انجمن مهندسان
مکانیک ایران

نشریه علمی
ماشین های کشاورزی

دانشگاه فردوسی مشهد

جلد۱۴ شماره ۳
سال ۱۴۰۳
(شماره پیاپی: ۳۳)

شاپا: ۶۸۲۹-۲۲۲۸

عنوان مقالات

مقالات پژوهشی

ارزیابی روش طیف‌سنجی دی‌الکتریک در تلفیق با روش طیف‌سنجی Vis-SWNIR برای اندازه‌گیری غلظت قند روی نمونه ساقه نیشکر ۲۳۷
مجتبی نادری بلداجی، مجتبی توحیدی، مهدی قاسمی ورنامخواستی

مطالعه روند خشک‌شدن گوشت میگوی پرورشی در خشک‌کن هوای گرم همرفتی و تغییرات برخی فراسنجه‌های مرتبط با آن ۲۵۵
محسن المعی، سید مهدی نصیری، محمد امین نعمت الهی، داریوش زارع، محمد خرم

مقایسه و بررسی میزان تانن پوست سیب‌زمینی با چهار حلال مختلف ۲۷۳
فاطمه مرتضوی، رسول خدابخشیان، مرضیه معین فرد

بررسی تاثیر زمان نگهداری بر ویژگی‌های مکانیکی فیلم زیست‌تخریب‌پذیر پلی‌لاکتیک اسید حاوی نانو ذرات اکسید روی ۲۸۵
ندا تجری، حسن صدرنیا، فرشته حسینی

ارزیابی شاخص‌های زنجیره تأمین مکانیزاسیون برنج با رویکرد مدل اسکور ۳۰۳
مرتضی زنگنه، نرگس بنائیان

ارزیابی جریان رودخانه‌ها به‌منظور تخمین توان و انرژی آبی‌جنبشی نظری با بهره‌گیری از هندسه هیدرولیک ۳۲۱
مهران صادقی دلوئی، رضا علیمردانی، حسین موسی زاده

بررسی کارایی پلاسمای سرد بر غیرفعال‌سازی قارچ *آسپرژیلوس نایجر* و حفظ ویژگی‌های کیفی انگور طی دوران پس از برداشت ۳۳۹
علی خلج، ابراهیم احمدی، سهیلا میرزائی، فهیمه قائمی زاده، روزبه عباس‌زاده

نشریه ماشین های کشاورزی

با شماره پروانه ۸۹/۱۲۶۳۹ **و درجه علمی – پژوهشی شماره** ۳/۱۱/۳۷۸۱ **از وزارت علوم، تحقیقات و فناوری**

۸۹/۶/۱۳ ۸۹/۳/۱۷

"بر اساس مصوبه وزارت عتف از سال ۱۳۹۸، کلیه نشریات دارای درجه "علمی-پژوهشی" به نشریه "علمی" تغییر نام یافتند."

جلد ۱۴ شماره ۳ پاییز ۱۴۰۳

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد

مدیر مسئول: سید محمدرضا مدرس رضوی استاد- گروه مکانیک دانشکده مهندسی (دانشگاه فردوسی مشهد)

سردبیر: محمدحسین عباسپور فرد استاد- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم (دانشگاه فردوسی مشهد)

اعضای هیئت تحریریه:

آق خانی، محمدحسین	استاد- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم (دانشگاه فردوسی مشهد)
ابونجمی، محمد	دانشیار- گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان (دانشگاه تهران)
پوررضا، علیرضا	استادیار- گروه مهندسی بیولوژیک و کشاورزی (دانشگاه کالیفرنیا، دیویس، آمریکا)
خوش تقاضا، محمدهادی	استاد- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم (دانشگاه تربیت مدرس)
راجی، عبدالغنی	استاد- گروه مهندسی کشاورزی و محیطزیست، دانشکده فنی (دانشگاه ایبادان، نیجریه)
روحانی، عباس	استاد- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم (دانشگاه فردوسی مشهد)
سعیدی راد، محمدحسین	دانشیار- مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی
سوپاکیت، سایاسونترن	استادیار- دانشکده کشاورزی (دانشگاه کاستسارت، تایلند)
عباسپور فرد، محمدحسین	استاد- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم (دانشگاه فردوسی مشهد)
علیمردانی، رضا	استاد- گروه ماشین‌های کشاورزی (دانشگاه تهران- پردیس کرج)
عمادی، باقر	استاد مدعو- گروه مهندسی شیمی و بیولوژیک (دانشگاه ساسکاچوان، ساسکاتون، کانادا)
غضنفری مقدم، احمد	استاد- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم (دانشگاه شهید باهنر کرمان)
کدخدایان، مهران	استاد- گروه مکانیک دانشکده مهندسی (دانشگاه فردوسی مشهد)
لغوی، محمد	استاد- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم (دانشگاه شیراز)
محتسبی، سید سعید	استاد- گروه ماشین‌های کشاورزی (دانشگاه تهران)
مدرس رضوی، محمدرضا	استاد- گروه مکانیک دانشکده مهندسی (دانشگاه فردوسی مشهد)
نصیراحمدی، ابوذر	گروه مهندسی کشاورزی (دانشگاه کاسل آلمان)

ناشر: دانشگاه فردوسی مشهد

مقالات این نشریه در پایگاه‌های معتبر زیر نمایه می‌شود:

AGRIS، Scopus، Web of Science: Emerging Sources Citation Index™ (ESCI)، CABI، DOAJ، EBSCO، Google scholar، Internet Archive، پایگاه استنادی جهان اسلام (ISC)، سامانه نشریات علمی ایران و پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی (SID)

پست الکترونیک: jame@um.ac.ir

مقالات این شماره در سایت http://jame.um.ac.ir به‌صورت مقاله کامل نمایه شده است.

این نشریه به تعداد ۴ شماره در سال و به‌صورت آنلاین منتشر می‌شود.

مندرجات

مقالات پژوهشی

ارزیابی روش طیف‌سنجی دی‌الکتریک در تلفیق با روش طیف‌سنجی Vis-SWNIR برای اندازه‌گیری غلظت قند روی نمونه ساقه نیشکر ۲۳۷
مجتبی نادری بلداجی، مجتبی توحیدی، مهدی قاسمی ورنامخواستی

مطالعه روند خشک‌شدن گوشت میگوی پرورشی در خشک‌کن هوای گرم همرفتی و تغییرات برخی فراسنجه‌های مرتبط با آن ۲۵۵
محسن المعی، سید مهدی نصیری، محمد امین نعمت الهی، داریوش زارع، محمد خرم

مقایسه و بررسی میزان تانن پوست سیب‌زمینی با چهار حلال مختلف ۲۷۳
فاطمه مرتضوی، رسول خدابخشیان، مرضیه معین فرد

بررسی تاثیر زمان نگهداری بر ویژگی‌های مکانیکی فیلم زیست‌تخریب‌پذیر پلی‌لاکتیک اسید حاوی نانو ذرات اکسید روی ۲۸۵
ندا تجری، حسن صدرنیا، فرشته حسینی

ارزیابی شاخص‌های زنجیره تأمین مکانیزاسیون برنج با رویکرد مدل اسکور ۳۰۳
مرتضی زنگنه، نرگس بنائیان

ارزیابی جریان رودخانه‌ها به‌منظور تخمین توان و انرژی آبی‌جنبشی نظری با بهره‌گیری از هندسه هیدرولیک ۳۲۱
مهران صادقی دلوئی، رضا علیمردانی، حسین موسی زاده

بررسی کارایی پلاسمای سرد بر غیرفعال‌سازی قارچ *آسپرژیلوس نایجر* و حفظ ویژگی‌های کیفی انگور طی دوران پس از برداشت ۳۳۹
علی خلج، ابراهیم احمدی، سهیلا میرزائی، فهیمه قائمی زاده، روزبه عباس‌زاده

Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 14, No. 3, 2024, p. 235-252

Evaluation of Dielectric Spectroscopy in Fusion with Vis-SWNIR Spectroscopy for the Measurement of Sugar Concentration in Sugarcane Stalk Samples

M. Naderi-Boldaji[1*], M. Tohidi[2], M. Ghasemi-Varnamkhasti[1]

1- Associate Professors, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahrekord University, Shahrekord, Iran
2- Graduated PhD Student, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahrekord University, Shahrekord, Iran
(*- Corresponding Author Email: naderi.mojtaba@sku.ac.ir)

Received: 15 January 2023
Revised: 04 March 2023
Accepted: 18 March 2023
Available Online: 31 August 2024

How to cite this article:
Naderi-Boldaji, M., Tohidi, M., & Ghasemi-Varnamkhasti, M. (2024). Evaluation of Dielectric Spectroscopy in Fusion with Vis-SWNIR Spectroscopy for the Measurement of Sugar Concentration in Sugarcane Stalk Samples. *Journal of Agricultural Machinery*, *14*(3), 235-252. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.2023.80620.1144

Introduction

The development of portable devices for real-time quality assessment of sugarcane is an essential necessity in the agricultural and industrial technology of sugarcane production and processing. Attributes of sugarcane such as sugar concentration and water content can be utilized for this purpose. Near infrared (NIR) spectroscopy has been one of the most widely applied techniques for quality evaluation of sugarcane. However, NIR spectrophotometers in the full NIR wavelength range (up to 2500 nm) are expensive devices that are not readily available for portable applications. Short-wave NIR devices in the range of 1100 nm are available at lower costs but need to be evaluated for specific applications. On the other hand, dielectric spectroscopy has attracted the attention of researchers for quality evaluation of agricultural and food products. In a previous study, a parallel-plate capacitance sensor was developed and evaluated for non-destructive measurement of sugarcane Brix (total soluble solids) and Pol (sucrose concentration) as well as water content, in the frequency range of 0-10 MHz. The results showed excellent prediction models with root mean square errors smaller than 0.3 for Brix and Pol. This study aimed to develop and evaluate a dielectric sensor that can be extended for portable measurements on standing sugarcane stalk in comparison with short-wave NIR (SWNIR) spectroscopy to address how the fusion of the two methods may improve the accuracy of models for predicting sugarcane Brix.

Materials and Methods

A dielectric sensor in the form of a gadget was developed with metallic electrodes to encompass the sugarcane stalk samples. The dielectric sensor was excited with a sinusoidal voltage within 0-150 MHz frequency range by a function generator, and the conductive power through the electrodes was measured using a spectrum analyzer. 105 sugarcane stalk samples were prepared from seven sugarcane varieties and scanned with the dielectric sensor. The samples were also subjected to Vis-SWNIR radiation in the wavelength range of 400-1100 nm, and the reflectance spectra were captured. Reference Brix and water content of the samples were determined using a portable refractometer and oven-drying method, respectively. Regression analyses and artificial neural networks were performed on independent and combined data from dielectric and Vis-SWNIR spectroscopy to develop prediction models for Brix and water content.

Results and Discussion

Partial least squares regression on independent data sets of each instrument resulted in $RMSE_P$ = 1.14 and

©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).

https://doi.org/10.22067/jam.2023.80620.1144

$RMSE_P$ = 1.88 for Brix using Vis-SWNIR and dielectric spectroscopy, respectively. Moreover, data fusion of dielectric and Vis-SWNIR spectroscopy at a low level for the prediction of Brix significantly improved the prediction accuracy to R^2_P = 0.94 and $RMSE_P$= 0.74. The medium-level data fusion resulted in R^2_P = 0.89 and $RMSE_P$ = 0.93 for prediction of water content.

Conclusion

In this study, the accuracy of using Vis-SWNIR and dielectric spectroscopy data for predicting Brix and water content in sugarcane stalk samples was evaluated. To develop the prediction models, partial least squares (PLS) regression and artificial neural network (ANN) were compared. First, the prediction models were developed based on Vis-SWNIR and dielectric spectroscopy independently. Then, the two techniques were fused and the improvement in the prediction accuracy was investigated. Fusing the two methods at an intermediate level lowered the RMSE of Brix to 0.74, showing noticeable improvement compared to previous studies. Based on the achieved results, developing a fusion probe for SWNIR and dielectric spectroscopy and designing the measuring system could be the aim of future studies for in-situ evaluation of sugarcane quality parameters. Due to the importance of sugarcane quality evaluation, during growth and maturity, the results of this study can have a significant role in the development of a portable device that combines NIR and dielectric spectroscopy methods for fast and non-destructive evaluation of sugarcane quality parameters.

Acknowledgement

This article was extracted from a research project financially supported by the Research deputy of Shahrekord University. The grant number was 0GRD34M1614. The authors would like to appreciate the support of the Amir-Kabir Sugarcane Agro-Industry Co., Khuzestan, Iran for providing the sugarcane stalk samples.

Keywords: Brix, Data fusion, Dielectric spectroscopy, Sugarcane, Visible-Near infrared spectroscopy

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۱٤، شماره ۳، پاییز ۱٤۰۳، ص ۲۵۲-۲۳۵

ارزیابی روش طیف‌سنجی دی‌الکتریک در تلفیق با روش طیف‌سنجی Vis-SWNIR برای اندازه‌گیری غلظت قند روی نمونه ساقه نیشکر

مجتبی نادری بلداجی[1*]، مجتبی توحیدی[2]، مهدی قاسمی ورنامخواستی[1]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۷

چکیده

توسعه ابزارهای اندازه‌گیری سریع برای ارزیابی خصوصیات کیفی نیشکر شامل غلظت قند و محتوای رطوبت بدون نیاز به استخراج عصاره از ساقه از جمله ضرورت‌های فناوری در کشاورزی و صنعت این محصول می‌باشد. در این پژوهش، یک پراب دی‌الکتریک با قابلیت توسعه و به‌کارگیری به شکل قابل‌حمل توسعه داده شد و عملکرد آن برای اندازه‌گیری غلظت قند (بر حسب درجه بریکس) و محتوای رطوبت روی نمونه‌های ساقه از هفت رقم نیشکر در بازه فرکانسی ۰-۱۵۰ MHz مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین به‌منظور مقایسه و بهبود دقت اندازه‌گیری غلظت قند، توانایی روش طیف‌سنجی مرئی- فروسرخ نزدیک موج کوتاه (Vis-SWNIR) در محدوده طول موج ۱۱۰۰-۴۰۰ نانومتر بررسی شد. از مدل‌های رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLS) و شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) برای پیش‌بینی درجه بریکس و محتوای رطوبت نمونه‌ها استفاده شد. علاوه‌بر ارزیابی مستقل عملکرد هر دو روش در بهترین حالت با $RMSE_P$= ۱/۱۴ و $RMSE_P$=۱/۸۸ برای اندازه‌گیری بریکس به‌ترتیب با روش‌های طیف‌سنجیVis-SWNIR و دی‌الکتریک، روش‌های تلفیق داده (سطح پایین و سطح متوسط) برای استفاده از اثر هم‌افزایی اطلاعات به‌دست‌آمده از دو روش به‌کار گرفته شد. در پیش‌بینی بریکس، بهترین نتیجه مربوط به روش تلفیق داده سطح پایین با R^2_p =۰/۹۴ و $RMSE_P$=۰/۷۴ بود. همچنین روش تلفیق داده سطح متوسط با R^2_p =۰/۸۹ و $RMSE_P$=۰/۹۳ بهترین نتیجه را در پیش‌گویی مقادیر محتوای رطوبت داشت. بنابراین، رویکرد تلفیق داده به‌طور موثر دقت پیش‌بینی مدل‌های توصیف‌کننده را بهبود بخشید و می‌تواند به‌عنوان روش و ابزاری قابل‌اعتماد در اندازه‌گیری خصوصیات کیفی نیشکر مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: تلفیق داده، درجه بریکس، طیف‌سنجی دی‌الکتریک، طیف‌سنجی مرئی- فروسرخ نزدیک، نیشکر

مقدمه

شکر یکی از مهم‌ترین مواد غذایی مورد نیاز انسان است که در بدن تولید انرژی می‌کند. تقریباً ۶۰ درصد قند تولیدی دنیا از نیشکر و مابقی از چغندرقند تهیه می‌شود. در بین ۱۱۸ کشور تولیدکننده شکر، تنها ۹ کشور از جمله ایران از نیشکر و چغندرقند، ۳۸ کشور به‌تنهایی از چغندرقند و ۷۱ کشور فقط از نیشکر، شکر تولید می‌کنند. لذا وابستگی جهانی در حدود ۷۵٪ به نیشکر و ۲۵٪ به چغندرقند است. نیشکر با پتانسیل تولید تا ۱۲۰ تن نی در هکتار و بیش از ۶۰ میلیون کیلوکالری تولید انرژی در هکتار، بخش عمده‌ای از انرژی غذای مردم جهان را تأمین می‌کند (FAO, 2021). اجزای تشکیل‌دهنده عصاره خام نیشکر بسته به رقم و اقلیم متغیر است و عموماً شامل ۷۵-۶۹ درصد آب، ۱۶-۸ درصد ساکاروز، ۲-۰/۵ درصد قندهای احیاکننده، ۵-۳ درصد فیبر، ۱-۰/۵ درصد ترکیبات غیرآلی، ۱-۰/۵ درصد مواد نیتروژن‌دار و ۱-۰/۵ درصد سایر مواد آلی است (Lal Mathur, 1990). این گیاه یکی از محصولات مهم زراعی کشور می‌باشد و در دهه اخیر به جایگاه مناسبی از نظر سطح زیر کشت و همچنین رشد عملکرد محصول دست یافته است، به گونه‌ای که در سال زراعی ۹۷-۹۶ سطح زیر کشت نیشکر در

۱- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران
۲- دانش‌آموخته دکتری، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: naderi.mojtaba@sku.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jam.2023.80620.1144

کشور ۸۸/۳ هزار هکتار و میانگین عملکرد آن به حدود ۵۸ تن در هکتار رسید (Anonymous, 2018). استان خوزستان با سهم تولید ۹۷ درصد از کل نیشکر کشور به‌عنوان قطب تولید نیشکر ایران شاخته شده است. وجود ۱۲ واحد کشت و صنعت نیشکر در این استان تولید سالانه ۶۵۰ هزار تن شکر را رقم زده است.

امروزه اندازه‌گیری و پایش کیفیت علاوه بر کمیت محصولات کشاورزی از جمله چالش‌های علمی و فنی کشاورزی بوده و بیش از پیش مورد توجه محققین واقع شده است. به‌طور کلی، بسیاری از فن‌آوری‌های رایج در تعیین خصوصیات کیفی محصولات از جمله نیشکر برای استفاده سریع مناسب نیستند، چرا که اجرای آن‌ها نیاز به افراد با مهارت بالا و تجهیزات گران‌قیمت دارند. همچنین روش‌های آزمایشگاهی وقت‌گیر بوده، اغلب وابسته به کاربر هستند و شامل استفاده از مواد شیمیایی خطرناک می‌شوند. مهم‌تر از همه این‌که نیازمند مکان ثابتی می‌باشند و تنها در آزمایشگاه قابلیت اجرا دارند (Mehrotra, & Siesler, 2003). به‌عنوان مثال، روش آزمایشگاهی پلاریمتری برای اندازه‌گیری غلظت قند در نیشکر یا چغندرقند نیاز به آماده‌سازی نمونه‌های عصاره قبل از اندازه‌گیری ساکاروز دارد و اغلب با سطوح بالایی از آلودگی با موادی مانند استات سرب همراه است (Magalhaes & Cerri, 2007). در همه روش‌های مزرعه‌ای (به‌جز برخی روش‌های غیرمخرب در حال پژوهش) که تاکنون برای عیارسنجی نیشکر به‌کار گرفته شده‌اند، ابتدا لازم است که ساقه نیشکر له‌شده و از عصاره آن برای تعیین عیار قند استفاده شود. از طرفی ارزش‌گذاری اقتصادی نیشکر در ورودی کارخانه‌های قند براساس شاخص‌های کیفی نیشکر از جمله عیار (غلظت) قند صورت می‌گیرد که نیازمند توسعه ابزارهای اندازه‌گیری سریع با قابلیت اندازه‌گیری غیرمخرب بر روی ساقه بدین منظور است.

ازجمله روش‌های غیرمخرب استفاده‌شده به‌منظور ارزیابی کیفیت محصولات کشاورزی می‌توان به روش‌های طیف‌سنجی دی‌الکتریک، طیف‌سنجی فروسرخ نزدیک، طیف‌سنجی رامان، ماشین بینایی و روش‌های صوتی و فراصوتی اشاره نمود که هر یک برای اندازه‌گیری پارامتر کیفی خاصی به‌کار گرفته شده‌اند (Augusto & Filho, 2009; Cole, Eggleston, Gilbert, & Chung, 2016; Mireei, Bagheri, Sadeghi, & Shahraki, 2016; Naderi-Boldaji, Fazelian-Dehkordi, Mireei, & Ghasemi-Varnamkhasti, 2015; Nawi, Chen, Jensen, & Mehdizadeh, 2013; Nawi, Jensen, & Chen, 2012; Xiaobo, Jiewen, Xingyi, & Yanxiao, 2007). در میان روش‌های مذکور روش طیف‌سنجی مرئی- فروسرخ (Vis-NIR) به علت دقت بالا و امکان اندازه‌گیری هم‌زمان خصوصیات کیفی ماده مورد توجه بیشتری قرار گرفته است (Pandiselvam *et al.*, 2022; Sirisomboon, 2018). در سال‌های اخیر پژوهش‌های زیادی با استفاده از این روش برای سنجش پارامترهای کیفی محصولات مختلف از جمله خرما (Mireei, Mohtasebi, Masoodi, Rafiei, & Arabanian, 2010)، سیب (Bobelyn *et al.*, 2010)، نیشکر (Chiatrakul, Terdwongworakul, Phuangsombut, & Phuangsombut, 2022; Nawi *et al.*, 2012; Nawi *et al.*, 2013)، پرتقال (Magwaza *et al.*, 2013)، لیموشیرین (Goodarzi, Movahhed, Shakouri, & Ahmadi Chenarbon, 2022)، چغندرقند (Bahrami, Honarvar, Ansari, & Jamshidi, 2022; Gaci *et al.*, 2022; Pan, Zhu, Lu, & McGrath, 2015) و گلابی (Choi, Chen, Lee, & Yim, 2017) انجام شده است. با این‌حال به‌کارگیری این روش در محدوده کامل طیف فروسرخ نزدیک (تا ۲۵۰۰ نانومتر) به دلیل هزینه بالای دستگاه طیف‌سنج و عدم سهولت دسترسی به آن موجب محدودیت‌هایی شده که توجه محققین را برای ارزیابی توانایی محدوده مرئی- نزدیک فروسرخ موج کوتاه (Vis-SWNIR[1] تا طول موج ۱۱۰۰ نانومتر) برای اندازه‌گیری خصوصیات کیفی مواد غذایی و کشاورزی به خود جلب نموده است چرا که طیف‌سنج‌های در این محدوده طیفی با قیمت نسبتا ارزان در داخل کشور نیز تولید می‌شوند.

