشترین مقدار محتوای کل کاروتنوئید را نسبت به اتانول و سایر حلال‌ها نشان داد که این افزایش از لحاظ آماری نیز معنی‌دار بود ( $p < 0/05$ ). در بین نمونه‌های میگو و سخت‌پوست گاماروس نیز میزان کاروتنوئید کل استخراج شده از میگوی موزی بیشتر از سخت‌پوست گاماروس بود. سومیا و همکاران (Sowmya, Ravikumar, Vivek, Rathinaraj, & Sachindra, 2014) در مطالعه خود گزارش دادند، میگو یک منبع مهم برای استخراج کاروتنوئیدها بویژه آستاگزانتین می‌باشد، که با نتایج حاصل از این پژوهش نیز مطابقت دارد. همچنین مقدار کل کاروتنوئید استخراج شده در نسبت‌های مختلف حلال به نمونه با افزایش نسبت‌ها روند صعودی یا کاهشی مرتبی را نشان نداد اما در نسبت ۵ برابر حلال به نمونه میزان کاروتنوئید کل استخراج شده در همه حلال‌ها بیشتر از سایر نسبت‌ها بود این اختلاف از لحاظ آماری نیز معنی‌دار بود ( $p < 0/05$ ). همچنین در بین حلال‌های مختلف استفاده شده در این پژوهش، حلال میکرومولسیون مایع یونی در آب بالاترین میزان کاروتنوئید استخراج شده را نسبت به سایر حلال‌ها در تمام نسبت‌های حلال به نمونه نشان داد. تاکنون از حلال‌های آلی مختلفی برای استخراج کاروتنوئیدها از منابع مختلف استفاده شده است که معمولاً پیشنهاد مناسب‌ترین حلال، به دلیل تفاوت در قطبیت انواع کاروتنوئیدهای مختلف، پیچیدگی ساختارماتریکس (بافت) نمونه و ترکیبات موجود در آن، به سادگی امکان‌پذیر نیست. معمولاً حلال‌های غیرقطبی مثل هگزان انتخاب خوبی برای استخراج کاروتنوئیدهای غیرقطبی نظیر کاروتن‌ها هستند درحالی‌که حلال‌های قطبی مانند اتانول و استون برای کاروتنوئیدهای قطبی نظیر گزارتوفیل‌ها مناسب‌تر هستند (Amorim-Carrilho, Cepeda, Fente, & Regal, 2014). بنابراین علت بالا بودن کاروتنوئیدهای استخراج شده بویژه آستاگزانتین توسط حلال میکرومولسیون مایع یونی در آب را می‌توان به انحلال بهتر رنگدانه‌ها و تطابق قطبیت در این حلال نسبت به سایر حلال‌های مورد استفاده در پژوهش نسبت داد.

$$\text{DPPH} = \left[ A_0 - \left( A - \frac{A_b}{A_0} \right) \right] \times 100 \quad (5)$$

A<sub>0</sub>: جذب محلول DPPH بدون نمونه

A: جذب نمونه مخلوط با محلول DPPH

A<sub>b</sub>: جذب نمونه بدون محلول DPPH

### آنالیز آماری

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از طرح آماری آنالیز واریانس یکطرفه ANOVA در سطح خطای ۰/۰۵ با نرم‌افزار SPSS 26.0 انجام گرفت. نتایج به صورت میانگین  $\pm$  انحراف معیار گزارش شد. رسم نمودارها در نرم‌افزار Excel 2010 انجام شد. بهترین شرایط استخراج آستاگزانتین و بهترین منبع برای استخراج بیشترین میزان آستاگزانتین با به کارگیری دو منبع سخت‌پوست گاماروس و میگوی موزی، حلال‌های اتانول به عنوان شاهد، مخلوط اتانول: اتیل استات (۱:۲)، حلال روغنی و میکرومولسیون مایع یونی در آب، در نسبت‌های متفاوت حلال به نمونه ۵، ۱۲/۵ و ۲۰ برابر تعیین شد. تمامی آزمون‌ها سه بار انجام شد.

### نتایج و بحث

#### ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی میکرومولسیون

تعیین چگالی، رسانایی و قطر از جمله ویژگی‌های مورد آزمون میکرومولسیون در این پژوهش بودند. مطالعه خواص فیزیکی حلال و وابستگی دمایی آن‌ها برای طراحی و عملکرد مناسب فرآیندهای جداسازی مهم است. با این حال، خواص فیزیکی میکرومولسیون‌های مبتنی بر مایع یونی کمیاب است و در مطالعات قبلی نادیده گرفته شده است. در این مطالعه چگالی میکرومولسیون در محدوده ۰/۹۷۱۵۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب، قطر آن‌ها ۱۵/۸ نانومتر و رسانایی آن‌ها ۳۱۲ میکروزیمنس در دمای ۲۷/۱ درجه سانتی‌گراد تعیین شد. گائو و همکاران (Gao et al., 2020)، مطالعه‌ای با هدف بازیافت آستاگزانتین از ضایعات میگو با استفاده از میکرومولسیون مایع یونی در آب انجام داده و ویژگی‌های فیزیکی میکرومولسیون را با حلال‌های آلی، مشابه پژوهش حاضر مورد مقایسه قرار دادند که نتایج چگالی در محدوده‌ی دمایی محیط و میزان رسانایی خوب و قابل قبول با مطالعه ما همخوانی داشت. رسانایی بالای میکرومولسیون مایع یونی نسبت حلال‌های آلی به دلیل وجود گونه‌های یونی محلول است که به صورت آزادانه حضور داشته و توانایی حرکت دارند. از طرف دیگر کوچک بودن اندازه ذرات در میکرومولسیون نشان دهنده ثبات و یکنواختی عالی می‌باشد. هدایت گری الکتریکی بالای میکرومولسیون مایع یونی در آب باعث برهمکنش بهتر حلال با نمونه و استخراج بالاتر رنگدانه می‌شود (Gao et al., 2020).

جدول ۱- محتوای کل کارتنوئیدها (میلی لیتر بر گرم) در میگوی موزی و سخت پوست گاماروس در نسبت‌های مختلف حلال به نمونه

Table 1- Total content of carotenoids in *Pontogammarus maeoticus* and *Fenneropenaeus merguensis* in different solvent to sample ratio

حلال‌ها Solvents	سخت پوست گاماروس <i>Pontogammarus maeoticus</i>			میگوی موزی <i>Fenneropenaeus merguensis</i>		
	نسبت حلال به نمونه Solvent to sample ratio			نسبت حلال به نمونه Solvent to sample ratio		
	5	12.5	20	5	12.5	20
اتانول Ethanol	45.76± 2.61 <sup>CA</sup>	36.39± 1.58 <sup>BB</sup>	40.39± 2.27 <sup>CB</sup>	44.37±1.48 <sup>CA</sup>	39.80±0.57 <sup>CB</sup>	43.39± 1.56 <sup>CA</sup>
مخلوط اتانول: اتیل استات (۱:۲) (Mixture of ethanol: ethyl acetate (1:2)	67.00±1.74 <sup>BA</sup>	39.24±0.03 <sup>BC</sup>	43.69± 0.04 <sup>BB</sup>	81.75±1.18 <sup>BA</sup>	43.28±0.70 <sup>BC</sup>	46.39±1.25 <sup>BB</sup>
میکروامولسیون مایع یونی در آب Ionic liquid microemulsion in water	78.07± 0.67 <sup>AA</sup>	62.17±1.62 <sup>AC</sup>	67.40±1.78 <sup>AB</sup>	88.98±1.33 <sup>AA</sup>	79.58±0.46 <sup>AB</sup>	77.16± 1.08 <sup>AC</sup>
حلال روغنی Oily solvent	48.25± 0.83 <sup>CA</sup>	37.69±1.18 <sup>BC</sup>	40.55± 0.66 <sup>CB</sup>	46.30 ± 0.31 <sup>CA</sup>	42.15±1.77 <sup>BB</sup>	46.78±1.6 <sup>BA</sup>

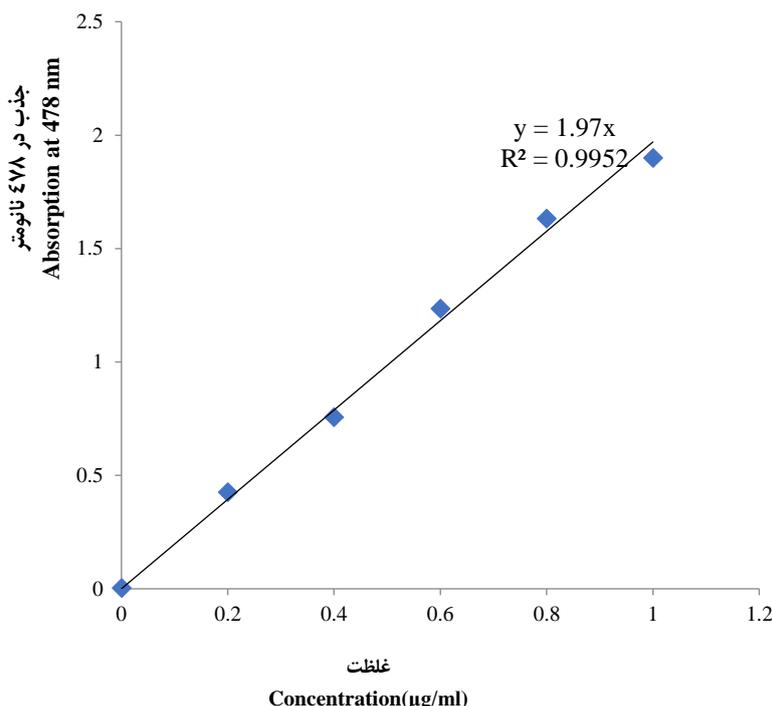
داده‌ها به صورت میانگین ± انحراف معیار (n=3) گزارش شده‌اند. حروف غیرمشابه کوچک در هر ستون نشان دهنده وجود اختلاف معنی‌دار بین حلال‌ها است (p<0/05). حروف بزرگ در هر ردیف نشان دهنده تفاوت معنی‌داری (p<0/05) در میان نسبت‌ها است.

Data are reported as mean ± standard deviation (n=3). Small non-similar letters in each column indicate the existence of a significant difference (p < 0.05) between the solvents. The capital letters in each row indicate a significant difference (p < 0.05) among the ratios.

### آنالیز آستاگزانتین با اسپکتروفتومتر

**شکل ۱**، منحنی استاندارد آستاگزانتین با تهیه رقت‌های مختلف آستاگزانتین خالص در غلظت‌های ۱-۰ میکروگرم بر میلی لیتر با استفاده از ۲-پروپانول در طول موج ۴۷۸ نانومتر را نشان می‌دهد. در پژوهش حاضر برای محاسبه منحنی استاندارد از رگرسیون خطی استفاده شد. ضرایب تعیین ( $R^2$ ) مقدار (۰/۹۹۵۲) خطی بودن مطلوب را در محدوده انتخاب شده برای آستاگزانتین نشان می‌دهد که در **شکل ۱** نشان داده شده است. نتایج حاصل از استخراج آستاگزانتین با استفاده از حلال‌های مختلف (اتانول، مخلوط اتانول: اتیل استات (۱:۲)، حلال میکروامولسیون مایع یونی در آب و حلال روغنی) در نسبت‌های ۵ برابر، ۱۲/۵ و ۲۰ برابر حلال به نمونه در **جدول ۲**، نشان داده شده است. نتایج بدست آمده نشان داد که میزان استخراج آستاگزانتین از میگوی موزی بالاتر از سخت پوست گاماروس است. آنالیز آماری نشان داد که میزان آستاگزانتین استخراج شده با استفاده از حلال‌های مختلف از میگوی موزی و سخت پوست گاماروس در نسبت ۱۲/۵ برابر نسبت به سایر نسبت‌ها بیشترین مقدار است. طبق نتایج حاصل از **جدول ۲**، در نسبت ۵ برابر میزان استخراج آستاگزانتین از میگوی موزی با استفاده از حلال روغنی کمترین مقدار بود اما در سایر نسبت‌ها حلال اتانول کمترین مقدار استخراج آستاگزانتین را نشان داد. در سخت پوست گاماروس نیز

در تمام نسبت‌ها همواره میزان استخراج آستاگزانتین با استفاده از حلال اتانول کمترین مقدار را نشان داد، این نتایج از لحاظ آماری نیز معنی‌دار بود (p < 0/05). علاوه بر این در بین حلال‌های متفاوت (اتانول، مخلوط اتانول: اتیل استات (۱:۲)، میکروامولسیون مایع یونی در آب و حلال روغنی) هم در میگوی موزی و هم در سخت پوست گاماروس حلال میکروامولسیون مایع یونی در آب بیشترین مقدار آستاگزانتین استخراج شده را در همه‌ی نسبت‌ها نشان داد. به طور کلی در بین دو نمونه میگوی موزی و سخت پوست گاماروس در نسبت‌های متفاوت حلال‌ها، نمونه میگوی موزی در نسبت ۱۲/۵ برابر حلال میکروامولسیون مایع یونی در آب بیشترین میزان استخراج آستاگزانتین را نشان داد. در نسبت‌های بالاتر حلال به نمونه بدلیل محدود بودن ظرفیت انحلال حلال روند کاهشی را نشان داد. بنابراین حلال میکروامولسیون مایع یونی در آب به عنوان حلال مناسب، نسبت ۱۲/۵ برابر حلال به نمونه به عنوان نسبت مناسب و میگوی موزی به عنوان نمونه مناسب انتخاب شدند. در مطالعه تان و همکاران (Tan et al., 2021)، از روش‌های مختلف نظیر میکروفلوئوریمتری، فشار بالا، مایعات یونی، آنزیمی و حلال اسیدکلریدریک جهت استخراج آستاگزانتین استفاده شد. نتایج نشان داد که بیشترین راندمان استخراج آستاگزانتین مربوط به روش استخراج با اسیدکلریدریک و مایعات یونی است که با تحقیق حاضر همخوانی دارد (Tan et al., 2021).



شکل ۱- منحنی استاندارد آستاگزانتین در غلظت‌های ۰-۱ میکروگرم بر میلی‌لیتر با استفاده از ۲-پروپانول  
 Fig. 1. Standard curve of astaxanthin in concentrations of 0-1 µg/ml using 2-propanol

جدول ۲- آستاگزانتین (میلی‌گرم بر میلی‌لیتر) استخراج شده از میگوی موزی و سخت‌پوست گاماروس در نسبت‌های مختلف حلال به نمونه  
 Table 2- Astaxanthin extracted from *Pontogammarus maoticus* and *Fenneropenaeus merguensis* in different solvent to sample ratio

حلال‌ها Solvents	سخت‌پوست گاماروس <i>Pontogammarus maoticus</i>			میگوی موزی <i>Fenneropenaeus merguensis</i>		
	نسبت حلال به نمونه Solvent to sample ratio			نسبت حلال به نمونه Solvent to sample ratio		
	5	12.5	20	5	12.5	20
اتانول Ethanol	21.47± 2.32 <sup>bc</sup>	34.10± 1.26 <sup>dA</sup>	30.16± 1.17 <sup>dB</sup>	27.20± 1.18 <sup>cC</sup>	37.60± 1.49 <sup>cA</sup>	32.21± 0.97 <sup>dB</sup>
مخلوط اتانول: اتیل استات (۱:۲) (Mixture of ethanol: ethyl acetate (1:2)	35.53± 0.83 <sup>aB</sup>	38.27± 0.61 <sup>cA</sup>	34.59± 1.13 <sup>cB</sup>	38.46± 1.03 <sup>bc</sup>	52.47± 0.53 <sup>ba</sup>	40.87± 0.73 <sup>bb</sup>
میکروامولسیون مایع یونی در آب Ionic liquid microemulsion in water	36.39± 1.35 <sup>aC</sup>	62.91± 0.48 <sup>aA</sup>	59.17± 0.20 <sup>aB</sup>	54.22± 0.91 <sup>aC</sup>	77.44± 1.09 <sup>aA</sup>	72.65± 0.67 <sup>aB</sup>
حلال روغنی Oily solvent	34.67± 0.74 <sup>ac</sup>	43.24± 0.90 <sup>bA</sup>	38.35± 0.44 <sup>bB</sup>	23.38± 0.89 <sup>dC</sup>	38.24± 0.97 <sup>cA</sup>	34.58± 0.47 <sup>cB</sup>

داده‌ها به صورت میانگین ± انحراف معیار (n=3) گزارش شده‌اند. حروف غیرمشابه کوچک در هر ستون نشان دهنده وجود اختلاف معنی‌دار بین حلال‌ها است (p<0/05). حروف بزرگ در هر ردیف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌داری (p<0/05) در میان نسبت‌ها است.

Data are reported as mean ± standard deviation (n=3). Small non-similar letters in each column indicate the existence of a significant difference (p < 0.05) between the solvents. The capital letters in each row indicate a significant difference (p < 0.05) among the ratios.

و دی متیل سولفوکسید)، میکروامولسیون مایع یونی در آب به دلیل فعل و انفعالات الکترواستاتیک قوی‌تر و برهمکنش‌های پیوند هیدروژنی باعث افزایش قابل توجه استخراج آستاگزانتین شدند (Gao et al., 2020). که با نتایج حاصل از پژوهش حاضر نیز مطابقت دارد. به طور

گائو و همکاران (Gao et al., 2020)، مطالعه‌ای با هدف بازیابی آستاگزانتین از ضایعات میگو (*Penaeus vannamei*) و استخراج به کمک فراصوت با استفاده از میکروامولسیون مایع یونی در آب انجام دادند. نتایج نشان داد که در مقایسه با حلال‌های آلی (اتانول، استون،

بررسی فعالیت به دام اندازی رادیکال آزاد DPPH یکی از روش‌های تعیین فعالیت آنتی‌اکسیدانی می‌باشد. در این روش رنگ ارغوانی رادیکال‌های آزاد DPPH در اثر آنتی‌اکسیدان‌های موجود در عصاره خنثی شده و بی‌رنگ می‌گردد. لذا درجه بی‌رنگ شدن این ترکیب بیانگر قدرت به دام اندازی رادیکال آزاد توسط آنتی‌اکسیدان‌های موجود می‌باشد (Nikmaram, Mousavi, Emam-Djomeh, Kiani, & Razavi, 2015). نتایج حاصل از مهار رادیکال DPPH توسط غلظت‌های متفاوت آستاگزانتین استخراج شده با حلال اتانول، مخلوط اتانول: اتیل استات (۱:۲)، حلال روغنی و حلال میکرومولسیون مایع یونی در آب در شکل ۲، نشان داده شده است. با افزایش غلظت، میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی آستاگزانتین استخراج شده توسط حلال‌های مختلف افزایش یافت. در بین حلال‌های استفاده شده برای استخراج آستاگزانتین، آستاگزانتین استخراج شده توسط حلال روغنی فعالیت آنتی‌اکسیدانی بیشتری نسبت به حلال مایع یونی و مخلوط اتانول: اتیل استات (۱:۲) نشان داد. اگر چه رنگدانه استخراج شده توسط حلال روغنی فعالیت آنتی‌اکسیدانی نزدیک به BHT داشت، اما همواره میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی BHT نسبت به این رنگدانه بالاتر بود. به‌طور کلی افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی آستاگزانتین استخراج شده توسط حلال روغنی عاری از آنتی‌اکسیدان نسبت به سایر حلال‌ها را می‌توان به حفاظت بهتر رنگدانه در روغن آفتابگردان نسبت داد. بعلاوه رنگدانه آستاگزانتین به سبب داشتن ماهیت چربی دوست در حلال روغن تمرکز بهتری داشته و از تماس با اکسیژن محیط دور مانده و خواص آنتی‌اکسیدانی خود را بیشتر حفظ می‌کند. در حلال مایع یونی علی‌رغم داشتن بالاترین میزان از رنگدانه بدلیل اکسید شدن جزئی یا آسیب‌های احتمالی بعدی طی دوره نگهداری خواص آنتی‌اکسیدانی کمتری نسبت به حلال روغن دارد. با توجه به نتایج این پژوهش می‌توان دریافت که بسته به نوع حلال مورد استفاده برای استخراج آستاگزانتین فعالیت آنتی‌اکسیدانی نیز متفاوت خواهد بود. فعالیت آنتی‌اکسیدانی آستاگزانتین در بسیاری از تحقیقات بیان شده است. آستاگزانتین به‌دلیل ساختمان مولکولی‌اش، خواص شیمیایی بسیار خاصی داشته و نقش مهمی در حذف رادیکال‌های آزاد و فلزات سنگین دارد. حضور قسمت‌های کتو بر روی حلقه یونی مسئول خواص آنتی‌اکسیدانی بالا این ترکیب می‌باشد. آستاگزانتین، هم در قسمت زنجیره کنژوگه غیر اشباع (پلی-انی) و هم در قسمت حلقه‌های ترمینال (حلقه‌های C3) رادیکال‌های آزاد را به دام می‌اندازد (Kishimoto et al., 2010).

کلی میکرومولسیون مبتنی بر مایع یونی جایگزین مناسبی برای روش‌های مرسوم در استخراج و بازیابی آستاگزانتین از منابع زیستی طبیعی است. روهی‌نژاد و همکاران (Roohinejad, Oey, Everett, & Niven, 2014)، استخراج بتاکاروتن از تفاله هویج تیمار شده با میدان الکتریکی پالسی با استفاده از میکرومولسیون روغن در آب را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که میزان استخراج بتاکاروتن با استفاده از میکرومولسیون آب در روغن مونوکاپریلوکاپرات گلیسرول<sup>۱</sup> در مقایسه با هگزان ۱۰۰ درصد بیشتر بود (Roohinejad et al., 2014). این نتایج با نتایج پژوهش حاضر نیز مشابهت دارد. هوشمند و همکاران (Hooshmand et al., 2017) بهینه‌سازی استخراج کاروتنوئیدها از ضایعات سخت‌پوستان از طریق استخراج با حلال آلی و روغن گیاهی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد در بین حلال‌ها، استون و روغن آفتابگردان بیشترین میزان عملکرد برای استخراج کاروتنوئید را داشتند. این مطالعه نشان داد که استخراج کاروتنوئیدها به روش حلال آلی کارآمدتر از روش روغن گیاهی است و میزان بازده کاروتنوئید در ضایعات میگو بیشتر از ضایعات خرچنگ است (Hooshmand et al., 2017). نتایج حاصل از این مطالعه نیز با پژوهش حاضر مطابقت دارد.