همچنین در مطالعات متعددی کارایی روش طیف‌سنجی دی‌الکتریک برای سنجش کیفیت مواد غذایی و کشاورزی از جمله عصاره انگور (Garcia, Torres, De Blas, De Francisco, & Illanes, 2004)، خربزه (Guo, Nelson, Trabelsi, & Kays, 2007)، کیفیت گوشت (Aldeza, Botella, Toldr, & Fito, 2010)، محتوای قند در عسل (Guo, Zhu, Liu, & Zhuang, 2010)، رسیدگی موز (Soltani, Alimardani, & Omid, 2011)، نیشکر (Naderi-Boldaji *et al.*, 2015)، کیفیت روغن زیتون (Sanaeifar, Jafari, & Golmakani, 2018) و کیوی (Fazayeli, Kamgar, Nassiri, Fazayeli, & Guardia, 2019) بررسی شده است. روش دی‌الکتریک یک روش ساده و ارزان قیمت با قابلیت اندازه‌گیری به شکل غیرمخرب می‌باشد که امکان توسعه و به‌کارگیری آن نسبت به روش NIR به‌مراتب آسان‌تر است. طیف‌سنجی دی‌الکتریک بیانگر سنجش روند تغییرات مشخصه‌های دی‌الکتریک ماده تابعی از فرکانس میدان الکتریکی حسگر است که به شکل طیف‌های دی‌الکتریک مورد تحلیل قرار می‌گیرد (Blakey & Morales-Partera, 2016; Nelson, 2004; Skierucha, Wilczek, & Szypowska, 2012). نادری بلداجی و همکاران (Naderi-Boldaji *et al.* 2015) با استفاده از روش طیف‌سنجی دی الکتریک و به‌کارگیری یک حسگر خازنی صفحه موازی امکان اندازه‌گیری محتوای قند ساقه چهار رقم مختلف نیشکر را بررسی کردند. نتایج حاکی از دقت بسیار مطلوب این روش برای اندازه‌گیری درجه بریکس، درجه پل (ساکاروز) و محتوای رطوبت ساقه به شکل

1- Visible-Short Wave Near-infrared

غیرمخرب بود. لذا توسعه یک پراب دی‌الکتریک با قابلیت توسعه و به‌کارگیری به شکل قابل‌حمل و امکان تغییر فاصله بین الکترودها جهت انطباق با ساقه ارقام مختلف نیشکر با قطرهای متفاوت و اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای مد نظر قرار گرفت.

تلفیق روش‌های اندازه‌گیری مختلف[1] می‌تواند در افزایش دقت اندازه‌گیری مشخصه‌های کیفی محصولات کشاورزی تاثیر به‌سزایی داشته باشد. به‌طور کلی تلفیق داده‌های دو یا چند حسگر به‌خصوص زمانی‌که حسگرها اثرات متقابل متفاوتی با ماده ایجاد نمایند می‌تواند نسبت به حالت استفاده از یک حسگر، اطلاعات دقیق‌تری از ماده فراهم کرده و منجر به نتایج بهتری شود (Korel, Luzuriaga, & Balaban, 2001). تاکنون تحقیقی در زمینه‌ی استفاده تلفیقی از دو روش طیف‌سنجی دی‌الکتریک و طیف‌سنجی Vis-SWNIR برای اندازه‌گیری محتوای قند ساقه نیشکر بدون استخراج عصاره از ساقه گزارش نشده است. اندازه‌گیری با حسگر دی‌الکتریک بر پایه اثر متقابل یک میدان الکتریکی با ماده و با روش طیف‌سنجی فروسرخ بر پایه جذب انرژی از طیف الکترومغناطیس می‌باشد. لذا انتظار می‌رود تلفیق دو روش بتواند اطلاعات مکملی از دو اثر متقابل با ماده را در اندازه‌گیری دقیق‌تر مشخصات کیفی نیشکر ایجاد نماید. بنابراین اهداف این پژوهش عبارتند از: ۱- توسعه و ارزیابی یک حسگر دی‌الکتریک با قابلیت توسعه و به‌کارگیری برای اندازه‌گیری مزرعه‌ای ساقه نیشکر به شکل غیرمخرب، ۲- ارزیابی روش طیف‌سنجی Vis-SWNIR در اندازه‌گیری مشخصه‌های کیفی ساقه نیشکر و ۳- ارزیابی تلفیق دو روش غیرمخرب طیف‌سنجی دی‌الکتریک و طیف‌سنجی Vis/WSIR در بهبود دقت اندازه‌گیری غلظت قند و محتوای رطوبت ساقه.

مواد و روش‌ها

تهیه نمونه‌ها

در این مطالعه، نمونه‌های نیشکر رسیده در اواخر فصل پاییز از مزارع نیشکر واحد کشت و صنعت امیرکبیر استان خوزستان تهیه شد. نمونه‌ها از هفت رقم تجاری CP-48، CP-57، CP-69، CP-70، CP-73، IRC-9902 و IRC-9903 انتخاب شدند. به‌منظور پوشش گستره‌ای از تغییرات غلظت قند، نمونه‌ها به‌صورت تصادفی از نقاط مختلف چند مزرعه تهیه و در کوتاه‌ترین زمان ممکن به محل اندازه‌گیری در دانشگاه شهرکرد منتقل شدند. نمونه‌ها تا زمان اندازه‌گیری برای جلوگیری از فساد و از دست دادن رطوبت در یخچال با دمای ۴ درجه سلسیوس نگهداری شدند. پیش از شروع اندازه‌گیری برای هر رقم، به‌منظور برقراری شرایط تعادل دمایی، نمونه‌ها به مدت ۱۲ ساعت در محل آزمایش نگهداری شد تا به دمای محیط برسند. برای انجام آزمایش‌ها از قسمت میانی بین گره‌های روی ساقه، تعداد ۱۰۵ نمونه ۱۰ سانتی‌متری از ارقام مختلف تهیه شد. هر نمونه به دو قطعه ۵ سانتی‌متری جفت‌شده بریده شد که نیمی از آن برای اندازه‌گیری با حسگرها و سپس خشکاندن در آون برای اندازه‌گیری محتوای رطوبت و نیم جفت‌شده برای اندازه‌گیری مرجع غلظت قند مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به تغییرات شدید غلظت قند در امتداد طول ساقه نیشکر، به‌منظور افزایش گستره تغییرات محتوای قند، نمونه‌ها از قسمت‌های مختلف سر، وسط و پایین ساقه تهیه شدند. قطر نمونه‌ها توسط کولیس با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر و جرم مرطوب آن‌ها توسط ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم اندازه‌گیری و ثبت گردید.

طیف‌سنجی دی‌الکتریک

به‌منظور اندازه‌گیری‌های دی‌الکتریک، پرابی به شکل یک انبر ساخته شد (شکل ۱-الف). این حسگر جهت امکان اندازه‌گیری سریع بر روی ساقه متشکل از دو الکترود نصب‌شده در دهانه انبر می‌باشد. الکترودهای خازن از ورق آلومینیوم مستطیل شکل با ابعاد ۲×۱/۵ سانتی‌متر در مقابل هم نصب شدند. فاصله دهانه انبر قابل‌تغییر و به شکل فنری برگشت‌پذیر می‌باشد به‌نحوی که می‌توان اندازه‌گیری بر روی ساقه‌ها با ضخامت‌های مختلف را اجرا نمود. الکترودهای خازن از طریق کابل کواکسیال با امپدانس مشخصه Ω ۵۰ از یک طرف به دستگاه مولد سیگنال (Ag-4151, Owon, Hong Kong) با دامنه فرکانسی ۱۵۰-۰ مگاهرتز و از طرف دیگر به دستگاه تحلیل‌گر طیف (GSP-827, GW Instek, Taiwan) متصل شد. شکل ۱- ب اجزا و نحوه اتصال در سامانه اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. روش اندازه‌گیری مورداستفاده در این پژوهش طیف‌سنجی توان دی‌الکتریک نام‌گذاری شد که اساسا هدایت خازنی جریان الکتریکی از طریق ماده دی‌الکتریک را اندازه‌گیری می‌کند که تحت تاثیر تغییرات موجود در مشخصه‌های دی‌الکتریک ماده قرار می‌گیرد (Naderi-Boldaji *et al.*, 2015). استفاده از این روش با ترکیب مولد سیگنال و تحلیل‌گر طیف برای سنجش تغییر خصوصیات دی‌الکتریک مایعات با استفاده از یک حسگر تشدیدگر استوانه‌ای قبلا توسط هوگ و همکاران (Hoog *et al.*, 2012) گزارش شده است. مشخصات دی‌الکتریک یک ماده شامل ضریب دی‌الکتریک (ε') و فاکتور افت (ε'') می‌باشد که ضریب دی‌الکتریک بیانگر جذب انرژی میدان الکتریکی خارجی توسط دو قطبی‌های موجود در ماده با مکانیزم پلاریزاسیون و فاکتور افت بیانگر میزان تبدیل انرژی الکتریکی به حرارت در ماده می‌باشد. اندازه‌گیری مستقل مشخصه‌های دی‌الکتریک ماده نیازمند دستگاه‌های تحلیل‌گر برداری شبکه یا

1- Sensor fusion

تحلیل‌گر امپدانس می‌باشد که دستگاه‌های بسیار گران‌قیمت بوده و به‌سادگی در دسترس نمی‌باشند. لذا روش مورد استفاده در این مطالعه اثر خصوصیات دی‌الکتریک را با پارامتر توان دی‌الکتریک تابعی از فرکانس تغذیه به شکل طیف‌های توان در اختیار قرار می‌دهد. توانایی این روش در مطالعات متعدد قبلی مورد ارزیابی و تایید قرار گرفته است (Ghasemi-Varnamkhasti, Ghatreh-Samani, Naderi-Boldaji, Forina, & Bonyadian, 2017; Hoog *et al.*, 2012; Mireei *et al.*, 2016; Naderi-Boldaji *et al.*, 2018).

برای اندازه‌گیری نمونه‌ها، توان دی‌الکتریک در محدوده فرکانس بین ۰-۱۵۰ MHz اندازه‌گیری و با استفاده از نرم‌افزار الحاقی دستگاه تحلیل‌گر طیف ثبت شد. با توجه به عدم امکان جاروب فرکانس به شکل پیوسته، فرکانس‌ها به شکل دستی در ۸۹ فرکانس (با فاصله ۰/۵ MHz در محدوده ۰-۱۰ MHz و با فاصله ۲ بین ۱۰-۱۵۰ MHz) تنظیم شد و اندازه‌گیری توان در هر فرکانس جداگانه انجام شد.

a الف **b** ب

شکل ۱- الف) حسگر دی‌الکتریک و ب) سامانه اندازه‌گیری دی‌الکتریک و اجزای آن

Fig.1. a) The dielectric sensor and b) the dielectric measuring system and its components

طیف‌سنجی مرئی- فروسرخ نزدیک موج کوتاه (Vis-SWNIR)

جمع‌آوری طیف‌های Vis-SWNIR از نمونه‌ها به روش بازتابی پراکنشی[1] و با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر (مدل NIR-V900) ساخت شرکت فناوران فیزیک نور ایران انجام شد. این طیف‌سنج دارای آشکارساز CCD[2]، محدوده طیفی ۴۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر و قابلیت تفکیک طول موج ۵ نانومتر است. همچنین این دستگاه مجهز به یک کاوشگر فیبر نوری شامل ۶ فیبر نوری ۲۰۰ میکرونی مجهز به درگاه خروجی SMA است به طوری‌که ۵ فیبر وظیفه انتقال نور از منبع نوری هالوژن به نمونه و یک فیبر وظیفه هدایت پرتوی برآمده از نمونه به دستگاه اسپکتروفوتومتر را انجام می‌دهد. نهایتا طیف به‌دست‌آمده از طریق درگاه USB به رایانه منتقل و ذخیره می‌شود. برای اندازه‌گیری نمونه‌های ساقه نیشکر، یک پایه تفلونی دارای سوراخی به قطر ۵ میلی‌متر در مرکز جهت عبور فیبر نوری ساخته شد (شکل ۲-ب). فاصله فیبر نوری از سطح پایه نگهدارنده نمونه در تمامی اندازه‌گیری‌ها ثابت (۵ میلی‌متر) بود به‌صورتی‌که فیبر با نمونه تماس مستقیم نداشت. با تنظیمات موجود در نرم‌افزار دستگاه، دستگاه در حالت بازتابی تنظیم شد و طیف‌های بازتابی بر حسب شدت نور ثبت شد. بر این اساس، از هر نمونه ساقه نیشکر ۴ طیف (از چهار نقطه محیطی، شکل ۲-الف) و با ۵ روبش متوالی (در هر نقطه) برداشت شد و میانگین آن‌ها به‌عنوان طیف اندازه‌گیری‌شده در نظر گرفته شد (شکل ۲).

1- Diffuse reflectance
2- Charge-Coupled Device

شکل ۲– الف) نقاط اندازه‌گیری روی ساقه و ب) طرح‌واره‌ی روش اندازه‌گیری طیف‌های *VIS/NIR*، ج) موقعیت فیبر نوری نسبت به نمونه‌ها و د) دستگاه طیف‌سنج مورد استفاده

Fig.2. a) The scanning points on the sugarcane stalk, b) Schematics of Vis-NIR measurement setup, c) The position of optical fiber with respect to the sample, and d) The device used for obtaining spectral data

اندازه‌گیری‌های مرجع

درجه بریکس معیاری جهت تعیین میزان مواد جامد محلول است که به‌طور استاندارد با روش شکست نور اندازه‌گیری می‌شود. در عصاره نیشکر این معیار به‌عنوان یکی از شاخص‌های عیار قند اندازه‌گیری و مقایسه می‌شود. برای اندازه‌گیری درجه بریکس، ابتدا عصاره هر نمونه ساقه نیشکر با فشار مکانیکی استخراج شد و سپس با استفاده از یک دستگاه رفرکتومتر دیجیتال رومیزی (Milwaukee MA871, Hungary) با دقت ۰/۲ g/100 ml، درجه بریکس نمونه‌ها با سه تکرار اندازه‌گیری و ثبت شد. برای تعیین محتوای رطوبت نمونه‌های ساقه نیشکر از روش خشک کردن با روش استاندارد (USDA, 1970) استفاده شد. ابتدا وزن تر نمونه‌ها با استفاده از ترازوی دیجیتال اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دستگاه آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد و وزن نمونه‌های خشک‌شده اندازه‌گیری شد. در نهایت محتوای رطوبت نمونه‌ها با استفاده از وزن تر و خشک محاسبه شد.

تحلیل داده‌ها

پیش‌پردازش داده‌ها

داده‌های خام طیف‌سنج Vis-SWNIR معمولا شامل اطلاعات غیرمفیدی است که در اثر عواملی مانند اثر پراکنش نور، ناهمواری‌های سطحی نمونه، تغییر در اندازه نمونه، نویز حرارتی آشکارساز طیف‌سنج ایجاد می‌شود. اطلاعات غیرمفید ممکن است تاثیر نامطلوب در نتایج حاصل از پردازش اطلاعات بگذارد. بنابراین به‌منظور حذف این اطلاعات باید قبل از تدوین مدل‌های کالیبراسیون، عملیات پیش‌پردازش بر روی داده‌ها انجام شود. برای پیش‌پردازش داده‌ها معمولا از روش‌های مختلف هموارسازی[1]، نرمال‌سازی[2] و افزایش قدرت تفکیک طیف[3] استفاده می‌شود (Heise & Winzen, 2006; Moomkesh *et al.*, 2017). در این پژوهش از روش‌های میانگین متحرک (MA)[4]، ساویتسکی-گولای (SG)[5]، تصحیح خط پایه (BC)[6]، تصحیح پراکنش افزاینده (MSC)[7]، متغیر نرمال استاندارد (SNV)[8]، مشتق اول (D1) و ترکیبی از این روش‌ها استفاده شد. MA و SG از روش‌های هموارسازی هستند که به‌منظور حذف نویزهای تصادفی استفاده می‌شوند. BC، MSC و SNV از روش‌های نرمال‌سازی هستند که برای تصحیح اثرات جمعی و افزاینده انحراف ناشی از عوامل فیزیکی مانند اندازه نمونه، پراکنش غیریکنواخت در طیف و ضریب شکست نور کاربرد دارند. از مشتق اول نیز برای افزایش قدرت تفکیکی طیف‌ها استفاده می‌شود که به این منظور ابتدا باید طیف‌ها هموار شوند. در این پژوهش از روش SG قبل از مشتق‌گیری استفاده شد (Jamshidi, Minaei, Mohajerani, & Ghassemian, 2014; Fu, Ying, Lu, Xu, & Yu, 2007).

تحلیل رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLS)[9]

روش PLS، یک روش مدل‌سازی خطی است که برای ساده‌سازی روابط میان متغیرهای مستقل (در این‌جا داده‌های طیف‌های Vis/SWNIR و دی‌الکتریک) و متغیرهای وابسته (در این‌جا بریکس و محتوای رطوبت)، مقادیر متغیرهای مستقل را به تعداد کمی از متغیرهای پنهانی (LV[10]) تصویر می‌کند. در واقع در این روش مولفه‌های جدید متعامدی که ترکیب خطی از متغیرهای اولیه هستند ایجاد شده، سپس از این مولفه‌ها برای ساختن مدل رگرسیونی استفاده می‌شود.

شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)[11]

شبکه‌های عصبی مصنوعی مدل‌های ریاضی و انعطاف‌پذیری هستند که می‌توانند در مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده و غیرخطی به‌کار برده شوند. این شبکه‌ها قادرند با انتخاب مناسب تعداد لایه‌ها و نرون‌ها، یک نگاشت غیرخطی بین ورودی‌ها و خروجی‌ها ارائه دهند. لایه یا لایه‌های مخفی، اطلاعات کسب‌شده از لایه ورودی را پردازش کرده و در اختیار لایه خروجی می‌دهد. در این تحقیق از دو نوع شبکه عصبی پرسپترون چندلایه (MLP) و شبکه آبشاری پس‌انتشار پیشرو (CFBP[12]) استفاده شد. شبکه عصبی CFBP نیز مانند MLP از الگوریتم پس‌انتشار خطا برای اصلاح وزن‌ها استفاده می‌کند ولی خصوصیت اصلی شبکه مذکور این است که نرون‌های هر لایه به همه نرون‌های لایه‌های قبل متصل است. برای آموزش و به‌هنگام‌سازی وزن‌های شبکه‌های مورد استفاده از روش‌های آموزش گرادیان نزولی (GD) و لونبرگ-مارکوارت (LM) استفاده شد. بهترین تابع فعال‌سازی، الگوریتم آموزشی و تعداد نرون به‌صورت سعی و خطا تعیین گردید.

روش‌های تلفیق داده[13]

تکنیک‌های تلفیق داده، ابزاری مهم است که می‌تواند عملکرد یک سیستم تشخیصی که از چندین حسگر مختلف تشکیل شده است را بهبود بخشد. در واقع در تلفیق داده، اطلاعات مربوط به پایگاه‌های داده چند حسگر (منابع مختلف اطلاعاتی) با یکدیگر تلفیق شده و نتایج بر اساس داده‌های جدید استخراج می‌شود (Luzuriaga, 1999). به‌طور کلی روش‌های تلفیق داده را می‌توان در سه سطح طبقه‌بندی کرد، تلفیق سطح پایین (LLF)[14]، سطح متوسط (ILF)[15] سطح بالا (HLF)[16] (Korel *et al.*, 2001). در تلفیق سطح پایین داده‌های همه منابع اطلاعاتی به‌سادگی پیش از ساخت مدل به هم اضافه می‌شوند (Castanedo, 2013; Rudnitskaya *et al.*, 2006). بنابراین در ماتریس داده ایجادشده با این روش، تعداد ردیف‌ها برابر با تعداد نمونه‌ها و تعداد ستون‌ها برابر با تعداد سیگنال‌های کلیه منابع است (شکل ۳).

1- Smoothing
2- Normalizing
3- Spectral Resolution
4- Moving Average
5- Savitzky-Golay
6- Baseline Correction
7- Multiplicative Scatter Correction
8- Standard Normal Variate
9- Partial Least Squares
10- Latent variable

11- Artificial Neural Network
12- Cascade forward back propagation
13- Data Fusion
14- Low-Level fusion
15- Intermediate-Level Fusion
16- High-Level Fusion

شکل ۳– طرح‌واره بلوکی روش تلفیق داده سطح پایین (LLF)

Fig.3. Block diagram of the low level data fusion model (LLF)

در تلفیق داده سطح متوسط (ILF) که به‌عنوان تلفیق داده سطح ویژگی نیز معروف است، ابتدا برای هر منبع داده، استخراج ویژگی انجام می‌شود و سپس ترکیب ویژگی‌های استخراج‌شده در توسعه مدل استفاده می‌شود (شکل ۴). این روش با توجه به عملکرد مناسب و سازگاری کافی با روش‌های استخراج ویژگی، محبوبیت زیادی دارد (Borras *et al.*, 2015).

شکل ٤– طرح‌واره بلوکی روش تلفیق داده سطح متوسط (ILF)

Fig.4. Block diagram of the intermediate fusion model (ILF)

در تلفیق داده سطح بالا (HLF) داده‌های هر منبع تجزیه و تحلیل شده و پس از آن یک مدل برای هر منبع داده به‌طور جداگانه ساخته می‌شود. سپس نتایج حاصل از همه مدل‌ها ادغام می‌شوند (Biancolillo, Bucci, & Marini, 2014).

ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی

در این پژوهش برای تدوین مدل‌های پیش‌بینی، ابتدا نمونه‌ها به دو دسته کالیبراسیون و پیش‌بینی به‌ترتیب شامل ۷۵٪ و ۲۵٪ داده‌ها تقسیم شدند. پس از آموزش مدل کالیبراسیون، از اعتبارسنجی متقاطع کامل[1] برای ارزیابی درونی مدل‌ها استفاده شد. این روش اعتبارسنجی، زمانی‌که تعداد نمونه‌ها کم یا متوسط است، مناسب‌ترین روش اعتبارسنجی مدل است (Jamshidi, Minaei, Mohajerani, & Ghassemian, 2012). در این روش پس از خارج کردن یک نمونه، مدل برای n-1 نمونه باقی‌مانده آموزش دیده و برای پیش‌بینی نمونه کنار گذاشته‌شده اعتبارسنجی می‌شود. با تکرار این الگوریتم برای تمامی نمونه‌ها اعتبارسنجی مدل کامل می‌شود. همچنین از دسته داده پیش‌بینی (۲۵٪ از کل داده‌ها) برای اعتبارسنجی نهایی مدل با نمونه‌هایی که قبلا در آموزش مدل به‌کارگرفته نشده استفاده شد. از پارامترهای آماری ریشه میانگین مربعات خطای کالیبراسیون ($RMSE_C$)، ریشه میانگین مربعات خطای اعتبارسنجی متقاطع یگانه ($RMSE_{CV}$)، ریشه میانگین مربعات خطای پیش‌گویی ($RMSE_P$) و همچنین ضریب تبیین کالیبراسیون (R^2_c)، ضریب تبیین اعتبارسنجی متقاطع یگانه (R^2_{cv}) و ضریب تبیین پیش‌گویی (R^2_p) برای مقایسه و اعتبارسنجی مدل‌ها استفاده شد. تحلیل‌های آماری این پژوهش با استفاده از نرم‌افزارهای SPSS v13، MATLAB 8.3 (R2014a) و Unscrambler x10.4 انجام شد.

1- Leave One-out Cross Validation

نتایج و بحث

مشخصات نمونه‌ها و طیف‌های برداشت‌شده

جدول ۱ خلاصه‌ای از آمار توصیفی داده‌های کالیبراسیون و آزمون نمونه‌های نیشکر را نشان می‌دهد. مقادیر شاخص بریکس و

محتوای رطوبتی به‌ترتیب در محدوده ۲۲/۷–۱۲/۵ و ۸۰/۸٪–۶۵ برای دسته کالیبراسیون و ۲۲/۴–۱۴/۳ و ۸۱٪–۶۹/۸ برای دسته آزمون می‌باشند که بیانگر تنوع و دامنه تغییرات گسترده در نمونه‌ها می‌باشد. همچنین نزدیکی محدوده‌های بریکس، محتوای رطوبتی و قطر نمونه‌ها در دسته‌های کالیبراسیون و آزمون، قابل‌اعتماد بودن طبقه‌بندی تصادفی داده‌ها برای تحلیل را نشان می‌دهد.

جدول ۱– آمار توصیفی نمونه‌های نیشکر

Table 1- Descriptive statistics of sugarcane stalk samples

مجموعه نمونه‌ها Sample set	نمونه‌های کالیبراسیون (۷۹ نمونه) Calibration (79 samples)				نمونه‌های آزمون (۲۸ نمونه) Prediction (28 samples)			
متغیر Variable	حداقل Min	حداکثر Max	میانگین Mean	انحراف استاندارد Standard deviation	حداقل Min	حداکثر Max	میانگین Mean	انحراف استاندارد Standard deviation
بریکس Brix (g/100 ml)	12.5	22.7	18.2	2.36	14.3	22.4	18.3	2.37
محتوای رطوبتی Moisture content (%)	65	80.8	74.1	2.87	69.8	81	73.8	3.11
قطر Diameter (mm)	16.6	30.8	22.3	2.91	16.9	28.7	22.1	2.87

شکل ۵ طیف‌های حاصل از دو روش Vis-SWNIR و دی‌الکتریک را برای تمامی نمونه‌ها نشان می‌دهد. در طیف‌های Vis-SWNIR با افزایش رطوبت میزان بازتاب به‌واسطه افزایش جذب کاهش یافته است چرا که مولکول آب در باند طیفی مورد مطالعه به‌خصوص در طول موج‌های بزرگ‌تر از ۶۰۰ نانومتر جذب قابل‌توجهی دارد (Langford, McKinley, & Quickenden, 2001). در طیف‌های دی‌الکتریک نیز روند موجود افزایش دامنه طیف‌ها با افزایش میزان رطوبت و کاهش آن با افزایش غلظت قند را نشان می‌دهد. افزایش میزان رطوبت در ساقه باعث افزایش ضریب دی‌الکتریک نمونه و متعاقبا افزایش توان دی‌الکتریک حسگر می‌شود (Skierucha *et al.*, 2012; Naderi-Boldaji *et al.*, 2015). بین رطوبت و غلظت قند در ساقه نیشکر معمولا یک همبستگی قوی منفی وجود دارد.

شکل ۵– الف) طیف‌های بازتابی Vis-SWNIR و ب) طیف‌های دی‌الکتریک نمونه‌های نیشکر

Fig.5. a) The reflection Vis-SWNIR spectra, and b) The dielectric spectra of the sugarcane samples

نتایج پیش‌بینی روش طیف‌سنجی Vis-SWNIR

نتایج کالیبراسیون و اعتبارسنجی درونی مدل‌های رگرسیونی PLS برای درجه بریکس و محتوای رطوبت با داده‌های طیفی Vis-SWNIR در جدول ۲ نشان داده شده است. مدل‌ها، هم بر اساس طیف‌های خام و هم با استفاده از روش‌های پیش‌پردازش مختلف بررسی شدند. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که مدل‌سازی شاخص بریکس با استفاده از پیش‌پردازش MSC بهترین نتیجه را به‌همراه داشته است (R^2_{cv}= ۰/۷۷، $RMSE_{CV}$= ۱/۱۳۶). برای

مدل‌سازی محتوای رطوبت، بهترین نتیجه در حالت استفاده از پیش‌پردازش SNV (R^2_{CV}= ۰/۷۳، $RMSE_{CV}$= ۱/۱۵) به‌دست‌آمد. همچنین در تدوین مدل‌ها به‌منظور جلوگیری از بیش یا کم‌برازش شدن مدل، انتخاب بهترین تعداد متغیر پنهانی (LV) بر اساس انتخاب نقطه کمینه در نمودار واریانس مقادیر باقی‌مانده در برابر تعداد متغیرهای پنهانی تعیین شد (Jamshidi *et al.*, 2012). به‌منظور صحت‌سنجی مدل‌های حاصل، بهترین مدل‌ها با ۲۵٪ از داده‌ها (داده‌های مشاهده‌نشده توسط مدل) مورد آزمون قرار گرفتند که نتایج آن در جدول ۳ گزارش شده است. همچنین شکل ۶ مقادیر پیش‌بینی‌شده مقدار رطوبت و بریکس مدل‌های PLS منتخب در مقابل مقادیر اندازه‌گیری‌شده آن‌ها نشان می‌دهد. بر این اساس خطای پیش‌بینی بریکس و محتوای رطوبت به‌ترتیب ۱/۱۲٪ و ۱/۴۹٪ حاصل شد که حاکی از دقت نسبتا خوب روش طیف‌سنجی Vis-SWNIR در اندازه‌گیری مشخصه‌های کیفی نیشکر می‌باشد.

این نتایج در مقایسه با برخی مطالعات دیگر با روش اندازه‌گیری مشابه در محصولات مختلف امیدوارکننده است. ناوی و همکاران (Nawi *et al.*, 2013) با مدل‌سازی PLS داده‌های حاصل از دو روش طیف‌سنجی جذبی و بازتابی در محدوده طیفی Vis-SWNIR به پیش‌بینی بریکس سه رقم مختلف نیشکر پرداختند و با R^2 و $RMSE_P$ به‌ترتیب ۰/۸۹ و ۱/۵۱ برای طیف جذبی و ۰/۹۱ و ۱/۴۱ برای طیف بازتابی مقادیر بریکس را پیش‌بینی نمودند. باقرپور و همکاران (Bagherpour, Minaei, Abdollahian Noghabi, & Khorasani Fardvani, 2015) در پژوهشی با استفاده از تکنیک NIR به بررسی میزان قند موجود در ریشه‌های چغندرقند پرداختند. نتایج تحلیل PLS برای تخمین بریکس، بیانگر R و $RMSE_P$ به‌ترتیب ۰/۹۵ و ۱/۷ بود. موم‌کش و همکاران (Moomkesh, Mireei, Sadeghi, & Nazeri, 2017) در اندازه‌گیری بریکس و محتوای رطوبت لیموشیرین با روش یکسان به‌ترتیب مقادیر خطای ۰/۵ و ۰/۵۷ را گزارش نمودند. پیرس و همکاران (Peirs, Lam mertyn, Ooms, & Nicolaı, 2001) مقدار بریکس واریته‌های مختلف سیب را با استفاده از روش طیف‌سنجی فروسرخ نزدیک مورد بررسی قرار دادند. مدل‌های PLS تدوین‌شده مقادیر بریکس را با R^2 در محدوده ۰/۷۳–۰/۸۹ و خطای حدود ۰/۷ درجه بریکس پیش‌بینی نمودند.

جدول ۲– نتایج کالیبراسیون و اعتبارسنجی درونی مدل رگرسیون PLS برای پیش‌بینی بریکس و محتوای رطوبت نیشکر با داده‌های طیفی Vis-SWNIR

Table 2- The calibration and validation accuracy of PLS regression models for predicting Brix and moisture content in sugarcane using Vis-SWNIR spectral data

پیش‌پردازش Pre-processing	بریکس Brix				محتوای رطوبت Moisture content			
	کالیبراسیون Calibration		اعتبارسنجی متقاطع یگانه Leave-one-out cross validation		کالیبراسیون Calibration		اعتبارسنجی متقاطع یگانه Leave-one-out cross validation	
	R^2_c	RMSEC	R^2_{cv}	RMSECV	R^2_c	RMSEC	R^2_{cv}	RMSECV
Raw	0.91	0.677	0.75	1.173	0.94	0.675	0.70	1.575
BC	0.95	0.52	0.75	1.191	0.92	0.795	0.67	1.645
MA	0.91	0.693	0.73	1.228	0.89	0.942	0.67	1.643
MSC	**0.97**	**0.381**	**0.77**	**1.136**	0.96	0.579	0.71	1.568
SNV	0.96	0.579	0.71	1.568	**0.97**	**0.457**	**0.73**	**1.500**
SG	0.91	0.691	0.74	1.214	0.91	0.833	0.69	1.606
D1	0.94	0.731	0.73	1.231	0.94	0.693	0.69	1.607
MSC+SG+D1	0.96	0.459	0.74	1.196	0.92	0.812	0.68	1.628

جدول ۳– نتایج اعتبارسنجی بهترین مدل‌های PLS در پیش‌بینی مقدار بریکس و محتوای رطوبتی با با داده‌های طیفی Vis-SWNIR

Table 3- The prediction accuracy of the top performing PLS models using Vis-SWNIR spectral data

متغیر Variable	پیش‌پردازش Pre-processing	R^2_p	RMSEP	LV
بریکس Brix (g/100 ml)	MSC	0.79	1.12	11
محتوای رطوبتی Moisture content (%)	SNV	0.76	1.49	12

شکل ٦– نتایج اعتبارسنجی مدل‌های PLS برای الف) مقدار بریکس و ب) محتوای رطوبتی با استفاده از داده‌های طیفی Vis-NIR

Fig.7. The validation results for PLS models of a) Brix, and b) Moisture content using the Vis-NIR spectral data

جدول ۴ نتایج ارزیابی دو نوع شبکه عصبی مصنوعی MLP و CFBP به‌منظور پیشگویی درصد محتوای رطوبت و بریکس نمونه‌ها را نشان می‌دهد. در پیش‌بینی بریکس، شبکه عصبی CFBP با ۲۰ نرون در لایه‌های مخفی کمترین مقدار خطا (۱/۳۸) و بالاترین ضریب تبیین (۰/۷۱) را به‌دست داد. همچنین شبکه عصبی MLP با ۱۷ نرون در لایه مخفی به‌عنوان بهترین شبکه در پیش‌بینی محتوای رطوبت با خطای ۱/۵۶ انتخاب شد. نتایج نشان می‌دهد که شبکه عصبی نتوانسته نتایج بهتری در مقایسه با روش رگرسیونی PLS ارائه دهد.

جدول ٤– نتایج اعتبارسنجی بهترین شبکه‌های عصبی در پیش‌بینی بریکس و محتوای رطوبتی با استفاده از داده‌های طیف‌سنجی Vis-SWNIR

Table 4- The validation results for the top performing neural networks in predicting Brix and water content using Vis-NIR spectral data

متغیر Variable	نوع شبکه Network type	الگوریتم آموزش Training algorithm	تابع فعالیت Function	تعداد نرون لایه مخفی The number of neurons in the hidden layer	RMSE	R^2
بریکس Brix (g/100 ml)	CFBP	LM	Logsig	20	1.38	0.71
محتوای رطوبتی Water content (%)	MLP	LM	Logsig	17	1.56	0.74

نتایج پیش‌بینی روش طیف‌سنجی دی‌الکتریک

به‌منظور حذف نویز از طیف‌های دی‌الکتریک از هموارسازی با استفاده از فیلتر ساویتزکی-گولای استفاده شد. نتایج مدل‌های به‌دست‌آمده با استفاده از روش رگرسیونی PLS با استفاده از طیف‌های دی‌الکتریک در جدول ۵ آورده شده است. دقت مدل به‌دست‌آمده در پیش‌بینی بریکس R^2_C= ۰/۷۴، RMSEC= ۱/۱۲، R^2_{cv}= ۰/۶۶، $RMSE_{CV}$= ۱/۳۲ و R^2_P= ۰/۵۹، $RMSE_P$= ۱/۸۴ و در پیش‌بینی محتوای رطوبتی R^2_C= ۰/۶۳، RMSEC= ۱/۷۵، R^2_{cv}= ۰/۵۳، $RMSE_{CV}$= ۲/۰۴ و R^2_P= ۰/۶۶، $RMSE_P$= ۱/۶۵ به‌دست‌آمد. دقت حسگر دی‌الکتریک توسعه داده‌شده در این مطالعه از نتایج Naderi-Boldaji *et al.*, (2015) که خطای $RMSE_P$= ۰/۳ برای اندازه‌گیری بریکس گزارش نمودند به‌مراتب کمتر است. این اختلاف می‌تواند به دلیل تفاوت در شکل پراب باشد که نیازمند بهینه‌سازی در مطالعات آینده می‌باشد.

جدول ۵– نتایج مدل‌های PLS در پیش‌بینی مقدار بریکس و محتوای رطوبتی با استفاده از طیف‌های دی‌الکتریک

Table 5- The accuracy of PLS models in predicting Brix and water content using dielectric spectra

متغیر Variable	R^2_c	RMSEC	R^2_{cv}	RMSECV	R^2_p	RMSEP	LV
بریکس Brix (g/100 ml)	0.74	1.13	0.66	1.32	0.59	1.84	10
محتوای رطوبتی Water content (%)	0.63	1.75	0.53	2.04	0.66	1.65	10

نتایج شبکه‌های عصبی در مدل‌سازی داده‌های حسگر دی‌الکتریک به‌منظور پیش‌بینی درصد محتوای رطوبت و بریکس ساقه‌های نیشکر در جدول ۶ گزارش شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود شبکه عصبی CFBP با الگوریتم آموزش لونبرگ–مارکوارت و تابع فعال‌ساز لگاریتمی، در بین سایر شبکه‌های عصبی و الگوریتم‌های آموزشی، بهترین نتایج را در پیش‌بینی هر دو پارامتر دارا می‌باشد هرچند به‌طور کلی از دقت بالایی نسبت به روش رگرسیون PLS برخوردار نمی‌باشند.

جدول ٦– نتایج اعتبارسنجی بهترین شبکه‌های عصبی در پیش‌بینی بریکس و محتوای رطوبتی با استفاده از طیف‌های دی‌الکتریک

Table 6- The validation results for the top performing neural networks in predicting Brix and water content using dielectric spectra

متغیر Variable	نوع شبکه Network type	الگوریتم آموزش Training algorithm	تابع فعالیت Function	تعداد نرون لایه مخفی The number of neurons in the hidden layer	RMSE	R^2
بریکس (g/100 ml) Brix (g/100 ml)	CFBP	LM	Logsig	18	2.09	0.51
محتوای رطوبتی (٪) Water content (%)	CFBP	LM	Logsig	21	1.86	0.56

تلفیق داده‌ها

در این مطالعه قابلیت دو روش تلفیق داده سطح پایین و سطح متوسط در پیش‌بینی مقادیر بریکس و محتوای رطوبت نمونه‌های نیشکر مورد بررسی قرار گرفت. در تلفیق داده سطح پایین، داده‌های به‌دست‌آمده از روش NIR و دی‌الکتریک پس از پیش‌پردازش، در یک ماتریس واحد با روش رگرسیون PLS تحلیل شد. با توجه به این‌که در تحلیل داده‌های NIR دو روش پیش‌پردازش MSC و SNV به‌ترتیب در پیش‌بینی بریکس و محتوای رطوبت بهترین نتایج را نشان دادند، در این قسمت نیز از داده‌های پیش‌پردازش‌شده با این دو روش استفاده شد. نتایج مدل‌های حاصل از تلفیق داده‌ها در سطح پایین در جدول ۷ نشان داده شده است. دقت مدل‌ها برای پیش‌بینی بریکس R^2_c= ۰/۷۹، $RMSE_C$= ۱/۰۷، R^2_{cv}= ۰/۶۵، $RMSE_{CV}$= ۱/۴، R^2_P= ۰/۶۵، $RMSE_P$= ۱/۳۷ و برای پیش‌بینی محتوای رطوبت R^2_c= ۰/۶۹، $RMSE_C$= ۱/۵۸، R^2_{cv}= ۰/۵۲، $RMSE_{cv}$= ۲/۰۱، R^2_P= ۰/۵۳، $RMSE_P$= ۲/۰۱ به‌دست آمد. این نتایج نشان می‌دهد که دقت مدل‌های PLS به‌دست‌آمده از تلفیق داده سطح پایین نسبت به مدل‌های مشابه در تحلیل‌های جداگانه برای روش‌های NIR و دی‌الکتریک کاهش پیدا کرده است. در ادامه به‌منظور انجام تلفیق داده سطح متوسط از متغیرهای پنهانی مدل‌های PLS منتخب به‌عنوان ورودی مدل استفاد شد. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از بهبود قابل‌توجه دقت مدل‌های PLS حاصل در پیش‌بینی مقدار بریکس و محتوای رطوبت می‌باشد. همان‌طور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود دقت این روش در پیش‌بینی بریکس R^2_C= ۰/۹۵، $RMSE_C$= ۰/۹۲، R^2_C= ۰/۹۲، $RMSE_C$= ۰/۶۶ و در پیش‌بینی محتوای رطوبت R^2_C=۰/۸۸، $RMSE_C$= ۱/۰۰، R^2_C= ۰/۷۷، $RMSE_C$= ۱/۱۷، حاصل شد. همچنین نتایج صحت‌سنجی مدل‌های مذکور موید دقت بسیار مطوب‌تر مدل‌های به‌دست‌آمده نسبت به روش تلفیق سطح پایین می‌باشد طوری‌که برای مدل توصیف‌کننده بریکس مقادیر R^2_P= ۰/۹۴، $RMSE_P$= ۰/۷۴ و برای محتوای رطوبت R^2_P= ۰/۸۹، $RMSE_P$= ۰/۹۳ حاصل شد. مقادیر پیش‌بینی‌شده بریکس و رطوبت در مقابل مقادیر اندازه‌گیری‌شده به‌دست‌آمده با استفاده از روش تلفیق داده سطح متوسط در شکل ۷ نشان داده شده است.

دقت حاصل با مدل‌های تلفیق داده برای پیش‌بینی بریکس در مقایسه با مطالعات انجام‌شده صرفا با روش NIR نتیجه مطلوبی است. با این‌حال برخی منابع خطا در اندازه‌گیری بریکس مرجع می‌تواند عامل کاهش دقت باشد. برای مثال در روش استاندارد آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری بریکس از استات سرب برای شفافیت نمونه قبل از اندازه‌گیری با رفرکتومتر استفاده می‌شود در حالی‌که در مطالعه حاضر عصاره استخراج‌شده فقط با کاغذ صافی و بدون استفاده از هرگونه ماده شیمیایی تهیه شد.

جدول ۷- نتایج مدل‌های PLS در پیش‌بینی مقدار بریکس و محتوای رطوبتی بر مبنای روش‌های تلفیق داده

Table 7- Brix and water content prediction accuracy using PLS models with data fusion methods

متغیر Variable	سطح تلفیق داده Data fusion level	R^2_c	$RMSE_C$	R^2_{cv}	$RMSE_{CV}$	R^2_P	$RMSE_P$	LV
بریکس Brix	پایین Low	0.79	1.07	0.65	1.4	0.65	1.27	6
بریکس Brix	**متوسط Intermediate**	**0.95**	**0.92**	**0.92**	**0.66**	**0.94**	**0.74**	**5**
محتوای رطوبت Water content	پایین Low	0.69	1.58	0.52	2.01	0.53	2.01	5
محتوای رطوبت Water content	**متوسط Intermediate**	**0.88**	**1**	**0.77**	**1.17**	**0.89**	**0.93**	**4**

شکل ۷– نتایج اعتبارسنجی مدل‌های PLS تلفیق داده سطح متوسط الف) مقدار بریکس، ب) محتوای رطوبتی

Fig.7. The validation results for PLS models with intermediate fusion level in predicting a) Brix and b) Water content

نتیجه‌گیری

در این مطالعه روش‌های طیف‌سنجی دی‌الکتریک و طیف‌سنجی بازتابی Vis-SWNIR برای اندازه‌گیری غیرمخرب مشخصه‌های کیفی نیشکر شامل غلظت قند (Brix) و محتوای رطوبت ساقه نیشکر مورد ارزیابی قرار گرفت. به‌منظور ایجاد مدل‌های توصیف‌کننده ویژگی‌های کیفی، روش‌های تحلیلی رگرسیونی PLS و شبکه عصبی مصنوعی مقایسه شد. در ابتدا مدل‌های پیش‌بینی با استفاده مستقیم و جداگانه از داده‌های حاصل از هرکدام از روش‌های طیف‌سنجی دی‌الکتریک و طیف‌سنجی Vis-SWNIR مورد بررسی قرار گرفت و سپس توانایی روش‌های تلفیق داده در افزایش کارایی مدل‌های توصیف‌کننده بررسی شد. بهترین نتیجه برای هرکدام از روش‌های اندازه‌گیری دی‌الکتریک و طیف‌سنجی Vis-SWNIR خطای اندازه‌گیری بریکس به‌ترتیب ۱/۱۳۶ و ۱/۸۸ را ارائه داد که نشان‌دهنده دقت مطلوب‌تر روش Vis-SWNIR می‌باشد. با تلفیق دو روش در سطح متوسط، خطای اندازه‌گیری بریکس به ۰/۷۴ کاهش یافت که در مقایسه با نتایج دیگر مطالعات بهبود قابل‌توجهی است. براساس نتایج به‌دست‌آمده، سامانه اندازه‌گیری براساس تلفیق روش‌های طیف‌سنجی دی‌الکتریک و طیف‌سنجی Vis-SWNIR توانایی اندازه‌گیری مقادیر بریکس و محتوای رطوبت ساقه نیشکر را

دارد. با توجه به اهمیت اندازه‌گیری خصوصیات کیفی نیشکر در طول مراحل رشد و داشت آن، این تحقیق می‌تواند در توسعه یک حسگر ترکیبی قابل‌حمل به‌منظور تشخیص سریع و غیرمخرب پارامترهای کیفی این محصول نقش به‌سزایی داشته باشد.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از نتایج طرح تحقیقاتی اجرا شده به شماره گرنت 0GRD34M1614 از محل اعتبارات معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهرکرد می‌باشد. از حمایت مالی دانشگاه شهرکرد برای اجرای این طرح قدردانی می‌گردد. همچنین از پشتیبانی شرکت کشت و صنعت نیشکر امیرکبیر خوزستان برای تهیه و ارسال نمونه‌های نیشکر قدردانی می‌گردد.