#### درصد بازیافت آستاگزانتین

درصد بازیافت آستاگزانتین با محاسبه درصد آستاگزانتین استخراج شده تحت هر یک از شرایط استخراج از مقدار آستاگزانتین کل نمونه (TAC) با توجه به معادله ۴، بدست آمد و نتایج حاصل از درصد بازیافت آستاگزانتین از نمونه‌های میگوی موزی و سخت‌پوست گاماروس با استفاده از حلال‌های مختلف در نسبت‌های ۵، ۱۲/۵ و ۲۰ برابر حلال به نمونه در جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج حاصل نشان داد که درصد بازیافت آستاگزانتین از نمونه میگوی موزی با استفاده از حلال میکرومولسیون مایع یونی در آب در نسبت ۱۲/۵ برابر حلال به نمونه بیشترین مقدار است. از لحاظ آماری نیز این یافته‌ها معنی‌دار بود ( $p < 0/05$ ). به‌طور کلی تحت شرایط این آزمایش هر چه میزان استخراج آستاگزانتین بیشتر باشد درصد بازیافت آستاگزانتین نیز بیشتر خواهد بود این نتایج با نتایج حاصل از آنالیز آستاگزانتین با اسپکتروفتومتر در پژوهش حاضر نیز مطابقت دارد.

#### فعالیت مهار رادیکال ۲،۲-دیفنیل-۱-پیکریل هیدرازیل (DPPH)

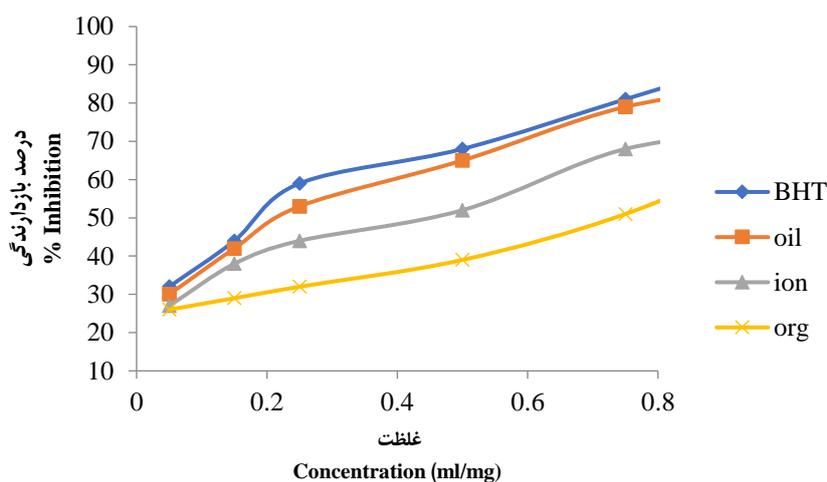
جدول ۳- درصد بازیافت آستاگزانتین از میگوی موزی و سخت پوست گاماروس در نسبت‌های مختلف حلال به نمونه

Table 3- Astaxanthin recovery percentage from *Pontogammarus maeoticus* and *Fenneropenaeus merguensis* in different solvent to sample ratio

حلال‌ها Solvents	سخت پوست گاماروس <i>Pontogammarus maeoticus</i>			میگوی موزی <i>Fenneropenaeus merguensis</i>		
	نسبت حلال به نمونه Solvent to sample ratio			نسبت حلال به نمونه Solvent to sample ratio		
	5	12.5	20	5	12.5	20
اتانول Ethanol	58.33±1.21 <sup>aC</sup>	91.33±1.38 <sup>aA</sup>	74.33±1.52 <sup>dB</sup>	56.00±1.00 <sup>cC</sup>	88.66±1.52 <sup>cA</sup>	76.66±0.57 <sup>dB</sup>
مخلوط اتانول: اتیل استات (۱:۲) (Mixture of ethanol: ethyl acetate (1:2)	50.00±1.00 <sup>bC</sup>	96.66±1.52 <sup>aA</sup>	82.00±1.00 <sup>bB</sup>	62.33±0.57 <sup>aC</sup>	91.33±1.15 <sup>bA</sup>	85.66±0.57 <sup>bB</sup>
میکرومولسیون مایع یونی در آب Ionic liquid microemulsion in water Green solvent	46.00±1.00 <sup>cC</sup>	97.00±1.00 <sup>aA</sup>	87.33±0.57 <sup>aB</sup>	59.33±0.57 <sup>bC</sup>	97.66±0.57 <sup>aA</sup>	92.66±0.57 <sup>aB</sup>
حلال روغنی Oily solvent	56.00±1.00 <sup>aC</sup>	94.00±1.00 <sup>aA</sup>	78.33±0.57 <sup>cB</sup>	55.00±1.00 <sup>cC</sup>	89.33±0.57 <sup>cA</sup>	79.00±1.00 <sup>cB</sup>

داده‌ها به صورت میانگین ± انحراف معیار (n=3) گزارش شده‌اند. حروف غیرمشابه کوچک در هر ستون نشان دهنده وجود اختلاف معنی‌دار بین حلال‌ها است (p<0.05). حروف بزرگ در هر ردیف نشان دهنده تفاوت معنی‌داری (p<0.05) در میان نسبت‌ها است.

Data are reported as mean ± standard deviation (n=3). Small non-similar letters in each column indicate the existence of a significant difference (p < 0.05) between the solvents. The capital letters in each row indicate a significant difference (p < 0.05) among the ratios.



شکل ۲- فعالیت مهار رادیکال DPPH آستاگزانتین استخراج شده با حلال آلی، یونی و روغنی در مقایسه با BHT

Fig. 2. DPPH radical scavenging activity of astaxanthin extracted with organic, ionic and oily solvent compared to BHT

عنوان روش مناسب برای استخراج انتخاب شد. مقدار آستاگزانتین استخراج شده در بهترین شرایط  $1/0.9 \pm 77/44$  میلی گرم بر میلی لیتر بود، که نشان دهنده انحلال بالای رنگدانه در میکرومولسیون مایع یونی است. همچنین نتایج حاصل از مهار رادیکال DPPH یا فعالیت آنتی اکسیدانی آستاگزانتین استخراج شده توسط حلال‌های مورد استفاده در این آزمون در مقایسه با آنتی اکسیدان سنتتیک BHT نشان داد که با افزایش غلظت آستاگزانتین فعالیت آنتی اکسیدانی افزایش می‌یابد اما این افزایش همواره کمتر از BHT بود. از طرف دیگر در بین

## نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که چگالی میکرومولسیون مایع یونی در آب در محدوده  $0.97151$  گرم بر سانتی متر مکعب، قطر آن  $15/8$  نانومتر و رسانایی  $312$  میکروزیمنس در دمای  $27/1$  درجه سانتی گراد بود. با توجه به نتایج بدست آمده از استخراج آستاگزانتین از دو منبع میگوی موزی و سخت پوست گاماروس، میگوی موزی به عنوان منبع بالاترین میزان آستاگزانتین استخراجی انتخاب شد. حلال سبز (میکرو مولسیون مایع یونی در آب) در نسبت  $12/5$  برابر حلال به نمونه به

## سپاسگزاری

از معاونت محترم غذا و داروی هرمزگان که ما را در انجام این پژوهش رساله‌ی دکتری یاری دادند کمال تشکر را داریم.

آستاگزانتین استخراج شده توسط حلال‌های ذکر شده آستاگزانتین استخراجی توسط حلال روغنی بیشترین فعالیت آنتی‌اکسیدانی را داشت که علت آن را می‌توان به حفاظت بهتر رنگدانه در روغن آفتابگردان نسبت داد.

## References

- Ambati, R.R., Siew Moi, P., Ravi, S., & Aswathanarayana, R.G. (2014). Astaxanthin: Sources, extraction, stability, biological activities and its commercial applications-A review. *Marine drugs*, 12(1), 128-152. <https://doi.org/10.3390/md12010128>
- Amiri-Rigi, A., & Abbasi, S. (2019). Extraction of lycopene using a lecithin-based olive oil microemulsion. *Food chemistry*, 272, 568-573. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.08.080>
- Amiri-Rigi, A., Abbasi, S., & Scanlon, M.G. (2016). Enhanced lycopene extraction from tomato industrial waste using microemulsion technique: Optimization of enzymatic and ultrasound pre-treatments. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 35, 160-167. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.05.004>
- Amorim-Carrilho, K., Cepeda, A., Fente, C., & Regal, P. (2014). Review of methods for analysis of carotenoids. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 56, 49-73. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2013.12.011>
- Brandão, L.B., Coelho, D.F., Souza, R.R., & Silva, C.F. (2019). Technological prospection of astaxanthin recovery of shrimp waste *litopenaeus vannamei* by the vegetable oil extracton process. *Revista INGI-Indicação Geográfica e Inovação*, 3(465-475).
- Delgado-Vargas, F., & Paredes-Lopez, O. (2002). *Natural colorants for food and nutraceutical uses*: CRC press.
- Gao, J., You, J., Kang, J., Nie, F., Ji, H., & Liu, S. (2020). Recovery of astaxanthin from shrimp (*Penaeus vannamei*) waste by ultrasonic-assisted extraction using ionic liquid-in-water microemulsions. *Food Chemistry*, 325, 126850. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126850>
- Haque, F., Dutta, A., Thimmanagari, M., & Chiang, Y.W. (2016). Intensified green production of astaxanthin from *Haematococcus pluvialis*. *Food and Bioprocess Processing*, 99, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2016.03.002>
- Hooshmand, H., Shabanpour, B., Moosavi-Nasab, M., Alishahi, A., & Golmakani, M.T. (2021). The optimization of extraction of carotenoids pigments from blue crab (*Portunus pelagicus*) and shrimp (*Penaeus semisulcatus*) wastes using ultrasound and microwave. *Journal of Marine Science and Technology*, 20(2), 72-93. <https://doi.org/10.22113/jmst.2018.105737.2084>
- Hooshmand, H., Shabanpour, B., Moosavi-Nasab, M., & Golmakani, M.T. (2017). Optimization of carotenoids extraction from blue crab (*Portunus pelagicus*) and shrimp (*Penaeus semisulcatus*) wastes using organic solvents and vegetable oils. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(5), e13171. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13171>
- Khoo, K.S., Chew, K.W., Yew, G.Y., Manickam, S., Ooi, C.W., & Show, P.L. (2020). Integrated ultrasound-assisted liquid biphasic flotation for efficient extraction of astaxanthin from *Haematococcus pluvialis*. *Ultrasonics Sonochemistry*, 67, 105052. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105052>
- Kishimoto, Y., Tani, M., Uto-Kondo, H., Iizuka, M., Saita, E., Sone, H., & Kondo, K. (2010). Astaxanthin suppresses scavenger receptor expression and matrix metalloproteinase activity in macrophages. *European Journal of Nutrition*, 49(2), 119-126. <https://doi.org/10.1007/s00394-009-0056-4>
- Martins, P.L.G., Braga, A.R., & de Rosso, V.V. (2017). Can ionic liquid solvents be applied in the food industry? *Trends in Food Science & Technology*, 66, 117-124. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.06.002>
- Nikmaram, P., Mousavi, S.M., Emam-Djomeh, Z., Kiani, H., & Razavi, S.H. (2015). Evaluation and prediction of metabolite production, antioxidant activities, and survival of *Lactobacillus casei* 431 in a pomegranate juice supplemented yogurt drink using support vector regression. *Food Science and Biotechnology*, 24(6), 2105-2112. <https://doi.org/10.1007/s10068-015-0279-5>
- Norshazila, S., Irwandi, J., Othman, R., & Zuhani, H.Y. (2012). Scheme of obtaining [Beta]-carotene standard from pumpkin (*Cucurbita moschata*) flesh. *International Food Research Journal*, 19(2), 531.
- Parjikolaei, B.R., Errico, M., El-Houri, R.B., Christensen, K.V., & Fretté, X.C. (2016). Green approaches to extract Astaxanthin from Shrimp waste: process design and economic evaluation. In *Computer Aided Chemical Engineering*, 38, 649-654. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63428-3.50113-2>
- Pérez-López, P., González-García, S., Jeffryes, C., Agathos, S.N., McHugh, E., Walsh, D., Moreira, M.T. (2014). Life cycle assessment of the production of the red antioxidant carotenoid astaxanthin by microalgae: from lab to pilot scale. *Journal of Cleaner Production*, 64, 332-344. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.011>
- Radi, M., & Abbasi, S. (2013). Microemulsions and their application in food industry, *Nano Technology Monthly*, No. 3.

19. Roohinejad, S., Oey, I., Everett, D., & Niven, B. (2014). Evaluating the effectiveness of  $\beta$ -carotene extraction from pulsed electric field-treated carrot pomace using oil-in-water microemulsion. *Food and Bioprocess Technology*, 7, 3336-334. <https://doi.org/10.1007/s11947-014-1334-6>
20. Ruen-ngam, D., Shotipruk, A., & Pavasant, P. (2010). Comparison of extraction methods for recovery of astaxanthin from *Haematococcus pluvialis*. *Separation Science and Technology*, 46(1), 64-70. <https://doi.org/10.1080/01496395.2010.493546>
21. Saini, R.K., & Keum, Y.-S. (2018). Carotenoid extraction methods: A review of recent developments. *Food Chemistry*, 240, 90-103. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.07.099>
22. Silva, A.K.N.D., Rodrigues, B.D., Silva, L.H.M.D., & Rodrigues, A.M.D.C. (2018). Drying and extraction of astaxanthin from pink shrimp waste (*Farfantepenaeus subtilis*): the applicability of spouted beds. *Food Science and Technology*, 38, 454-461 .
23. Sowmya, R., Ravikumar, T., Vivek, R., Rathinaraj, K., & Sachindra, N. (2014). Optimization of enzymatic hydrolysis of shrimp waste for recovery of antioxidant activity rich protein isolate. *Journal of Food Science and Technology*, 51, 3199-3207 . <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0815-8>
24. Tan, Y., Ye, Z., Wang, M., Manzoor, M.F., Aadil, R.M., Tan, X., & Liu, Z. (2021). Comparison of different methods for extracting the astaxanthin from *Haematococcus pluvialis*: Chemical composition and biological activity. *Molecules*, 26(12), 3569. <https://doi.org/10.3390/molecules26123569>
25. Zhao, X., Zhang, X., Fu, L., Zhu, H., & Zhang, B. (2016). Effect of extraction and drying methods on antioxidant activity of astaxanthin from *Haematococcus pluvialis*. *Food and Bioprocess Processing*, 99, 197-203. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2016.05.007>

## Improving the Texture of Shrimp Nugget Produced from Surimi in Combination with Carrageenan, Alginate and Xanthan

B. Shabanpour<sup>1</sup>\*, P. Pourashouri<sup>2</sup>, A. Jamshidi<sup>3</sup>, K. Rahmanifarah<sup>4</sup>, A. Vejdan Taleshmikaeil<sup>5</sup>

1, 2 and 5- Professor, Associate Professor and M.Sc Graduated, Department of Seafood Processing, Faculty of Fisheries and Environment Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, respectively.

(\*- Corresponding Author Email: [shabanpour@gau.ac.ir](mailto:shabanpour@gau.ac.ir))

3- Assistant Professor, Department of Fisheries, Faculty of Marine Natural Resources, Khorramshahr University of Marine Science and Technology, Khorramshahr, and Ph.D. Graduated, Department of Seafood Processing, Faculty of Fisheries and Environment Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

4- Assistant Professor, Department of Pathobiology and Quality Control, Artemia and Aquaculture Research Institute, Urmia University, Urmia, West Azerbaijan, Iran

Received: 04.07.2023

Revised: 11.11.2023

Accepted: 12.11.2023

Available Online: 13.11.2023

### How to cite this article:

Shabanpour, B., Pourashouri, P., Jamshidi, A., Rahmanifarah, K., & Vejdan Taleshmikaeil, A. (2024). Improving the texture of shrimp nugget produced from surimi in combination with carrageenan, alginate and xanthan. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 20(2), 323-337. (In Persian with English abstract).  
<https://doi.org/10.22067/ifstrj.2023.83269.1268>

### Introduction

Consumption of ready-to-eat products especially seafood, has become very popular based on the lifestyle during these years. Battered and breaded products are highly acceptable due to their attractive appearance and unique taste. Shrimp and shrimp products are one of the most popular seafood products in many countries because of their unique flavor, nutritional value and texture. The interactions of proteins with other ingredients can play a critical role in the structure of processed foods. Protein-polysaccharide interactions provide functional properties in foods especially when proteins are the main ingredients, such as processed shrimp products without affecting the original flavor of the food. The use of gelling properties of carbohydrates in the formulation of food products is increasingly growing. The wide variety of hydrocolloids have been examined to modify the mechanical, textural and functional properties of shrimp products. In this regard, application of carrageenan, xanthan, and alginate have been reported to improve the physicochemical and sensory attributes of shrimp products. In the present study, surimi was produced and used in combination with different percentages of carrageenan, alginate and xanthan gums in order to simulate breaded shrimp and produce shrimp nuggets with a texture similar to battered and breaded shrimp.

### Materials and Methods

In the first step, surimi was prepared from silver carp filets. In the next step, shrimp nuggets were produced from obtained surimi in combination with additives (including starch, salt, garlic, and spices) and different percentages (0.5, 1, 1.5 and 2% ) of carrageenan, alginate and xanthan gums. The prepared mixture was kept at 35 °C for 1 hour and then battered and breaded after molding. Physical (expressible water, product yield, and shrinkage), chemical (moisture, fat, and pH), color, texture, and sensory analysis were performed on several samples of shrimp nuggets (containing different percentages of carrageenan, alginate, and xanthan gums) in comparison with the control sample (battered and breaded shrimp immersed in salt and polyphosphate).

### Results and Discussion

Based on the results, the amount of shrinkage decreased in all samples containing gums in comparison with



©2023 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

<https://doi.org/10.22067/ifstrj.2023.83269.1268>

the control ( $p < 0.05$ ). Shrimp nuggets containing xanthan and alginate showed a lower amount of fat in comparison with the control and the samples containing carrageenan ( $p < 0.05$ ). The highest amount of pH value observed in the control sample, and the sample containing 1.5 and 2 % alginate showed the lowest amounts of pH. The shrimp nuggets containing 2 % alginate demonstrated the highest amounts of water holding capacity. However, the other samples did not show significant differences with the control ( $p > 0.05$ ). There were no significant differences between the control and shrimp nuggets containing gums in terms of product yield ( $p > 0.05$ ). Shrimp nuggets containing 2 % xanthan and the control showed the highest and lowest amounts of brightness, respectively. The highest value of adhesion observed in shrimp nuggets containing 2 % alginate and the control. The lowest amounts of adhesion were observed in shrimp nuggets containing 2 % xanthan, 0.5 % alginate, 1 and 2 % carrageenan ( $p < 0.05$ ). Samples containing 1% carrageenan showed the highest scores of the sensory attributes of taste, smell, texture and overall acceptance, as same as the control ( $p > 0.05$ ).

## Conclusion

Hydrocolloid additions were found to be significantly affecting the quality parameters including fat content, pH value, shrinkage and texture of produced shrimp nuggets. Therefore, it seems that producing shrimp nuggets containing 1 % carrageenan showed the nearest physical, chemical, and sensory characteristics to the control (battered and breaded shrimp), and this sample can be used as alternative of battered and breaded shrimp.

**Keywords:** Breaded shrimp, Shrimp nugget, Gum, Sensory analysis

## مقاله پژوهشی

جلد ۲۰، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۳، ص. ۳۲۳-۳۳۷

# بهبود بافت ناگت میگوی تولیدی از سوریمی ماهی در ترکیب با کاراژینان، آلژینات و زانتان

بهاره شعبان‌پور<sup>۱\*</sup>، پرستو پورعاشوری<sup>۲</sup>، انیسه جمشیدی<sup>۳</sup>، کاوه رحمانی‌فرح<sup>۴</sup>، اکبر وجدان طالب‌شمیکائیل<sup>۵</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۲۱

## چکیده

در تحقیق حاضر از سوریمی قوام‌یافته در ترکیب با درصد‌های مختلف کاراژینان، آلژینات و زانتان به‌منظور شبیه‌سازی میگو سوخاری و تولید ناگت میگو با بافتی مشابه میگو سوخاری استفاده شد. ناگت‌های میگو از ترکیب سوریمی حاصل از ماهی کپور نقره‌ای در ترکیب با افزودنی‌ها و درصد‌های مختلف (۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲) کاراژینان، آلژینات و زانتان تهیه شدند و پس از قوام‌یابی در دمای ۳۵C<sup>۰</sup> تحت فرایند سوخاری شدن قرار گرفتند. آزمایشات فیزیکی، شیمیایی، رنگ‌سنجی و حسی بر تیمارهای تولیدی در مقایسه با تیمار شاهد (میگو سوخاری) انجام گرفت. براساس نتایج حاصل، مقدار چروکیدگی در کلیه تیمارها در مقایسه با شاهد کاهش یافت (۰/۰۵ < p). تیمارهای حاوی زانتان و آلژینات مقدار چربی کمتری را نسبت به تیمار شاهد و تیمارهای حاوی کاراژینان نشان دادند (۰/۰۵ < p). بالاترین مقدار pH در تیمار شاهد و بالاترین مقدار ظرفیت نگهداری آب در تیمار حاوی ۲ درصد آلژینات مشاهده شد. بالاترین مقادیر شاخص‌های بافت‌سنجی شامل سختی، فنریت و چسبندگی به‌ترتیب در تیمارهای شاهد، تیمارهای حاوی کاراژینان و تیمارهای حاوی آلژینات مشاهده شدند (۰/۰۵ < p). تیمار حاوی ۱ درصد کاراژینان بالاترین مقادیر شاخص‌های حسی طعم، بو، بافت و پذیرش کلی را دریافت کرد ولی در مقایسه با نمونه شاهد اختلاف معنی‌داری را نشان نداد.

واژه‌های کلیدی: آنالیز حسی، سوریمی، صمغ، میگو سوخاری، ناگت میگو

## مقدمه

است. این منابع می‌توانند در تولید فراورده‌های با ارزش افزوده مورد استفاده قرار گیرند (Hannan et al., 2022). تکنولوژی شناخته شده در جهت استفاده از ماهیان و تولید فراورده‌های با ارزش افزوده، تولید مینس و سوریمی ماهی است که بعنوان فراورده‌های حد واسط برای تولید محصولات با ارزش افزوده و آماده مصرف مانند سوسیس ماهی، کیک و کلوچه ماهی، ناگت و فراورده‌های شبیه‌سازی شده مورد استفاده قرار می‌گیرند (Yingchutrakul et al., 2022). از میان ماهیان سفید گوشت، ماهیان پرورشی مانند کپور نقره‌ای (*Hypophthalmichthys molitrix*) را می‌توان نام برد که بسیار ارزان‌تر از ماهیان دریایی بوده

افزایش تقاضای مصرف کنندگان نسبت به محصولات آماده یکی از روندهای رو به افزایش در مصرف غذاهای دریایی است. یکی از راه‌حل‌های استراتژیک در افزایش در دسترس بودن این محصولات طبق عادت‌های امروز افراد جامعه، وجود غذاهای آماده مصرف است (Pourashouri et al., 2013; 2020; 2022). در میان غذاهای آماده مصرف، گوشت ماهی به‌عنوان منبع غنی از پروتئین با قابلیت هضم آسان و ارزش بیولوژیکی بالا که قادر است ویتامین‌ها، مواد معدنی و اسیدهای چرب مفید را در دسترس قرار دهد، جایگاه خاصی پیدا کرده

۱، ۲ و ۵- استاد، دانشیار و فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد گروه فرآوری محصولات شیلاتی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

\*- نویسنده مسئول: (Email: shabanpour@gau.ac.ir)

۳- استادیار گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر و فارغ‌التحصیل دکتری گروه فرآوری محصولات شیلاتی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

۴- استادیار پژوهشکده تحقیقات دریاچه ارومیه، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

و از نظر اقتصادی استفاده از آن‌ها به‌عنوان ماده اولیه مقرون به صرفه می‌باشد (Li et al., 2021).