مشارکت نویسندگان

مجتبی نادری بلداجی: نظارت و مدیریت، مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، اعتبارسنجی، ویرایش متن

مجتبی توحیدی: جمع‌آوری داده‌ها، پردازش داده‌ها، تحلیل آماری، استخراج و تهیه متن اولیه

مهدی قاسمی ورنامخواستی: مشاوره فنی، مفهوم‌سازی، ویرایش متن

References

1. Aldeza, C. G., Botella, M., Toldr, P., & Fito, P. (2010). Low frequency dielectric spectrum to determine pork meat quality. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, *11*(2), 376-386. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2010.01.011
2. Anonymous. (2018). Agriculture– Iran– Statistics: *Agriculture Agricultural census*. *2016-2017*, *1*, 47-48. (in Persian).
3. Augusto, P., & Filho, C. (2009). Rapid determination of sucrose in chocolate mass using near infrared spectroscopy. *Analytica Chimica Acta*, *631*, 206-211. https://doi.org/10.1016/J.ACA.2008.10.049
4. Bahrami, M. E., Honarvar, M., Ansari, K., & Jamshidi, B. (2020). Measurement of quality parameters of sugarbeet juices using near-infrared spectroscopy and chemometrics. *Journal of Food Engineering*, *271*, 109775. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109775
5. Bagherpour, H., Minaei, H., Abdollahian Noghabi, M., & Khorasani Fardvani, M. E. (2015). Non-destructive determination of sugar content in root beet by near infrared spectroscopy (NIRS). *Food Science and Technology*, *46*(12), 219-228. (in Persian with English abstract).
6. Biancolillo, A., Bucci, R., & Marini, F. (2014). Data-fusion for multiplatform characterization of an Italian craft beer aimed at its authentication. *Analytica Chimica Acta*, *820*, 23-31. https://doi.org/10.1016/j.aca.2014.02.024
7. Blakey, R. T., & Morales-Partera, A. M. (2016). Microwave dielectric spectroscopy– A versatile methodology for online, non-destructive food analysis, monitoring and process control. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, *9*(3), 264-273. https://doi.org/10.1016/j.eaef.2016.02.001
8. Bobelyn, E., Serban, A. S., Nicu, M., Lammertyn, J., Nicoli, B. M., & Saeys, W. (2010). Postharvest quality predicted by NIR-spectroscopy: Study of the effect of biological variability on spectra and model performance. *Postharvest Biology and Technology*, *55*(3), 133-143. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2009.09.006
9. Borras, E., Ferre, J., Boque, R., Mestres, M., Acena, L., & Busto, O. (2015). Data fusion methodologies for food and beverage authentication and quality assessment–A Review. *Analytica Chimica Acta*, *891*(3), 1-14. https://doi.org/10.1016/j.aca.2015.04.042
10. Castanedo, F. (2013). *A Review of Data Fusion Techniques*. Hindawi Publishing Corporation, 2013, 1-19.
11. Chiatrakul, J., Terdwongworakul, A., Phuangsombut, K., & Phuangsombut, A. (2022). Improved evaluation of commercial cane sugar content in sugarcane stalk using near infrared hyperspectral imaging and stalk axis rotation technique. *Biosystems Engineering*, *223*, 161-173. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.08.019
12. Choi, J. H., Chen, P. A., Lee, B., & Yim, S. H. (2017). Portable, non-destructive tester integrating VIS/NIR reflectance spectroscopy for the detection of sugar content in Asian pears. *Scientia Horticulturae*, *220*(16), 147-153. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.03.050
13. Cole, M. R., Eggleston, G., Gilbert, A., & Chung, Y. J. (2016). Development of an analytical method to measure insoluble and soluble starch in sugarcane and sweet sorghum products. *Food Chemistry*, *190*, 50-59. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.05.049
14. FAO. (2021). Food and Agricultural Organization of United Nations. Statistical Yearbook 2021. Rome. https://doi.org/10.4060,cb4477en
15. Fazayeli, A., Kamgar, S., Nassiri, S. M., Fazayeli, H., & Guardia, M. D. L. (2019). Dielectric spectroscopy as a potential technique for prediction of kiwifruit quality indices during storage. *Information Processing in Agriculture*, *6*(4), 479-486. https://doi.org/10.1016/j.inpa.2019.02.002
16. Fu, X., Ying, Y., Lu, H., Xu, H., & Yu, H. (2007). FT-NIR diffuse reflectance spectroscopy for kiwifruit firmness detection. *Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety*, *1*, 29-35. https://doi.org/10.1007/s11694-007-

9004-2
17. Gaci, B., Garcia, S. M., Abdelghafour, F., Adrian, J., Maupas, F., & Roger, J. M. (2022). Assessing the potential of a handheld visible-near infrared microspectrometer for sugar beet phenotyping. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, *30*(3), 122-129. https://doi.org/10.1177/09670335221083448
18. Garcia, A., Torres, J. L., De Blas, M., De Francisco, A., & Illanes, R. (2004). Dielectric characteristics of grape juice and wine. *Journal of Biosystems Engineering*, *88*(3), 343-349. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.04.008
19. Ghasemi-Varnamkhasti, M., Ghatreh-Samani, N., Naderi-Boldaji, M., Forina, M., & Bonyadian, M. (2017). Development of two dielectric sensors coupled with computational techniques for detecting milk adulteration. *Computers and Electronics in Agriculture*, *140*, 266-278. https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.06.005
20. Goodarzi, N., Movahhed, S., Shakouri, M. J., & Ahmadi Chenarbon, H. (2022). Feasibility of Visible/Near Infrared (Vis/NIR) Spectroscopy capability in classification of lemon samples during storage period by PCA, LDA and SVM identification methods. *Iranian Journal of Food Science and Technology*, *18*, 335-352. https://doi.org/10.52547/fsct.18.120.26
21. Guo, W., Nelson, S. O., Trabelsi, S., & Kays, S. J. (2007). Dielectric properties of honeydew melons & correlation with quality. *Microwave Power & Electromagnetic Energy*, *41*(2), 4454. https://doi.org/10.1080/08327823.2006.11688556
22. Guo, W., Zhu, X., Liu, Y., & Zhuang, H. (2010). Sugar and water contents of honey with dielectric property sensing. *Journal of Food Engineering*, *97*(2), 275-281. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.10.024
23. Heise, H. M., & Winzen, R. (2006). *Chemometrics in Near-Infrared Spectroscopy*. In: Siesler, H. W., Ozaki, Y., Kawata, S. and Heise, H. M. (Eds.) Near-Infrared Spectroscopy: Principles, Instruments, Applications. 3rd Reprint. WileyVCH. Germany.
24. Hoog, N. A., Olthuis, W., Mayer, M. J. J., Yntema, D., Miedema, H., & van den Berg, A. (2012). Online fingerprinting of fluids using coaxial stub resonator technology. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, *163*(1), 90-96. https://doi.org/10.1016/j.snb.2012.01.012
25. Jamshidi, B., Minaei, S., Mohajerani, E., & Ghassemian, H. (2012). Reflectance Vis/NIR spectroscopy for nondestructive taste characterization of Valencia oranges. *Computers and Electronics in Agriculture*, *85*, 64-69. https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.03.008
26. Jamshidi, B., Minaei, S., Mohajerani, E., & Ghassemian, H. (2014). Effect of spectral pre-processing methods on non-destructive quality assessment of oranges using NIRS. *Journal of Agricultural Engineering Research*, *167*, 264-271. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22092/JAER.2014.100188
27. Korel, F., Luzuriaga, D., & Balaban, M. O. (2001). Objective quality assessment of raw tilapia (*Oreochromis niloticus*) fillets using electronic nose and machine vision. *Journal of Food Science*, *66*(7), 1018-1024.
28. Lal Mathur, R. B. (1990). *Handbook of cane sugar technology*. Oxford & Ibh Publishing Co. India. pp:11.
29. Langford, V. S., McKinley, A. J., & Quickenden, T. I. (2001). Temperature Dependence of the Visible-Near-Infrared Absorption Spectrum of Liquid Water. *Journal of Physical Chemistry A*, *105*, 8916-8921. https://doi.org/10.1021/jp010093m
30. Luzuriaga, D. A. (1999). Application of computer vision and electronic nose technologies for quality assessment of color and odor of shrimp and salmon. *PhD dissertation, Department of Food Science and Technology*, University of Florida, Gainesville, FL.
31. Magalhaes, P. S. G., & Cerri, D. G. P. (2007). Yield monitoring of sugar cane. *Biosystems Engineering*, *96*(1), 1-6. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.10.002
32. Magwaza, L. S., Opara, U. L., Terry, L. A., Landahl, S., Cronje, P. J. R., Nieuwoudt, H. H., Hanssens, A., Saeys, W., & Nicolaï, B. M. (2013). Evaluation of Fourier transform-NIR spectroscopy for integrated external and internal quality assessment of Valencia oranges. *Journal of Food Composition and Analysis*, *31*(1), 144-154. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2013.05.007
33. Mehrotra, R., & Siesler, H. W. (2003). Application of mid infrared/near infrared spectroscopy in sugar industry. *Applied Spectroscopy Reviews*, *38*(3), 307-354. https://doi.org/10.1081/ASR-120024392
34. Mireei, S. A., Mohtasebi, S. S., Masoodi, R., Rafiei, S. H., & Arabanian, A. S. (2010). Application of FT-NIR spectroscopy in nondestructive maturity determination of Shahani date fruit. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, *41*(2), 113-120. (in Persian with English abstract).
35. Mireei, A., Bagheri, R., Sadeghi, M., & Shahraki, A. (2016). Developing an electronic portable device based on dielectric power spectroscopy for non-destructive prediction of date moisture content. *Sensors and Actuators A: Physical*, *247*, 289-297. https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.06.012
36. Moomkesh, S., Mireei, S. A., Sadeghi, M., & Nazeri, M. (2017). Non-destructive prediction of quality parameters of sweet lemon (*Citrus limetta*) by Vis-SWNIR spectroscopy. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, *47*(4), 603-613. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22059/IJBSE.2017.61991
37. Naderi-Boldaji, M., Fazelian-Dehkordi, M., Mireei, A., & Ghasemi-Varnamkhasti, M. (2015). Dielectric power spectroscopy as a potential technique for the non-destructive measurement of sugar concentration in sugarcane.

Journal of Biosystems Engineering, *140*, 1-10. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.09.003
38. Naderi-Boldaji, M., Mishra, P., Ahmadpour-Samani, M., Ghasemi-Varnamkhasti, M., Ghanbarian, D., & Izadi, Z. (2018). Potential of two dielectric spectroscopy techniques and chemometric analyses for detection of adulteration in grape syrup. *Measurement*, *127*, 518-524. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.06.015
39. Nawi, M. N., Chen, G., Jensen, T., & Mehdizadeh, S. A. (2013). Prediction and classification of sugar content of sugarcane based on skin scanning using visible and shortwave near infrared. *Biosystems Engineering*, *115*(2), 151-161. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.03.005
40. Nawi, N. M., Jensen, T., & Chen, G. (2012). The application of spectroscopic methods to predict sugarcane quality based on stalk cross-sectional scanning. *Journal of American Society of Sugar Cane Technologists*, *32*, 16-27.
41. Nelson, S. O. (2004). Agricultural applications of dielectric spectroscopy. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, *39*(2), 75-85. https://doi.org/10.1080/08327823.2004.11688510
42. Pan, L., Zhu, Q., Lu, R., & McGrath, J. M. (2015). Determination of sucrose content in sugar beet by portable visible and near-infrared spectroscopy. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, *167*(15), 264-271. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.06.117
43. Pandiselvam, R., Prithviraj, V., Manikantan, M. R., Kothakota, A., Rusu, A. V., Trif, M., & Khaneghah, A. M. (2022). Recent advancements in NIR spectroscopy for assessing the quality and safety of horticultural products: A comprehensive review. *Frontiers in Nutrition*, *9*, 973457. https://doi.org/10.3389/fnut.2022.973457
44. Peirs, A., Lam mertyn, J., Ooms, K., & Nicolaı, B. M. (2001). Prediction of the optimal picking date of different apple cultivars by means of VIS: NIR-spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology*, *21*(2), 189-199. https://doi.org/10.1016/S0925-5214(00)00145-9
45. Rudnitskaya, A., Kirsanov, D., Legin, A., Beullens, K., Lammertyn, J., & Nicolaï, B. M. (2006). Analysis of apples varieties– Comparison of electronic tongue with different analytical techniques. *Sensors and Actuators B: Chemical*, *116*(1-2), 23-28. https://doi.org/10.1016/j.snb.2005.11.069
46. Sanaeifar, A., Jafari, A., & Golmakani, M. T. (2018). Fusion of dielectric spectroscopy and computer vision for quality characterization of olive oil during storage. *Computers and Electronics in Agriculture*, *145*, 142-152. https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.12.035
47. Sirisomboon, P. (2018). NIR spectroscopy for quality evaluation of fruits and vegetables. *Materials Today: Proceedings*, *5*(10), 22481-22486. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.619
48. Skierucha, W., Wilczek, A., & Szypowska, A. (2012). Dielectric spectroscopy in agrophysics. *International Agrophysics*, *26*, 187-197. https://doi.org/10.2478/v10247-012-0027-5
49. Soltani, M., Alimardani, R., & Omid, M. (2011). Evaluating banana ripening status from measuring dielectric properties. *Journal of Food Engineering*, *105*(4), 625-631. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.03.032
50. Xiaobo, Z., Jiewen, Z., Xingyi, H., & Yanxiao, L. (2007). Use of FT-NIR spectrometry in non-invasive measurements of soluble solid contents (SSC) of 'Fuji' apple based on different PLS models. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, *87*(1), 43-51. https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2006.09.003

Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 14, No. 3, 2024, p. 253-269

Study on Drying Process of Farmed Shrimp Meat in a Hot Air Convective Dryer and Variation of Some Related Parameters

M. Almaei[1], S. M. Nassiri[2*], M. A. Nematollahi[3], D. Zare[4], M. Khorram[5]

1- Ph. D. Student, Department of Biosystems Engineering, School of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran
2- Associate Professor, Department of Biosystems Engineering and Seafood Processing Research Center, School of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran
3- Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, School of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran
4- Professor, Department of Biosystems Engineering, School of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran
5- Associate Professor, Department of Gas Engineering, School of Chemical, Petroleum and Gas Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran
(*- Corresponding Author Email: nasiri@shirazu.ac.ir)

Received: 10 February 2023
Revised: 16 April 2023
Accepted: 30 April 2023
Available Online: 31 August 2024

How to cite this article:
Almaei, M., Nassiri, S. M., Nematollahi, M. A., Zare, D., & Khorram, M. (2024). Study on Drying Process of Farmed Shrimp Meat in a Hot Air Convective Dryer and Variation of Some Related Parameters. *Journal of Agricultural Machinery, 14*(3), 253-269. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.2023.80905.1145

Introduction

Drying shrimp is one of the storage methods that, while increasing the shelf life, leads to the production of a versatile product with various uses, from consumption as snacks to use as one of the main components of foods. Drying is preferred over other preservation methods because it offers numerous advantages, including extended shelf life, enhanced microbial stability, convenient consumption, reduced transportation costs, increased value, and product diversity.

To accurately model these processes and thus obtain information on factors such as shelf life and energy consumption, it is necessary to determine the product's initial and final temperatures, its geometry and dimensions, and its thermo-physical characteristics. Simulation of different drying processes requires accurate estimation of the effective moisture diffusion coefficient, which is highly dependent on temperature and humidity. Its dependence can be shown by an equation with an Arrhenius structure as an empirical function of humidity and temperature, or by considering the activation energy.

It is necessary to have sufficient knowledge about heat and mass transfer characteristics, such as diffusion or penetration coefficient and the heat transfer coefficient to estimate the final temperature and drying time. This study investigated the drying process of peeled farmed shrimp (*Litopenaeus vannamei*) using a convective hot air dryer. Various parameters such as shrinkage and the effective moisture diffusion coefficient were examined.

Materials and Methods

A drying device was built to conduct experimental studies on drying shrimp samples. The experiments were conducted on sliced shrimp meat samples at temperatures of 40, 50, and 60 degrees Celsius, with a constant air velocity of 1.5 m/s. The experimental drying models were based on diffusion theory. In these models, it is assumed that the resistance to moisture diffusion occurs from the outer layer of the food. In most cases, Fick's second law was used to describe the phenomenon of moisture penetration.

The study used the standard method of immersion in toluene to measure volume changes in the samples. During the drying process, the volume of the samples was measured at 45-minute intervals, and their volume changes were calculated. To measure the moisture content of the samples, each test started by recording the initial weight of the samples using a digital scale with an accuracy of ±0.001 g. During the drying process, the

©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).

https://doi.org/10.22067/jam.2023.80905.1145

samples were weighed each time their volume was measured.

Shrinkage during the drying process is commonly modeled by finding a relationship between shrinkage and moisture, using linear and non-linear models. In most cases, effective permeability is defined as a function of humidity and temperature. For this purpose, curve-fitting methods were employed to analyze the data collected from experimental tests. The appropriate function was extracted by incorporating the Arrhenius equation, which is applicable to most food items.

Results and Discussion

Based on the results of statistical indices, the linear model was the best model for depicting the relationship between shrinkage changes versus moisture ratio changes among the various experimental models evaluated for shrinkage and drying kinetics. Similarly, the Weibull distribution demonstrated superior performance in expressing variations in moisture ratio over time. A moisture dependent experimental model was used to express the variations in the apparent density of shrimp, resulting in a computed range of 1017-1117 kg m^{-3}. Furthermore, an Arrhenius equation was derived to express the effect of moisture content and temperature on the effective diffusion coefficient of shrimp. According to the results, the effective diffusion coefficient of shrimp exhibited variations ranging from 0.08×10^{-9} m^2 s^{-1} to 7.39×10^{-9} m^2 s^{-1}. When deriving the effective diffusion coefficient, the impact of the number of terms in Fick's second law on the variation of the moisture ratio was studied. The findings revealed that increasing the number of terms beyond 100 did not significantly affect the model’s outputs.

Conclusion

The linear model had the highest coefficient of determination (R^2) among the evaluated shrinkage models, as well as the lowest root mean square error and sum of square error (SSE). This makes it the most optimal model for interpreting shrinkage at the tested temperature levels. The Weibull distribution experimental model proved to be the most suitable for expressing changes in the moisture ratio of shrimp meat slices over time within the evaluated temperature range. The Arrhenius model accurately predicts changes in the effective diffusion coefficient of shrimp slices with respect to temperature and moisture content within the tested temperature range.

Keywords: Drying, Effective moisture diffusion coefficient, Shrimp meat, Shrinkage

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۱٤، شماره ۳، پاییز ۱٤۰۳، ص ۲٦۹-۲۵۳

مطالعه روند خشک‌شدن گوشت میگوی پرورشی در خشک‌کن هوای گرم همرفتی و تغییرات برخی فراسنجه‌های مرتبط با آن

محسن المعی[۱]، سید مهدی نصیری[۲*]، محمد امین نعمت الهی[۳]، داریوش زارع[٤]، محمد خرم[۵]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۰

چکیده

روند خشک‌کردن میگوی پرورشی (*Litopenaeus vannamei*) پوست‌گیری‌شده در یک خشک‌کن هوای گرم همرفتی برای تعیین فراسنجه‌های چروکیدگی، سینتیک خشک‌شدن، جرم حجمی و ضریب انتشار مؤثر رطوبت مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور نمونه‌های میگو به شکل ورقه در سه سطح دمای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس با سرعت ثابت هوای ۱/۵ متر بر ثانیه در دستگاه خشک‌کن ساخته‌شده، خشک شدند و وزن و حجم نمونه‌ها طی فرآیند خشک‌شدن، برای مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند. از بین مدل‌های تجربی در نظر گرفته‌شده برای چروکیدگی و سینتیک خشک‌کردن، مدل خطی بهترین مدل برای بیان تغییرات چروکیدگی در مقابل تغییرات نسبت رطوبت و مدل توزیع ویبال به‌عنوان بهترین مدل برای بیان تغییرات نسبت رطوبت-زمان انتخاب شد. از یک مدل تجربی وابسته به رطوبت برای بیان تغییرات جرم حجمی ظاهری میگو استفاده شد که با تخمین ضرایب آن، دامنه $kg\ m^{-3}$ ۱۱۱۷-۱۰۵۰ به‌دست آمد. افزون بر آن برای بیان اثر محتوای رطوبت و دما بر ضریب انتشار مؤثر رطوبت میگو یک رابطه آرنیوسی استخراج شد. بر اساس نتایج، تغییرات ضریب انتشار مؤثر رطوبت میگو در دامنه $m^2\ s^{-1}$ ۰/۰۸×۱۰$^{-9}$ تا $m^2\ s^{-1}$ ۷/۳۹×۱۰$^{-9}$ به‌دست آمد. اثر بسط تعداد جملات قانون دوم فیک بر تغییرات نسبت رطوبت برای معادله ضریب انتشار مؤثر، مورد مطالعه قرار گرفت و مشخص شد افزایش تعداد جملات بیشتر از ۱۰۰ جمله اثر قابل‌ملاحظه‌ای در دقت خروجی مدل ندارد و بر همین اساس تعداد صد جمله برای تخمین ضریب انتشار رطوبت توصیه می‌شود. همچنین برای تعیین این ضریب، اثر چروکیدگی به‌عنوان عامل تاثیرگذار باید لحاظ گردد.

واژه‌های کلیدی: چروکیدگی، خشک کردن، ضریب انتشار مؤثر رطوبت، گوشت میگو

مقدمه

مصرف غذاهای دریایی از زمانی که به‌عنوان منابع مهم مواد مغذی برای سلامتی انسان شناخته شدند، در حال افزایش است. پروتئین، چربی‌ها و ترکیبات فعال زیستی در غذاهای دریایی دارای جنبه‌های منحصر به فردی هستند که آن‌ها را از حیوانات خشکزی متفاوت می‌کند (Azimi, 2016). آبزی‌پروری یکی از فعالیت‌های اقتصادی مهم در بسیاری از کشورها است که منجر به اشتغال‌زایی، توسعه اقتصادی، کاهش آلایندگی منابع دریایی طبیعی و بهبود وضعیت ایمنی غذایی می‌گردد. میگو از مهم‌ترین غذاهای دریایی است که غنی از پروتئین، اسیدهای چرب غیراشباع، کلسیم و بسیاری از ویتامین‌ها بوده و به اشکال مختلف در تهیه مواد غذایی در نقاط گوناگون جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد (Mohebi, Akbarzadeh, Shahidi & Porshhabi, 2007).

میزان کل صید و آبزی‌پروری در ایران در سال ۱۳۹۸، بالغ بر یک میلیون و دویست هزار تن بوده است که سهم میگو در آن بیش از ۵۶۰۰۰ تن است. از این مقدار ۹۹۳۷ تن به‌صورت صید در آب‌های

۱- دانشجوی دکتری بخش مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران
۲- دانشیار، بخش مهندسی بیوسیستم و مرکز پژوهشی فرآوری آبزیان، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران
۳- دانشیار، بخش مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران
۴- استاد، بخش مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران
۵- دانشیار بخش مهندسی گاز، دانشکده مهندسی شیمی نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: nasiri@shirazu.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jam.2023.80905.1145

جنوب کشور، ۴۶۱۱۴ تن به‌صورت پرورش در آب‌های شور و حدود ۱۶ تن به‌صورت پرورش در آب شیرین و شاه‌میگو بوده است (Anonymous, 2020). از این میزان تولید بیش از ۹۵٪ آن صادر می‌گردد که بخش اعظم آن را میگوی منجمد تشکیل می‌دهد. اما نکته حائز اهمیت در نظر گرفتن متنوع‌سازی بازارهای عرضه و نیز تولید محصولات با ارزش افزوده بالا و تأکید بر مسائل کیفی است (Mohebi *et al.*, 2007).

خشک کردن به سبب مزایایی از قبیل زمان ماندگاری طولانی، پایداری میکروبی، قابلیت مصرف آسان، کاهش هزینه‌های حمل و نقل، ارزش افزوده بالا و تنوع محصول نسبت به سایر روش‌های نگهداری ترجیح داده می‌شود (Radhakrishnan, 1997). خشک‌کردن میگو یکی از روش‌های نگهداری است که ضمن افزایش مدت زمان ماندگاری، منجر به تولید محصولی متنوع و با کاربردهای متفاوت، از مصرف به‌عنوان تنقلات تا کاربرد به‌عنوان یکی از اجزای اصلی غذاها می‌گردد. خشک‌کردن میگو در اکثر نقاط جهان و نیز مناطق جنوبی ایران به‌صورت سنتی (با یا بدون جوشاندن و خشک‌کردن در آفتاب) انجام می‌گیرد. اما خشک کردن سنتی با آفتاب باعث آلودگی گوشت میگو با گرد و غبار، عوامل میکروبی و حشرات خواهد شد و همچنین فرآیند خشک‌کردن فقط در طول روز امکان‌پذیر است (Wisaiprom *et al.*, 2018). این در حالی است که تولیدکنندگان در جستجوی راه‌هایی برای تولید محصولی با کیفیت، شکل، اندازه، رنگ و پذیرش کلی مناسب هستند که به شدت قیمت محصول را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Mohebi *et al.*, 2007).

رویکردهای مختلف خشک‌کردن ممکن است بر میزان کیفیت فیزیکی و تغذیه‌ای گوشت میگو اثرگذار باشد، بنابراین اثر روش‌های مختلف خشک‌کردن میگو باید روشن شود زیرا تغییراتی که در نتیجه خشک‌شدن رخ می‌دهد احتمالا بر کیفیت و در نتیجه ارزش نهایی محصول در بازار تأثیر می‌گذارد (Akonor, Ofori, Dziedzoave & Kortei, 2016). برای به حداقل رساندن کاهش وزن و کنترل تغییرات کیفی مرتبط با گرما، فرآیند پخت‌وپز ماهی و سایر آبزیان را می‌توان با استفاده از مدل‌سازی ریاضی با معادلات انتقال گرما و جرم بهینه کرد (Blikra, Skipnes & Feyissa, 2019). از بررسی تجربی و عددی فرآیند خشک‌کردن میگو و فراسنجه‌های به‌دست‌آمده در فرآیندهای انتقال برای شبیه‌سازی توزیع دما و رطوبت در داخل میگو با کمک نرم‌افزار برای شرایط خشک‌کردن می‌توان استفاده نمود. واکاوی اطلاعات حاصل از حل عددی فرآیند خشک‌کردن میگو بهینه‌سازی مصرف انرژی در فناوری‌های مختلف خشک‌کردن آن را امکان‌پذیر می‌سازد (Nguyen, Ngo & Le, 2019).

شبیه‌سازی فرآیندهای مختلف خشک‌کردن نیازمند تخمین دقیق ضریب انتشار مؤثر رطوبت است (Anabel, Celia, German & Rosa, 2018). این فراسنجه به شدت به دما و میزان رطوبت وابستگی دارد که سطح وابستگی آن معمولاً با معادله‌ای با ساختار آرنیوسی به‌عنوان تابعی تجربی از رطوبت و دما و یا با در نظر گرفتن انرژی فعال‌سازی نشان داده می‌شود (Komolafe, Oluwaleye, Adejumo, Waheed & Kuye, 2018). هدف از خشک کردن میگو کاهش رطوبت به حداقل مقدار ممکن و مهار آنزیم‌ها و سایر واکنش‌های بیولوژیکی است (Al-Hilphy *et al.*, 2022). از روش‌های متفاوتی برای خشک‌کردن میگو در پژوهش‌های مختلف نظیر، مایکروویو (Farhang, Hossinpour, Darvishi & Nargesi, 2011)، آون و خلایی (Ersan & Tugrul, 2020)، ترکیبی خورشیدی-گازی (Murali *et al.*, 2021) و مادون قرمز (Al-Hilphy *et al.*, 2022) استفاده شده است. نتایج حاصل از این مطالعات نشان داده است که روش‌های مختلف خشک‌کردن ممکن است خواص حرارتی، ضریب انتشار، کیفیت فیزیکی و تغذیه‌ای میگو را به‌صورت متفاوت تحت تاثیر قرار دهد (Akonor, Ofori, Dziedzoave & Kortei, 2016). بنابراین شناخت و بررسی روند تغییرات مواردی نظیر ضریب انتشار از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. روش همرفتی با توجه به سادگی، هزینه کم، انعطاف‌پذیری و سهولت کنترل تجهیزات یکی از روش‌های متداول برای خشک‌کردن محصولات مختلف نظیر میگو است (Ersan & Tugrul, 2020)، که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت.

خشک‌کردن مواد غذایی فرآیندی پیچیده است که در آن به‌طور همزمان پدیده‌های انتقال حرارت و جرم اتفاق می‌افتد و یکی از مهم‌ترین تغییرات فیزیکی که مواد غذایی در طول خشک‌شدن به آن دچار می‌شوند، کاهش حجم خارجی یا چروکیدگی[1] است. چروکیدگی میزان کاهش حجم محصول را نسبت به حجم اولیه نشان می‌دهد و شاخصی از خصوصیات ظاهری و شدت تغییرات ساختمانی ماده غذایی است. از دست دادن آب و گرمایش، باعث ایجاد تنش بر ساختار سلولی مواد غذایی شده و در نهایت منجر به تغییر شکل و کاهش در ابعاد ماده غذایی می‌گردد. بررسی مدل‌های خشک‌کردن بدون در نظر گرفتن چروکیدگی منجر به نتایج قابل اطمینانی نخواهد شد. مطالعات نشان می‌دهد که داده‌های تجربی ناشی از خشک‌کردن مواد غذایی انطباق مطلوبی با مدل‌های خشک‌کردنی که در آن‌ها چروکیدگی در نظر گرفته شده است، دارند. دو رویکرد کاملاً متفاوت به‌منظور مدل کردن چروکیدگی فرآیند خشک‌کردن مواد غذایی اتخاذ شده است. رویکرد اول شامل یک برازش تجربی از داده‌های حاصل از چروکیدگی به‌عنوان تابعی از مقدار رطوبت است. رویکرد دوم بیشتر بنیادی و مبتنی بر تفسیر فیزیکی سامانه‌های غذایی است و تلاش

1- Shrinkage

می‌کند تا تغییرات هندسی را بر اساس قوانین تبدیل جرم و حجم پیش‌بینی کند (Mayor & Sereno, 2004). علاوه بر این چروکیدگی باعث بروز تغییرات در خواص فیزیکی و به‌خصوص در جرم حجمی می‌شود. جرم حجمی واقعی و ظاهری دو معیار متداول برای تعیین جرم حجمی مواد غذایی هستند (Niamnuy, Devahastin, Soponronnarit & Raghavan, 2008). در اکثر موارد به علت راحتی و سرعت محاسبات از جرم حجمی ظاهری برای بیان تغییرات جرم حجمی استفاده می‌شود. از آنجا که جرم حجمی ظاهری بستگی به مقدار رطوبت ماده غذایی دارد بعضی از محققین از روابط تجربی وابسته به مقدار رطوبت برای تخمین آن استفاده می‌کنند (Guiné, 2006).

در پژوهش‌های مختلف مدل چروکیدگی محصولاتی نظیر سیب‌زمینی (Mulet, Caicia Reverter, Bon & Berna, 2000)، موز (Queiroz & Nebra,2001)، هویج (Mayor & Sereno, 2004)، گیلاس (Ochoa, Kesseler, Pirone, Marquez & DeMichelis, 2002) و گوشت ماهی (Park, 1998) مورد بررسی قرار گرفته‌اند. خشک‌کردن میگو با روش ترکیبی هوای گرم و امواج مادون قرمز حدود ۳۲ درصد چروکیدگی در محصول خشک‌شده ایجاد کرد (Tirawanichakul, Na Phatthalung, & Tirawanichakul, 2011). در همین ارتباط افزایش دما باعث افزایش درصد چروکیدگی در میگو می‌شود (Wang *et al.*, 2018). علی‌رغم این نتایج، مطالعات محدودی در زمینه مدل چروکیدگی و سایر فراسنجه‌های مرتبط در زمینه میگو صورت پذیرفته است. بنابراین تعیین صحیح مدل چروکیدگی میگو و تاثیر آن بر رابطه فیک از طریق بسط جملات معادله مرتبط با ضریب انتشار مؤثر رطوبت، نقش مهمی در شناخت و تجزیه و تحلیل دقیق فرآیند خشک‌کردن میگو بازی می‌کند. هدف پژوهش حاضر بررسی تجربی فرآیند خشک‌شدن نمونه میگو و تخمین خواص مرتبط با آن و همچنین تعیین مناسب‌ترین مدل ریاضی برای فرآیند خشک‌کردن، چروکیدگی میگو و ضریب انتشار رطوبت میگو با توجه به مدل چروکیدگی با بسط تعداد جملات مناسب از قانون دوم فیک است که از جمله مهم‌ترین نوآوری این پژوهش به‌شمار می‌آید.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی نمونه‌ها

در پژوهش حاضر از میگوی پرورشی وانامی (*Litopenaeus vannamei*) یا به اصطلاح گونه سفید غربی برای بررسی تغییرات سینتیک خشک‌کردن و تعیین مناسب‌ترین مدل چروکیدگی استفاده شد. نمونه‌های تازه میگو پس از تهیه از مزارع پرورش میگو واقع در استان بوشهر و برش سر و دم، پوست‌گیری‌شده و در دمای ۵ درجه سلسیوس نگهداری شدند. نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها به شکل ورقه‌هایی با ابعاد تقریبی ۲ × ۵ سانتی‌متر و ضخامت ۰/۵ سانتی‌متر با تیغ برش زده شدند (شکل ۱).

خشک‌کردن نمونه‌ها

برای انجام آزمایش‌های تجربی خشک‌کردن نمونه‌های میگو، یک دستگاه خشک‌کن ساخته شد (شکل ۲). خشک‌کن مجهز به یک پنکه با قدرت هوادهی حداکثر ۷۹۰ $m^3\ hr^{-1}$ ساخت شرکت دمنده، ایران (BEB-25/10L4S) و همچنین دو عدد المنت حرارتی با توان مجموع ۲۰۰۰ وات بود. برای اندازه‌گیری دما و رطوبت هوای ورودی و خروجی خشک‌کن از دو عدد ماژول سنسور دما و رطوبت (Am2301) ساخت کشور چین با دقت اندازه‌گیری دمای ±۰/۵ درجه سلیسوس و رطوبت ±۳ درصد در ورودی هوا به پنکه و خروجی خشک‌کن استفاده شد. برای اندازه‌گیری تغییرات وزن نمونه‌ها از بارسنج Zemic L6D-C3 ساخت کشور چین با ظرفیت حداکثر ۲/۵ kg و دقت ±۰/۱ gr استفاده گردید. این تجهیزات از طریق برنامه‌ریزی برد آردینو با قابلیت تنظیم فواصل زمانی بین داده‌برداری‌ها در طول آزمایش‌ها، دما و رطوبت هوای ورودی و خروجی و همچنین وزن نمونه‌ها را به‌صورت برخط اندازه‌گیری کرده و روی یک کارت حافظه (SD) داده‌ها را ذخیره می‌کرد. کنترل دمای خشک‌کن از طریق ترموستات (Autonics TC4Y) با کمک سنسور حرارتی PT-100 نصب شده در کانال اصلی خشک‌کن صورت می‌گرفت. بر اساس پژوهش‌های پیشین بهترین محدوده دمای خشک‌کردن برای آبزیان و همچنین میگو ۴۰–۸۰°C است (Blikra *et al.*, 2019; Nguyen *et al.*, 2019)، بنابراین آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های ورقه گوشت میگو در دماهای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس و سرعت هوای ثابت ۱/۵ متر بر ثانیه انجام گرفت.

شکل ۱– ابعاد نمونه ورقه تهیه شده از گوشت میگو

Fig.1. Dimensions of a sample slab prepared from shrimp meat

a b

شکل ۲– a) طرحواره خشک‌کن ساخته‌شده برای خشک‌کردن ورقه‌های گوشت میگو، b) تصویری از نمای کلی خشک‌کن

۱) واحد کنترل الکتریکی، ۲) پنکه، ۳) المنت‌های حرارتی، ۴) سینی نمونه‌های میگو، ۵) بارسنج

Fig.2. a) Schematic of dryer made for drying shrimp meat slab and b) overall view of dryer

1) Electrical control unit, 2) Fan, 3) Thermal elements, 4) Shrimp samples tray, and 5) Load cell

مدل‌سازی فرآیند خشک‌شدن

اساس مدل‌های تجربی خشک‌شدن بر مبنای نظریه انتشار است. در این مدل‌ها فرض بر این است که مقاومت در مقابل انتشار رطوبت از لایه خارجی ماده غذایی صورت می‌پذیرد (Komolafe *et al.*, 2018). در مدل‌سازی سینتیک خشک‌کردن معمولاً به جای محتوای رطوبت از نسبت رطوبت ($MR = \frac{X}{X_0}$) استفاده می‌شود (Dai, Wang, Ren, Liu & Zhang, 2018). نسبت رطوبت بر حسب زمان با استفاده از مدل‌های ریاضی توصیف می‌شود (Buzrul, 2022). از رابطه (۱) برای این منظور استفاده می‌شود (Zielinska & Aniesrani Delfiya, Murali, Alfiya & Markowski, 2007 ; Samuel, 2020):

$$\frac{X_t}{X_0} = exp(-kt) \quad (۱)$$

که $\frac{X_t}{X_0}$ همان نسبت رطوبت[1] (MR) است. رطوبت اولیه (X_0) بر مبنای خشک (kg water(kg dry solid)$^{-1}$)، با قرار دادن نمونه در آون ۱۰۵°C به مدت ۲۴ ساعت محاسبه شد (Porciuncula, Zotarelli, Carciofi & Laurindo, 2013).

مدل‌های تجربی خشک‌شدن را می‌توان با معادلات زیادی که با مجموعه خاصی از داده‌های آزمایشگاهی سازگاری داشته باشند، بیان کرد. مرسوم‌ترین مدل‌های تجربی که توسط پژوهشگران مختلف برای توصیف فرآیند خشک‌کردن مواد غذایی مورد استفاده قرار گرفته و در پژوهش حاضر نیز مورد بررسی واقع شده‌اند، در جدول ۱ آورده شده‌اند. در این روابط a، b، c، k و n ضرایب ثابت مدل‌ها و t زمان خشک‌کردن بر حسب دقیقه است.

1- Moisture ratio

جدول ۱– مدل‌های تجربی متداول برای خشک‌کردن مواد غذایی و محصولات کشاورزی

Table 1– Common empirical models for drying food and agricultural products

مدل **Model**	معادله **equation**	منبع **Reference**
Newton	$MR = exp(-kt)$	Ceylan, 2008
Henderson & Pabis	$MR = a\ exp(-kt)$	Manjeet, 1984
Logarithmic	$MR = a\ exp(-kt) + c$	Doymaz, 2008
Logestic	$MR = a/(1+b)exp(kt)$	Toğrul & Pehlivan, 2002
Two-term exponential	$MR = a\ exp(-kt) + (1-a)\ exp(-kat)$	Sharaf-Eldeen, Blasdell & Hamdy, 1984
Simplified Fick's diffusion	$MR = a\ exp(-b(t/c^2)$	Azzouz, Guizani, Jomma & Belghith, 2002
Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	Yi, Wu, Zhang, Li & Luo, 2012
Weibull distribution	$MR = a - bexp(-kt^n)$	Yi *et al.*, 2012

تعیین معادله ضریب انتشار مؤثر رطوبت

انتقال رطوبت در هر ماده غذایی در طی فرآیند خشک‌کردن موضوع بسیار مهمی است. در اغلب موارد قانون دوم فیک برای توصیف پدیده نفوذ رطوبت به‌کار می‌رود (Reyes, Alvarez & Marquardt, 2002):

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (۲)$$

فرض اصلی حاکم بر این معادله ناپایدار بودن فرآیند است، که در آن t زمان، x مختصه مکانی[1] و D_e ضریب مؤثر انتشار رطوبت (m^2s^{-1}) است. حل معادله فیک برای یک ورقه در یک بستر لایه نازک و با فرض ضریب انتشار ثابت به‌صورت زیر است (Hashemi, Mowla & Kazemeini, 2009):

$$\frac{X-X_e}{X_0-X_e} = \frac{8}{\pi^2}\left[\sum_{i=1}^{\infty}\frac{1}{(2i-1)^2} exp\left(-(2i-1)^2\pi^2\frac{D_e}{L^2}t\right)\right] \quad (۳)$$

که در آن L ضخامت ورقه گوشت میگو (بر حسب متر) است. در بیشتر موارد از جمله اول و به‌ندرت از بسط دوجمله اول رابطه (۳) برای تخمین ضریب انتشار استفاده می‌شود (Amankwah, Dzisi, Staten & Boxtel, 2018). درصورتی‌که زمان خشک شدن و نسبت رطوبت به‌ترتیب بالای ۷ دقیقه و کمتر از ۰/۳۶ باشد، در بسط یک جمله خطای نسبی در محدوده ۵ درصد خواهد بود. همچنین این مقدار در بسط دوجمله به‌ترتیب برای زمان خشک شدن و نسبت رطوبت، ۱/۵ دقیقه و ۰/۶۷ است (Pabis,Jayas & Cenkowski, 1998). برای افزایش دقت در محاسبه معادله ضریب انتشار مؤثر رطوبت ورقه گوشت میگو، در پژوهش حاضر برای انتخاب تعداد جمله‌های مؤثر از رابطه (۳)، ابتدا سه ضریب انتشار ثابت فرضی برای میگو در نظر گرفته شد. برای حصول اطمینان از اینکه ضرایب فرض شده خارج از محدوده نباشند، مطابق تحقیق گزارش شده (Nguyen *et al.*, 2019) مقادیر زیر برای ضریب انتشار مورد بررسی قرار گرفتند:

$D=[1\times10^{-7},1\times10^{-10},5\times10^{-11}]\ m^2s^{-1}$

سپس در هر مقدار ضریب انتشار رطوبت، اثر تعداد جملات بر اساس مقادیر زیر مورد بررسی قرار گرفت:

i=[1,10,20,100,1000]

برای محاسبه رطوبت و حل رابطه (۶) از الگوریتم زیر استفاده شد:

۱- دریافت مقدار گام زمانی

۲- دریافت رطوبت در ابتدای گام زمانی

۳- محاسبه ضریب انتشار بر اساس اطلاعات دریافتی در ابتدای گام زمانی

۴- محاسبه رطوبت در پایان گام زمانی بر اساس رابطه (۳)

۵- در صورت وجود گام زمانی بعدی تکرار مجدد مراحل

برای حصول اطمینان از نتایج حاصل‌شده، اثر چروکیدگی در تغییرات بعد مشخصه یا همان ضخامت ورقه گوشت میگو مطابق رابطه (۴) در نظر گرفته شد (Zielinska & Markowski, 2007):

$$L = L_0\left(A\frac{X}{X_0} + B\right)^{\frac{1}{3}} \quad (۴)$$

که در آن A و B ضرایب استخراج‌شده از معادله چروکیدگی و L_0 ضخامت اولیه ورقه (برحسب متر) است.

قابلیت نفوذ مؤثر در اغلب موارد بر اساس تابعی از رطوبت و درجه حرارت تعریف می‌شود. برای این منظور با استفاده از روش‌های برازش منحنی بر داده‌های حاصل از آزمایش‌های تجربی و لحاظ کردن معادله آرینیوس (برای اغلب مواد غذایی) تابع مناسب استخراج شد (Zielinska & Markowski, 2007):

$$D_e = a\ exp\left(-\frac{b}{273.15+T} + cX\right) \quad (۵)$$

در این معادله T دمای ماده (درجه سلسیوس) و a، b و c ثابت‌های معادله هستند.

مدل‌سازی چروکیدگی

چروکیدگی (s) طبق تعریف نسبت حجم ظاهری در رطوبت

1- Position coordinate

نهایی (V) به حجم ظاهری در رطوبت اولیه (V_0) ماده غذایی است (Ochoa *et al.*, 2002). در پژوهش حاضر برای تعیین تغییرات حجم نمونه از روش استاندارد اندازه‌گیری تغییرات حجم با روش غوطه‌وری استفاده گردید (Zielinska & Markowski, 2007). حجم ابتدایی نمونه‌ها از طریق غوطه‌ور کردن آن‌ها در داخل بشر حاوی تولوئن به‌دست آمد. سپس در طول زمان خشک‌شدن به فواصل ۴۵ دقیقه حجم نمونه‌ها مجدداً اندازه‌گیری شد و تغییرات حجم آن‌ها ($\Delta v = v_i - v_{i-1}$) محاسبه گردید. برای اندازه‌گیری محتوای رطوبتی نمونه‌ها، در ابتدای هر آزمایش وزن نمونه‌ها با ترازوی دیجیتال با دقت ±۰/۰۰۱ گرم ثبت شدند. سپس در طول زمان خشک نمونه‌ها، همزمان با اندازه‌گیری حجم، نمونه‌ها توزین شدند.

متداول‌ترین روش برای مدل‌کردن چروکیدگی در طی فرآیند خشک‌کردن، به‌دست آوردن یک رابطه تجربی بین چروکیدگی و رطوبت است که برای این منظور از مدل‌های خطی و غیرخطی استفاده می‌شود (Mayor & Sereno, 2004). در جدول ۲ فهرست متداول‌ترین مدل‌های ریاضی تجربی چروکیدگی که توسط محققین مختلف مورد استفاده قرار گرفته، نشان داده شده است. در روابط ارائه‌شده در این جدول، ضرایب a، b، c و d ثابت‌های مدل‌ها هستند. در پژوهش حاضر نیز از این مدل‌ها برای انطباق با داده‌های تجربی استفاده شد.

جدول ۲- مدل‌های تجربی برای چروکیدگی ورقه‌های گوشت میگو

Table 2- Empirical models for shrimp meat slabs shrinkage

مدل Model	معادله equation	هندسه Geometry	منبع Reference
1	$s = a\frac{X}{X_0} + b$	ورقه، مکعب، استوانه Slab, Cube, Cylinder	Ochoa *et al.*, 2002
2	$s = a + b\left(\frac{X}{1+X}\right) + exp(c\frac{X}{1+X})$	ورقه، استوانه، نیم‌کره Slab, Cylinder, Hemisphere	Kaminski, Szarycz and Janowicz, 1996
3	$s = a + bX + cX^{\frac{3}{2}} + dexp(kX)$	ورقه slab	Vázquez, Chenlo, Moreira and Costoyas, 1999
4	$s = a + b\frac{X}{X_0} + c(\frac{X}{X_0})^2$	ورقه، استوانه Slab, Cylinder	Mayor and Sereno, 2004
5	$s = aexp(\frac{bX}{X_0})$	ورقه، استوانه Slab, Cylinder	Mayor and Sereno, 2004

مدل‌سازی جرم حجمی

برای جرم حجمی ظاهری میگو (Suvarnakuta, Devahastin & Mujumdar, 2007) رابطه تجربی (۶) را که با محتوای رطوبتی مرتبط است پیشنهاد داده‌اند:

$$\rho = c_1 + c_2(\frac{X}{X+1}) \quad (۶)$$

که در آن ρ جرم حجمی ($kg\ m^{-3}$)، X محتوای رطوبتی میگو بر مبنای خشک ($kg\ kg^{-1}$)، c_1 و c_2 ضرایب تجربی وابسته به دما هستند. در پژوهش حاضر از این مدل برای بیان تغییرات جرم حجمی میگو نسبت به محتوای رطوبتی استفاده شد.

تحلیل آماری

در تمامی موارد مطرح‌شده برای تخمین فراسنجه‌ها و ضرایب در هر یک از مدل‌ها، از روش برازش غیرخطی منحنی استفاده شد. برای این منظور از نرم‌افزار matlab R2018 و تابع lsqcurvefit نوار ابزار بهینه‌سازی استفاده گردید. از شاخص‌های آماری ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، کمترین مقدار مربع کای (χ^2) و مجموع مربعات خطا (SSE) برای تعیین بهترین مدل در هر قسمت استفاده شد (Yi *et al.*, 2012):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_{exp,i} - y_{pre,i})}{\sum_{i=1}^{n}(y_{pre,i} - \overline{y_{pre}})} \quad (۷)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\frac{(y_{i,exp} - y_{i,pre})^2}{n}} \quad (۸)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_{exp,i} - y_{pre,i})^2}{n-p} \quad (۹)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^{n}(y_{pre,i} - \overline{y_{pre}})^2 \quad (۱۰)$$

در این روابط n تعداد تکرار، p تعداد ثابت‌های مدل، *pre* فراسنجه‌های مربوط به مدل و *exp* فراسنجه‌های مربوط به آزمایش‌های تجربی است. داده‌برداری در این پژوهش با سه تکرار انجام گرفت.

نتایج و بحث

چروکیدگی

با استخراج ضرایب مدل‌های مختلف چروکیدگی، مدل‌ها بر اساس شاخص‌های آماری در نظر گرفته شده مورد ارزیابی قرار گرفتند. جدول ۳ ضرایب استخراج‌شده و شاخص‌های آماری برای مدل‌های مختلف چروکیدگی را نشان می‌دهد. نتایج حاصل نشان داد که مدل خطی (مدل ۱) با داشتن شاخص‌های آماری مناسب، بهترین مدل برای تفسیر داده‌های تجربی است. نتایج تحقیقات پژوهشگران مختلف در مواد غذایی نظیر سیب (Moreira, Figueiredo & Sereno, 2000)، هویج (Hatamipour & Mowla, 2002)، گیلاس (Ochoa *et al.*, 2002)، گوشت ماهی (Park, 1998) و گوشت خوک (Clemente, Sanjuan & Mulet, 2009) نیز مبین این مطلب است که مدل خطی تفسیر مناسبی از فرآیند چروکیدگی ارائه می‌دهد. شکل ۳ نمونه خشک‌شده و رابطه بین داده‌های تجربی و داده‌های مدل انتخابی (مدل خطی) در پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.