پس از ماهی در غذاهای دریایی، نرم‌تنانی مانند لابستر، میگو و خرچنگ به‌دلیل طعم منحصر به‌فرد و ویژگی‌های پخت مناسب بالاترین میزان صید را دارند. ویژگی‌هایی مانند طعم ملایم (فاقد بوی تند ماهی)، راحتی آماده‌سازی، رنگ سفید و کیفیت پایدار باعث ترجیح میگو نسبت به سایر غذاهای دریایی شده است. میگو یکی از غذاهای اصلی دریایی است که در نقاط مختلفی از جهان استفاده می‌شود (Gulzar & Benjakul, 2020). اگرچه تقاضای بالایی برای مصرف میگو وجود دارد اما به‌دلیل صید بی‌رویه، در دسترس بودن آن، دچار کاهش شده است. در این زمینه، غذاهای دریایی شبیه‌سازی شده به‌عنوان محصولات شبیه‌سازی شده با توجه به قیمت پایین آن محبوبیت زیادی یافته‌اند. محصولات شبیه‌سازی شده از منابع پروتئینی ماهی با قیمت پایین یا سوریمی تهیه و به‌صورت یک ماده غذایی شبیه‌سازی شده لوکس با قیمت بالا طراحی می‌شود (Sun & Holley, 2011; Hannan et al., 2022).

ناگت میگو محصولی کاملاً شبیه میگو سوخاری است که از سوریمی همراه با دیگر ترکیبات مناسب برای تعدیل بافت و اصلاح مزه تولید می‌شود. این فرآورده آماده مصرف، دارای طعم، بافت و ظاهری شبیه میگوی حقیقی بوده که از طریق استخراج پروتئین‌های میوفیبریل، حل کردن آن‌ها در نمک، افزودن نشاسته و طعم دهنده، اعمال حرارت قوام‌یابی، قالب‌گیری و پخت نهایی تولید می‌گردد. مهم‌ترین خاصیت سوریمی توانایی تشکیل ژل است. ژل حالت واسطه‌ای بین جامد و مایع است که در ساختمان آن رشته‌های پروتئینی از طریق ارتباط متقاطع، یک شبکه پیوسته ایجاد می‌کنند (Sun & Holley, 2011). تولید ژل از پروتئین ماهی مهم‌ترین مرحله تشکیل بافت مناسب برای تولید بسیاری از غذاهای دریایی است. خواص کاربردی، بخصوص استحکام ژل و ظرفیت نگهداری آب، توسط شرایط فیزیکی مانند غلظت پروتئین، قدرت یونی، دما و دوره حرارت‌دهی تحت تأثیر قرار می‌گیرد (Chen et al., 2021). تشکیل شبکه ژلی ناشی از حرارت که به شدت تحت تأثیر دما و زمان حرارت‌دهی می‌باشد، روی خواص بافتی پروتئین‌های غذایی و رنگ ژل سوریمی اثر دارد.

ترکیباتی که به بافت سوریمی افزوده می‌شوند باید اثر مثبتی در ویژگی‌های بافتی و رطوبتی محصول داشته باشند. در تحقیقی اثر افزودن فیبرهای خوراکی گندم و جودوسر را بر کیفیت و جلوگیری از تغییر شکل فرآورده تقلیدی میگو تولیدی از سوریمی ماهی فیتوفاگ مورد بررسی قرار دادند. این محققان نشان دادند افزودن ۶ درصد فیبر جودوسر در مقایسه با فیبر گندم بر خواص بافتی و تغییر شکل ناشی از سرخ شدن ناگت میگوی شبیه‌سازی شده اثر مطلوبی داشت (Heydari

et al., 2016). از عمده‌ترین ترکیبات دیگری که در محصولات ارزش افزوده استفاده می‌شوند هیدروکلوئیدهایی هستند که از طریق برهمکنش با پروتئین‌های میوفیبریل و اثر بر شبکه‌ی ژلی سوریمی، باعث حفظ ظرفیت نگهداری آب و کمک به بهبود کیفیت ژل سوریمی می‌شوند (Núñez-Flores et al., 2018). کارائینان پلی‌ساکاریدی است که از یک نوع جلبک (*Chondrus crispus*) استخراج می‌شود و به جهت اثرات تثبیت‌کنندگی و ساختار منحصر به فردی که دارد، همانند جانشین‌های چربی به‌طور گسترده‌ای در صنایع غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از کارائینان به میزان ۰/۱ تا ۰/۵ درصد در فرمولاسیون فرآورده‌های شبیه‌سازی شده بر پایه سوریمی استفاده می‌شود (Emo et al., 2013). آلژینات هیدروکلوئیدی به رنگ سفید تا قهوه‌ای مایل به زرد است که از جلبک‌های دریایی قهوه‌ای بدست می‌آید و به‌عنوان یک افزودنی در غذاهای دریایی حاصل از سوریمی استفاده می‌شود. آلژینات دارای خواصی مانند قوام‌بخشی، پایدارکنندگی، تعلیق، تولید ژل و تثبیت امولسیون بوده و جهت اهداف مختلف در غذاها، مواد دارویی و سایر محصولات صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Hauzoukim et al., 2019). در بررسی اثر استفاده از آلژینات بر خصوصیات بافتی ژل سوریمی مشخص شد که افزودن آلژینات سبب افزایش توانایی نگهداری آب و سختی ژل می‌شود اما از چسبندگی ژل می‌کاهد (Galus et al., 2013). صمغ زانتان پلی‌ساکارید خارج سلولی است که توسط انواعی از باکتری زانتوموناس متعلق به خانواده Pseudomonadaceae تولید می‌شود. زانتان علی‌رغم وزن مولکولی زیاد به سادگی در آب سرد و گرم حل می‌شود و حتی در مقادیر کم، محلول بسیار غلیظی ایجاد می‌کند. تغییرات pH اثر چندانی بر ویسکوزیته ایجاد شده توسط زانتان ندارد، در نتیجه می‌توان از آن در بسیاری از سیستم‌های غذایی استفاده کرد (Hasanpour et al., 2012). از این رو براساس نتایج تحقیقات دیگر محققان، صمغ‌های کارائینان، آلژینات و زانتان به‌دلیل ویژگی‌های عملکردی مناسب با هدف تولید ناگت میگو، با بافتی مشابه میگو سوخاری با استفاده از سوریمی قوام‌یافته در ترکیب با درصدهای مختلف صمغ‌ها، مورد استفاده قرار گرفتند. در این راستا، پس از تولید ناگت‌های میگوی شبیه‌سازی شده و انجام آزمایشات مربوطه، بهترین نوع هیدروکلوئید و مؤثرترین درصد آن در ترکیب با سوریمی ماهی کپور نقره‌ای جهت تولید ناگت میگو انتخاب می‌گردد.

## مواد و روش‌ها

### مواد مصرفی

جهت تولید تیمارهای مختلف میگو سوخاری، میگوی تازه از مزرعه پرورش میگو و ماهی کپور نقره‌ای تازه از بازار ماهی فروشان خریداری

نسبت‌های مختلف ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد ترکیب گردید. خمیر حاصل در قالب‌های فلزی مستطیل شکل در اندازه ۱۳×۵×۱/۵ قالب‌گیری شد و در دمای ۳۵ °C به مدت ۱ ساعت جهت قوام‌یابی قرار داده شد. پس از طی زمان قوام‌یابی، خمیر حاصل با استفاده از قالب میگوی شکل، قالب‌گیری شد و قطعات حاصل مانند تیمار شاهد تحت مراحل پوشش‌دهی و سوخاری کردن قرار گرفتند.

پس از کامل شدن پوسته سوخاری، میگوهای سوخاری و ناگت‌های میگوی تولیدی با استفاده از روغن گیاهی آفتابگردان (مخصوص سرخ کردن، اوپلا-ایران) به مدت ۳۰ ثانیه در سرخ‌کن (Moulinex Toucan ADR2) تحت دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد به صورت مقدماتی به روش سرخ کردن عمیق سرخ شده و پس از خنک شدن در دمای محیط، تکرارهای هر تیمار جداگانه درون بسته‌های زیپ‌کیپ بسته‌بندی شده و در فریزر ۲۰- درجه سانتی‌گراد منجمد گردیدند. به منظور انجام آزمایشات فیزیکی، بافت‌سنجی، رنگ‌سنجی و حسی، از تیمارهای مختلف به‌طور تصادفی نمونه‌برداری انجام شده و پس از انجام‌زدایی در دمای محیط، آزمایشات مربوطه در سه تکرار بر روی آن‌ها صورت گرفت. برای آنالیز حسی، میگوهای سوخاری در روغن آفتابگردان به مدت ۳ دقیقه در سرخ‌کن (Moulinex Toucan ADR2) سرخ شدند.

#### اندازه‌گیری مقادیر رطوبت و چربی

مقدار رطوبت نمونه‌ها براساس اختلاف وزن اولیه (بر حسب وزن خشک) و وزن ثانویه پس از خشک کردن در آون (WT-binder 7200, Germany) با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد پس از ۲۴ ساعت، محاسبه شد. از دستگاه سوکسله (Gerhardt, Germany) برای اندازه‌گیری مقدار چربی نمونه‌ها استفاده شد. استخراج چربی با استفاده از پترولیوم اتر و طی ۲/۵ ساعت انجام شد (AOAC, 2000).

#### اندازه‌گیری pH

مقدار ۵ گرم از نمونه‌های سرخ شده در ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر هموژنیزه شد و مقدار pH نمونه‌ها با استفاده از pH متر (Metrohm model 713) اندازه‌گیری شد.

#### مقدار رطوبت تحت فشار

مقدار ۵ گرم نمونه (Wi) درون کاغذ فیلتر پیچیده شده و داخل لوله فالکون (۵۰ میلی‌لیتری) قرار داده شد. پس از سانتریفیوژ (Eppendorf centrifuge 5810 R, Germany) در دور ۱۰۰۰۰ g× در طی ۱۵ دقیقه، وزن ثانویه نمونه‌ها (Wf) اندازه‌گیری شد و مقدار

شده و با یخ‌پوشی مناسب به آزمایشگاه فرآوری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان منتقل شدند. آرد گندم، آرد گلوتن، نشاسته، بکینگ‌پودر و نمک از بازار محلی تهیه شدند. آرد سوخاری از شرکت شیرین پارت ایرانیان خریداری شد. مواد شیمیایی با درجه آزمایشگاهی از شرکت سیگما (Darmstadt, Germany) تهیه شدند.

#### تهیه سوریمی

از ماهی‌های کپور نقره‌ای پس از شستشو، سرزنی و تخلیه امعاء و احشا، فیله تهیه شده و پس از جداسازی گوشت‌های تیره و شستشوی فیله‌های ماهی، پوست و استخوان فیله‌های حاصل توسط دستگاه استخوان‌گیر جداسازی شد. از مینس ماهی حاصل پس از سه مرحله شستشو با آب سرد، سوریمی تولید گردید. به‌منظور تهیه سوریمی، گوشت چرخ شده طی سه سیکل ۱۰ دقیقه‌ای شستشو شد (Shabanpour et al., 2007). برای محاسبه دقیق میزان آب مورد نیاز برای شستشو، از دو ظرف استفاده شد. ظرف فلزی کوچک‌تر، حاوی گوشت چرخ شده و آب ۴ درجه سانتی‌گراد به نسبت یک به سه درون ظرف بزرگ‌تر حاوی مخلوط آب و یخ با دمای ۲ تا ۳ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. گوشت چرخ شده و آب به آرامی به مدت ۱۰ دقیقه مخلوط شدند سپس مخلوط حاصل با استفاده از پارچه تنظیف دو لایه آبگیری شد. مرحله دوم و سوم شستشو نیز مانند مرحله اول تکرار شد، با این تفاوت که در مرحله سوم جهت آبگیری بهتر، از آب نمک ۰/۳ درصد استفاده شد. سوریمی حاصل در زیپ‌کیپ بسته‌بندی شد و تا روز تولید ناگت میگو در فریزر ۲۰- درجه سانتی‌گراد نگهداری شد.

#### تولید میگوی سوخاری و ناگت میگو

از میگوها برای تولید میگوی کامل سوخاری شده استفاده شد. میگوها پس از پاکسازی در محلول نمکی حاوی ۱/۵ گرم در لیتر نمک و تری‌پلی‌فسفات با دمای ۴ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۰ دقیقه غوطه‌ور شدند. پس از شستشو با آب سرد و چکاندن آب اضافی به مدت ۵ دقیقه، میگوها به ترتیب تحت فرایند آردزنی اولیه، غوطه‌وری در لعاب و پوشش‌دهی با آرد سوخاری قرار گرفتند. فرمول لعاب مورد استفاده شامل ۵۵ درصد آرد گندم، ۳۰ درصد نشاسته، ۱۰ درصد گلوتن، ۲ درصد بکینگ پودر و ۳ درصد نمک بود که با نسبت یک مواد خشک و یک و نیم آب (۱۰ درجه سانتی‌گراد) مخلوط شد (Jamshidi & Shabanpour, 2014).

جهت تولید ناگت میگو، سوریمی ماهی کپور نقره‌ای با ترکیباتی مانند نشاسته (۷ درصد)، نمک (۲/۵ درصد)، سیر (۰/۵ درصد)، ادویه‌جات (لفل قرمز ۰/۱ درصد و جوز هندی ۰/۱ درصد)، پودر میگوی لیوفلیزه (۱ درصد) و صمغ‌های کاراژینان، آلژینات و زانتان با

توسط ۱۵ نفر از دانشجویان دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی گرگان (رده سنی ۲۵ تا ۳۰ سال) مورد ارزیابی قرار گرفتند. با استفاده از آزمون هدونیک ۹ مرتبه‌ای، ارزیابان به شاخص‌های حسی براساس جداول ارزیابی، از یک تا نه امتیاز دادند (بی‌نهایت بد: ۱، بی‌نهایت عالی: ۹) (Nino et al., 2022).

### آنالیز آماری

جهت مقایسه تیمارها با تیمار شاهد، از آنالیز یک‌طرفه (one way ANOVA) با کمک نرم‌افزار SPSS استفاده شد و مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال  $\alpha = 0.05$  انجام گرفت. برای آنالیز داده‌های حسی از آزمون‌های ناپارامتری کروسکال‌والیس (برای مقایسه چند گروه) و من‌ویتنی (برای مقایسه دو گروه با یکدیگر) استفاده گردید. نتایج داده‌ها با ۳ تکرار بصورت میانگین  $\pm$  انحراف معیار ارائه شده است.

### نتایج و بحث

#### رطوبت و چربی

**شکل ۱** مقادیر رطوبت و چربی تیمارهای مختلف ناگت میگو و شاهد (میگو سوخاری) را نشان می‌دهد. تیمار شاهد اختلاف معنی‌داری با سایر تیمارها نشان نداد ( $p > 0.05$ ). تیمار حاوی ۱/۵ درصد زانتان بالاترین مقدار رطوبت را در مقایسه با سایر تیمارها نشان داد ( $p < 0.05$ ). افزایش درصد هیدروکلوئیدها اختلاف معنی‌داری در مقادیر رطوبت تیمارهای حاوی آلژینات و زانتان نشان نداد، در حالی که مقدار رطوبت در تیمارهای حاوی کاراژینان با افزایش مقدار درصد هیدروکلوئید افزایش معنی‌داری یافت ( $p < 0.05$ ). احتمالاً شبکه‌ی ژلی تشکیل شده ناشی از برهم‌کنش صمغ کاراژینان و دمای انعقاد با به دام انداختن مولکول‌های آب، مانع از خروج رطوبت بیشتر در طی سرخ کردن می‌گردد که منجر به حفظ رطوبت بالاتر طی فرآیند شد. ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2016) نیز گزارش دادند که افزودن کاراژینان و کنجاک باعث بهبود بافت و ویژگی‌های ساختاری ژل سوریمی شد.

براساس **شکل ۱**، نتایج مقادیر چربی نشان داد که اختلاف معنی‌داری میان تیمار شاهد و تیمارهای حاوی درصد‌های مختلف کاراژینان مشاهده نشد ( $p > 0.05$ ). در حالی که، تیمارهای حاوی درصد‌های مختلف آلژینات و زانتان مقدار چربی کمتری را در مقایسه با تیمار شاهد نشان دادند ( $p < 0.05$ ). علت کاهش چربی در تیمارهای حاوی آلژینات و زانتان نسبت به تیمارهای حاوی کاراژینان، می‌تواند به

رطوبت تحت فشار بر اساس معادله (۱) محاسبه شد (Ramirez et al., 2010):

$$(\%) \text{ آب قابل بیان} = \left( \frac{W_i - W_f}{W_i} \right) \times 100 \quad (1)$$

#### اندازه‌گیری بازده محصول و مقدار چروکیدگی

برای محاسبه‌ی بازده محصول، نمونه‌های سرخ شده مقدماتی توزین شده و وزن اولیه (A) آن‌ها یادداشت شد. پس از فرآیند سرخ کردن نهایی، نمونه‌ها مجدد (B) توزین شدند و براساس معادله (۲) مقدار بازده محصول محاسبه شد:

$$(\%) \text{ بازده محصول} = \left( \frac{B}{A} \right) \times 100 \quad (2)$$

قطر (D) و ضخامت (T) هر نمونه قبل از سرخ کردن (A) و پس از فرآیند سرخ کردن نهایی (B) اندازه‌گیری شد و میزان چروکیدگی طبق معادله (۳) محاسبه شد (Jamshidi & Shabanpour, 2014):

$$(\%) \text{ چروکیدگی} = \left( \frac{(TB - TA) + (DB - DA)}{(TB + DB)} \right) \times 100 \quad (3)$$

### رنگ‌سنجی

از دستگاه Lovibond (CAM-system, England 500, Amesbury, UK) برای اندازه‌گیری پارامترهای رنگ‌سنجی استفاده شد. متغیر  $L^*$  برای بیان شاخص روشنایی از ۰ (بعد سیاهی) تا ۱۰۰ (بعد سفیدی)، شاخص  $a^*$  برای بیان بعد قرمزی-سبزی ( $+a^*$  نشان‌دهنده قرمزتر و  $-a^*$  نشان‌دهنده سبزتر) و شاخص  $b^*$  برای بیان بعد زرد-آبی ( $+b^*$  نشان‌دهنده زردتر و  $-b^*$  نشان‌دهنده آبی‌تر) می‌باشد (Nino et al., 2022).

### بافت‌سنجی

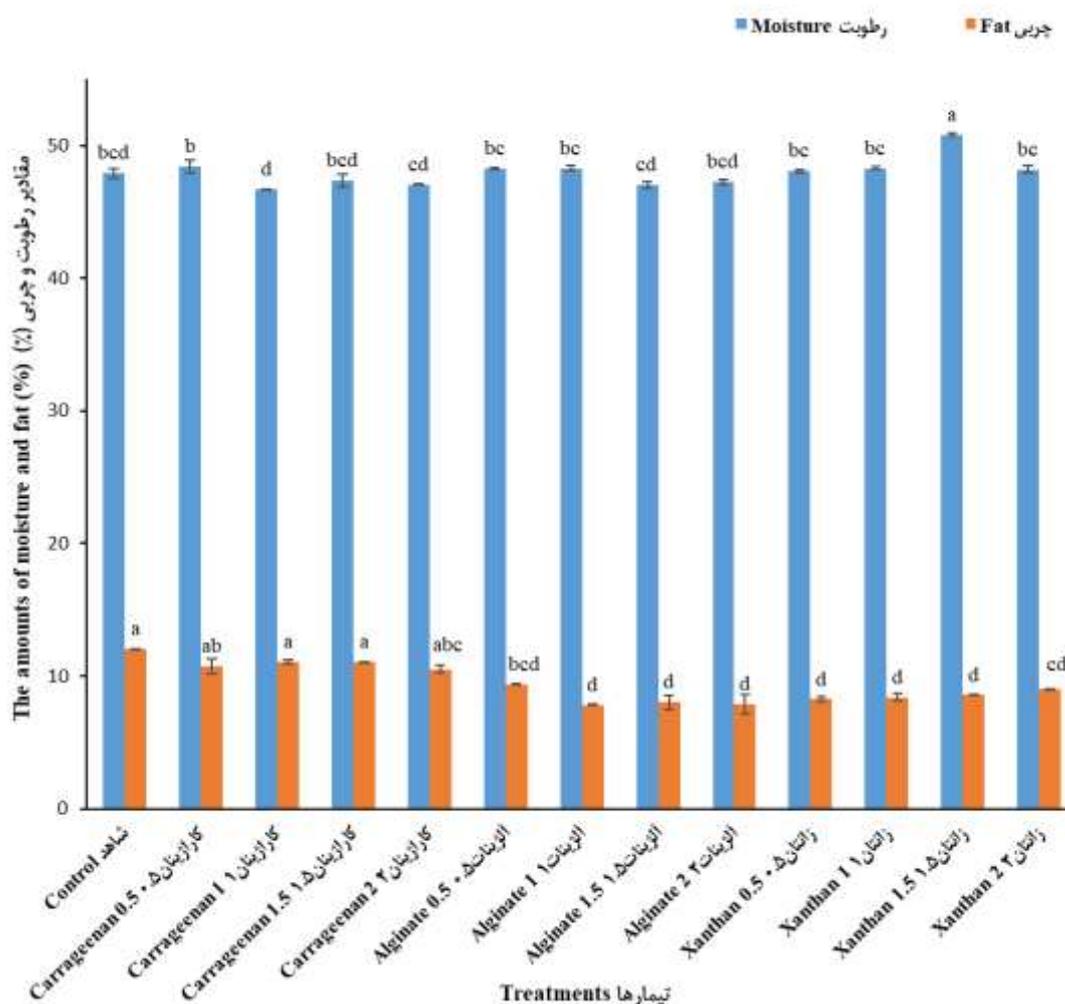
بافت‌سنجی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه Texture analyzer LFRA 4500 (Brook field) انجام شد. جهت این آزمایش نمونه‌ها توسط پروب چاقویی شکل (TA7) یک بار با سرعت ۱ میلی‌متر بر ثانیه برش خوردند. بار وارد شده ۲۵ kg<sup>۱</sup>، نقطه شروع ۵ g<sup>۲</sup> و نقطه هدف ۳۰ میلی‌متر بود. پارامترهایی که تعیین شد شامل چسبندگی، تغییر شکل، فنریت و سختی بودند (Huda et al., 2013).