جدول ۳– ضرایب و شاخص‌های آماری استخراج شده برای مدل‌های مختلف چروکیدگی میگو

Table 3- Extracted coefficients and statistical indices for different models of shrimp shrinkage

مدل Model	ضرایب ثابت مدل‌ها Constant coefficients of models					R^2	χ^2	RMSE	SSE
	a	b	c	d	k				
1	0.823	0.175	-	-	-	0.999	2.16E-05	0.0046	2.15E-05
2	0.132	-4.597	1.882	-	-	0.981	0.0006	0.0260	0.0006
3	0.243	0.103	0.042	-2.2E-14	6.836	0.985	0.0005	0.0229	0.0005
4	0.183	0.790	0.260	-	-	0.991	2E-05	0.0044	1.97E-05
5	0.313	1.192	-	-	-	0.985	0.0005	0.0234	0.0005

a

b

شکل ۳– a) نمونه خشک‌شده ورقه گوشت میگو و b) تغییرات بین داده‌های تجربی و داده‌های مدل انتخابی (مدل ۱) برای چروکیدگی ورقه گوشت میگو

Fig.3. a) Dried shrimp meat slab samples and b) variations between experimental data and data of the selected model (Model 1) for shrimp meat slab shrinkage

بر اساس پژوهش انجام‌شده بین چروکیدگی و دمای انتقال شیشه‌ای ارتباط وجود دارد (Achanta, Okos, Cushman & Kessler, 1997). مواد جامد بی‌شکل (آمورف) در دمای موسوم به دمای شیشه‌ای از حالت جامد به شکل لاستیکی درمی‌آیند. در مواد غذایی با محتوای رطوبتی بالا ماده در حالت لاستیکی قرار دارد و تغییرات بین چروکیدگی و کم شدن میزان آب محصول به‌صورت خطی است، امّا در مواد با محتوای رطوبتی پایین دمای انتقال شیشه‌ای افزایش می‌یابد و ماده با تغییر فاز وارد حالت شیشه‌ای می‌شود. در موادی نظیر گوشت مرغ، گوشت ماهی تن و گوشت خوک که محتوای رطوبتی بالایی دارند این تغییر فاز در دماهای زیر صفر درجه سلسیوس رخ می‌دهد (Clemente *et al.*, 2009). با توجه به این‌که میگو محصولی با محتوای رطوبتی بالا است و فرآوری آن نیز

در درجه حرارت‌های بالا صورت می‌پذیرد، بنابراین تغییر فازی در آن رخ نمی‌دهد و در نتیجه تغییرات خطی بین چروکیدگی و میزان رطوبت دور از انتظار نیست. با توجه به اهمیت چروکیدگی و تأثیر زیادی که بر فرآیند خشک‌کردن دارد، این پدیده حتماً بایستی در شبیه‌سازی ریاضی فرآیند خشک‌کردن در نظر گرفته شود.

خشک کردن

فرآیند خشک‌کردن ورقه‌های میگو در هر سطح دمایی با استفاده از ۸ مدل ارائه‌شده در جدول ۱ با داده‌های تجربی برازش شدند. در جدول ۴ ثابت‌های استخراج‌شده برای هر مدل و در جدول ۵ شاخص‌های آماری مربوط به هر مدل ارائه گردیده است. با توجه به نتایج حاصل‌شده، مدل توزیع ویبال در هر سه سطح دمایی در نظر گرفته‌شده دارای بیشترین ضریب تبیین (R^2) و کمترین ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، مربع کای (χ^2) و مجموع مربعات خطا (SSE) است. بنابراین مدل ویبال به‌عنوان بهترین مدل برای بیان سینتیک خشک‌کردن ورقه گوشت میگو پیشنهاد می‌شود. این انطباق مناسب در شکل ۴ قابل مشاهده است.

جدول ٤– ضرایب ثابت مدل‌های مختلف خشک‌کردن ورقه گوشت میگو

Table 4- Constant coefficients of different models of shrimp meat slab drying

نام مدل Model	دمای خشک‌کردن Drying temperature (°C)	ضرایب ثابت مدل‌ها Constant coefficients of models				
		a	b	c	k	n
Newton	40	-	-	-	5.17E-05	-
	50	-	-	-	6.15E-05	-
	60	-	-	-	7.19E-05	-
Henderson & Pabis	40	0.885	-	-	4.41E-05	-
	50	0.873	-	-	5.19E-05	-
	60	0.861	-	-	5.97E-05	-
Logarithmic	40	0.778	-	0.174	7.54E-05	-
	50	0.778	-	0.160	8.88E-05	-
	60	0.783	-	0.0001	0.15	-
Logestic	40	1.081	0.222	-	4.41E-05	-
	50	1.072	0.227	-	5.19E-05	-
	60	1.062	0.233	-	5.97E-05	-
Two-term exponential	40	0.188	-	-	0.0002	-
	50	0.197	-	-	0.0002	-
	60	0.196	-	-	0.0003	-
Simplified Fick's diffusion	40	0.885	1.18E-05	0.157	-	-
	50	0.873	1.39E-05	0.156	-	-
	60	0.861	0.0003	2.39	-	-
Wang & Singh	40	-5E-05	8E-10	-	-	-
	50	-5.6E-05	9.89E-10	-	-	-
	60	-6.5E-05	0.128E-10	-	-	-
Weibull distribution	40	0.074	-0.94	-	0.0006	0.76
	50	0.049	-0.98	-	0.0011	0.71
	60	0.016	-1.02	-	0.0016	0.68

شکل ٤– نمودار تغییرات رطوبت نسبی واقعی و پیش‌بینی‌شده نسبت به زمان با مدل ویبال

Fig.4. Diagram of actual and predicted relative humidity vs. time with Weibull model

جدول ۵- شاخص‌های آماری مدل‌های مختلف خشک‌کردن ورقه گوشت میگو

Table 5- Statistical indices of different models of shrimp meat slab drying

نام مدل Model	دمای خشک‌کردن Drying temperature (°C)	R^2	χ^2	RMSE	SSE
Newton	40	0.986	0.0024	0.0491	0.0024
	50	0.982	0.0029	0.0536	0.0028
	60	0.983	0.0031	0.0562	0.0031
Henderson & Pabis	40	0.978	0.0009	0.0299	0.0008
	50	0.973	0.0012	0.0343	0.0011
	60	0.973	0.0011	0.0342	0.0011
Logarithmic	40	0.996	0.0001	0.0118	0.0001
	50	0.993	0.0002	0.0168	0.0003
	60	0.991	0.0003	0.0185	0.0003
Logestic	40	0.979	0.0009	0.0299	0.0008
	50	0.973	0.0012	0.0343	0.0011
	60	0.973	0.0012	0.0343	0.0011
Two-term exponential	40	0.996	0.0004	0.0216	0.0004
	50	0.994	0.0006	0.0259	0.0006
	60	0.994	0.0008	0.0282	0.0008
Simplified Fick's diffusion	40	0.978	0.0009	0.0299	0.0008
	50	0.973	0.0012	0.0343	0.0011
	60	0.973	0.0012	0.0343	0.0011
Wang & Singh	40	0.977	0.0019	0.0437	0.0019
	50	0.965	0.0030	0.0543	0.0029
	60	0.961	0.0036	0.0596	0.0035
Weibull distribution	40	0.999	2.39E-05	0.0048	2.32E-05
	50	0.998	7.2E-05	0.0083	6.97E-05
	60	0.998	6.29E-05	0.0077	6.06E-05

نتایج به‌دست‌آمده در این بخش منطبق با پژوهش‌های مختلفی است که در زمینه کاربرد مدل ویبال در صنایع غذایی و فرآیند خشک کردن محصولات مختلف انجام شده است. پژوهشگران متعددی برای بررسی سینتیک خشک شدن محصولاتی نظیر انبه (Corzo, Bracho & Pereira, 2008)، ورقه‌های ماهی ساردین (Corzo & Bracho, 2008)، عناب (Yi *et al.*, 2012)، انگور (Bai *et al.*, 2013)، سیب‌زمینی (Dai *et al.*, 2018) و ماش سیاه (Gaikwad, Sunil, Negi & Pare, 2022) از مدل توزیع ویبال استفاده نموده‌اند. مطابق نتایج حاصل در این پژوهش‌ها مدل ویبال به‌خوبی قابلیت پیش‌بینی تغییرات در محتوای رطوبت در طول فرآیند خشک‌کردن دارا بود. دلیل این موضوع به ویژگی‌های تابع یادشده از جمله رابطه نمایی غیرخطی باز می‌گردد. این مدل به‌خوبی قابلیت توصیف رفتار پدیده‌هایی را که درجات مختلفی از تغییرپذیری را نشان می‌دهند دارد (Corzo & Bracho, 2008). همچنین مدل ویبال بدلیل سادگی و قابلیت انعطاف به‌خوبی می‌تواند رفتار سینتیکی محصولات در حال خشک‌شدن را پیش‌بینی کند (Ling, Teng & Lin, 2018). نکته حائز اهمیت دیگر وابستگی ضرایب مدل به درجه حرارت هوای خشک‌کن است، که نتایج سایر پژوهش‌ها نیز مبین این مطلب است.

جرم حجمی

با برازش داده‌های تجربی بر رابطه (۶) ثابت‌های مدل در نظرگرفته‌شده برای جرم حجمی ظاهری میگو به‌صورت جداگانه در هر سطح دمایی محاسبه شدند که ضرایب آن در جدول ۶ ارائه شده است. افزون بر آن، شکل ۵ انطباق مناسب بین داده‌های تجربی و داده‌های پیش‌بینی‌شده توسط مدل برای جرم حجمی ظاهری میگو را به نمایش گذاشته است.

جدول ٦- ضرایب تجربی رابطه ۶ در دماهای مختلف خشک کردن

Table 6- Experimental coefficients of Equation 6 at different drying temperatures

دمای خشک‌کن Drying temperature (°C)	C_1	C_2	R^2
40	1193.7	-170.17	0.918
50	1187.9	-163.35	0.895
60	1182.3	-156.15	0.937

شکل ۵– داده‌های تجربی جرم حجمی میگو در مقابل داده‌های پیش‌بینی‌شده در دماهای مختلف خشک‌کردن

Fig.5. Experimental data of shrimp density versus predicted data at different drying temperatures

طبق نتایج حاصله جرم حجمی ظاهری نمونه‌های میگو در دامنه ۱۰۵۰–۱۱۱۷ kg m^{-3} تغییر می‌کند. با توجه به گزارش ارائه‌شده دامنه تغییرات جرم حجمی ظاهری میگو در محدوده ۱۰۹۳ kg m^{-3}–۱۰۴۲ در دمای ۲۰ درجه سلسیوس است (Shafiur Rahman & Driscoll, 1993). در موادی نظیر گوشت میگو به‌دلیل ضعیف شدن پیوند مولکولی در ساختارهای پروتئینی در زمان خشک‌شدن، پدیده چروکیدگی رخ می‌دهد (Kassama & Ngadi, 2004). این پدیده به‌نوبه خود باعث ایجاد تغییرات حجمی می‌شود، که در نهایت به تغییر در جرم حجمی ظاهری منجر می‌شود. علاوه بر این عواملی مانند هندسه نمونه، روش خشک‌کردن، شرایط انجام آزمایش و دما نیز می‌تواند جرم حجمی ظاهری را تحت تأثیر قرار دهد (Kassama & Ngadi, 2016).

معادله ضریب انتشار مؤثر رطوبت

در این بخش، ابتدا رابطه (۳) با در نظر گرفتن تعداد جملات بیان‌شده (1,10,20,100,1000) با فرض ضریب انتشار نمونه‌ها، مطابق با الگوریتم ارائه‌شده بسط داده شد. در هر مقدار از ضریب انتشار ثابت در نظر گرفته‌شده، اثر تعداد جملات بر روی تغییرات نسبت رطوبت در مقابل زمان مورد بررسی قرار گرفت که نتایج حاصل در شکل ۶ ارائه شده است. بر اساس مقایسه نمودارها می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش تعداد جمله‌ها بیشتر از ۱۰۰، اثر قابل‌ملاحظه‌ای در خروجی مدل مشاهده نمی‌شود. بر همین اساس تعداد جملات بسط قانون فیک (رابطه ۳) برابر ۱۰۰ در نظر گرفته شد. تغییرات در ضریب انتشار مؤثر میگو در طی فرآیند خشک‌شدن با تخمین ضرایب رابطه (۵) به‌دست آمد. مطابق نتایج حاصل‌شده رابطه (۱۱) برای تخمین ضریب انتشار مؤثر میگو مشخص شد:

$$D_e = 0.0002\, exp\left(-\frac{4612.96}{273.15+T} + 0.839X\right) \qquad (۱۱)$$

در تفسیر منحنی‌های خشک شدن پدیده چروکیدگی و تغییرات ضریب انتشار رطوبت اهمیت به‌سزایی دارند (Amankwah *et al.*, 2018). تخمین مناسب از ضریب انتشار مؤثر زمانی حاصل می‌شود که چروکیدگی و ضریب انتشار هر دو، به‌صورت تابعی از رطوبت در نظر گرفته شوند (Ruiz-López & García-Alvarado, 2007). رابطه (۱۱) علاوه بر داشتن موارد فوق دارای چهارچوبی مشابه سایر مواد غذایی است. از معادلاتی مشابه برای تخمین تغییرات ضریب انتشار مؤثر هویج (Zielinska & Markowski, 2007)، گوشت گوساله (Trujillo, Wiangkaew & Tuan Pham, 2007) و ماهی تیلاپیا (Komolafe *et al.*, 2018) نسبت به دما و رطوبت استفاده شده است.

(a)

(b)

(c)

شکل ٦– نتایج بسط تقریبی معادله انتشار در ضریب انتشار ثابت: a) $D=1\times10^{-7}\ m^2\ s^{-1}$، b) $D=1\times10^{-10}\ m^2\ s^{-1}$، c) $D=5\times10^{-11}\ m^2\ s^{-1}$

Fig.6. Effect of the constant diffusion coefficient on the approximate expansion of the diffusion equation: a) $D = 1 \times 10^{-7}\ m^2\ s^{-1}$, b) $D = 1 \times 10^{-10}\ m^2\ s^{-1}$, and c) $D = 5 \times 10^{-11}\ m^2\ s^{-1}$

جدول ۷– شاخص‌های آماری به‌دست‌آمده برای تخمین ضرایب رابطه (۵) در دماهای مختلف خشک‌کردن

Table 7- Statistical indices obtained for estimating the coefficients of Equation 5 at different drying temperatures

دمای خشک‌کن Drying temperature (°C)	R^2	RMSE	SSE
40	0.999	0.0082	6.78E-05
50	0.998	0.0158	0.0003
60	0.999	0.0108	0.0001

در جدول ۷ شاخص‌های آماری مربوط به تخمین ضرایب رابطه (۵) در هر سطح دمای خشک‌کن ارائه شده است. مطابق نتایج حاصل و ضرایب تبیین به‌دست‌آمده، رابطه (۱۱) به‌خوبی می‌تواند تخمین مناسبی از ضریب انتشار میگو در محدوده آزمایش‌های تجربی انجام‌شده ارائه دهد. شکل ۷ میزان تغییرات ضریب انتشار مؤثر میگو در مقابل تغییرات دما و محتوای رطوبتی مطابق رابطه (۱۱) را نشان می‌دهد، به نحوی که با افزایش دمای خشک‌کردن و افزایش محتوای رطوبتی، ضریب انتشار مؤثر میگو افزایش می‌یابد.

محدوده تغییرات ضریب انتشار مؤثر میگو طبق نتایج حاصل‌شده در دامنه $۰/۰۸\times۱۰^{-۹}$ $m^2\ s^{-1}$ تا $۷/۳۹\times۱۰^{-۹}$ $m^2\ s^{-1}$ گزارش شده است که در محدوده مورد انتظار برای مواد غذایی خشک‌شده (از $۱۰^{-۱۲}m^2\ s^{-1}$ تا $۱۰^{-۸}$) قرار دارد (Giovanelli, Zanini, Lavelli & Nani, 2002; Gely & Santalla, 2007; Falade & Solademi, 2010). دامنه‌های $۰/۲۱\times۱۰^{-۹}$ $m^2\ s^{-1}$ تا $۴/۳۴\times۱۰^{-۹}$ $m^2\ s^{-1}$ و (Nguyen *et al.*, 2019) $۱/۴۸۹\times۱۰^{-۸}$ $m^2\ s^{-1}$ تا $۲/۹۶۰\times۱۰^{-۸}$ $m^2\ s^{-1}$ (Costa, Silva, Rodrigues, Silva & Cruz Rodrigues, 2018) برای ضریب انتشار مؤثر میگو نیز گزارش شده است. علت اختلاف بین نتایج پژوهش‌های مختلف را می‌توان به لحاظ کردن یا نکردن پدیده چروکیدگی طی فرآیند خشک‌کردن مرتبط دانست. ضریب انتشار مؤثر به‌دست‌آمده در تحقیق حاضر با در نظر گرفتن چروکیدگی از طریق رابطه (۴) حاصل شده است، در حالی‌که اگر ضریب انتشار با فرض چروکیدگی قابل‌چشم‌پوشی به‌دست‌آمده باشد به دلیل مسیر طولانی‌تر انتشار رطوبت بالاتر خواهد بود (Zielinska & Markowski, 2007). علاوه بر این تغییرات در دامنه مقادیر ضریب انتشار را می‌توان به عواملی مانند انواع و شرایط روش‌های آزمایشگاهی مورد استفاده برای تعیین ضریب انتشار مؤثر، روش پردازش داده‌ها، پیچیدگی ساختار ماده غذایی، دمای خشک‌کردن و میزان رطوبت مرتبط دانست (Costa *et al.*, 2018).

شکل ۷- تغییرات در ضریب نفوذ مؤثر میگو در مقابل تغییرات دما و محتوای رطوبت

Fig.7. Variations in the effective diffusion coefficient of shrimp versus changes in temperature and moisture content

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر سینتیک خشک‌کردن ورقه‌های گوشت میگو، تغییرات چروکیدگی و رابطه ضریب انتشار مؤثر ورقه‌های گوشت میگو مورد مطالعه قرار گرفت. مطابق نتایج، در بین مدل‌های چروکیدگی ارزیابی‌شده مدل خطی با بالاترین ضریب تبیین (R^2) و کمترین ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، مربع کای (χ^2) و مجموع مربعات خطا (SSE)، بهترین مدل برای تفسیر چروکیدگی در دماهای مورد آزمایش بود. همچنین مدل تجربی توزیع ویبال در محدوده دمایی ارزیابی‌شده با داشتن بهترین شاخص‌های آماری مناسب‌ترین مدل برای بیان تغییرات نسبت رطوبت ورقه‌های گوشت میگو در مقابل زمان است. طبق نتایج حاصل‌شده در این پژوهش مدل آرنیوس پیشنهادی برای پیش‌بینی ضریب انتشار مؤثر ورقه میگو به‌خوبی می‌تواند تغییرات ضریب انتشار ورقه گوشت میگو را نسبت به دما و

محتوای رطوبت در محدوده دمایی مورد ارزیابی پیش‌بینی کند. افزون بر آن، مشخص شد بسط قانون دوم فیک بیش از ۱۰۰ جمله اثر قابل‌توجهی بر خروجی مدل ندارد و بسط ۱۰۰ جمله برای این قانون پیشنهاد می‌شود.

سپاسگزاری

هزینه‌های این پژوهش از گرنت پژوهشی به شماره ۱۹۷۱ توسط معاونت پژوهشی دانشگاه شیراز تامین شده است که به این وسیله قدردانی می‌شود.

مشارکت نویسندگان

محسن المعی: جمع‌آوری داده‌ها، پردازش داده‌ها، تصویرسازی نتایج، استخراج و تهیه متن اولیه

سید مهدی نصیری: نظارت و مدیریت، مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، مشاوره فنی، ویرایش متن

محمد امین نعمت‌اللهی: مشاوره فنی، شبیه‌سازی عددی/کامپیوتری، اعتبارسنجی، ویرایش متن

داریوش زارع: مشاوره فنی، ویرایش متن

محمد خرم: مشاوره فنی، ویرایش متن

References

1. Achanta, S., Okos, M. R., Cushman, J. H., & Kessler, D. P. (1997). Moisture transport in shrinking gels during saturated drying. *Association of International Chemical Engineers Journal*, *43*(8), 2112-2122. https://doi.org/10.1002/aic.690430818
2. Akonor, P. T., Ofori, H., Dziedzoave, N. T., & Kortei, N. K. (2016). Drying characteristics and physical and nutritional properties of shrimp meat as affected by different traditional drying techniques. *International Journal of Food Science*, 2016. 7879097. https://doi.org/10.1155/2016/7879097
3. Al-Hilphy, A., Al-Mtury, A., Al-Iessa, S., Gavahian, M., Al-Shatty, S., Jassim, M., & Mohusen, Z. (2022). The pilot-scale rotary infrared dryer of shrimp (*Metapenaeus affinis*): mathematical modeling and effect on the chemical, color components, and sensory attributes. *Journal of Food Process Engineering*, *45*(6). https://doi.org/10.1111/jfpe.13945
4. Amankwah, E. A., Dzisi, K. A., Staten, G., & Boxtel, A. J. B. (2018). Moisture Dependent Diffusion and Shrinkage in Yam during Drying. *International Journal of Food Engineering*. https://doi.org/10.1515/ijfe-2017-0394
5. Anabel, F., Celia, R., Germán, M., & Rosa, R. (2018). Determination of effective moisture diffusivity and thermodynamic properties variation of regional wastes under different atmospheres. *Case Studies in Thermal Engineering*, *12*(2018), 248-257. https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.04.015
6. Aniesrani Delfiya, D. S., Murali, S., Alfiya, P. V., & Samuel, M. P. (2020). Drying characteristics of shrimp (*Metapenaeus dobsoni*) in electrical dryer. *Pantnagar Journal of Research*, *18*(3), 281-285.
7. Anonymous. (2020). *Iran Fisheries Organization statistical yearbook, 2014-2020*. Iran Fisheries Organization Tehran. Iran. (in Persian).
8. Azimi, M. J. (2016). *Cabinet Drying, Freeze Drying and Sun Drying methods of shrimp and study of its Physicochemical and Microbial*. M.Sc. dissertation. University of Shiraz. Shiraz. (in Persian).
9. Azzouz, S., Guizani, A., Jomma, W., & Belghith, A. (2002). Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes. *Journal of Food Engineering*, *55*(4), 323-330. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00109-7
10. Bai, J., Wang, J., Xiao, H., Ju, H., Liu, Y., & Gao, Z. (2013). Weibull distribution for modeling drying of grapes and its application. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, *29*(16), 278-285.
11. Blikra, M. J., Skipnes, D., & Feyissa, A. H. (2019). Model for heat and mass transport during cooking of cod loin in a convection oven. *Food Control*, *102*, 29-37. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.03.001
12. Buzrul, S. (2022). Reassessment of Thin-Layer Drying Models for Foods: A Critical Short Communication. *Processes*, *10*(1), 118. https://doi.org/10.3390/pr10010118
13. Ceylan, İ. (2008). Determination of drying characteristics of timber by Using artificial neural networks and mathematical models. *Drying Technology*, *26*(12), 1469-1476. https://doi.org/10.1080/07373930802412132
14. Clemente, G., Bon, J., Sanjuan, N., & Mulet, A. (2009). Determination of Shrinkage Function for Pork Meat Drying. *Drying Technology*, *27*(1), 143-148. https://doi.org/10.1080/07373930802566051
15. Corzo, O., & Bracho, N. (2008). Application of Weibull distribution model to describe the vacuum pulse osmotic dehydration of sardine sheets. *Lwt- Food Science and Technology*, *41*(6), 1108-1115. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.06.018
16. Corzo, O., Bracho, N., Pereira, A. & Vásquez, A. (2008). Weibull distribution for modeling air drying of coroba slices. *Lwt- Food Science and Technology*, *41*(10), 2023-2028. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2008.01.002
17. Costa, M. V., Silva, A. K. N., Rodrigues, P. R., Silva, L. H. M., & Cruz Rodrigues, A. M. (2018). Prediction of