### آنالیز حسی

به‌منظور ارزیابی شاخص‌های شکل ظاهری، طعم، بو، بافت، ظاهر و پذیرش کلی ناگت‌های میگو تولیدی، به‌مدت ۳ دقیقه در سرخ‌کن تحت دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد در روغن آفتابگردان سرخ شدند و

روغن بیشتر طی فرآیند سرخ کردن شدند. همانطور که نتایج نشان می‌دهد ارتباط مستقیمی میان افزایش رطوبت و کاهش چربی در تیمارهای حاوی زانتان مشاهده شد. نتایج این قسمت مشابه با نتایج گیبیس و همکاران (Gibis *et al.*, 2015) و چن و همکاران (Chen *et al.*, 2008) بود که به ترتیب با مطالعه بر روی کلوچه ماهی سرخ شده و ناگت ماهی گزارش کردند ارتباط معکوسی میان کاهش رطوبت و افزایش چربی میان تیمارها در طی فرآیند سرخ کردن عمیق وجود دارد.

نحوه‌ی قرارگیری هیدروکلوئیدها در ارتباط با شبکه‌ی ژلی تشکیل شده مربوط باشد، بطوری که باعث حفظ و استحکام شبکه ژلی طی فرآیند سرخ کردن می‌شود و در نهایت جذب روغن را طی زمان سرخ کردن کاهش می‌دهد. نتایج حاصله با نتایج حق‌شناس و همکاران (Haghshenas *et al.*, 2015) که اثر افزودن صمغ‌ها را بر ناگت میگو بررسی کرده بودند، همخوانی داشت. به نظر می‌رسد در تحقیق حاضر نیز، کاربرد صمغ‌های آلژینات و زانتان ارتباط مستحکم‌تری را با شبکه‌ی ژلی سوریمی تشکیل دادند، به طوری که مانع خروج رطوبت و جذب



شکل ۱- مقادیر رطوبت و چربی در تیمار شاهد (میگو سوخاری) و تیمارهای ناگت میگوی حاصل از سوریمی در ترکیب با درصد‌های مختلف کاراژینان، آلژینات و زانتان

Fig. 1. Values of fat and water of control (battered and breaded shrimp) and shrimp nuggets obtained from surimi in combination with different percentages of carrageenan, alginate and xanthan

داده‌ها به صورت میانگین سه تکرار  $\pm$  انحراف معیار بیان شده‌اند. حروف مختلف (a-d) در نمودار، نشان دهنده اختلاف معنی‌دار بین تیمارها می‌باشد ( $p < 0.05$ ).

The data are expressed as the average of three replicates  $\pm$  standard deviation. Different letters (a-c) indicate significant differences between treatments ( $p < 0.05$ ).

### رطوبت تحت فشار، pH، چروکیدگی و بازده محصول

به نظر می‌رسد به دلیل تازگی مواد اولیه مورد استفاده (میگو و سوریمی) در تهیه ناگت‌های میگوی تولیدی، pH تیمارهای تولیدی پس از سرخ شدن نهایی، در محدوده خنثی قرار داشتند، اما مقدار pH، در تیمارهای ناگت میگوی تولید شده در مقایسه با تیمار شاهد، اختلاف معنی‌داری نشان داد ( $p < 0/05$ ) (جدول ۱). تیمار شاهد بالاترین و تیمار حاوی آلژینات ۱/۵ و ۲ درصد کمترین مقدار pH را نشان دادند. با افزایش مقدار کاراژینان و آلژینات، pH روند کاهشی و با افزایش مقدار زانتان، pH روند افزایشی نشان داد. دی‌میرسی و همکاران (Demirci et al., 2014) گزارش کردند که با افزودن صمغ‌های کاراژینان، زانتان و گوار در کوفته، مقدار pH نمونه‌ها، پس از فرآیند سرخ کردن افزایش یافت که مطابق با نتایج حاصل از افزودن صمغ‌های کاراژینان و آلژینات به ناگت میگو در تحقیق حاضر بود. تغییرات pH بر خواص بافت پیوندی و ماهیت پروتئین‌های میوفیبریل مؤثر بوده و در نتیجه تغییر میزان pH موجب تغییر آب‌گریزی و تغییر خواص کاربردی پروتئین‌ها می‌گردد (Das et al., 2011).

میان میزان جذب روغن، از دست رفتن رطوبت و ایجاد چروکیدگی در محصولات غذایی سرخ شده ارتباطی خطی وجود دارد و بطور کلی، میان میزان چروکیدگی و مقدار افت رطوبت محصول ارتباط مستقیمی موجود است (Jamshidi & Shabanpour, 2014). تشکیل و انبوهش شبکه ژلی از یک طرف و دناتوره شدن پروتئین‌ها از طرف دیگر نیز بر مقدار چروکیدگی محصول مؤثر می‌باشند (Nguyen, 2009). بالاترین میزان چروکیدگی در تیمار شاهد مشاهده شد ( $p < 0/05$ ). هر چند که با توجه به نتایج رطوبت و چربی، انتظار می‌رفت صمغ کاراژینان نسبت به صمغ‌های آلژینات و زانتان، اثر کمتری بر مقدار چروکیدگی داشته باشد، اما اختلاف معنی‌داری در تیمارهای حاوی درصدهای مختلف صمغ مشاهده نشد ( $p > 0/05$ ). به نظر می‌رسد صمغ‌ها در ترکیب با شبکه‌ی ژلی تشکیل شده، اثر مناسبی بر ممانعت از خروج رطوبت طی فرایند سرخ کردن نهایی و کاهش چروکیدگی نسبت به تیمار شاهد شدند. به طور کلی، به دلیل شبکه‌ی ژلی نسبتاً مستحکمی که طی فرآیند خرد کردن پروتئین‌ها در نمک و فرآیند قوام‌یابی تشکیل شده بود، مولکول‌های آب تبخیر شده طی فرایند سرخ کردن قادر به خروج از شبکه‌ی ژلی نبوده و مانع از ایجاد چروکیدگی در تیمارهای تولیدی شدند.

بازده محصول یکی از شاخص‌های مهم محصولات لعاب‌دهی و سوخاری شده است که با مقدار وزن نهایی محصول ارتباط مستقیمی دارد و برای مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان از نظر اقتصادی حائز اهمیت است (Das et al., 2008). نتایج بازده محصول نشان داد که تیمارهای ناگت میگو تولیدی در مقایسه با تیمار شاهد اختلاف معنی‌داری نشان ندادند ( $p > 0/05$ ). براساس نتایج حاصل، به نظر می‌رسد عملکرد هیدروکلوئیدهای استفاده شده و درصدهای مختلف آن‌ها، در مقدار بازده محصول یکسان بوده است. از آنجا که اختلاف معنی‌داری در مقادیر رطوبت تیمار شاهد و تیمارهای حاوی صمغ مشاهده نشده بود (به استثناء تیمار حاوی ۱/۵ درصد زانتان)، نتایج حاصل از بازده را علاوه بر اثر مقادیر رطوبت، می‌توان به اثر پوسته سوخاری نیز نسبت داد. پوسته سوخاری به‌عنوان یک عایق مناسب در مقابل از دست رفتن رطوبت و کاهش وزن محصول عمل می‌کند که می‌تواند به دلیل ژلاتینه شدن نشاسته‌ی موجود در آرد سوخاری باشد (Kwaw et al., 2017). در نتیجه، مقادیر بازده محصول، اختلاف معنی‌داری میان تیمار شاهد و سایر تیمارها نشان نداد.

رطوبت تحت فشار نسبت معکوسی با ظرفیت نگهداری آب دارد. همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، مقدار رطوبت تحت فشار اختلاف معنی‌داری میان تیمار شاهد در مقایسه با سایر تیمارها نشان نداد ( $p > 0/05$ ). تنها تیمار ناگت میگو حاوی ۲ درصد آلژینات رطوبت تحت فشار کمتر، یا به بیان دیگر ظرفیت نگهداری آب بالاتری را نسبت به شاهد نشان داد ( $p < 0/05$ ). در مطالعه حاضر به استثناء تیمار حاوی ۲ درصد آلژینات، در سایر تیمارها ارتباط مستقیمی میان بازده محصول و ظرفیت نگهداری آب مشاهده شد، همانطور که داس و همکاران (Das et al., 2008) بیان نمودند میزان بازده محصول ارتباط مستقیمی با ظرفیت نگهداری آب دارد. به نظر می‌رسد بازده محصول در تیمارهای حاصل‌چندان متأثر از هیدروکلوئیدهای افزوده شده به بافت سوریمی نبوده است و همانطور که در بحث مقادیر بازده بیان شد، پوسته سوخاری نیز در ممانعت از خروج رطوبت مؤثر بوده که در نهایت بر ظرفیت نگهداری آب اثر گذاشته و سبب ایجاد عدم تغییر معنی‌دار در مقادیر آن شده است. داس و همکاران (Das et al., 2008) با مطالعه اثر خمیر سویا و گرانول سویا بر کیفیت ناگت گوشت بیان نمودند که میزان بازده در تیمارهای آزمایشی، مشابه یا بالاتر از تیمار شاهد بود که دلیل آن را ظرفیت نگهداری آب بالای گوشت طی فرآیند پخت اعلام کردند که با نتایج مطالعه حاضر مشابهت داشت.

جدول ۱- مقادیر رطوبت تحت فشار، pH، چروکیدگی و بازده محصول در تیمار شاهد (میگو سوخاری) و تیمارهای ناگت میگوی حاصل از سوریمی در ترکیب با درصدهای مختلف کاراژینان، آلژینات و زانتان

Table 1- Values of express water, pH, shrinkage and product yield of control (battered and breaded shrimp) and shrimp nuggets obtained from surimi in combination with different percentages of carrageenan, alginate and xanthan

تیمار Treatment	درصد های هیدروکلوئید Hydrocolloids percentage	رطوبت تحت فشار Express water (%)	pH	چروکیدگی Shrinkage (%)	بازده محصول Product yield (%)
شاهد Control	-	7.0±12.22 <sup>a</sup>	6.0±95.01 <sup>a</sup>	8.4±49.70 <sup>a</sup>	91.1±81.09 <sup>abc</sup>
کاراژینان Carrageenan	0.5	6.0±19.01 <sup>ab</sup>	6.0±77.01 <sup>e</sup>	-1.0±39.85 <sup>b</sup>	90.0±55.37 <sup>bc</sup>
	1	6.0±85.01 <sup>ab</sup>	6.0±85.01 <sup>b</sup>	-1.1±86.03 <sup>b</sup>	91.0±34.18 <sup>abc</sup>
	1.5	8.1±14.51 <sup>a</sup>	6.0±80.01 <sup>cd</sup>	0.0±01.56 <sup>b</sup>	90.01±49.11 <sup>c</sup>
آلژینات Alginate	2	6.0±02.16 <sup>ab</sup>	6.079.01 <sup>cd</sup>	1.1±09.1 <sup>ab</sup>	93.10±32.46 <sup>ab</sup>
	0.5	6.0±82.06 <sup>ab</sup>	6.0±78.01 <sup>de</sup>	0.0±78.43 <sup>b</sup>	93. ±83.50 <sup>a</sup>
	1	6.0±62.21 <sup>ab</sup>	6.0±74.01 <sup>f</sup>	-1.0±11.37 <sup>b</sup>	93.0±14.32 <sup>ab</sup>
زانتان Xanthan	1.5	6.0±11.09 <sup>ab</sup>	6.0±60.01 <sup>i</sup>	0.0±01.66 <sup>b</sup>	91.0±87.41 <sup>abc</sup>
	2	4.0±44.19 <sup>ab</sup>	6.0±61.01 <sup>i</sup>	-1.0±27.97 <sup>b</sup>	91.0±82.45 <sup>abc</sup>
	0.5	6.0±01.29 <sup>ab</sup>	6.0±67.01 <sup>h</sup>	-2.1±54.30 <sup>b</sup>	93.1±14.35 <sup>ab</sup>
Xanthan	1	6.0±13.12 <sup>ab</sup>	6.0±71.0 <sup>e</sup>	-0.1±55.01 <sup>b</sup>	92.0±10.13 <sup>abc</sup>
	1.5	6.0±16.32 <sup>ab</sup>	6.0±80.01 <sup>b</sup>	0.0±88.6 <sup>b</sup>	92.0±17.34 <sup>abc</sup>
	2	7.0±13.51 <sup>a</sup>	6.0±79.0 <sup>cd</sup>	-1.0±30.65 <sup>b</sup>	92.0±19.35 <sup>abc</sup>

داده‌ها به صورت میانگین سه تکرار ± انحراف معیار بیان شده‌اند. حروف مختلف (a-c) در هر ردیف و ستون، نشان دهنده اختلاف معنی‌دار بین تیمارها می‌باشد (p<0.05). The data are expressed as the average of three replicates ± standard deviation. Different letters (a-c) in each row and column indicate significant differences between treatments (p<0.05).

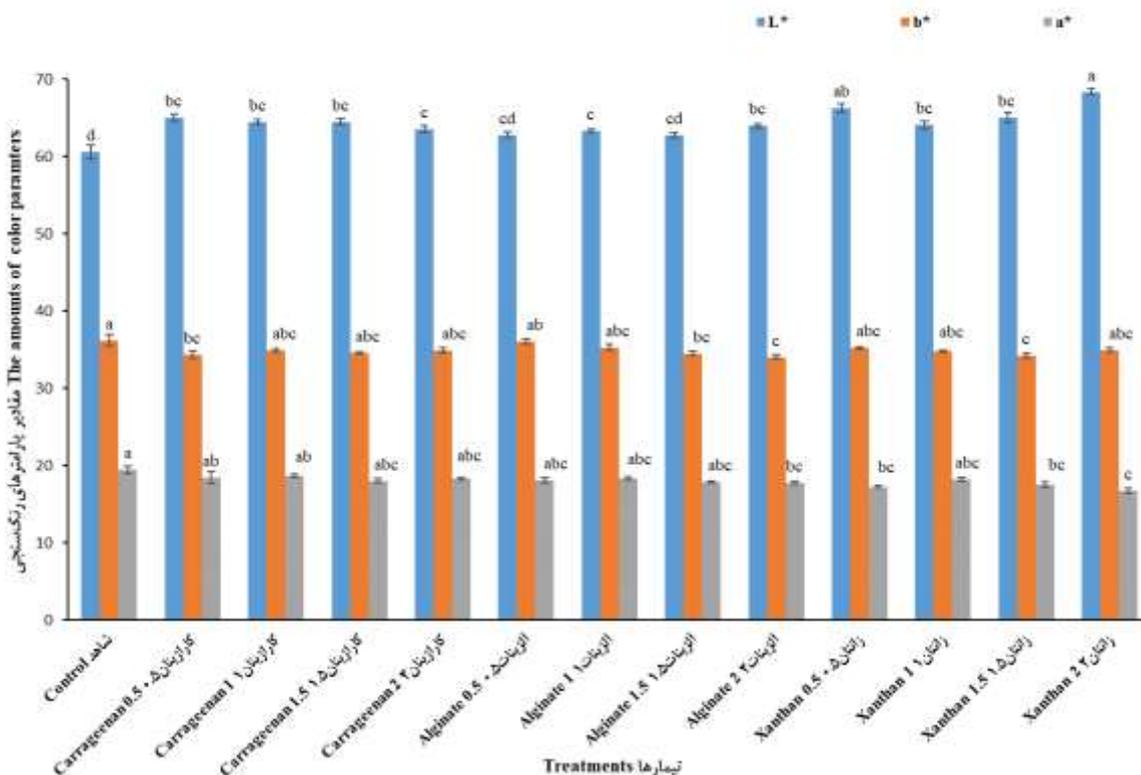
## رنگ‌سنجی

تیمارهای تولیدی انجام گرفت، تغییرات شاخص‌های رنگی حاصل، ناشی از اثر فرآیند سرخ کردن نیز می‌باشند. مطالعات گذشته نیز کاهش شاخص روشنایی و افزایش شاخص قرمزی و زردی را در محصولات سوخاری شده پس از سرخ کردن مقدماتی گزارش کردند (Moradi et al., 2009).

## بافت‌سنجی

چسبندگی<sup>۱</sup> بافت به معنی تغییر شکل رخ داده طی گاز زدن محصول می‌باشد (Noordin et al., 2014). در تیمارهای ناگت میگو تولیدی، تیمارهای حاوی ۲ درصد آلژینات بالاترین و تیمار شاهد، تیمارهای حاوی ۲ درصد زانتان، ۰/۵ درصد آلژینات، و ۱ و ۲ درصد کاراژینان در یک رده قرار داشته و کمترین مقدار چسبندگی را نشان دادند (p < ۰/۰۵). به نظر می‌رسد این نتیجه ناشی از وجود مقادیر بالاتر رطوبت در تیمارهای حاوی صمغ زانتان و کاراژینان بود. حق‌شناس و همکاران (Haghshenas et al., 2015) با بررسی تاثیر افزودن بتاگلوکان و کربوکسی متیل سلولز بر ویژگی‌های حسی و فیزیکی ناگت میگوی فراسودمند دریافتند نمونه‌های حاوی این دو نوع هیدروکلوئید کمترین میزان چسبندگی را نشان دادند که مطابق نتایج مطالعه حاضر بود، به طوری که مؤثر بودن هیدروکلوئیدها بر کاهش میزان چسبندگی بافت فرآورده را ثابت می‌کند.

یکی از مهم‌ترین پارامترهایی که بر میزان بازارپسندی محصولات لعاب‌دهی و سوخاری شده مؤثر است، رنگ نهایی این محصولات می‌باشد. طی فرآیند سرخ کردن محصولات لعاب‌دهی و سوخاری شده واکنش‌های شیمیایی مختلفی از قبیل دناتورده شدن پروتئین‌ها، ژلاتینه شدن نشاسته و واکنش قهوه‌ای شدن لعاب و پوشش آرد سوخاری رخ می‌دهد که کلیه این واکنش‌ها، باعث ایجاد تغییرات پیچیده در رنگ می‌گردند (Das et al., 2011). براساس نتایج ارائه شده در شکل ۲، کلیه‌ی شاخص‌های رنگ‌سنجی روشنایی، قرمزی و زردی در تیمارهای مختلف نسبت به تیمار شاهد اختلاف معنی‌داری را نشان دادند (p < ۰/۰۵). بالاترین مقدار شاخص روشنایی در تیمار حاوی ۲ درصد زانتان و کمترین مقدار آن در تیمار شاهد مشاهده شد. سایر تیمارها نیز مقدار روشنایی بالاتری را در مقایسه با تیمار شاهد نشان دادند. به نظر می‌رسد روشنایی پوسته متأثر از رنگ روشن ناگت‌های میگو (سوریمی) نیز بود که در مقایسه با رنگ صورتی تیمار شاهد (میگو)، پوسته ناگت‌های میگو روی زمینه‌ای با رنگ روشن‌تر قرار گرفتند، که با توجه به دانه‌بندی پوشش سوخاری، رنگ زمینه‌ی تیمارها تا حدودی توسط دستگاه رنگ‌سنج تشخیص داده شده و منجر به افزایش روشنایی رنگ کل ناگت‌ها نسبت به تیمار شاهد شد. هر دو تیمارهای شاهد و تیمارهای حاوی کاراژینان مقادیر شاخص‌های قرمزی و زردی بالاتری را در مقایسه با تیمارهای حاوی آلژینات و زانتان نشان دادند. از آنجا که اندازه‌گیری شاخص‌های رنگ‌سنجی از سطح رویی و سوخاری شده



شکل ۲- مقادیر شاخص‌های رنگ‌سنجی در تیمار شاهد (میگو سوخاری) و تیمارهای ناگت میگوی حاصل از سوریمی در ترکیب با درصد‌های مختلف کاراژینان، آلژینات و زانتان

Fig. 2. Values of color analysis of control (battered and breaded shrimp) and shrimp nuggets obtained from surimi in combination with different percentages of carrageenan, alginate and xanthan

داده‌ها به صورت میانگین سه تکرار  $\pm$  انحراف معیار بیان شده‌اند. حروف مختلف (a-c) در نمودار، نشان دهنده اختلاف معنی‌دار بین تیمارها می‌باشد ( $p < 0.05$ ).

The data are expressed as the average of three replicates  $\pm$  standard deviation. Different letters (a-c) indicate significant differences between treatments ( $p < 0.05$ ).

نسبت به تیمارهای شاهد، ۱/۵ درصد کاراژینان، ۱/۵ و ۲ درصد آلژینات نشان دادند ( $p < 0.05$ )، در حالی که سایر تیمارها اختلاف معنی‌داری را با شاهد نشان ندادند ( $p > 0.05$ ). تغییرات ساختاری که در سطح ناگت میگو طی فرآیند سرخ کردن مقدماتی در روغن عمیق رخ می‌دهد، باعث تشکیل حباب‌های کوچک و افزایش پف‌کردگی و در نتیجه افزایش میزان شاخص فنریت در بافت سوریمی می‌شود. علاوه بر آن، ژلاتینه شدن نشاسته‌ی موجود در پوسته سوخاری سدی را مقابل خروج حباب‌های تشکیل شده در بافت سوریمی تشکیل می‌دهد که منجر به افزایش حجم فرآورده و در نتیجه افزایش شاخص فنریت می‌گردد (Chen et al., 2021). به نظر می‌رسد که صمغ کاراژینان نسبت به صمغ‌های آلژینات و زانتان، برهمکنش‌های بالاتری با پروتئین‌های میوفیبریل تشکیل داد، به نحوی که مانع خروج بیشتر حباب‌های تشکیل شده گردید و در نتیجه شاخص فنریت در این تیمار بالاتر از سایر تیمارها

در فاکتورهای ارزیابی بافت، فاکتور تغییر شکل<sup>۱</sup> برای ارزیابی قابلیت شکست استفاده می‌شود. مقدار یا توانایی تغییر شکل، ارتباط مستقیمی با تردی پوسته دارد (Bechtel et al., 2018). در مطالعه حاضر، تغییرات معنی‌داری در فاکتور تغییر شکل میان تیمار شاهد و سایر تیمارها مشاهده نشد ( $p > 0.05$ )، به طوری که تغییرات تابع روند خاصی نبود. در مطالعه فیله ماهی سوخاری شده، مرادی و همکاران (Moradi et al., 2009) گزارش کردند که شاخص تغییر شکل پس از سرخ کردن مقدماتی دچار افزایش شد که با نتایج تحقیق حاضر مطابقت ندارد.