moisture transfer parameters for convective drying of shrimp at different pretreatments. *Food Science and Technology*, *38*(4), 612-618. https://doi.org/10.1590/fst.31517
18. Dai, J. W., Wang, J., Ren, L., Liu, Y. W., & Zhang, L. H. (2018). *Mathematical model of potato slices under process-based temperature and humidity integration control of tilted tray air impingement drying*. In: Proceedings of 7th International Conference on Energy and Environmental Protection (ICEEP 2018). 14-15 July. Shenzhen, China. pp. 50-56. https://doi.org/10.2991/iceep-18.2018.9
19. Doymaz, İ. (2008). Convective drying kinetics of strawberry. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, *47*(5), 914-919. https://doi.org/10.1016/j.cep.2007.02.003
20. Erşan, A. C., & Tugrul, N. (2020). The drying kinetics and characteristics of Shrimp dried by conventional methods. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, *27*(4), 319-328. https://doi.org/10.2298/ciceq201114050e
21. Falade, K. O., & Solademi, O. J. (2010). Modelling of air drying of fresh and blanched sweet potato slices. *International Journal of Food Science & Technology*, *45*(2), 278-288. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2009.02133.x
22. Farhang, A., Hosainpour, A., Darvishi, H., & Nargesi, F. (2011). Shrimp drying characterizes undergoing microwave treatment. *Journal of Agricultural Science*, *3*(2), 157-164. https://doi.org/10.5539/jas.v3n2p157
23. Gaikwad, P. S., Sunil, C. K., Negi, A., & Pare, A. (2022). Effect of microwave assisted hot-air drying temperatures on drying kinetics of dried black gram papad (Indian snack food) Drying characteristics of black gram papad. *Applied Food Research*, *2*(2022). https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100144
24. Gely, M. C., & Santalla, E. M. (2007). Moisture diffusivity in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) seeds: Effect of air temperature and initial moisture content of seeds. *Journal of Food Engineering*, *78*(3), 1029-1033. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.12.015
25. Giovanelli, G., Zanoni, V., Lavelli, V., & Nani, R. (2002). Water sorption, drying and antioxidant properties of tomato products. *Journal of Food Engineering*, *52*(2), 135-141. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00095-4
26. Guiné, R. d. P. F. (2006). Influence of drying method on density and porosity of pears. *Food and Bioproducts Processing*, *84*(3), 179-185. https://doi.org/10.1205/fbp.05106
27. Hashemi, G., Mowla, D., & Kazemeini, M. (2009). Moisture diffusivity and shrinkage of broad beans during bulk drying in an inert medium fluidized bed dryer assisted by dielectric heating. *Journal of Food Engineering*, *92*(3), 331-338. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.12.004
28. Hatamipour, M. S., & Mowla, D. (2002). Shrinkage of carrots during drying in an inert medium fluidized bed. *Journal of Food Engineering*, *55*(3), 247-252. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00082-1
29. Kaminski, E., Szarycz, M., & Janowicz, L. (1996) *The kinetics of drying sliced apples in the conditions of natural convection*. In: Proceedings of 7th Seminar on Properties of water in foods. Warsaw Agricultural University. Warsaw. Poland. pp. 24-34.
30. Kassama, L. S., & Ngadi, M. O. (2004). Pore development in chicken meat during deep-fat frying. *LWT Food Science and Technology*, *37*(8), 841-847. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2004.03.010
31. Kassama, L. S., & Ngadi, M. O. (2016). Shrinkage and density change of de-boned chicken breast during deep-fat frying. *Food and Nutrition Sciences*, *2016*(7), 895-905. https://doi.org/10.4236/fns.2016.710089
32. Komolafe, C. A., Oluwaleye, I. O., Adejumo, A. O. D., Waheed, M. A., & Kuye, S. I. (2018). Determination of moisture diffusivity and activation energy in the convective drying of fish. *International Journal of Heat and Technology*, *36*(4), 1262-1267. https://doi.org/10.18280/ijht.360414
33. Ling, J., Teng, Z., & Lin, H. (2018). Improved method for prediction of milled rice moisture content based on Weibull distribution. *International Journal of Agricultural & Biological Engineering*, *11*(3), 159-165. https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181103.3429
34. Manjeet, S. C. (1984). Evaluation of selected mathematical models for describing Thin-Layer drying of In-Shell Pecans. *Transactions of the ASAE*, *27*(2), 610-615. https://doi.org/10.13031/2013.32837
35. Mayor, L., & Sereno, A. M. (2004). Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering*, *61*(3), 373-386. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00144-4
36. Mohebi, M., Akbarzadeh, M. R., Shahidi, F., & Porshahabi, M. R. (2007). *Investigation of the possibility of using the visual machine and artificial neural network in predicting the moisture content of dried shrimp*. In proceeding of 4th Iranian Machine Vision and Image Processing Conference. 14-15 Feb. Ferdowsi university of Mashhad. Mashhad. Iran. (in Persian).
37. Moreira, R., Figueiredo, A., & Sereno, A. (2000). Shrinkage of apple disks during drying by warm air convection and freeze drying. *Drying Technology*, *18*(1-2), 279-294. https://doi.org/10.1080/07373930008917704
38. Mulet, A., Garcia Reverter, J., Bon, J., & Berna, A. (2000). Effect of shape on potato and cauliflower shrinkage during drying. *Drying Technology*, *18*(6), 1201-1219. https://doi.org/10.1080/07373930008917772
39. Murali, S., Aniesrani Delfiya, D. S., Sathish Kumar, K., Kumar, L. R. G., Ezhil Nilavan, S., Amulya, P. R., Krishnan, V. S., Alfiya P. V., & Samuel M. P. (2021) Mathematical modeling of drying kinetics and quality characteristics of shrimps dried under a Solar–LPG hybrid dryer. *Journal of Aquatic Food Product Technology*,

30(5), 561-578. https://doi.org/10.1080/10498850.2021.1901814
40. Nguyen, M. P., Ngo, T. T., & Le, T. D. (2019). Experimental and numerical investigation of transport phenomena and kinetics for convective shrimp drying. *Case Studies in Thermal Engineering*, *14*(2019), 100465. https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100465
41. Niamnuy, C., Devahastin, S., Soponronnarit, S., & Raghavan, V. G. S. (2008). Modeling coupled transport phenomena and mechanical deformation of shrimp during drying in a jet spouted bed dryer. *Chemical Engineering Science*, *63*(22), 5503-5512. https://doi.org/10.1016/j.ces.2008.07.031
42. Ochoa, M. R., Kesseler, A. G., Pirone, B. N., Marquez, C. A., & DeMichelis, A. (2002). Volume and area shrinkage of whole sour cherry fruits (Prunus Cerasus) during dehydration. *Drying Technology*, *20*(1), 147-156. https://doi.org/10.1081/DRT-120001371
43. Pabis, S., Jayas, D., & Cenkowski, S. (1998). *Grain drying: Theory and practice*. New York, United States: John Wiley and Sons.
44. Park, K. J. (1998). Diffusional model with and without shrinkage during salted fish muscle drying. *Drying Technology*, *16*(3-5), 889-905. https://doi.org/10.1080/07373939808917443
45. Porciuncula, B. D. A., Zotarelli, M. F., Carciofi, B. A. M., & Laurindo, J. B. (2013). Determining the effective diffusion coefficient of water in banana (Prata variety) during osmotic dehydration and its use in predictive models. *Journal of Food Engineering*, *119*(3), 490-496. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.06.011
46. Queiroz, M. R., & Nebra, S. A. (2001). Theoretical and experimental analysis of the drying kinetics of bananas. *Journal of Food Engineering*, *47*(2), 127-132. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00108-4
47. Radhakrishnan, S. (1997). *Measurement of thermal properties of seafood*. M.Sc. dissertation. Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia.
48. Reyes, A., Alvarez, P. I., & Marquardt, F. H. (2002). Drying of carrots in a fluidized bed. I. Effects of drying conditions and modelling. *Drying Technology*, *20*(7), 1463-1483. https://doi.org/10.1081/DRT-120005862
49. Ruiz-López, I. I., & García-Alvarado, M. A. (2007). Analytical solution for food-drying kinetics considering shrinkage and variable diffusivity. *Journal of Food Engineering*, *79*(1), 208-216. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.01.051
50. Shafiur Rahman, M., & Driscoll, R. H. (1994). Density of fresh and frozen seafood. *Journal of Food Process Engineering*, *17*(2), 121-140. https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.1994.tb00331.x
51. Sharaf-Elden, Y. I., Blaisdell, J. L., & Hamdy, M. Y. (1984). A model for ear corn drying. *Transactions of the ASAE*, *23*(5), 1261-1265. https://doi.org/10.13031/2013.34757
52. Suvarnakuta, P., Devahastin, S., & Mujumdar, A. S. (2007). A mathematical model for low-pressure superheated steam drying of a biomaterial. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, *46*(7), 675-683. https://doi.org/10.1016/j.cep.2006.09.002
53. Tirawanichakul, S., Na Phatthalung, W., & Tirawanichakul, Y. (2011). Drying Strategy of Shrimp using Hot Air Convection and Hybrid Infrared Radiation/Hot Air Convection. *Walailak Journal of Science and Technology (WJST)*, *5*(1), 77-100.
54. Toğrul, İ. T., & Pehlivan, D. (2002). Mathematical modelling 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
55. Trujillo, F. J., Wiangkaew, C., & Tuan Pham, Q. (2007). Drying modeling and water diffusivity in beef meat. *Journal of Food Engineering*, *78*, 74-85. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.09.010
56. Vazquez, G., Chenlo, F., Moreira, R., & Costoyas, A. (1999). The dehydration of garlic. 1. Desorption isotherms and modelling of drying kinetics. *Drying Technology*, *17*(6), 1095-1108. https://doi.org/10.1080/07373939908917596
57. Wang, J., Tang, J., Rasco, B., Sablani, S. S., Ovissipour, M., & Qu, Z. (2018). Kinetics of Quality Changes of Shrimp (Litopenaeus setiferus) During Pasteurization. *Food and Bioprocess Technolgy*, *11*, 1027-1038 https://doi.org/10.1007/s11947-018-2073
58. Wisaiprom, N., Kasayapanand, N., Pratinthong, N., Songprakorp, R., Thepa, S., & Deeto, S. (2018). The study of shrimp drying by greenhouse drying combined with low humidity air. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, *7*(4), 303-313. https://doi.org/10.12720/sgce.7.4.303-313
59. Yi, X. K., Wu, W. F., Zhang, Y. Q., Li, J. X., & Luo, H. P. (2012). Thin-Layer drying characteristics and modeling of Chinese Jujubes. *Mathematical Problems in Engineering*, *2012*, 386214. https://doi.org/10.1155/2012/386214
60. Zielinska, M., & Markowski, M. (2007). Drying behavior of carrots dried in a spout–fluidized bed dryer. *Drying Technology*, *25*(1), 261-270. https://doi.org/10.1080/07373930601161138

Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 14, No. 3, 2024, p. 271-282

Comparing and Examining the Tannin Content of Potato Peel with Four Different Solvents

F. Mortazavi[1], R. Khodabakhshian[2*], M. Moeenfard[3]

1- MSc Student, Biosystems Engineering Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
2- Assistant Professor, Biosystems Engineering Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
3- Assistant Professor, Food Industry Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
(*- Corresponding Author Email: khodabakhshian@um.ac.ir)

Received: 10 April 2023
Revised: 24 June 2023
Accepted: 09 July 2023
Available Online: 01 September 2024

How to cite this article:
Mortazavi, F., Khodabakhshian, R., & Moeenfard, M. (2024). Comparing and Examining the Tannin Content of Potato Peel with Four Different Solvents. *Journal of Agricultural Machinery*, *14*(3), 271-282. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.2023.80710.1147

Introduction

Tannins are a type of phenolic compound usually found in plants, with high molecular weights typically ranging from 500 to more than 3000 Da and even up to 20000 Da. The chemical structure of tannins is very diverse and varied. Tannin exists in plant cells in two forms: hydrolyzable and condensed. The tannin content in plants can vary from 0.2% to 25% of the dry weight of the plant. This can vary depending on the plant species, harvest time, plant habitat, and extraction method. Currently, tannin is used in various fields such as leather making, medicine, food, beverages, ink and glue making, paint and tanning industries, plastic resins, water treatment, and surface coatings. The application of tannins depends on the tannin concentration. Extraction of tannin from agricultural products is done by different methods. Maceration, decoction, pressurized water extraction, Soxhlet extraction, supercritical fluid extraction, ultrasound, and microwave are among these methods. Ultrasound extraction is an effective method for extracting chemical compounds, which is performed in a shorter period of time compared to other methods, and can be used for heat-sensitive compounds such as tannins.

Materials and Methods

Potato peels were randomly selected, dried, and ground. Extraction was performed with an ultrasonic device, and after centrifugation, the total amount of phenolic compounds was measured using the Folin-Ciocalteu method. Afterward, utilizing the method used by Makkar et al. (2001), the amount of total tannins was calculated, and the condensed tannin content was calculated using the method introduced by Porter et al. (1986).

Results and Discussion

The average amount of total tannin extracted by using water as solvent was 142.8 ± 50.9 mg per 100 grams of dry powder in a period of 15 minutes, which was the highest amount of extraction. After water, methanol was the second solvent, yielding an extracted amount of 0.63 ± 55.9 mg per 100 grams of dry powder in 15 minutes. The lowest amount of extraction was related to the ethanol solvent in which was measured over a period of 10 minutes.

Due to its higher polarity, water is the best-performing solvent for extraction. Comparing the results of this experiment with previous research, water is suitable for extracting tannins from potato peels. Additionally, water is a non-toxic and environmentally friendly solvent, and making it an ideal choice for extraction. Increasing the

©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).

https://doi.org/10.22067/jam.2023.80710.1147

extraction time from 10 to 15 minutes, significantly affects the total amount of extracted tannin, more tannin being extracted during the longer the extraction period.

The effect of extraction time on the amount of condensed tannin is not significant, and no variable in this study had a significant effect on the amount of extracted condensed tannin. It is expected that the increase in the total amount of tannin with the increase in extraction time is related to the increase in the amount of hydrolyzable tannin extracted from the sample.

Conclusion

In this research, the amount of tannin extracted from potato peel was measured. The ultrasound method was used to prepare potato peel, which is a less expensive and faster alternative to other methods. The effect of different solvents were investigated over various extraction times. The results showed that the total amount of extracted tannin increases with the ultrasound extraction time, specifically from 10 to 15 minutes. However, with the increased extraction time, the amount of condensed tannin does not significantly increase. Among the studied solvents, water accounted for the highest amount of extracted tannin. After water, methanol was the second-best solvent, followed by acetone and ethanol. Water is an effective and environmentally friendly solvent for tannin extraction. Potato peels are rich in tannin and contain significantly less condensed tannin than hydrolyzable tannin.

Keywords: Extraction, Phenolic compounds, Potato peel, Tannin, Ultrasound

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۱٤، شماره ۳، پاییز ۱٤۰۳، ص ۲۸۲-۲۷۱

مقایسه و بررسی میزان تانن پوست سیب‌زمینی با چهار حلال مختلف

فاطمه مرتضوی[۱]، رسول خدابخشیان[۲*]، مرضیه معین فرد[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۲۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۱۸

چکیده

گروهی از ترکیب‌های فنلی به نام تانن‌ها به لحاظ فعالیت بیولوژیکی و واکنش‌پذیری شیمیایی، قابل‌تشخیص هستند که در صنایع چرم‌سازی، چسب‌سازی، رنگ‌سازی، داروسازی و سایر صنایع کاربرد دارند. روش‌های استخراج این ترکیب‌ها بسیار متنوع هستند. استخراج به روش فراصوت روشی مؤثر برای استخراج ترکیب‌های شیمیایی است که در مقایسه با سایر روش‌ها در مدت‌زمان کوتاه‌تری انجام می‌گیرد و قابلیت استفاده برای ترکیب‌های حساس به حرارت را دارد. در این پژوهش استخراج ترکیب‌های فنلی، تانن و تانن متراکم به روش فراصوت از پوست سیب‌زمینی بررسی شد و اثر مدت‌زمان استخراج و نوع حلال روی میزان استخراج این ترکیب‌ها مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور پوست سیب‌زمینی پس از شستشو، خشک و آسیاب گردید سپس با چهار حلال متانول، اتانول، استون و آب و در دو زمان ۱۰ و ۱۵ دقیقه عصاره‌گیری انجام شد. با افزایش زمان استخراج میزان ترکیب‌های فنلی و تانن کل استخراج‌شده افزایش می‌یابد؛ اما میزان تانن متراکم استخراج‌شده وابسته به زمان استخراج نمی‌باشد. کم‌ترین استخراج مربوط به حلال اتانول ((میلی‌گرم در هر صد گرم پوست)۶/۲۲±۱۳/۳) در مدت‌زمان ۱۰ دقیقه و بیش‌ترین استخراج را حلال آب ((میلی‌گرم در هر صد گرم پوست)۹/۵۰±۱۴۲/۸) در مدت‌زمان استخراج ۱۵ دقیقه به خود اختصاص داد. حلال آب به دلیل دارابودن قطبیت و راندمان بالا برای استخراج تانن از پوست سیب‌زمینی مناسب است. به‌علاوه حلال آب به دلیل سازگاری با محیط‌زیست حلال مناسبی برای استخراج تانن است. پوست سیب‌زمینی حاوی مقادیر قابل‌توجهی تانن و مقدار کمتری تانن متراکم نسبت به تانن قابل هیدرولیز می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تانن، تانن متراکم، ترکیب‌های فنلی، فراصوت

مقدمه

یکی از چالش‌های جدی بیش‌تر کشورها به‌ویژه کشورهای درحال‌توسعه، روند افزایشی ضایعات کشاورزی است. بخش کشاورزی در ایران با تولید سالانه ۱۰۰ میلیون تن محصول، نقش عمده‌ای در تأمین مواد اولیه صنایع و ۹۰ درصد نیاز غذایی و در نتیجه اقتصاد کشور را دارد. این در حالی است که ضایعات کشاورزی در ایران بنا بر اظهارات مسئولان ۳۰ تا ۳۵ درصد با ارزشی معادل پنج میلیارد دلار در سال تخمین زده شده است که در حدود شش برابر متوسط جهان و همچنین معادل ۲۵ درصد درآمد نفتی کشور است (Eazadi & Hayati, 2013) به‌عنوان‌مثال در صنعت غذا، دانه و پوست گیاهان و میوه‌ها به‌عنوان ضایعات در نظر گرفته می‌شود، درحالی‌که منبع غنی از ترکیب‌های فعال گیاهی هستند؛ بنابراین استفاده از ضایعات کشاورزی به کاهش آلودگی محیط‌زیست و اقتصاد کمک می‌نماید (Sultan Toyeh, Ismailzadeh Kanari, & Nahidi, 2013) همچنین مقدار زیاد زباله تولیدشده توسط کارخانه‌های صنایع غذایی مشکلات جدی زیست‌محیطی ایجاد می‌کند و در صورت عدم استفاده مؤثر از آن، زیان‌های اقتصادی نیز به همراه دارد. گزارش‌های تحقیقاتی مختلف نشان داده است که محصولات جانبی صنایع غذایی

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۲- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۳- استادیار گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: khodabakhshian@um.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jam.2023.80710.1147

می‌توانند منابع خوبی از ترکیبات فعال گیاهی باشند (Jahurul *et al.* 2015). علاوه بر این با این‌که استفاده از مواد تهیه‌شده از نفت در چندین دهه گذشته گسترش‌یافته است، اما در حال حاضر به دلیل مشکلاتی مانند، نوسان‌های قیمت نفت، مشکلات تخلیه ذخایر و آلودگی ناشی از این مواد موضوع موردتوجهی است. علاوه بر این، امروزه اهمیت مواد پایدار (به‌عنوان‌مثال اسید پلی‌لاکتیک، کیتوزان، لیگنین، تانن و غیره) به‌منظور کاهش مصرف روغن خام و کاهش تأثیرات زیست‌محیطی، در حال افزایش است (Luckeneder, Gavino, Kuchernig, Petutschnigg, & Tondi, 2016). در این بین ترکیب‌های فنلی، گروهی از ترکیب‌های شیمیایی گیاهی هستند که به‌واسطه ساختار شیمیایی ویژه خود قادر به مهار رادیکال‌های آزاد، غیرفعال‌کردن اکسیژن یگانه و تشکیل کمپلکس با یون‌های فلزی هستند (Beutner, Bloedorn, & Frixel, 2001). به‌طورکلی گیاهان دارای انواع وسیعی از متابولیت‌های ثانویه (ترکیب‌های فنلی، ترپن‌ها و آلکالوئیدها) هستند. این ترکیب‌ها می‌توانند گیاهان را در مقابل انواع بیماری‌ها محافظت نمایند. متابولیسم ترکیب‌های فنلی در گیاهان پیچیده است و باعث ایجاد دسته وسیعی از ترکیب‌ها شامل انواع پیگمان‌های موجود در گل‌ها- موسوم به آنتوسیانیدین‌ها- تا ترکیب‌های فنلی پیچیده موجود در دیواره سلولی گیاه می‌شوند. به‌هرحال، گروهی از ترکیب‌های فنلی معروف به تانن[1]ها به‌طور واضح از سایر فنل‌های ثانویه گیاهی، به لحاظ فعالیت‌های بیولوژیکی و واکنش‌پذیری شیمیایی، قابل‌تشخیص هستند. (Ebrahimi & Sedghi, 2013). تانن یکی از جالب‌ترین مواد قابل‌استخراج از گیاهان است. تانن‌ها ساختارهای فنلی طبیعی هستند که به‌وفور در پوست و همچنین چوب و مقدار کمتری در برگ و میوه انواع گیاهان یافت می‌شوند (Mueller-Harvey, 2001; Schofield, Mbugua, & Pell, 2011). تانن‌ها نوعی ترکیب فنلی با وزن مولکولی بالا هستند که معمولاً در گیاهانی که وزن مولکولی از ۵۰۰ تا بیش از ۳۰۰۰ (Da) و حتی تا ۲۰۰۰۰ (Da)دارند، وجود دارد. ساختار شیمیایی تانن بسیار متنوع و متفاوت است. تانن در سلول‌های گیاهی به دو صورت قابل هیدرولیز و متراکم وجود دارد. محتوای تانن بسته به گونه های گیاهی، زمان برداشت، زیستگاه گیاهان و روش استخراج می‌تواند از ۰/۲٪ تا ۲۵٪ وزن خشک گیاه متغیر باشد. در حال حاضر، تانن در زمینه‌های مختلفی از جمله چرم‌سازی، دارو، غذا، نوشیدنی، ساخت جوهر و چسب، صنایع رنگ و برنزه کردن، رزین‌های پلاستیکی، تصفیه آب و پوشش‌های سطحی استفاده شده است. کاربرد تانن به غلظت تانن بستگی دارد (Cuong *et al.*, 2020).