خاصیت فنریت<sup>۲</sup> یکی از ویژگی‌های مهم و شناخته شده محصولات قوام‌یابی شده است و به معنای توانایی محصول در بازگشتن به حالت اولیه هنگام فشردن است (Noordin et al., 2014). در مطالعه حاضر تیمارهای حاوی ۲ درصد کاراژینان مقدار فنریت بالاتری

2- springiness

1- Deformation

ارتباط مستقیمی میان قدرت تشکیل ژل و شاخص‌های رئولوژی بافت محصول مانند سختی، نیروی برشی و خاصیت ارتجاعی وجود دارد.

شد. پارک و همکاران (Park et al., 2008) گزارش کردند که هرچه میزان چسبندگی ژل تولیدی بیشتر باشد، میزان فنریت نیز افزایش می‌یابد. در این راستا، آنتونوا و همکاران (Antonova et al., 2003) در تحقیقی که روی ناگت مرغ سرخ شده انجام دادند، نشان دادند که

جدول ۲- مقادیر شاخص‌های بافت‌سنجی در تیمار شاهد (میگو سوخاری) و تیمارهای ناگت میگوی حاصل از سوریمی در ترکیب با درصد‌های مختلف کاراژینان، آلژینات و زانتان

Table 2- Values of texture analysis indices in control (battered and breaded shrimp) and shrimp nuggets obtained from surimi in combination with different percentages of carrageenan, alginate and xanthan

تیمار	درصد‌های هیدروکلوئید	چسبندگی	تغییر شکل	فنریت	سختی
Treatment	Hydrocolloids percentage	Adhesion (%)	Deformation (%)	Springiness (mm)	Hardness (N)
شاهد	-	55.5±7.42 <sup>b</sup>	14.0±9.01 <sup>a</sup>	128.8±50.08 <sup>b</sup>	3200.681±16.47 <sup>a</sup>
کاراژینان	0.5	48.7±2.29 <sup>b</sup>	14.0±9.01 <sup>a</sup>	223.31±66.06 <sup>ab</sup>	2506.198±83.96 <sup>ab</sup>
	1	49.3±2.43 <sup>b</sup>	14.0±9.01 <sup>a</sup>	238.57±71.84 <sup>ab</sup>	1966.242±16.11 <sup>bcd</sup>
	1.5	68.8±4.90 <sup>ab</sup>	15.12±8.10 <sup>a</sup>	121.29±25.01 <sup>b</sup>	2308.60±66.78 <sup>abc</sup>
آلژینات	0.5	72.7±5.83 <sup>ab</sup>	14.0±9.01 <sup>a</sup>	289.47±76.12 <sup>a</sup>	1879.147±66.83 <sup>bcd</sup>
	1	48.4±8.29 <sup>b</sup>	14.0±8.01 <sup>a</sup>	202.19±47.96 <sup>ab</sup>	1591.8±33.98 <sup>bcd</sup>
	1.5	67.5±5.55 <sup>ab</sup>	14.0±9.01 <sup>a</sup>	172.25±37.06 <sup>ab</sup>	750±90.85 <sup>def</sup>
زانتان	0.5	72.5±8.57 <sup>ab</sup>	14.0±7.01 <sup>a</sup>	121.24±23.12 <sup>b</sup>	479.46±50.6 <sup>f</sup>
	1	112.30±3.84 <sup>a</sup>	14.0±7.01 <sup>a</sup>	105.14±25.32 <sup>b</sup>	537.55±50.71 <sup>f</sup>
	1.5	64.10±19.97 <sup>ab</sup>	14.0±9.01 <sup>a</sup>	159.24±16.17 <sup>ab</sup>	1525.105±50.09 <sup>bcd</sup>
Xanthan	0.5	59.10±38.51 <sup>ab</sup>	14.0±8.01 <sup>a</sup>	207.28±38.43 <sup>ab</sup>	1248.181±33.24 <sup>cdef</sup>
	1	78.3±17.65 <sup>ab</sup>	14.0±7.01 <sup>a</sup>	203.8±75.98 <sup>ab</sup>	743.42±66.35 <sup>ef</sup>
	2	44.10±13.13 <sup>b</sup>	14.0±9.01 <sup>a</sup>	121.11±16.95 <sup>b</sup>	1157.138±83.40 <sup>cdef</sup>

داده‌ها به صورت میانگین سه تکرار ± انحراف معیار بیان شده‌اند. حروف مختلف (a-f) در هر ردیف و ستون، نشان دهنده اختلاف معنی‌دار بین تیمارها می‌باشد (p<0.05). The data are expressed as the average of three replicates ± standard deviation. Different letters (a-f) in each row and column indicate significant differences between treatments (p<0.05).

رسیده و پوسته سختی را در سطح خود تشکیل می‌دهد (Chen et al., 2021).

### آنالیز حسی

نتایج ارزیابی حسی ناگت‌های تولیدی در مقایسه با تیمار شاهد، در جدول ۳ و شکل ۳ نشان داده شده است. اولین معیار ارزیابی کیفیت حسی محصولات سوخاری شده، ویژگی‌های پوسته سوخاری آن است که اثر مهمی بر میزان پذیرش محصول دارد. با اعمال فرآیند سوخاری کردن، پوسته‌ای با بافت ترد و نارنجی رنگ روی محصول شکل می‌گیرد که به‌عنوان سدی مقابل کاهش رطوبت فرآورده عمل می‌کند (Kwaw et al., 2017). از نظر شکل ظاهری اختلاف معنی‌داری میان تیمار شاهد و تیمارهای ناگت میگو تولیدی مشاهده نشد (p > 0.05)، زیرا کلیه تیمارها در معرض فرآیند آردزنی اولیه، لعاب‌دهی و پوشش‌دهی با آرد سوخاری قرار گرفته بودند.

از آنجاکه هدف بهینه‌سازی بافت ناگت میگو با کاربرد هیدروکلوئیدها بود، در بررسی آنالیز حسی، تیماری که نزدیک‌ترین نتیجه به تیمار شاهد (میگو سوخاری) را دارا بود به‌عنوان تیمار بهینه در نظر گرفته شد.

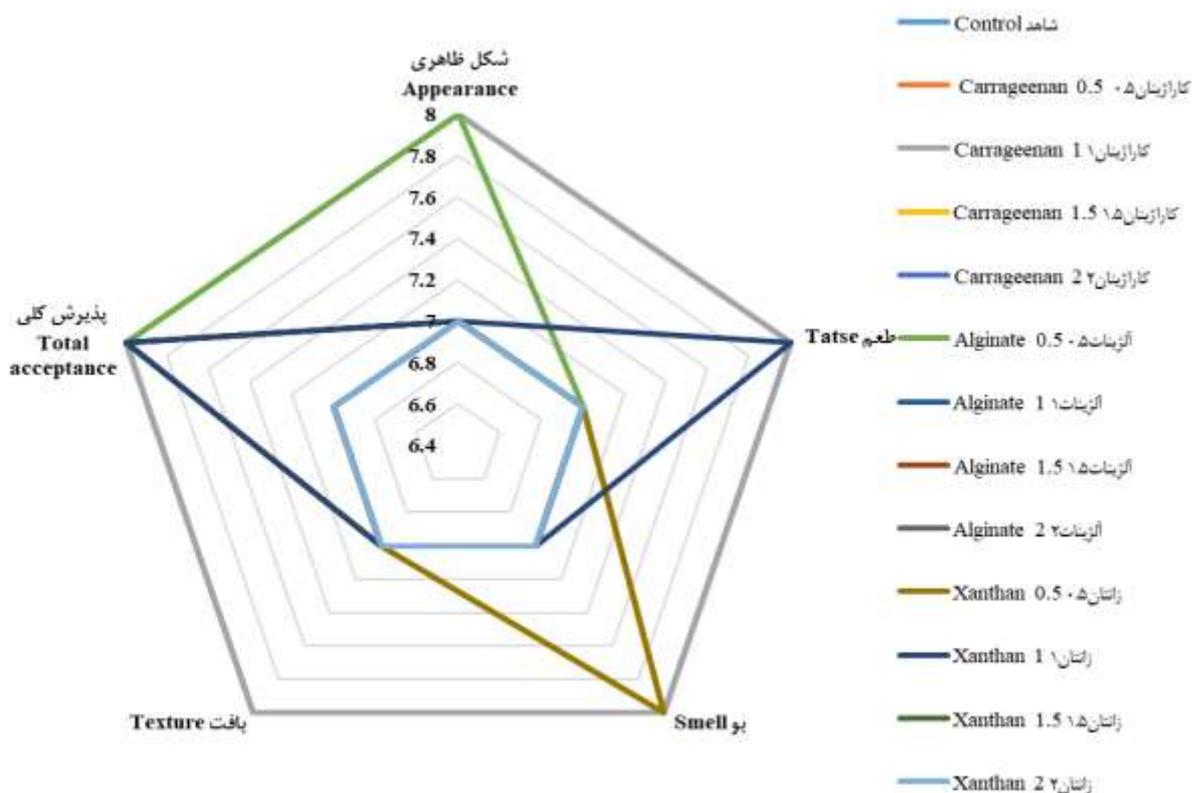
طبق نتایج جدول ۲، مقدار فاکتور سختی<sup>۱</sup> در تیمار شاهد بالاتر از تیمارهای حاوی درصد‌های مختلف آلژینات و زانتان بود (p < 0.05). تیمارهای حاوی درصد‌های مختلف کاراژینان در مقایسه با شاهد، اختلاف معنی‌داری را در فاکتور سختی نشان ندادند (p > 0.05). تحقیقات گذشته ثابت کردند که با افزایش میزان رطوبت ماده غذایی، میزان سختی آن کاهش می‌یابد و کمترین میزان شاخص سختی در محصولی دیده می‌شود که بالاترین مقدار رطوبت را دارا باشد (Varela & Fiszman, 2011). بطور کلی رابطه معکوسی میان میزان رطوبت ماده غذایی و میزان شاخص سختی دیده شده بود. در تحقیق حاضر، رابطه‌ی معکوس میان سختی و رطوبت در تیمارهای حاوی آلژینات و زانتان مشاهده شد. در نتیجه‌ی دمای ناشی از فرآیند انعقاد و سرخ کردن اولیه، ابتدا، پروتئین‌های میوفیبریل منبسط شده و پیوندهای دی‌سولفید پلیمریزه شده‌ی بیشتری تشکیل می‌دهند، که پلیمریزه شدن این پیوندها، در نهایت منجر به متراکم شدن و منقبض شدن پروتئین‌های میوفیبریل و افزایش سختی بافت می‌شوند (Chen et al., 2021). در دمای ناشی از فرآیند آماده‌سازی، پروتئین‌های محلول در نمک حل شده و تحت شرایط کم فشار با مولکول‌های آب ترکیب می‌شوند. به عبارت دیگر، سوریمی با سرعت بالاتری به مرحله‌ی دهیدراته شدن

جدول ۳- مقادیر شاخص‌های آنالیز حسی در تیمار شاهد (میگو سوخاری) و تیمارهای ناگت میگوی حاصل از سوریمی در ترکیب با درصد‌های مختلف کاراژینان، آلژینات و زانتان

Table 3- Values of sensory analysis in control (battered and breaded shrimp) and shrimp nuggets obtained from surimi in combination with different percentages of carrageenan, alginate and xanthan

تیمار Treatment	درصد‌های هیدروکلوئید Hydrocolloids percentage	شکل ظاهری Appearance	طعم Taste	بو Smell	بافت Texture	پذیرش کلی Overall acceptance
شاهد Control	-	8.0±33.15 <sup>a</sup>	8.0±9 <sup>ab</sup>	8.0±46.16 <sup>ab</sup>	8.0±13.8 <sup>ab</sup>	8.0±40.13 <sup>ab</sup>
کاراژینان Carrageenan	0.5	7.0±93.11 <sup>a</sup>	7.0±40.13 <sup>bc</sup>	7.0±60.19 <sup>c</sup>	7.0±73.11 <sup>bc</sup>	7.0±73.15 <sup>bcd</sup>
	1	8.0±40.16 <sup>a</sup>	8.0±53.13 <sup>a</sup>	8.0±73.11 <sup>a</sup>	8.0±73.11 <sup>a</sup>	8.0±80.10 <sup>a</sup>
	1.5	7.0±86.13 <sup>a</sup>	7.0±80.10 <sup>bc</sup>	8.0±45.10 <sup>abc</sup>	7.0±66.12 <sup>bc</sup>	7.0±73.15 <sup>bcd</sup>
آلژینات Alginate	2	7.0±93.11 <sup>a</sup>	7.0±60.16 <sup>bc</sup>	7.0±86.13 <sup>bc</sup>	7.0±60.13 <sup>bc</sup>	7.0±26.15 <sup>d</sup>
	0.5	8.0±80.09 <sup>a</sup>	7.0±66.18 <sup>bc</sup>	8.0±13.21 <sup>abc</sup>	7.0±86.16 <sup>bc</sup>	8.0±13.16 <sup>abc</sup>
	1	8.0±75.10 <sup>a</sup>	7.0±33.15 <sup>bc</sup>	7.0±86.13 <sup>bc</sup>	7.0±53.21 <sup>bc</sup>	7.0±26.15 <sup>d</sup>
زانتان Xanthan	1.5	8.0±70.12 <sup>a</sup>	7.0±66.12 <sup>bc</sup>	7.0±86.13 <sup>bc</sup>	7.0±53.21 <sup>bc</sup>	7.0±40.19 <sup>cd</sup>
	2	7.0±86.13 <sup>a</sup>	7.0±53.13 <sup>bc</sup>	7.0±73.15 <sup>bc</sup>	7.0±66.12 <sup>bc</sup>	7.0±33.23 <sup>cd</sup>
	0.5	8.0±33.12 <sup>a</sup>	7.0±80.17 <sup>bc</sup>	8.0±46.16 <sup>ab</sup>	7.0±60.13 <sup>bc</sup>	7.0±66.18 <sup>bcd</sup>
زانتان Xanthan	1	8.0±13.12 <sup>a</sup>	7.0±66.15 <sup>bc</sup>	7.0±86.19 <sup>bc</sup>	8.0±51.12 <sup>bc</sup>	7.0±66.27 <sup>bcd</sup>
	1.5	7.0±93.15 <sup>a</sup>	7.0±86.13 <sup>abc</sup>	7.0±86.16 <sup>bc</sup>	7.0±86.09 <sup>bc</sup>	7.0±40.19 <sup>cd</sup>
	2	7.0±93.15 <sup>a</sup>	7.0±26.15 <sup>c</sup>	7.0±73.18 <sup>bc</sup>	7.0±33.12 <sup>c</sup>	7.0±80.02 <sup>bcd</sup>

داده‌ها به صورت میانگین سه تکرار ± انحراف معیار بیان شده‌اند. حروف مختلف (a-d) در هر ردیف و ستون، نشان دهنده اختلاف معنی‌دار بین تیمارها می‌باشد (p<0.05).  
The data are expressed as the average of three replicates ± standard deviation. Different letters (a-d) in each row and column indicate significant differences between treatments (p<0.05).



شکل ۳- مقادیر شاخص‌های آنالیز حسی در تیمار شاهد (میگو سوخاری) و تیمارهای ناگت میگوی حاصل از سوریمی در ترکیب با درصد‌های مختلف کاراژینان، آلژینات و زانتان

Fig. 3. Values of sensory analysis in control (battered and breaded shrimp) and shrimp nuggets obtained from surimi in combination with different percentages of carrageenan, alginate and xanthan

رنگ، طعم، سختی و پذیرش کلی را در نمونه‌های حاوی هیدروکلئیدهای زانتان، گوار و کاراژینان گزارش کردند.

### نتیجه‌گیری

کاربرد هیدروکلئیدهای آلژینات و زانتان در بافت سوریمی سبب کاهش معنی‌دار میزان چربی در فرآورده نهایی شدند. کلیه تیمارهای ناگت میگوی تولیدی، مقدار چروکیدگی کمتری را در مقایسه با میگو سوخاری نشان دادند. حضور کاراژینان و آلژینات در ارتباط با پروتئین‌های میوفیبریل سوریمی به ترتیب باعث افزایش فنریت و چسبندگی بافت ناگت‌های میگو شدند. شاخص‌های رنگ‌سنجی ( $L^*$ ،  $a^*$  و  $b^*$ ) در این مطالعه بیشتر تحت تأثیر فرآیند سرخ کردن قرار داشت. تیمار حاوی ۱ درصد کاراژینان بالاترین امتیاز شاخص‌های حسی را دریافت کرد و میزان پذیرش آن در محدوده‌ی میزان پذیرش تیمار شاهد قرار گرفت. با توجه به نتایج حاصل، صمغ کاراژینان اثر بهتری را نسبت به صمغ‌های آلژینات و زانتان بر بهبود بافت ناگت میگو نشان داد و به‌طور کلی، کاربرد مقدار ۱ درصد کاراژینان در این زمینه پیشنهاد می‌گردد.

تیمار حاوی ۱ درصد کاراژینان بالاترین امتیاز شاخص‌های طعم، بو، بافت و پذیرش کلی را نسبت به سایر تیمارهای حاوی صمغ‌های دیگر دارا بود ( $p < 0.05$ ) در حالی که، اختلاف معنی‌داری با تیمار شاهد نشان نداد. میزان پذیرش کلی برای ناگت‌های میگوی تولیدی در محدوده‌ی امتیازهای ۷/۲۶-۸/۸۰ بود که توسط ارزیابان بصورت "خیلی خوب" ارزیابی شده بود که پذیرش بالای ناگت‌های میگوی تولیدی را توسط ارزیابان نشان داد. اما به‌نظر می‌رسد، افزایش درصد هیدروکلئیدها اثر کاهشی معنی‌داری بر مقدار پذیرش ناگت‌های میگو نشان داد به‌طوری که تیمارهای حاوی ۲ درصد کاراژینان کمترین پذیرش کلی را دریافت نمودند. همچنین، تیمار ۲ درصد زانتان کمترین امتیاز طعم و بافت را به خود اختصاص داد که دلیل آن می‌تواند به‌دلیل جذب بالای آب توسط صمغ زانتان باشد که منجر به تشکیل حالت ژله‌ای بیشتر و در نتیجه ایجاد بافتی نرم‌تر در هنگام جویدن در مقایسه با تیمار شاهد شد. برخلاف نتایج حاصل از این تحقیق، دمیرسی و همکاران (Demirci et al., 2014) کاهش معنی‌دار شاخص‌های حسی

### References

- Antonova, I., Mallikarjunan, P., & Duncan, S.E. (2003). Correlating objective measurements of crispness in breaded fried chicken nuggets with sensory crispness. *Journal of Food Science*, 68(4), 1308–1315. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2003.tb09644.x>
- AOAC. (2002). *Official Methods of Analysis*. Cunniff, (Ed.), Gaithersburg, MD, pp. 3.
- Bechtel, P.J., Bland, J.M., Woods, K., Lea, J.M., Brashear, S.S., Boue, S.M., & Bett-Garber, K.L. (2018). Effect of par frying on composition and texture of breaded and battered catfish. *Foods*, 7(4), 46. <https://doi.org/10.3390/foods7040046>
- Chen, Ch., Li, P., Hu, W., Lan, M., Chen, M., & Chen, H. (2008). Using HPMC to improve crust crispness in microwave-reheated battered mackerel nuggets: water barrier effect of HPMC. *Journal of Food Hydrocolloids*, 22, 1334-1344. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2007.07.003>
- Chen, J., Lei, Y., Zuo, J., Guo, Z., Miao, S., Zheng, B., & Lu, X. (2021). The effect of vacuum deep-frying technology and raphanus sativus on the quality of surimi cubes. *Foods*, 10(11), 2544. <https://doi.org/10.3390/foods10112544>
- Das, A.K., Anjaneyulu, A.S.R., Gadekar, Y.P., Singh, R.P., & Pragati, H. (2008). Effect of full-fat soy paste and textured soy granules on quality and shelf-life of goat meat nuggets in frozen storage. *Journal of Meat Science*, 80, 607-614. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2008.02.011>
- Das, R., Pawar, D.P., & Modi, V.K. (2011). Quality characteristics of battered and fried chicken: comparison of pressure frying and conventional frying. *Journal of Food Science Technology*, <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0350-z>
- Demirci, Z.O., Yilmaz, I., & Demirci, A.Ş. (2014). Effects of xanthan, guar, carrageenan and locust bean gum addition on physical, chemical and sensory properties of meatballs. *Journal of Food Science and Technology*, 51(5), 936-942. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0588-5>
- Emo, S.H., Kim, J.A., Son, B.Y., You, D.H., Han, J.M., Oh, J.H., Kim, B.Y., & Kong, C.S. (2013). Effects of carrageenan on the gelatinization of salt-based surimi gels. *Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 16, 143-147. <https://doi.org/10.5657/FAS.2013.0143>
- Galus, S., & Lenart, A. (2013). Development and characterization of composite edible films based on sodium alginate and pectin. *Journal of Food Engineering*, 115(4), 459–465. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.03.006>

11. Gibis, M., Schuh, V., & Weiss, J. (2015). Effects of carboxymethyl cellulose (CMC) and microcrystalline cellulose (MCC) as fat replacers on the microstructure and sensory characteristics of fried beef patties. *Journal of Food Hydrocolloids*, 45, 236-246. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.11.021>
12. Gulzar, S., & Benjakul, S. (2020). Impact of pretreatment and atmosphere on quality of lipids extracted from cephalothorax of Pacific white shrimp by ultrasonic assisted process. *Food Chemistry*, 309, e125732. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125732>
13. Haghshenas, M., Hosseini, H., Nayebzadeh, K., Shabkoobi Kakesh, B., Mohmoudzadeh, M., & Komeyli Fonood, R. (2015). Effect of beta glucan and carboxymethyl cellulose on lipid oxidation and fatty acid composition of pre-cooked shrimp nugget during storage. *Journal of LWT-Food Science and Technology*, In Press. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.01.042>
14. Hannan, M.A., Habib, K.A., Shahabuddin, A.M., Haque, M.A., & Munir, M.B. (2022). Frozen shrimp and other seafood-based value-added products. In: *Post-Harvest Processing, Packaging and Inspection of Frozen Shrimp: A Practical Guide*. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-1566-6\\_13](https://doi.org/10.1007/978-981-19-1566-6_13)
15. Hauzoukim, Martin Xavier, K.A., Kannuchamy, N., Balange, A., & Gudipati, V. (2019). Development of enrobed fish products: Improvement of functionality of coated materials by added aquatic polymers. *Journal of Food Process Engineering*, 42(3), e12999. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12999>
16. Hasanpour, F., Hoseini, E., Motalebi, A.A., & Darvish, F. (2012). Effects of soy protein concentration and xanthan gum on physical properties of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) surimi. *Iranian Journal of Fisheries Sciences*, 11, 518-530.
17. Heydari, S., Shabanpour, B., & Pourashouri, P. (2016). Effect of wheat and oat dietary fibers on quality and prevention of shrimp analogue products deformation during deep frying. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 14(1), 207-217.
18. Huda, N., Seow, E.K., Normawati, M.N., Aisyah, N.N., Fazilah, A., & Easa, A.M. (2013). Effect of duck feet collagen addition on physicochemical properties of surimi. *International Food Research Journal*, 20(2).
19. Jamshidi, A., & Shabanpour, B. (2014). The effect of hydroxypropyl methylcellulose (HPMC) added pre-dust and batter of Talang queenfish (*Scomberoides commersonnianus*) nuggets on the quality and reduction of oil uptake. *MINERVA BIOTECNOLOGICA*, 26(1), 57-64.
20. Kwaw, E., Sackey, A.S., Apaliya, M.T., & Tchabo, W. (2017). Utilization of composite flours as breading agents for deep frying of chicken breast. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 11, 1523-1530. <https://doi.org/10.1007/s11694-017-9531-4>
21. Li, D., Prinyawiwatkul, W., Tan, Y., Luo, Y., & Hong, H. (2021). Asian carp: A threat to American lakes, a feast on Chinese tables. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(3), 2968-2990. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12747>
22. Moradi, Y., Bakar, J., Muhamad, S.S., & Man, Y.C. (2009). Effects of different final cooking methods on physicochemical properties of breaded fish fillets. *American Journal Food Technology*, 4, 136-145.
23. Nguyen, B.E. (2009). Effects of methylcellulose on the quality and shelf-life of deep-fat fried and oven baked chicken nuggets. A Thesis in Food Science.
24. Nino, T., Sasidharan, A., Sabu, S., Sunooj, K.V., Pradhan, C., & Xavier, K.M. (2022). Effect of vacuum tumbling assisted marination on textural and sensory properties of deep-fried Indian white shrimp. *Indian Journal Fish*, 69(3), 100-107. <https://doi.org/10.21077/ijf.2022.69.3.112765-12>
25. Noordin, W.N., Shunmugam, N., & Huda, N. (2014). Application of salt solution and vacuum packaging in extending the shelf life of cooked fish balls for home and retail uses. *Journal of Food Quality*, 13(6), 444-452. <https://doi.org/10.1111/jfq.12105>
26. Núñez-Flores, R., Cando, D., Borderías, A.J., & Moreno, H.M. (2018). Importance of salt and temperature in myosin polymerization during surimi gelation. *Food Chemistry*, 239, 1226-1234. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.07.028>
27. Park, Y.D., Yoon, K.S., & Lee, C.M. (2008). Thermal syneresis affected by heating schedule and moisture level in surimi gels. *Journal of Food Engineering and Physical Properties*, 73, 103-107. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00644.x>
28. Pourashouri, P., Shabanpour, B., Kordjazi, M., & Jamshidi, A. (2020). Characteristic and shelf life of fish sausage: fortification with fish oil through emulsion and gelled emulsion incorporated with green tea extract. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(12), 4474-4482. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10488>
29. Pourashouri, P., Shabanpour, B., Heydari, S., & Raeisi, S. (2022). Encapsulation of fish oil by carrageenan and gum tragacanth as wall materials and its application to the enrichment of chicken nuggets. *LWT*, 137, 110334. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110334>
30. Pourashouri, P., Chapela, M.J., Atanassova, M., Cabado, A.G., Vieites, J.M., & Aubourg, S.P. (2013). Quality loss assessment in fish-based ready-to-eat foods during refrigerated storage. *Grasas y Aceites*, 64(1), 22-29.

31. Ramirez, J.A., Uresti, R.M., Velazquez, G., & Vazquez, M. (2010). Food hydrocolloids as additives to improve the mechanical and functional properties of fish products: A review. *Journal of Food Hydrocolloids*, 25, 1842-1852. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.05.009>
32. Shabanpour, B., Kashiri, H., Moloudi, Z., & Hoseininezhad, A.S. (2007). Effects of washing bouts and times on surimi quality prepared from common carp (*Cyprinus carpio*). *Iranian Scientific Fisheries Journal* 16(1), 81-92.
33. Sun, X.D., & Holley, R.A. (2011). Factors influencing gel formation by myofibrillar proteins in muscle foods. *Compr. Review Food Science Food Safety*, 10, 33-51. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2010.00137.x>
34. Varela, P., & Fiszman, S.M. (2011). Review: Hydrocolloids in fried food. *Journal of Food Hydrocolloids*, 25, 1801-1812. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.01.016>
35. Yingchutrakul, M., Wasinnitwong, N., Benjakul, S., Singh, A., Zheng, Y., Mubango, E., & Hong, H. (2022). Asian carp, an alternative material for surimi production: progress and future. *Foods*, 11(9), 1318. <https://doi.org/10.3390/foods11091318>
36. Zhang, T., Li, Z., Wang, Y., Xue, Y., & Xue, C. (2016). Effects of konjac glucomannan on heat-induced changes of physicochemical and structural properties of surimi gels. *Food Research International*, 83, 152-161. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.03.007>



## Effect of Microwave Treatment on Physicochemical Characteristics and Efficiency of Sour Cherry Drying Process

F. Salehi<sup>1\*</sup>, M. Inanloodoghrouz<sup>2</sup>, S. Ghazvineh<sup>3</sup>, P. Moradkhani<sup>3</sup>

1, 2 and 3- Associate Professor, M.Sc. Student and B.Sc. Student, Department of Food Science and Technology, Faculty of Food Industry, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran, respectively.

(\*- Corresponding Author's Email: [F.Salehi@Basu.ac.ir](mailto:F.Salehi@Basu.ac.ir))

Received: 24.07.2023  
Revised: 17.08.2023  
Accepted: 13.09.2023  
Available Online: 13.09.2023

### How to cite this article:

Salehi, F., Inanloodoghrouz, M., Ghazvineh, S., & Moradkhani, P. (2024). Effect of microwave treatment on physicochemical characteristics and efficiency of sour cherry drying process. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 20(2), 239-350. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/ifstrj.2023.83605.1272>

### Introduction

Sour cherries (*Prunus cerasus* L.) are relatively diverse and broadly distributed around the world, being found in Asia, Europe, and North America. Sour cherries have unique anthocyanin content, and rich in phenolic compounds. The fruits are generally used for processing purposes, such as for production juice and jam. The fruits of sour cherries can also be frozen and dried. One of the best methods for the preservation of agricultural product is drying, which involves removing water from the manufactured goods. Dried sour cherries have a long shelf life and therefore may be a fine alternative to fresh fruit all year round. There are no reports on the effect of microwave pretreatment on the hot air drying kinetics of sour cherries in the literature. Hence, the purpose of this study was to estimate the impacts of microwave pretreatment on the total phenolics, drying time, mass transfer kinetic, effective moisture diffusivity, total color difference index, shrinkage and rehydration of sour cherry. In addition, the moisture ratio changes of sour cherry during drying were modeled.

### Material and Methods

Sour cherries were purchased from the market at Bahar, Hamedan Province, Iran. The average diameter of fresh sour cherries was 1.6 cm. In this study, the water content of fresh and dried sour cherries was calculated using an oven at 103°C for 5 h (Shimaz, Iran). In this research, the effect of microwave time on the drying time, effective moisture diffusivity coefficient and rehydration of sour cherries was investigated and drying kinetics were modeled. To apply the microwave pretreatment on the sour cherries, a microwave oven (Gplus, Model; GMW-M425S.MIS00, Goldiran Industries Co., Iran) was used under atmospheric pressure. In this work, the influence of the microwave pretreatment time at five levels of 0, 30, 60, 90, and 120 s (power=220W) on the cherries was examined. After taking out the treated sour cherries from microwave device, the samples were placed in the hot-air dryer (70°C) as a thin layers. The dehydration kinetics of sour cherries were explained using 7 simplified drying equations. Fick's second law of diffusion using spherical coordinates was used to calculate the moisture diffusivity of sour cherries at various hot-air drying conditions. The rehydration test was conducted with a water bath (R.J42, Pars Azma Co., Iran). Dried sour cherries were weighed and immersed for 30 min in distilled water in a 250 ml glass beaker at 50°C.

### Results and Discussion

The results showed that microwave treatment led to an increase in moisture removal rate from the sour cherries, an increase in the effective moisture diffusivity coefficient, and, consequently, a decrease in drying time. By increasing the microwave time from 0 to 12 s, the average drying time of sour cherries in the hot-air dryer was decreased from 370 min to 250 min ( $p < 0.05$ ). The average effective moisture diffusivity coefficient calculated for



©2023 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

<https://doi.org/10.22067/ifstrj.2023.83605.1272>

the samples placed in the hot-air dryer was  $4.25 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s. Increasing the microwave time from 0 to 120 s increased the average effective moisture diffusivity coefficient by 85%. The maximum amount of phenolic was related to the sample treated with microwave for 90 seconds. Microwave treatment time had no significant effect on the rehydration of dried sour cherries.

## Conclusion

Kinetic modeling of weight changes of sour cherries during drying was carried out using models in the sources, followed the Page model was selected as the best model to predict moisture ratio changes under the selected experimental conditions. The mean values of sum of squares due to error, root mean square error, and r for all samples ranged from 0.001 to 0.007, 0.005 to 0.017, and 0.997 to 0.999, respectively. Generally, 120 s pre-treatment by microwave is the best condition for drying sour cherries.

**Keywords:** Drying, Effective moisture diffusivity coefficient, Shrinkage, Total phenolic

## مقاله پژوهشی

جلد ۲۰، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۳، ص. ۳۳۹-۳۵۰

# اثر تیماردهی با امواج مایکروویو بر خصوصیات فیزیکوشیمیایی و کارایی فرآیند خشک شدن آلبالو

فخرالدین صالحی<sup>۱\*</sup>، معین اینانلودوقوز<sup>۲</sup>، سارا قزوینه<sup>۳</sup> - پریسا مرادخانی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۲

## چکیده

آلبالو خشک‌شده ماندگاری زیادی دارد و می‌تواند جایگزین خوبی برای میوه تازه باشد. در این پژوهش اثر اعمال پیش‌تیمار مایکروویو بر محتوای فنل کل، زمان خشک‌شدن، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت، شاخص تغییرات رنگ کلی، چروکیدگی و آبگیری مجدد آلبالو بررسی و سینتیک خشک‌شدن آن مدل‌سازی شد. برای اعمال پیش‌تیمار مایکروویو، آلبالوها به مدت ۰، ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ ثانیه داخل دستگاه مایکروویو قرار گرفتند و بعد از خروج از دستگاه، به‌صورت لایه‌نازک داخل خشک‌کن با دمای ۷۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند. نتایج این پژوهش نشان داد که تیمار مایکروویو، به‌صورت معنی‌داری سبب افزایش سرعت خروج رطوبت از آلبالوها، افزایش ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و در نتیجه باعث کاهش زمان خشک‌کردن آلبالوها شد ( $p < 0.05$ ). با افزایش زمان تیمار مایکروویو از صفر به ۱۲۰ ثانیه، میانگین زمان خشک‌شدن آلبالوها در خشک‌کن ۳۲ درصد کاهش یافت. همچنین با افزایش زمان تیمار مایکروویو از صفر به ۱۲۰ ثانیه، متوسط ضریب نفوذ مؤثر رطوبت ۸۵ درصد افزایش یافت ( $p < 0.05$ ). حداکثر مقدار فنل مربوط به نمونه تیمار شده با مایکروویو به مدت ۹۰ ثانیه بود. با افزایش اعمال تیمار مایکروویو، شاخص تغییرات رنگ نمونه‌ها افزایش یافت، البته این تغییر معنی‌دار نبود ( $p > 0.05$ ). با اعمال بیش از ۶۰ ثانیه مایکروویو، به علت افزایش سرعت خروج رطوبت از نمونه و کاهش زمان خشک‌شدن، چروکیدگی نمونه‌ها نیز به‌صورت معنی‌داری کاهش یافت ( $p < 0.05$ ). زمان اعمال امواج مایکروویو تأثیر معنی‌داری بر آبگیری مجدد آلبالوهای خشک‌شده نداشت. مدل پیچ به‌عنوان مدل مناسب برای پیش‌بینی کننده تغییرات نسبت رطوبت تحت شرایط مورد آزمایش انتخاب شد. در مجموع، اعمال ۱۲۰ ثانیه مایکروویو پیش از فرآیند خشک‌کردن آلبالو به‌دلیل حفظ ترکیبات فنلی، افزایش سرعت انتقال جرم و کاهش زمان خشک‌کردن، توصیه می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** چروکیدگی، خشک‌کردن، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت، فنل کل

## مقدمه

استفاده کرد. همچنین این محصول به‌صورت منجمد و خشک نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد (Doymaz, 2007; Šumić et al., 2013). فرآیند خشک‌کردن می‌تواند یکی از مهمترین فرآیندها در تهیه مواد غذایی از محصولات کشاورزی باشد. خشک‌کردن حذف حداکثر آب از محصول مورد نظر با هدف افزایش مدت ماندگاری است (Momenzadeh et al., 2010). به خشک‌شدن فرآورده‌های غذایی به‌صورت تک لایه تحت شرایط ثابت دمایی و رطوبتی خشک‌کردن به روش لایه‌نازک می‌گویند. در اکثر موارد خشک‌کردن باعث بهبود

آلبالو (*Prunus cerasus* L.) میوه‌ای نسبتاً متنوع است و به‌طور گسترده در سراسر جهان پراکنده است و در آسیا، اروپا و آمریکای شمالی یافت می‌شود. آلبالو به‌دلیل طعم خاص و ترکیبات مفید برای سلامتی، یکی از محبوب‌ترین میوه‌ها است. آلبالو دارای ترکیبات منحصر به فردی همچون انواع آنتوسیانین و ترکیبات فنلی مختلف است. میوه تازه آلبالو را می‌توان علاوه بر تازه‌خوری برای تهیه کمپوت، آبمیوه، مربا و شربت

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشیار، دانشجوی کارشناسی ارشد و دانشجوی کارشناسی، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

(Email: F.Salehi@Basu.ac.ir

\*) نویسنده مسئول:

ویژگی ارگانولپتیکی محصول می‌گردد. محققان زیادی سینتیک خشک کردن محصولات کشاورزی را جهت یافتن بهترین مدل ریاضی برای توصیف سینتیک خشک شدن آن‌ها بررسی کرده‌اند (Delgado & da Silva, 2014; Ghaderi et al., 2011). متداول‌ترین روش خشک کردن محصولات کشاورزی استفاده از جریان هوای داغ و به روش انتقال حرارت جابه‌جایی است که شامل انتقال جرم و حرارت هم‌زمان در محصول می‌باشد. خشک کردن با خشک‌کن هوای داغ علاوه بر داشتن مزایایی مانند امکان کنترل دقیق دما و شرایط فرآیند، دارای معایبی مانند زمان طولانی‌تر برای خشک کردن محصولات در مقایسه با سایر روش‌ها است (Amin Ekhlas et al., 2023).

استفاده از پیش‌تیمارهای مختلف جهت کاهش زمان خشک کردن و بهبود خواص تغذیه‌ای، امروزه جایگاه ویژه‌ای در صنعت خشک کردن مواد غذایی دارد. همچنین استفاده از پیش‌تیمار سبب کاهش برخی از تغییرات ناخواسته مانند تغییر رنگ و بافت محصولات کشاورزی می‌شود (Sahin & Doymaz, 2017). امواج مایکروویو بخشی از طیف امواج الکترومغناطیس هستند و در طیف بین امواج دی‌الکتریک و فرسرخ قرار گرفته‌اند. این امواج به دلیل دارا بودن فرکانس کم، برخلاف اشعه ایکس و گاما، قادر به شکستن پیوندهای شیمیایی و آسیب‌رسانی به مولکول‌های مواد غذایی نیستند. مایکروویو از طریق ایجاد اصطکاک مولکولی به خصوص بین مولکول‌های آب، در غذا تولید حرارت می‌کند. حرارت تولید شده در سیستم مایکروویو به میزان آب موجود در مواد غذایی بستگی دارد و به عمق غذا نفوذ می‌کند (Salehi, 2020; Wray & Ramaswamy, 2015). نتایج گزارش‌های مربوط به مطالعات مختلف نشان می‌دهد که استفاده از پیش‌تیمار مایکروویو سبب کمترین آسیب به ترکیبات تغذیه‌ای موجود در گیاهان می‌شود (Akbarian Meymand et al., 2015).

## مواد و روش‌ها

### درصد رطوبت اولیه آلبالو

این پژوهش در محدوده زمانی بهار تا تابستان ۱۴۰۲ در آزمایشگاه تخصصی دانشکده صنایع غذایی انجام شد. برای این پژوهش، آلبالو تازه از شهرستان بهار (استان همدان)، تهیه و تا زمان مصرف در یخچال نگهداری شد. برای تعیین رطوبت اولیه نمونه‌ها، از دستگاه آون (شیماز، ایران) با دمای ۱۰۳ درجه سلسیوس و در مدت زمان ۵ ساعت استفاده شد.

### اعمال تیمار مایکروویو

با توجه به اینکه آلبالو تازه بیشتر به صورت سالم و همراه با هسته خشک و به بازار فروش عرضه می‌شود، در این پژوهش نیز برای اعمال تیمار مایکروویو و فرآیند خشک کردن از آلبالوهای سالم (هسته‌دار) استفاده شد. پیش‌تیمار مایکروویو توسط دستگاه مایکروویو (جی پلاس، مدل GMW-M425S.MIS00، شرکت گلدیران، ایران) بر آلبالوها اعمال گردید. برای این منظور، آلبالوها داخل دستگاه مایکروویو با توان ۲۲۰ وات به مدت ۰، ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ ثانیه قرار گرفتند.

### فرآیند خشک کردن آلبالوهای تیمار شده

برای خشک کردن آلبالوهای تیمار شده از خشک کردن همرفتی (هوای داغ) استفاده شد. برای انجام عملیات خشک کردن با هوای داغ از آون فن‌دار با دمای ۷۰ درجه سلسیوس (شیماز، ایران) استفاده شد. در این روش تغییرات وزن نمونه‌ها در طی خشک شدن تا دستیابی به وزن ثابت، توسط ترازوی دیجیتالی (کیا، مدل SL1000، ایران) با دقت  $\pm 0.01$  گرم، ثبت شد.

عین‌افشار (Einafshar, 2014) در پژوهشی خصوصیات فیزیکوشیمیایی، میکروبی و آنتی‌اکسیدانی چهار رقم آلبالو خشک شده به روش اسمزی را بررسی کرد. نتایج این پژوهش نشان داد که ارقام مختلف آلبالو از نظر خصوصیات رنگی، مقدار ترکیبات فنلی، آنتوسیانین‌ها و قدرت آنتی‌اکسیدانی با یکدیگر متفاوت هستند. همچنین انجام پیش‌تیمار اسمز بر خشک کردن آلبالو مؤثر بوده و کیفیت محصول خشک شده و خصوصیات آنتی‌اکسیدانی آن را افزایش می‌دهد. آلبالو خشک ماندگاری طولانی دارد و می‌تواند جایگزین خوبی برای میوه‌های تازه در تمام طول سال باشد (Wojdyło et al., 2014). برای مثال دویماز (Doymaz, 2007) اثر پیش‌تیمار محلول اتیل اولئات قلیایی بر زمان خشک شدن آلبالو به صورت تجربی را بررسی کرد. در این پژوهش خشک کردن لایه‌نازک آلبالو در دو دمای هوای ۵۵ و ۶۵ درجه سلسیوس انجام شد. در پژوهش دیگری نیز وجدیلو و همکاران

### محاسبه ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

برای تعیین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت<sup>۱</sup> آلبالوهای تیمار شده هنگام خشک شدن توسط خشک کردن همرفتی، ابتدا مختصات نمونه کروی<sup>۲</sup> در نظر گرفته شد و سپس از قانون دوم نفوذ فیک<sup>۳</sup> استفاده شد. در این روش، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت از طریق شیب خط لگاریتم طبیعی نسبت رطوبت داده‌های تجربی در مقابل زمان خشک کردن و با استفاده از معادله ۱ محاسبه می‌شود (Amin Ekhlash et al., 2023).

$$Slope = \frac{\pi^2 D_{eff}}{r^2} \quad (1)$$

در این معادله،  $r$  متوسط شعاع آلبالوها (m)،  $D_{eff}$  ضریب نفوذ مؤثر رطوبت ( $m^2s^{-1}$ ) و Slope شیب خط می‌باشد.

### مدل‌سازی سینتیکی

به‌منظور بررسی سینتیک و پیش‌بینی روند خشک شدن آلبالوهای تیمار شده، با کمک داده‌های تجربی و با استفاده از مدل‌های ریاضی مختلف، مدل‌سازی سینتیکی انجام گردید. معادله‌های ونگ و سینگ، هندرسون و پابیس، تقریب انتشار، پیچ، نیوتن، میدیلی و لگاریتمی برای مدل‌سازی فرآیند خشک کردن آلبالو و انتخاب بهترین مدل سینتیکی، انتخاب و بررسی شدند (Salehi & Satorabi, 2021b). به‌منظور مدل کردن داده‌های تجربی خشک کردن و به‌دست آوردن ثابت‌های مدل‌ها نیز از نرم‌افزار متلب ویرایش R2012a استفاده شد.

### تعیین فنل کل

برای تهیه عصاره آلبالو، ۱۰ میلی‌لیتر متانول ۸۰ درصد به ۱ گرم پودر آلبالو خشک‌شده درون فالكون اضافه شد و به‌مدت ۲۴ ساعت روی شیکر قرار گرفت. سپس مخلوط به‌مدت ۵ دقیقه با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه جهت حذف ترکیبات با قابلیت رسوب، سانتریفوژ<sup>۴</sup> شد.

برای محاسبه فنل کل آلبالوهای خشک، ۰/۵ میلی‌لیتر از عصاره آلبالو (ماده رویی فالكون) در لوله آزمایش ریخته شد و ۰/۵ میلی‌لیتر معرف فنل فولین سیوکالتو<sup>۵</sup> (سیگما-آلدریج، آمریکا) به آن اضافه شد. پس از ۵ دقیقه، ۲ میلی‌لیتر کربنات سدیم (۲۰٪ وزنی در حجم) (مرک، آلمان) اضافه و به‌مدت ۳۰ ثانیه تکان داده شد. پس از انکوباسیون به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۲۵ درجه سلسیوس، ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر اضافه و رسوب تشکیل شده با استفاده از سانتریفوژ به‌مدت ۵ دقیقه در ۴۰۰۰ دور در دقیقه جدا شد. در نهایت، جذب مایع رویی در ۷۶۵ نانومتر با اسپکتروفوتومتر (XD-7500، لاویانده، آلمان) ثبت و با منحنی

استاندارد اسید گالیک مقایسه گردید. نتایج فنل کل با واحد معادل میکروگرم اسید گالیک بر گرم ماده خشک گزارش شد (Vega-Gálvez et al., 2009).

### شاخص تغییرات رنگ

جهت بررسی تغییرات رنگ آلبالوهای خشک‌شده، از روش پردازش تصویر استفاده گردید. قبل و بعد از فرآیند خشک کردن، از نمونه‌ها توسط دوربین با کیفیت ۱۲ مگاپیکسل (iPhone 12 Pro, Apple) عکس در فرمت JPG تهیه شد. بعد از تبدیل عکس‌ها به فرمت  $L^*a^*b^*$  توسط نرم‌افزار Image J (version 1.42e, USA)، مؤلفه‌های رنگی آنها شامل مؤلفه‌های روشنایی - تیرگی ( $L^*$ )، سبزی - قرمزی ( $a^*$ )، آبی - زردی ( $b^*$ ) به‌دست آمد و از آنها برای محاسبه شاخص تغییرات رنگ ( $\Delta E$ ) استفاده شد. مقادیر شاخص تغییرات رنگ ( $\Delta E$ ) در مقایسه با نمونه تازه با استفاده از معادله ۲ محاسبه شد (Salehi & Satorabi, 2021a).

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (2)$$

### چروکیدگی

درصد چروکیدگی یا تغییرات اندازه سطح ( $\Delta A$ ) آلبالوها که معیاری از کاهش سطح محصول در طی فرآیند خشک کردن می‌باشد، با استفاده از روش پردازش تصویر و رابطه ۳ محاسبه و گزارش شد. در این روش ابتدا از نمونه‌ها عکس با کیفیت بالا تهیه شد. سپس توسط نرم‌افزار Image J تعداد پیکسل‌های موجود در عکس به سانتی‌متر تبدیل گردید و با استفاده از بخش آنالیز نرم‌افزار، سطح نمونه‌ها برحسب سانتی‌متر مربع محاسبه و گزارش شد.

$$\Delta A = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \times 100 \quad (3)$$

در این رابطه،  $A_1$ : سطح نمونه تازه (سانتی‌متر مربع) و  $A_2$ : سطح نمونه خشک‌شده (سانتی‌متر مربع) است (Salehi et al., 2023).

### آبگیری مجدد آلبالوهای خشک‌شده

برای محاسبه درصد آبگیری مجدد<sup>۶</sup> (RR)، آلبالوهای خشک‌شده توزین، سپس درون حمام آب (مدل R.J42، شرکت پارس آزما، ایران) با دمای ۵۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند. نمونه‌ها بعد از گذشت ۳۰

4- Universal 320R, Hettich, Germany  
5- Folin-Ciocalteu's phenol reagent  
6- Rehydration ratio (RR)

1- Effective moisture diffusivity coefficient (Deff)  
2- Spherical coordinate  
3- Fick's second law of diffusion

پژوهش، توان ماکروویو و میزان خلأ روی سرعت خشک شدن آلبالو اثر مهمی دارند و با افزایش توان و کاهش فشار محفظه، زمان خشک شدن کاهش یافت.

#### اثر مایکروویو بر نفوذ مؤثر رطوبت

برای کاهش مشکلات ناشی از هدایت حرارتی پایین طی خشک کردن محصولات غذایی و دست یافتن به فرآیند تأثیرگذار، استفاده از مایکروویو برای این منظور افزایش یافته است. افزایش تمرکز حرارتی منجر به افزایش نفوذ رطوبت از محصول به محیط می‌شود (Kouchakzadeh & Shafeei, 2010; Mohammadpour Mir *et al.*, 2020; Pourhaji *et al.*, 2018). در جدول ۲ اثر زمان تیماردهی با مایکروویو بر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت آلبالو طی خشک شدن در خشک‌کن هوای داغ گزارش شده است. همان‌طور که در این جدول ملاحظه می‌شود با افزایش زمان اعمال مایکروویو، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت افزایش یافته است که منجر به تسریع خروج رطوبت از آلبالوها و در نتیجه کاهش زمان خشک شدن محصول شده است. با افزایش زمان تیمار مایکروویو از صفر به ۱۲۰ ثانیه، مشاهده گردید که ضریب نفوذ مؤثر رطوبت برای آلبالوهای قرار گرفته در خشک‌کن همرفتی به صورت معنی‌داری از  $1.0 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  به  $3.16 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  (Doymaz, 2007) افزایش یافت ( $p < 0.05$ ). دویماز (Doymaz, 2007) اثر پیش‌تیمار محلول اتیل اولئات قلیایی بر زمان خشک شدن آلبالو به صورت تجربی را بررسی کرد. این پژوهشگر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت آلبالو را در محدوده  $4.75 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  تا  $1.0 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  گزارش کرده است.

#### مدل‌سازی فرآیند خشک شدن آلبالو

با انتخاب یک مدل ریاضی مناسب که به کمک آن بتوان سینتیک خشک شدن یک محصول را پیش‌بینی کرد، می‌توان یک خشک‌کن جدید طراحی یا کارایی آن را ارزیابی نمود (Ghaderi *et al.*, 2011). با محاسبه مقدار نسبت رطوبت برای تمامی تیمارهای مورد مطالعه طی فرآیند خشک کردن آلبالوها و برازش نقاط حاصل از ترسیم نمودارهای نسبت رطوبت-زمان، به وسیله مدل‌های سینتیکی، نتایج برای هر مدل مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. بهترین مدل باید دارای بیشترین مقدار ضریب تبیین ( $r$ ) و حداقل مقادیر خطا باشد.

دقیقه از آب خارج شده و توزین شدند. نسبت باز جذب آب توسط معادله ۴ محاسبه و گزارش شد (Salehi *et al.*, 2022).

$$RR = \frac{M}{M_0} \times 100 \quad (4)$$

در این معادله  $M$  وزن آلبالوها بعد از باز جذب آب و  $M_0$  وزن آلبالوهای خشک می‌باشد.

#### آنالیز آماری

در این پژوهش اثر پیش‌تیمار مایکروویو در پنج سطح ۰، ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ ثانیه بر فنل کل، سینتیک افت رطوبت، زمان خشک شدن، ضریب نفوذ مؤثر رطوبت و آبگیری مجدد آلبالو بررسی شد. برای آنالیز آماری نتایج از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۱ استفاده شد. آزمون‌های خشک کردن در سه تکرار انجام و برای مقایسه میانگین پاسخ‌های مشاهده شده، از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۹۵٪ استفاده شد.

#### نتایج و بحث

##### اثر مایکروویو بر زمان خشک شدن

میانگین رطوبت اولیه آلبالوها برابر ۷۳/۸۰ درصد بر پایه مرطوب بود. در جدول ۱ اثر زمان اعمال مایکروویو بر زمان خشک شدن آلبالوها گزارش شده است. همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود، با افزایش زمان اعمال مایکروویو، زمان خشک شدن نمونه‌ها به صورت معنی‌داری کاهش یافته است ( $p < 0.05$ ). با افزایش زمان تیمار مایکروویو از صفر به ۱۲۰ ثانیه، میانگین زمان خشک شدن آلبالوها در خشک‌کن هوای داغ به صورت معنی‌داری ۳۲/۴ درصد کاهش یافت ( $p < 0.05$ ). شارما و پراساد (Sharma & Prasad, 2006) برای خشک کردن سیر از مایکروویو آزمایشگاهی استفاده کرد. آنها تأیید کردند که خشک کردن حبه‌های سیر در مایکروویو باعث کاهش مدت زمان خشک شدن در مقایسه با خشک کردن با هوای گرم می‌شود و ویژگی‌های کیفی محصول خشک‌شده با روش مایکروویو نیز بالاتر است. دویماز (Doymaz, 2007) گزارش کرد که زمان خشک شدن آلبالو پیش‌تیمار شده با محلول اتیل اولئات قلیایی حدود ۲۶ تا ۳۰ درصد کوتاه‌تر از نمونه‌های تیمار نشده است.

شکل ۱ تغییر محتوای رطوبت آلبالوهای تیمار شده با مایکروویو طی فرآیند خشک شدن را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، تیماردهی آلبالو توسط امواج مایکروویو باعث تسریع در سرعت انتقال جرم و افزایش سرعت خروج رطوبت از نمونه‌ها شده است. قادری و همکاران (Ghaderi *et al.*, 2011) سینتیک خشک کردن میوه آلبالو در خشک‌کن مایکروویو-خلأ را بررسی کردند. براساس نتایج این

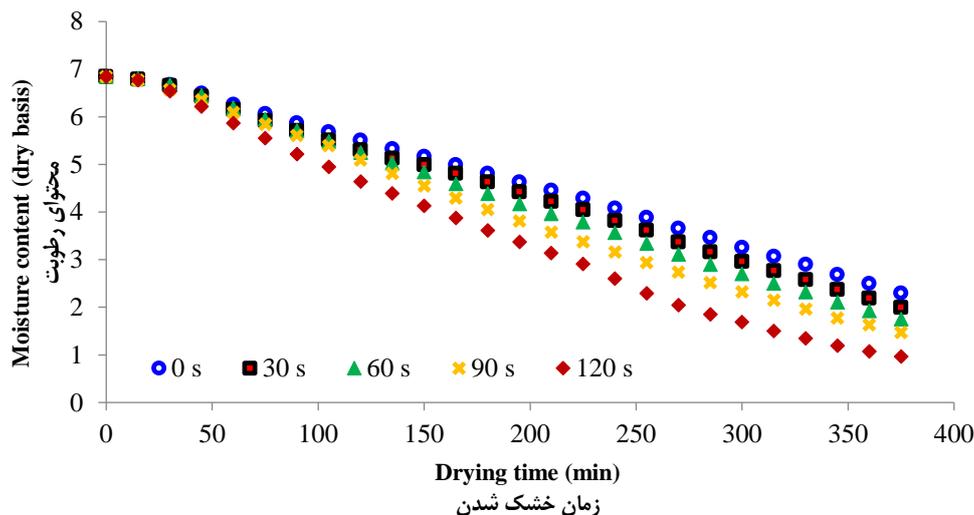
جدول ۱- تأثیر پیش تیمار مایکروویو بر زمان خشک کردن آلبالو

Table 1- Impact of microwave pretreatment on the drying time of sour cherry

Microwave time	Drying time (min)
زمان مایکروویو	زمان خشک کردن
0 s	370.0±7.07 <sup>a</sup>
30 s	345.0±12.25 <sup>b</sup>
60 s	320.0±7.07 <sup>c</sup>
90 s	300.0±12.25 <sup>c</sup>
120 s	250.0±7.07 <sup>d</sup>

حروف متفاوت بالای مقادیر نشان دهنده تفاوت معنادار است (p<0.05)

Different letters above the values indicate significant difference (p<0.05)



شکل ۱- تأثیر پیش تیمار مایکروویو بر محتوای رطوبت آلبالو طی فرآیند خشک شدن

Fig. 1. Impact of microwave pretreatment on the moisture content of sour cherry during drying process

جدول ۲- تأثیر پیش تیمار مایکروویو بر ضریب نفوذ مؤثر رطوبت آلبالو

Table 2- Impact of microwave pretreatment on the effective moisture diffusivity coefficient of sour cherry

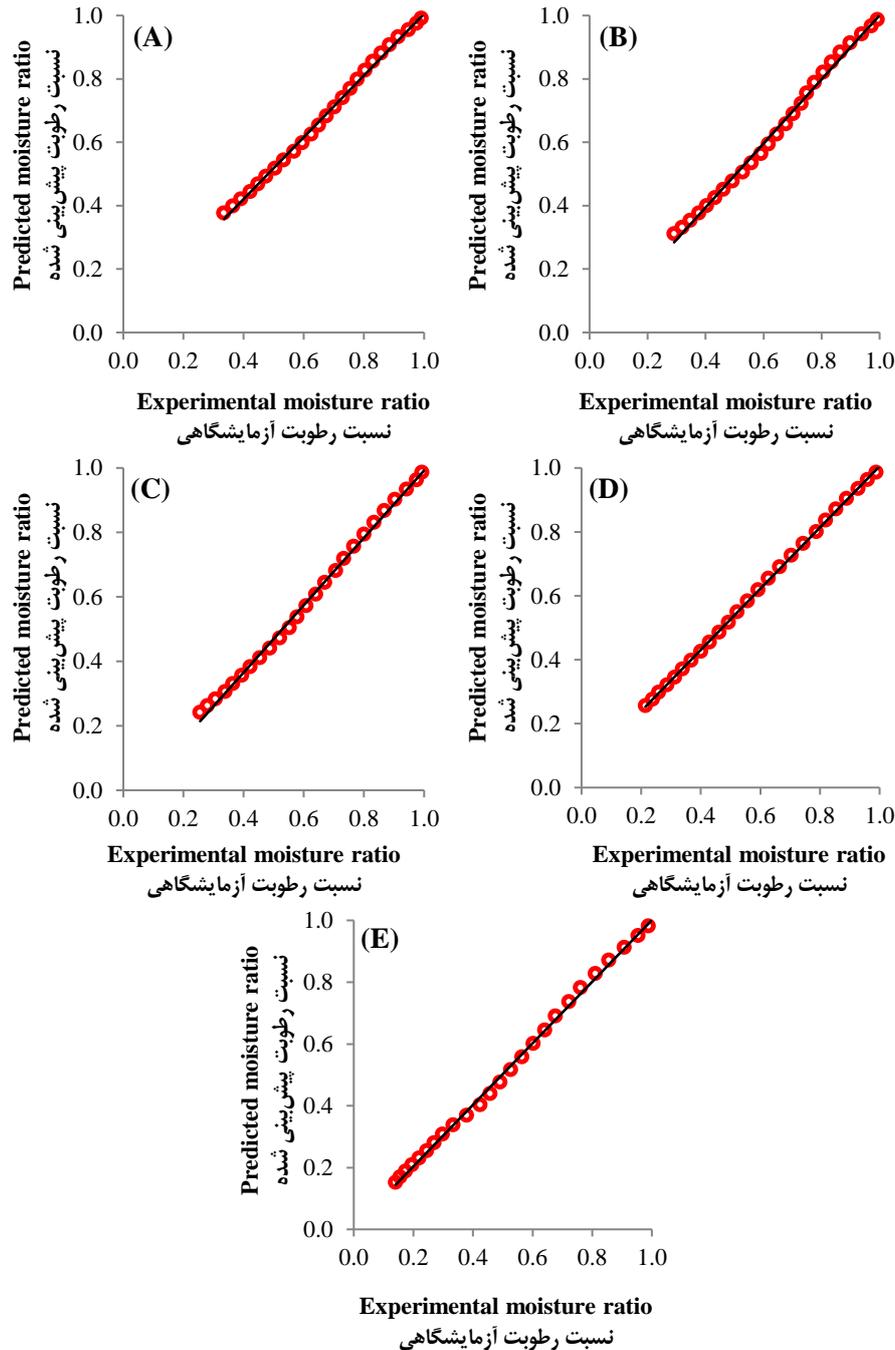
Microwave time	moisture diffusivity coefficient (m <sup>2</sup> /s)
زمان مایکروویو	ضریب نفوذ مؤثر رطوبت
0 s	3.16×10 <sup>-10</sup> ±1.12×10 <sup>-11d</sup>
30 s	3.59×10 <sup>-10</sup> ±1.86×10 <sup>-11d</sup>
60 s	4.08×10 <sup>-10</sup> ±1.79×10 <sup>-11c</sup>
90 s	4.56×10 <sup>-10</sup> ±2.85×10 <sup>-11b</sup>
120 s	5.83×10 <sup>-10</sup> ±1.89×10 <sup>-11a</sup>

حروف متفاوت بالای مقادیر نشان دهنده تفاوت معنادار است (p<0.05)

Different letters above the values indicate significant difference (p<0.05)

نمودارهای موجود در این شکل نیز نشان می‌دهد که مدل پیچ انطباق خوبی با داده‌های نسبت رطوبت آزمایشگاهی دارد. لذا این مدل برای بررسی فرآیند خشک کردن آلبالوهای تیمار شده با مایکروویو توصیه می‌شود. قادری و همکاران (Ghaderi et al., 2011) گزارش کردند که مدل میدلی به دلیل دارا بودن بالاترین ضریب همبستگی و کمترین خطا، مناسب‌ترین مدل برای بررسی فرآیند خشک شدن آلبالو در خشک‌کن مایکروویو-خلأ است.

در مجموع، نتایج نشان داد که بهترین مدل با بالاترین برازش، در مورد فرآیند خشک کردن آلبالوها، مدل پیچ است. در جدول ۳ مجموع مربعات خطا، ضریب تبیین (r) و جذر میانگین مربعات خطا و همچنین ضرایب ثابت مدل پیچ (k و n) برای شرایط مختلف خشک کردن آلبالوها گزارش شده است. در این پژوهش مقادیر مجموع مربعات خطا، ضریب تبیین و جذر میانگین مربعات خطا به ترتیب در محدوده ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۰۷، ۰/۹۹۷ تا ۰/۹۹۹ و ۰/۰۰۵ تا ۰/۰۱۷ به دست آمد. در شکل ۲ نیز مقایسه داده‌های برازش شده توسط مدل پیچ با نتایج تجربی نسبت رطوبت برای زمان‌های پیش تیمار مختلف گزارش شده است.



شکل ۲- مقایسه داده‌های برازش شده توسط مدل پیج با نتایج تجربی نسبت رطوبت. A: ۰ ثانیه، B: ۳۰ ثانیه، C: ۶۰ ثانیه، D: ۹۰ ثانیه و E: ۱۲۰ ثانیه

Fig. 2. Comparison of fitted data by Page model with experimental results of moisture ratio; A: 0 s, B: 30 s, C: 60 s, D: 90 s, and E: 120 s

این شکل، اعمال بیش از ۶۰ ثانیه مایکروویو تأثیر معنی‌داری بر حفظ ترکیبات فنلی و افزایش مقدار این ترکیبات در آلبالوهای خشک‌شده داشته است ( $p < 0.05$ ). مقدار فنل کل نمونه تیمار شده با مایکروویو به مدت ۳۰ ثانیه نیز بیشتر از نمونه شاهد بود؛ اما از نظر آماری اختلاف

#### فنل کل

آلبالو دارای آنتوسیانین‌های منحصر به فردی است و سرشار از ترکیبات فنلی است. در شکل ۳ اثر زمان اعمال مایکروویو بر فنل کل آلبالوهای خشک‌شده گزارش شده است. بر اساس نتایج گزارش شده در

آزادبخت و همکاران (Azadbakht *et al.*, 2021) گزارش کردند که افزایش توان مایکروویو سبب افزایش مقدار فنل کل و ترکیبات فلاونوئیدی در هویج خشک شده می شود.

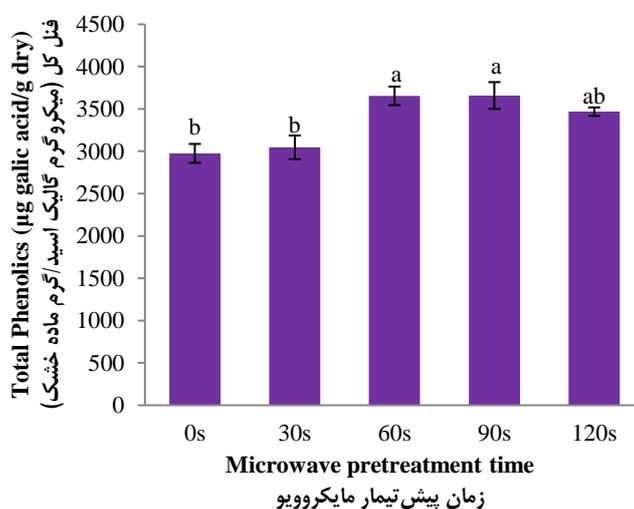
معناداری بین این نمونه و نمونه شاهد وجود نداشت ( $p > 0.05$ ). حداکثر مقدار فنل مربوط به نمونه تیمار شده با مایکروویو به مدت ۹۰ ثانیه بود. با افزایش زمان تیماردهی به ۱۲۰ ثانیه مقدار فنل کل کاهش یافت؛ البته این کاهش معنی دار نبود ( $p > 0.05$ ). هم راستا با نتایج این پژوهش،

جدول ۳- ثابت‌ها و ضرایب مدل پیج برای پیش‌بینی پارامتر نسبت رطوبت

Table 3- The constants and coefficients of the Page model to predict the moisture ratio parameter

Microwave time زمان مایکروویو	k	n	SSE <sup>1</sup>	r	RMSE <sup>2</sup>
0 s	0.0003	1.4050	0.0026	0.9989	0.0102
30 s	0.0003	1.4123	0.0051	0.9980	0.0143
60 s	0.0003	1.4340	0.0029	0.9991	0.0108
90 s	0.0004	1.3983	0.0026	0.9992	0.0091
120 s	0.0003	1.4610	0.0029	0.9993	0.0109

1- Sum of squares due to error (SSE); 2- Root mean square error (RMSE)



شکل ۳- اثر پیش تیمار مایکروویو بر فنل کل آلبالو خشک

Fig. 3. Effect of microwave pretreatment on the total phenolics of dried sour cherry

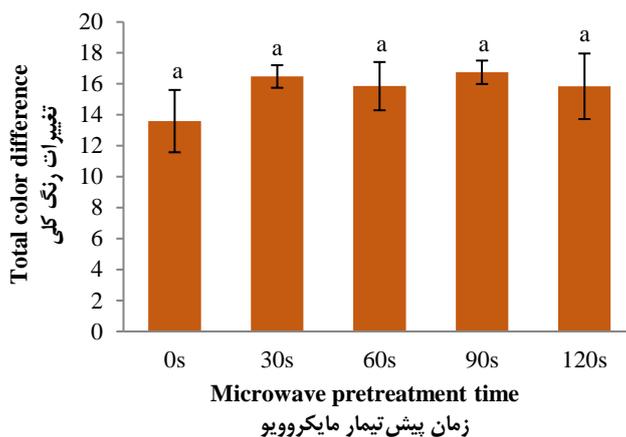
حروف متفاوت بالای ستون‌ها نشان دهنده تفاوت معنادار است ( $p < 0.05$ )

Different letters above the columns indicate a significant differences ( $p < 0.05$ )

مایکروویو با استفاده از میانگین عددی مؤلفه‌های رنگی محاسبه در شکل ۴ گزارش شد. همانطور که در این شکل دیده می شود، اعمال تیمار مایکروویو باعث افزایش مقدار عددی شاخص تغییرات رنگ آلبالوهای خشک شده شد، اما تأثیر معنی داری بر تغییر آنها نداشت ( $p > 0.05$ ). این شکل نشان می دهد که تیمار مایکروویو علاوه بر تأثیرات مثبتی که در کاهش زمان خشک شدن و حفظ ترکیبات فنلی دارد، تأثیر منفی هم بر رنگ سطحی نمونه‌ها نمی گذارد.

### شاخص تغییرات رنگ

در این پژوهش متوسط مقدار عددی مؤلفه‌های روشنایی ( $L^*$ )، قرمزی ( $a^*$ ) و زردی ( $b^*$ ) آلبالوهای تازه به ترتیب برابر ۳۱/۲۰، ۱۶/۴۱ و ۰/۷۶ بود. فرآیند خشک شدن باعث کاهش مؤلفه‌های رنگی آلبالوها شد و متوسط مقدار عددی مؤلفه‌های روشنایی، قرمزی و زردی آلبالوهای خشک شده (تیمار نشده و تیمار شده) به ترتیب برابر ۲۲/۰۵، ۷/۱۹ و ۰/۳۹ بود. برای بررسی دقیق تر تغییرات رنگ آلبالوها بعد از فرآیند خشک کردن، شاخص تغییرات رنگ کلی برای همه تیمارهای



شکل ۴- اثر پیش تیمار مایکروویو بر شاخص تغییرات رنگ کلی آلبالو خشک  
 Fig. 4. Effect of microwave pretreatment on the total color difference index of dried sour cherry

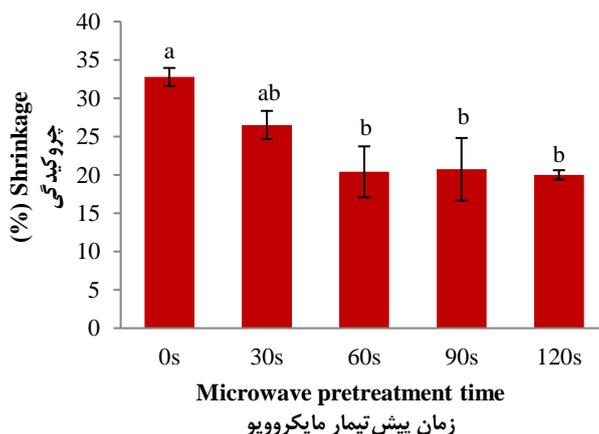
حروف متفاوت بالای ستون‌ها نشان دهنده تفاوت معنادار است ( $p < 0.05$ )  
 Different letters above the columns indicate a significant differences ( $p < 0.05$ )

#### آبگیری مجدد

آلبالو را می‌توان به صورت تازه، خشک یا فرآوری شده در بسیاری از محصولات استفاده کرد. در جدول ۴ اثر زمان اعمال مایکروویو بر آبگیری مجدد آلبالوهای خشک شده گزارش شده است. براساس نتایج گزارش شده در این جدول، اعمال مایکروویو تأثیر معنی‌داری بر تغییر درصد آبگیری مجدد آلبالوهای خشک شده نداشت ( $p > 0.05$ ). در این پژوهش، متوسط آبگیری مجدد آلبالوهای خشک شده ۱۱۱/۶۵ درصد بود.

#### چروکیدگی

در شکل ۵ اثر زمان اعمال مایکروویو بر چروکیدگی آلبالوهای خشک شده گزارش شده است. با اعمال بیش از ۶۰ ثانیه مایکروویو، به علت افزایش سرعت خروج رطوبت از نمونه و کاهش زمان خشک شدن، چروکیدگی نمونه‌ها نیز به صورت معنی‌داری کاهش یافت ( $p < 0.05$ ). مقدار چروکیدگی نمونه تیمار شده با مایکروویو به مدت ۳۰ ثانیه نیز کمتر از نمونه شاهد بود؛ اما از نظر آماری اختلاف معناداری بین این نمونه و نمونه شاهد وجود نداشت ( $p > 0.05$ ).



شکل ۵- اثر پیش تیمار مایکروویو بر چروکیدگی آلبالو خشک  
 Fig. 5. Effect of microwave pretreatment on the shrinkage of dried sour cherry

حروف متفاوت بالای ستون‌ها نشان دهنده تفاوت معنادار است ( $p < 0.05$ )  
 Different letters above the columns indicate a significant differences ( $p < 0.05$ )

جدول ۴- تأثیر پیش تیمار مایکروویو بر آبیگری مجدد آلبالو خشک شده

Table 4- Impact of microwave pretreatment on the rehydration ratio of dried sour cherry

Microwave time	Rehydration ratio(%)
زمان مایکروویو	آبیگری مجدد
0 s	112.87±3.69 <sup>a</sup>
30 s	110.79±2.23 <sup>a</sup>
60 s	109.70±2.68 <sup>a</sup>
90 s	112.62±2.95 <sup>a</sup>
120 s	112.25±3.48 <sup>a</sup>

حروف متفاوت بالای مقادیر نشان دهنده تفاوت معنادار است (p<0.05)

Different letters above the values indicate significant difference (p<0.05)

## نتیجه گیری

۱۲۰ ثانیه پیش تیمار با مایکروویو بود. با افزایش زمان تیماردهی به ۱۲۰ ثانیه مقدار فنل کل کاهش یافت؛ البته این کاهش معنی دار نبود (p>0.05). نتایج این پژوهش نشان داد که تیمار مایکروویو علاوه بر تأثیرات مثبتی که در کاهش زمان خشک شدن و حفظ ترکیبات فنلی دارد، تأثیر منفی بر رنگ سطحی و درصد آبیگری مجدد آلبالوهای خشک شده نمی گذارد. مقدار چروکیدگی نمونه تیمار شده با مایکروویو به مدت ۳۰ ثانیه نیز کمتر از نمونه شاهد بود؛ اما از نظر آماری اختلاف معناداری بین این نمونه و نمونه شاهد وجود نداشت (p>0.05).

## سپاسگزاری

نویسندگان مقاله بر خود لازم می دانند از معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه بوعلی سینا به دلیل حمایت های مادی و معنوی از این پژوهش، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایند.

در این پژوهش اثر پیش تیمار مایکروویو بر سرعت انتقال جرم طی فرآیند خشک کردن آلبالو در خشک کن همرفتی بررسی شد. زمان تیماردهی با مایکروویو تأثیر معنی داری در کاهش زمان خشک شدن آلبالوها در خشک کن هوای داغ داشت (p<0.05). برای تعیین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت آلبالوهای تیمار شده هنگام خشک شدن، ابتدا مختصات نمونه کروی در نظر گرفته شد و سپس از قانون دوم نفوذ فیک استفاده شد. با افزایش زمان تیمار مایکروویو تا ۱۲۰ ثانیه، مقدار ضریب نفوذ مؤثر رطوبت ۸۵ درصد افزایش یافت که منجر به ۳۲ درصد کاهش در زمان خشک شدن آلبالوها شد. جهت بررسی سینتیک خشک شدن آلبالوهای تیمار شده، مدل های ریاضی بر داده های آزمایشگاهی برازش و در مجموع مدل پیچ براساس بالاترین صحت به عنوان بهترین مدل انتخاب شد. به طور کلی، بهترین شرایط برای خشک کردن آلبالو،

## References

- Akbarian Meymand, M.J., Faraji Kafshgari, S., Mahmodi, E., & Vatankhah, M. (2015). The effect of using microwave pretreatment in drying roots nutmeg on antimicrobial properties against pathogenic bacteria and spoilage molds. *Iranian Journal of Medical Microbiology*, 9(2), 47-55.
- Amin Ekhlasi, S., Pajohi-Alamoti, M.R., & Salehi, F. (2023). Effect of ultrasonic waves and drying method on the moisture loss kinetics and rehydration of sprouted wheat. *Journal of Food Science and Technology (Iran)*, 20(135), 159-168. <https://doi.org/10.22034/fsct.19.135.159>
- Azadbakht, M., Vahedi Torshizi, M., Mahmoodi, M.J., & Ghazagh Jahed, R. (2021). Mathematical modeling of the biochemical properties of carrots by microwave drying with different pretreatments using response surface methodology. *Food Engineering Research*, 21(72), 35-56. <https://doi.org/10.22092/fooder.2020.343389.1273>
- Delgado, J.M.P.Q., & da Silva, M.V. (2014). Food Dehydration: Fundamentals, Modelling and Applications, in: Delgado, J.M.P.Q., Barbosa de Lima, A.G. (Eds.), *Transport phenomena and drying of solids and particulate materials*. Springer International Publishing, Cham, pp. 69-94.
- Doymaz, İ. (2007). Influence of pretreatment solution on the drying of sour cherry. *Journal of Food Engineering*, 78(2), 591-596. <https://doi.org/10.1016/j.foodeng.2005.10.037>
- Einafshar, S. (2014). Quality and microbial changes of four dried sour cherry by osmosis process through one year storage. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 10(4), 363-374. <https://doi.org/10.22067/ifstj.v10i4.43732>.
- Ghaderi, A., Abbasi, S., Motevali, A., & Minaei, S. (2011). Selection of a mathematical model for drying kinetics of sour cherry (*Prunus cerasus* L.) in a microwave-vacuum dryer. *Iranian Journal of Nutrition Sciences and Food Technology*, 6(2), 55-64.
- Kouchakzadeh, A., & Shafeei, S. (2010). Modeling of microwave-convective drying of pistachios. *Energy Conversion and Management*, 51(10), 2012-2015. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.02.034>

9. Maskan, M. (2000). Microwave/air and microwave finish drying of banana. *Journal of Food Engineering*, 44(2), 71-78. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(99\)00167-3](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(99)00167-3)
10. Mohammadpour Mir, M.E., Nanvakenari, S., & Movagharnejad, K. (2020). Modeling and investigation of the performance of MLP and RBF during the paddy rice drying in microwave dryer. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 16(2), 331-341. <https://doi.org/10.22067/ifstrj.v16i2.80737>
11. Momenzadeh, L., Zomorodian, A.A., & Mowla, D. (2010). Applying artificial neural network for shrinkage prediction of green pea in a microwave assisted fluidized bed dryer. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 6(4), 277-285. <https://doi.org/10.22067/ifstrj.v6i4.9285>
12. Pourhaji, F., Tabatabaei Yazdi, F., Mortazavi, S.A., Mohebbi, M., & Mazaheri Tehrani, M. (2018). Foam mat drying of banana milk using microwave and evaluation of resulting powders's properties. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 14(2), 283-296. <https://doi.org/10.22067/ifstrj.v0i0.60551>
13. Sahin, M., & Doymaz, İ. (2017). Estimation of cauliflower mass transfer parameters during convective drying. *Heat and Mass Transfer*, 53(2), 507-517. <https://doi.org/10.1007/s00231-016-1835-0>
14. Salehi, F. (2020). *Food industry machines and equipment*. Bu-Ali Sina University Press, Hamedan, Iran.
15. Salehi, F., Cheraghi, R., & Rasouli, M. (2022). Mass transfer kinetics (soluble solids gain and water loss) of ultrasound-assisted osmotic dehydration of apple slices. *Scientific Reports*, 12(1), 15392. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19826-w>
16. Salehi, F., Razavi Kamran, H., & Goharpour, K. (2023). Effects of ultrasound time, xanthan gum, and sucrose levels on the osmosis dehydration and appearance characteristics of grapefruit slices: process optimization using response surface methodology. *Ultrasonics Sonochemistry*, 98, 106505. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106505>
17. Salehi, F., & Satorabi, M. (2021a). Effect of basil seed and xanthan gums coating on colour and surface change kinetics of peach slices during infrared drying. *Acta Technologica Agriculturae*, 24(3), 150-156. <https://doi.org/10.2478/ata-2021-0025>
18. Salehi, F., & Satorabi, M. (2021b). Influence of infrared drying on drying kinetics of apple slices coated with basil seed and xanthan gums. *International Journal of Fruit Science*, 21(1), 519-527. <https://doi.org/10.1080/15538362.2021.1908202>
19. Sharma, G.P., & Prasad, S. (2006). Optimization of process parameters for microwave drying of garlic cloves. *Journal of Food Engineering*, 75(4), 441-446. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.04.029>
20. Šumić, Z., Tepić, A., Vidović, S., Jokić, S., & Malbaša, R. (2013). Optimization of frozen sour cherries vacuum drying process. *Food Chemistry*, 136(1), 55-63. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.07.102>
21. Vega-Gálvez, A., Di Scala, K., Rodríguez, K., Lemus-Mondaca, R., Miranda, M., López, J., & Perez-Won, M. (2009). Effect of air-drying temperature on physico-chemical properties, antioxidant capacity, colour and total phenolic content of red pepper (*Capsicum annuum*, L. var. Hungarian). *Food Chemistry*, 117(4), 647-653. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.04.066>
22. Wojdyło, A., Figiel, A., Lech, K., Nowicka, P., & Oszmiański, J. (2014). Effect of convective and vacuum-microwave drying on the bioactive compounds, color, and antioxidant capacity of sour cherries. *Food and Bioprocess Technology*, 7(3), 829-841. <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1130-8>
23. Wray, D., & Ramaswamy, H.S. (2015). Novel concepts in microwave drying of foods. *Drying Technology*, 33(7), 769-783. <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.985793>



## Contents

<b>Investigation of Characteristics of Alginate Film Containing Probiotic <i>Lactobacillus plantarum</i> for Sliced Sausages Coating</b>	183
D. Shahrampour, M. Khomeiri, S.M.A. Razavi, M. Kashiri	
<b>Evaluation the Performance of Drying Efficiency and Energy Efficiency of a Solar Dryer Quipped with Phase Change Materials and Air Recirculation System</b>	199
M. Ahmadi, H. Samimi Akhijahani , P. Salami	
<b>Investigation of Thermal Stability of Sunflower and Olive Triacylglycerols under the Influence of Gallic Acid and Methyl Gallate</b>	217
M. Akbari, R. Farhoosh, M. Moeenfarid	
<b>The Effect of Foliar Application of Silicon Fertilizer on Some Qualitative Traits and Mineral Compositions of ‘Barhee’ Date Fruit under Soil Salinity Conditions</b>	229
R. Yousefi, M.R. Pourghayoumi, S.S. Marashi, A. Ghasemi	
<b>The Effect of Edible Coatings on the Quality and Storage Life of Cherry cv. Lambert</b>	237
A.A. Shokouhian, S. Einizadeh, M. Dashti	
<b>Investigating the Effect of Ozone on the Physicochemical, Microbial and Sensory Properties of Brined Ultrafiltered Cheese During Ripening</b>	249
A.A. Gholamhosseinpour, A. Karimi Davijani, M. Karami	
<b>Production of Gelatin-Pullulan- Nanofibers Cellulose Film Containing <i>Salmonella</i> Phages and Effect Its Anti-salmonella Against <i>Salmonella typhimurium</i></b>	267
A. Entezari, N. Sedaghat, G. Shakeri	
<b>Effect of Hydrothermal/dry Heating and Particle Sizes of Rice Flour on Quality of Gluten-free Bread</b>	281
A. Hashemi Shektai, J. Mohammadzadeh Milani, A. Motamedzadegan, S. Haghghat-Kharazi	
<b>Using Microwave Pretreatment in the Enzymatic Hydrolysis of Pumpkin Seed Protein (<i>Cucurbita maxima</i> L.) by Alcalase and Investigating Its Antioxidant Properties</b>	295
Z. Nooshi Manjili, A. Sadeghi Mahoonak, V. Erfani-Moghadam, M. Ghorbani, H. Shahriri Tabarestani	
<b>Comparison Astaxanthin Extraction of <i>Fenneropenaeus merguensis</i> and <i>Pontogammarus maoticus</i> by Using Organic Solvent, Sunflower Oil and Ionic Liquid Micro Emulsion</b>	309
P. Feizi, Y. Maghsoudlou, H. Shahiri Tabarestani, S.M. Jafari, A.H. Bahri	
<b>Improving the Texture of Shrimp Nugget Produced from Surimi in Combination with Carrageenan, Alginate and Xanthan</b>	323
B. Shabanpour, P. Pourashouri, A. Jamshidi, K. Rahmanifarah, A. Vejdan Taleshmikaeil	
<b>Effect of Microwave Treatment on Physicochemical Characteristics and Efficiency of Sour Cherry Drying Process</b>	339
F. Salehi, M. Inanloodoghous, S. Ghazvineh, P. Moradkhani	

# Iranian Food Science and Technology Research Journal

**Vol. 20**

**No. 2**

**2024**

<b>Published by:</b>	Ferdowsi University of Mashhad, (College of Agriculture), Iran
<b>Executive Manager:</b>	N. Shahnoushi, Department of Agricultural Economics, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
<b>Editor-in-Chief:</b>	M. Yavarmanesh, Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
<b>Editorial Board:</b>	
Mortazavi, Seyed A.	Professor, Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
Shahidi, F.	Professor, Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
Habibi najafi, M.	Professor, Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
Razavi, Seyed M. A.	Professor, Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
Kashaninejad, M.	Professor, Department of Food Science and Technology, Agricultural Sciences & Natural Resources University of Gorgan, Gorgan, Iran
Khomeiri, M.	Professor, Department of Food Science and Technology, Agricultural Sciences & Natural Resources University of Gorgan, Gorgan, Iran
Farhoosh, R.	Professor, Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
Fazli Bazzaz, S.	Professor, Department of Pharmaceutical Chemistry, School of Pharmacy, Mashhad University of Medical Sciences, Mashhad, Iran
Koocheki, A.	Professor, Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
Mohebbi, M.	Professor, Department of Food Science and Technology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
Ghanbarzadeh, B.	Professor, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Tabriz University, Tabriz, Iran
Alemzadeh, I.	Professor, Department of Food Chemical Engineering, Faculty of Chemical and Petroleum Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
Rajabzadeh, GH.	Associate Professor, Department of Food Nanotechnology, Research Institute of Food Science and Technology, Mashhad, Iran
Heydarpour, M.	Associate Professor, Brigham and Women's Hospital, Boston, Massachusetts. United States America
Ghoddusi, H. B.	Associate Professor, School of Human Sciences, London Metropolitan University, England
Khosravidarani, K.	Professor, Department of Food Industry, School of Nutrition Sciences & Food Technology, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran
Abbaszadegan, M.	Professor, Director Water & Environmental Technology Center, Arizona State University, United States of America
Mohammadifar, M. A.	Associate Professor, Research Group for Food Production Engineering, Technical University of Denmark, Denmark
Vosoughi, M.	Professor, Department of Food Chemical Engineering, Faculty of Chemical and Petroleum Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
Almasi, H.	Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Urmia University, Urmia , Iran
Fathi, M.	Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Isfahan University of Technology Isfahan, Iran
Abbasi, S.	Professor, Department of Food Science and Technology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
Borges, N.	Professor, Faculty of Nutrition and Food Sciences, University of Porto; Portugal
Moazzami, Ali A.	Doctor of Philosophy, Department of Molecular Sciences, Swedish University, Sweden
Dr. Nkemnaso Obi C.	Department of Microbiology, Michael Okpara University of Agriculture, Umudike, Abia State, Nigeria
Dr, Olalekan Adeyeye S.A.	Department of Food Technology, Hindustan Institute of Technology and Science, Chennai, Tamil Nadu, India
<b>Publisher</b>	Ferdowsi University of Mashhad
<b>Address:</b>	College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
<b>P.O.BOX:</b>	91775- 1163
<b>Fax:</b>	(98)051-38787430
<b>E-Mail:</b>	ifstrj@um.ac.ir
<b>Web Site:</b>	<a href="https://ifstrj.um.ac.ir">https://ifstrj.um.ac.ir</a>

## Contents

<b>Investigation of Characteristics of Alginate Film Containing Probiotic <i>Lactobacillus plantarum</i> for Sliced Sausages Coating .....</b>	<b>183</b>
D. Shahrampour, M. Khomeiri, S.M.A. Razavi, M. Kashiri	
<b>Evaluation the Performance of Drying Efficiency and Energy Efficiency of a Solar Dryer Quipped with Phase Change Materials and Air Recirculation System.....</b>	<b>199</b>
M. Ahmadi, H. Samimi Akhijahani , P. Salami	
<b>Investigation of Thermal Stability of Sunflower and Olive Triacylglycerols under the Influence of Gallic Acid and Methyl Gallate .....</b>	<b>217</b>
M. Akbari, R. Farhoosh, M. Moenfarid	
<b>The Effect of Foliar Application of Silicon Fertilizer on Some Qualitative Traits and Mineral Compositions of ‘Barhee’ Date Fruit under Soil Salinity Conditions.....</b>	<b>229</b>
R. Yousefi, M.R. Pourghayoumi, S.S. Marashi, A. Ghasemi	
<b>The Effect of Edible Coatings on the Quality and Storage Life of Cherry cv. Lambert .....</b>	<b>237</b>
A.A. Shokouhian, S. Einizadeh, M. Dashti	
<b>Investigating the Effect of Ozone on the Physicochemical, Microbial and Sensory Properties of Brined Ultrafiltered Cheese During Ripening.....</b>	<b>249</b>
A.A. Gholamhosseinpour, A. Karimi Davijani, M. Karami	
<b>Production of Gelatin-Pullulan- Nanofibers Cellulose Film Containing <i>Salmonella</i> Phages and Effect Its Anti-salmonella Against <i>Salmonella typhimurium</i>.....</b>	<b>267</b>
A. Entezari, N. Sedaghat, G. Shakeri	
<b>Effect of Hydrothermal/dry Heating and Particle Sizes of Rice Flour on Quality of Gluten-free Bread .....</b>	<b>281</b>
A. Hashemi Shektai, J. Mohammadzadeh Milani, A. Motamedzadegan, S. Haghighat-Kharazi	
<b>Using Microwave Pretreatment in the Enzymatic Hydrolysis of Pumpkin Seed Protein (<i>Cucurbita maxima</i> L.) by Alcalase and Investigating Its Antioxidant Properties .....</b>	<b>295</b>
Z. Nooshi Manjili, A. Sadeghi Mahoonak, V. Erfani-Moghadam, M. Ghorbani, H. Shahriri Tabarestani	
<b>Comparison of Different Methods for Extracting the Astaxanthin from <i>Fenneropenaeus merguensis</i> and <i>Pontogammarus maeoticus</i> .....</b>	<b>309</b>
P. Feizi, Y. Maghsoudlou, H. Shahriri Tabarestani, S.M. Jafari, A.H. Bahri	
<b>Improving the Texture of Shrimp Nugget Produced from Surimi in Combination with Carrageenan, Alginate and Xanthan.....</b>	<b>323</b>
B. Shabanpour, P. Pourashouri, A. Jamshidi, K. Rahmanifarah, A. Vejdan Taleshmikaeil	
<b>Effect of Microwave Treatment on Physicochemical Characteristics and Efficiency of Sour Cherry Drying Process .....</b>	<b>339</b>
F. Salehi, M. Inanloodoghous, S. Ghazvineh, P. Moradkhani	