استخراج تانن از محصولات با روش‌های مختلفی انجام می‌شود. روش‌هایی مانند خیساندن، جوشاندن، فراصوت، سوکسله، استخراج آب تحت‌فشار و استخراج با ماکروویو از انواع این روش‌ها هستند. استخراج به کمک فراصوت روشی مؤثر برای استخراج ترکیبات شیمیایی از مواد گیاهی است که در مقایسه با سایر روش‌های استخراج در مدت‌زمان کوتاه‌تری انجام می‌گیرد و قابلیت استفاده برای استخراج ترکیب‌های حساس به حرارت مورداستفاده در مواد غذایی، محصولات سلامت بخش، مواد دارویی و مواد آرایشی را داراست (Moftakher, Samvati, & Zand Moghadam, 2013) یک دستگاه فراصوت با استفاده از امواج صوتی باانرژی بالا سبب ایجاد نیرویی جهت نفوذ حلال به موادی که قابلیت مرطوب شدن ندارند، می‌شود. در یک حمام فراصوت می‌توان چندین نمونه را به‌طور هم‌زمان به‌کار گرفت (Ebrahimi & Sedghi, 2013). در برخی نمونه‌ها ترکیبات فنولی می‌توانند به‌طور مؤثر و تکرارپذیر با استفاده از دستگاه فراصوت استخراج شوند (Torti, Dearing, & Kursar, 2015). در این روش، قدرت اولتراسونیک، دما و زمان عواملی هستند که به‌شدت بر بازده استخراج تانن تأثیر می‌گذارند (Cigdem & Hasan, 2012). نظر به این که سیب‌زمینی یکی از محصول‌های عمده کشاورزی در ایران است و باتوجه‌به میزان زیاد ضایعات پوست سیب‌زمینی و تعداد بالای کارخانه‌های فراوری سیب‌زمینی و این که پوست سیب‌زمینی یک منبع ترکیب‌های فنولی است، انتظار می‌رود میزان قابل‌توجهی تانن از پوست سیب‌زمینی قابلیت استخراج و استفاده را داشته باشد. این آزمایش در سه مرحله در آزمایشگاه گروه صنایع غذایی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شده است.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی نمونه

پوست سیب‌زمینی تازه از شرکت صنایع غذایی شهد پاک (تاپیس) واقع در کیلومتر ۲۰ جاده مشهد- قوچان تهیه شد و متانول ۹۸٪، اتانول ۹۶٪، استون ۹۹٪، معرف فولین سیوکالتئو، محلول کربنات سدیم ۷/۵٪، پلی‌وینیل پلی پیرولیدون، سولفات آمونیوم فریک ۲ درصد، اسیدکلریدریک ۳۷٪ و بوتانول ۹۹٪ تهیه‌شده از شرکت صنایع شیمیایی مجللی و مرک آلمان، مورداستفاده قرار گرفت. نمونه‌هایی از محصولات فرعی پوست سیب‌زمینی تازه به‌طور تصادفی برداشت شده، تمیز شده و پس از شستشو در سایه کامل خشک شدند. سپس آسیاب شده و از الک با مش ۴۰ عبور داده شد. پس از تعیین درصد رطوبت به‌منظور استخراج ترکیبات فنلی در شرایط آزمایشگاه از حلال‌ها استفاده شد. در این بررسی از حلال‌های متانول، اتانول استون و آب برای استخراج بهره‌گیری شد. به این صورت که ۱ گرم نمونه با ۱۰ میلی‌لیتر حلال مخلوط‌شده و با دستگاه فراصوت در

1- Tannin

مدت‌زمان‌های ۱۰ و ۱۵ دقیقه عصاره‌گیری شد. محلول حاصل پس از عصاره‌گیری با دستگاه حمام فراصوت در دمای ۲۵ درجه از کاغذ صافی عبور داده شد. سپس به مدت ۱۰ دقیقه با دور ۳۰۰۰ در دقیقه سانتریفیوژ گردید و در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد. بخش رویی محلول (سوپرتانانت) جدا شده و باقی‌مانده آن با ۱۰ میلی‌لیتر حلال مخلوط و دوباره سانتریفیوژ شد. در آزمایش‌ها اولیه نشان داده شد که میزان بازیافت کل ترکیبات فنولی در سوپرتانانت دوم کمتر از ۵ درصد سوپرتانانت اول می‌باشد؛ بنابراین مرحله دوم استخراج حذف شد.

شکل ۱- نمونه داخل حمام اولتراسوند

Fig.1. Sample inside the ultrasonic bath

اندازه‌گیری ترکیبات فنلی عصاره (عصاره فاقد پلی‌وینیل پلی پیرولیدون)

برای تعیین میزان ترکیبات فنلی ۱۲۵ میکرولیتر از محلول استخراج‌شده برداشته و با ۳۷۵ میکرولیتر معرف فولین سیوکالتئو ۱/۵ میلی‌لیتر کربنات سدیم ۷/۵ درصد (حجمی/وزنی) و ۵ میلی‌لیتر آب دیونیزه مخلوط کرده، ورتکس کرده و به مدت ۶۰ دقیقه در تاریکی و در دمای اتاق نگهداری شد، سپس جذب محلول در ۷۶۵ نانومتر توسط طیف‌سنج فرابنفش- مرئی (یونیکو- آمریکا) قرائت شد (Makkar, Bluemmel, Borowy, & Becker, 2001).

شکل ۲- محلول تعیین ترکیب‌های فنلی

Fig. 2. Solution for determining the phenolic compounds

اندازه‌گیری ترکیب‌های فنلی غیرتانن (عصاره حاوی پلی‌وینیل پلی پیرولیدون)

میزان کل تانن بر اساس روش مکار و همکاران (Makkar *et al.*, 2001) با معرف فولین انجام شد. در فالکون ۱۵ میلی‌لیتری ۱۰۰ میلی‌گرم پلی‌وینیل پلی پیرولیدون ریخته سپس یک میلی‌لیتر آب مقطر و یک میلی‌لیتر عصاره حاوی تانن (عصاره اولیه) به آن اضافه شده و ورتکس شد. فالکون‌ها به مدت ۱۵ دقیقه در دمای چهار درجه سلسیوس نگهداری شده و دوباره ورتکس شدند. سپس ۱۰ دقیقه با دور ۳۰۰۰ سانتریفیوژ گردیده تا تانن با پلی‌وینیل پلی پیرولیدون رسوب کند سپس محلول رویی که فاقد تانن است جدا شد. ۱۲۵ میکرولیتر از سوپرتانانت اول برداشته و در فالکون ۱۵ میلی‌لیتری ریخته شد. (۳ تکرار برای هر نمونه) سپس ۳۷۵ میکرولیتر معرف فولین سیوکالتئو (با نسبت یک به ۱۰ رقیق شده) و ۱/۵ میلی‌لیتر کربنات سدیم ۷/۵ درصد (وزنی/حجمی) اضافه شد و حجم محلول با کمک پنج میلی‌لیتر آب دیونیزه به هفت میلی‌لیتر رسانده شد (شکل ۳). ورتکس شده و به مدت ۶۰ دقیقه در تاریکی و در دمای محیط نگه‌داری شد تا میزان ترکیبات فنولی فاقد تانن محاسبه شود و از اختلاف آن با ترکیب حاوی تانن مقدار تانن خالص محاسبه شود.

شکل ۳- محلول تعیین تانن

Fig.3. Solution for determining the Tannin

تهیه محلول استاندارد جهت تعیین فنول کل

منحنی استاندارد با استفاده از اسیدگالیک تهیه شد. بدین منظور ۵۰۰ میکروگرم اسیدگالیک را در یک میلی‌لیتر آب مقطر حل کرد و محلول‌های استاندارد در محدوده غلظتی پنج تا ۵۰۰ میلی‌گرم در یک میلی‌لیتر آب با رقیق کردن محصول مادر تهیه شد. از محلول استاندارد به‌دست‌آمده مقادیر ۱۲۵ میکرولیتر برداشته و بعد از رساندن حجم آن به هفت میلی‌لیتر توسط پنج میلی‌لیتر آب مقطر، ۳۷۵ میکرولیتر فولین و ۱/۵ میلی‌لیتر کربنات سدیم ۷/۵ درصد (وزنی/حجمی) بعد از ورتکس کردن به مدت ۹۰ دقیقه در دمای اتاق و در تاریکی قرار گرفت. میزان جذب در طول‌موج ۷۶۵ نانومتر برای هر محلول استاندارد با استفاده از طیف‌سنج فرابنفش- مرئی اندازه‌گیری‌شده و منحنی جذب در غلظت رسم گردید و شیب منحنی محاسبه شد (رابطه ۱).

$$Y = 0.0021X - 0.0041 \quad (۱)$$

Y جذب نمونه منهای جذب شاهد

X غلظت معادل اسیدگالیک ($mg\ 100ml^{-1}$)

میزان جذب در طول‌موج ۷۶۵ نانومتر با کمک طیف‌سنج فرابنفش- مرئی (یونیکو، آمریکا) اندازه‌گیری و نتایج به‌صورت میلی‌گرم گالیک اسید در ۱۰۰ گرم پوست سیب‌زمینی گزارش شدند (Mussatto, Machado, Martins, & Teixeira, 2011).

اندازه‌گیری تانن متراکم قابل‌استخراج

برای اندازه‌گیری میزان تانن متراکم ۰/۵ میلی‌لیتر عصاره تانني با ۳ میلی‌لیتر معرف بوتانول- اسیدکلریدریک و ۰/۱ میلی‌لیتر معرف فریک مخلوط شده و سپس به مدت ۶۰ دقیقه داخل بن ماری با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرد. پس از خنک‌شدن جذب در ۵۵۰ نانومتر قرائت شد. میزان تانن متراکم بر اساس درصد ماده خشک و معادل لوکوآنتوسیانیدین به‌صورت (رابطه ۲) (Porter, Hrstich, & Chan, 1986) محاسبه شد:

(۲) تانن‌های متراکم به‌صورت معادل لوکوسیانیدین‌ها (پوست $mg\ 100g^{-1}$) = جذب در 550 نانومتر × $\frac{78}{26}$ × $\frac{\text{درصد ماده خشک}}{\text{ضریب رقت}}$

در این رابطه فاکتور رقت برای استون عدد یک می‌باشد.

روش‌های آماری

تجزیه‌وتحلیل نتایج حاصل از آزمایش‌ها در قالب آزمون فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی انجام شد که در آن فاکتور اول نوع حلال مورداستفاده برای استخراج (آب، متانول، اتانول و استون)، فاکتور دوم زمان استخراج (۱۰ و ۱۵ دقیقه) می‌باشد. مقایسه میانگین‌ها در سطح احتمال ۵ درصد و آزمون فیشر صورت گرفت. برای این منظور از نرم‌افزار مینی‌تب[1] استفاده شد. همه آزمون‌ها در سه تکرار انجام شد و برای رسم نمودارها نیز از نرم‌افزار اکسل[2] استفاده گردید.

1- Minitab 2021
2- Excel 2016

شکل ٤- نمونه در دستگاه بن ماری
Fig.4. Sample in water bath

نتایج و بحث

در این پژوهش استخراج تانن از پوست سیب‌زمینی با ۴ حلال متانول، اتانول، استون و آب مورد بررسی قرار گرفت. کلیه نمونه‌ها با روش اولتراسوند عصاره‌گیری شد. میزان کل تانن بر اساس روش مکار و همکاران (Makkar *et al.*, 2001) با معرف فولین سیوکالتئو انجام شد. میزان تانن متراکم کل (پروآنتوسیانیدین) توسط روش پورتر و همکاران (Porter *et al.*, 1986) محاسبه گردید. آزمایش‌های سنجش ترکیبات فنلی، تانن و آنتوسیانین، وجود مقادیر نسبتا بالای این ترکیبات را در عصاره‌های مختلف تایید نمود.

نتایج استخراج و اندازه‌گیری ترکیب‌های فنلی

میزان ترکیب‌های فنلی قابل‌استخراج از پودر پوست سیب‌زمینی به تفکیک نوع حلال و زمان استخراج در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- نتایج استخراج ترکیبات فنلی پوست سیب‌زمینی (میلی‌گرم بر ۱۰۰ گرم پوست خشک)
Table 1- Results of the phenolic compounds of potato peel (mg/100 g of dry powder)

میانگین±انحراف معیار Mean ± SD	ضریب تغییرات CV%	زمان Time (min)	حلال Solvent
15.30±78.2	20%	10	متانول
14.93±146	10%	15	Methanol
8.82±45.5	19%	10	اتانول
4.75±114.7	4%	15	Ethanol
4.75±48	10%	10	استون
5.54±65.5	8%	15	Acetone
5.48±156	4%	10	آب
4.75±219.5	2%	15	Water

باتوجه‌به جدول ۱ که مربوط به میزان فنل استخراجی از پوست سیب‌زمینی با حلال‌های مختلف می‌باشد، مشاهده می‌شود که حلال آب با اختلاف زیادی بالاتر از سایر حلال‌ها قرار گرفته است.

میانگین میزان ترکیب‌های فنلی استخراج‌شده با حلال آب در زمان ۱۵ دقیقه ۵/۷۵±۲۱۹/۴ (میلی‌گرم بر ۱۰۰ گرم پودر) می‌باشد. پس از آن حلال متانول در زمان ۱۵ دقیقه با مقدار عددی ۹۳/۱۴ ±۱۴۶ (میلی‌گرم بر ۱۰۰ گرم پودر) در جایگاه دوم قرار دارد. کم‌ترین میزان ترکیب‌های فنلی استخراج‌شده مربوط به حلال اتانول در زمان ۱۰ دقیقه به مقدار ۸/۸۲ ±۴۵/۵ (میلی‌گرم بر ۱۰۰ گرم پودر) می‌باشد.

میانگین میزان ترکیب‌های فنلی پوست سیب‌زمینی ۱۵/۸-۳۲/۲٪ وابسته به نوع واریته سیب‌زمینی می‌باشد. ترکیب‌های فنلی پوست سیب‌زمینی قرمز ۵۸/۶ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم پوست و در سیب‌زمینی قهوه‌ای میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم (اسیدگالیک) می‌باشد (Onyeneho, & Hattiarachchy 1993). بخش بزرگی از ترکیب‌های فنلی موجود در پوست سیب‌زمینی بسیار محلول در آب هستند. مقدار ترکیب‌های فنلی موجود در پوست سیب‌زمینی ۱۱ میلی‌گرم در یک گرم پوست گزارش شده است (Wu *et al.*, 2012).

ازکیل و همکاران (Ezekiel *et al.*, 2013) میزان فنل کل در سیب‌زمینی را ۲۳۷/۷ gg^{-6} –۵۲۷/۲ گزارش کردند. حلال برای حل‌کردن ماده در خود نیاز به غلبه بر جاذبه بین‌مولکولی در ماده موردنظر دارد. با افزایش قطبیت حلال بازده عصاره‌گیری افزایش پیدا می‌کند. آب بالاترین قطبیت را بین حلال‌های مورد آزمایش دارا می‌باشد. این امر در بالابودن راندمان عصاره‌گیری با آب مؤثر است؛ زیرا بخش زیادی از ترکیبات پوست سیب‌زمینی از مواد قطبی تشکیل شده‌اند. علت تفاوت در میزان ترکیبات استخراج‌شده از پوست سیب‌زمینی در تحقیقات مختلف به گونه سیب‌زمینی، درجه خلوص حلال‌های مورداستفاده و شرایط استخراج نسبت داده می‌شود (Mohagheghi, Pourazhang, Akhlaghi, Elhami-Rad, & Hematyar, 2017). ترکیبات فنلی پوست انار را با چهار حلال اتانول، متانول، استون و آب استخراج کردند و محتوای فنل کل را ۶۶/۵±۳۵/۱۹ mg $100g^{-1}$ گزارش کردند (Wang *et al.*, 2013).

استخراج پلی‌فنل‌ها از پوست انار یا سایر مواد زائد صنایع غذایی توسط متانول یا سایر حلال‌های آلی انجام می‌شود. این امر نیازمند حلال‌های آلی پرخطر بر سلامت انسان و محیط‌زیست می‌باشد. استفاده از حلال آب با کاهش خطر آلودگی می‌تواند روشی مؤثر در استخراج ترکیبات پلی‌فنلی باشد (Cama & Hısıl, 2010).

نتایج استخراج و اندازه‌گیری تانن کل

میزان تانن استخراج‌شده حاصل از روش فراصوت با ۴ حلال و ۲ زمان در شکل ۵ آورده شده است.

شکل ۵- میزان تانن استخراج‌شده از پودر پوست سیب‌زمینی (میلی‌گرم بر ۱۰۰ گرم پودر خشک): a متانول، b اتانول

Fig.5. Amount of tannin extracted from potato peel powder (mg/100 grams of dry powder)

باتوجه‌به شکل ۵ که مربوط به میزان تانن استخراجی با استفاده از حلال‌های مختلف می‌باشد، مشاهده می‌شود که حلال آب با زمان استخراج ۱۵ دقیقه با مقدار عددی ۹/۵۰±۱۴۲/۸(میلی‌گرم بر ۱۰۰ گرم پودر خشک) بالاترین میزان تانن استخراجی را به خود اختصاص داده است. به‌طورکلی مقدار تانن قابل‌استخراج با حلال آب در مدت‌زمان ۱۰ و ۱۵ دقیقه بیشتر از سایر حلال‌ها بود. بعد از آب متانول در مدت‌زمان استخراج ۱۵ دقیقه با مقدار ۹/۵۵±۶۳/۰ (میلی‌گرم بر ۱۰۰ گرم پودر خشک) در رتبه بعدی قرار می‌گیرد. کمترین میزان استخراج تانن مربوط به حلال اتانول در مدت‌زمان ۱۰ دقیقه می‌باشد.

عوامل مختلفی ازجمله تفاوت در واریته سیب‌زمینی مورداستفاده، نسبت اجزای تشکیل‌دهنده پوست سیب‌زمینی، روش آماده‌سازی و اندازه‌گیری نمونه و شرایط کشت در اختلاف نتایج تحقیقات مختلف در مورد مقدار تانن محصولات تأثیر دارد.

سوکور و همکاران (Sukor *et al.*, 2021) میزان اسیدتانیک موجود در پوست پیاز را با روش اولتراسوند ۹۹/۳۶ میکروگرم در هر گرم پوست بیان کردند.

استفاده از امواج فراصوت بر خلاف روش‌های دیگر استخراج مانند ماکروویو و آب فوق‌بحرانی سریع‌تر انجام می‌شود و تخریب کم‌تری به همراه دارد. کم‌هزینه‌تر است و ابزار ساده‌تری برای استخراج نیاز دارد (Laborde, Bouyer, Caltagirone, & Gérard, 1998; Herrera, & Luque de Castro, 2004).

نتایج تجزیه واریانس میزان استخراج تانن کل

نتایج تجزیه واریانس جهت تأثیر نوع حلال و زمان بر روی میزان تانن قابل‌استخراج از پوست سیب‌زمینی در جدول ۲ گزارش شده است.

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، اثر مستقل نوع حلال (P<۰/۰۱) در سطح ۱٪ و ۵٪ معنادار شده است. یعنی بین حلال‌های مختلف در استخراج تانن از پوست سیب‌زمینی اختلاف وجود دارد. همچنین اثر مستقل زمان استخراج روی میزان تانن معنادار می‌باشد، به عبارتی در زمان‌های استخراج متفاوت مقدار استخراج تانن از پوست سیب‌زمینی متغیر است. اثر متقابل نوع حلال و زمان نیز معنادار شده است. یعنی میزان استخراج تانن از پوست سیب‌زمینی به زمان استخراج نیز وابسته است. با افزایش زمان استخراج، میزان استخراج تانن کل افزایش می‌یابد. در نتیجه بهترین زمان برای استخراج تانن ۱۵ دقیقه می‌باشد، زمان‌های بالاتر به دلیل ثابت‌بودن میزان تانن استخراج شده توصیه نمی‌شود.

کلیکریسان و ازوگونای (Kilicarislan & Ozgunay, 2012) با استخراج تانن از بلوط به روش اولتراسوند و مقایسه اثر دما بر

استخراج تانن باتوجه‌به آزمون تجزیه واریانس و مقایسات دانکن بیان کردند که استخراج با فراصوت می‌تواند روش مؤثری برای ارزیابی تانن باشد. همچنین افزایش زمان استخراج تأثیر معناداری بر بازده استخراج داشته و باعث افزایش آن می‌شود.

استفاده از روش فراصوت باعث افزایش بازده استخراج و مقدار تانن در نمونه بلوط شد و کاهش زمان استخراج با این روش امکان‌پذیر است (Schieber & Saldana, 2009).

باتوجه‌به نتایج آزمایش و تحقیقات سایر محققان فراصوت روشی مناسب برای استخراج تانن از پوست سیب‌زمینی می‌باشد.

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس برای میزان تانن کل

Table 2- Results of analysis of variance for total tannin content

عامل تغییرات Source	درجه آزادی Degrees of Freedom	مجموع مربعات Sum of Squares	میانگین مجموع مربعات Mean of Squares	F-Value	P-Value	F 5%	F 1%
تیمار Treatment	7	48379.54	6911.36	186.59**	0.00**	2.66	4.03
حلال Solvent	3	43042.6	14347.5	387.35**	0.00**	3.24	5.29
زمان Time	1	3700.6	3700.6	9.99**	0.00**	4.49	8.53
اثرات متقابل Interaction effect	3	1636.34	545.45	14.72**	0.00**	3.24	5.29
اشتباه Error	16	592.58	37.04				
کل Total	23	48972.12					

**: معنی‌دار در سطح ۱ درصد

** Significant at 1% level

نتایج مقایسه میانگین‌ها در استخراج تانن کل

مقایسه میانگین میان حلال‌های مورد بررسی توسط آزمون دانکن انجام شد. نتایج در جدول ۳ گزارش شد.

در مقایسه میانگین بین حلال‌های مورد بررسی بین حلال آب با متانول، اتانول و استون اختلاف معنادار مشاهده گردید؛ اما بین استون و اتانول اختلاف معناداری وجود ندارد. همچنین بین حلال‌های متانول و اتانول نیز اختلاف معناداری وجود ندارد. نوع حلال در میزان استخراج تانن تأثیرگذار است، این ارتباط به پیوند داخلی ترکیبات فنلی موجود در محصول و سازگاری با ترکیب شیمیایی حلال مورداستفاده مرتبط است.

جدول ۳- نتایج مقایسه میانگین تانن کل

Table 3- Comparison of the results of the total average tannin

زمان Time / حلال Solvent	10 min دقیقه	15 min دقیقه
متانول Methanol	37.96 a	62.96 c
اتانول Ethanol	13.3 a	57.13 c
آب Water	111.6 b	142.83 d
استون Acetone	18.83 a	14.26 a

Different letters indicate significant difference between solvents ($p<0.05$)

در مقایسه میانگین بین زمان‌های ۱۰ و ۱۵ دقیقه، برای حلال‌های آب، متانول و اتانول اختلاف معنادار مشاهده شد. در

زمان‌های کوتاه استخراج ترکیبات از محلول به‌طور کامل انجام نمی‌شود. نتایج آزمایش نشان داد زمان ۱۵ دقیقه زمان مناسب‌تری برای استخراج کامل تانن از عصاره می‌باشد.

متانول برای استخراج پلی‌فنل‌هایی با وزن مولکولی پایین و استون آبی برای استخراج پلی‌فنل‌ها با وزن بالا بیشترین کاربرد را دارند (Labarbe, Cheynier, Brossaud, Souquet, & Moutounet, 1999). آب بالاترین بازده در استخراج تانن از پوست بلوط را دارد و بهترین حلال در استخراج تانن از پوست بلوط می‌باشد، زیرا آب قطبیت بیشتری نسبت به دیگر حلال‌ها دارد. بیشتر ترکیباتی که قابلیت استخراج دارند؛ مانند لیگنین‌های قابل‌حل، املاح معدنی، کربوهیدرات‌ها و سلولزهای موجود در پوست، به‌خوبی در آب حل می‌شوند؛ اما در حلال‌های دیگر گزینشی حل می‌شوند به عبارتی در جریان استخراج پیوندهای گلیکوزیدی آبکافت نمی‌شوند (Jahanshahi, Tabarsa, Asghari, & Rasalti, 2019). همچنین نتایج تحقیق روی پوست اکالیپتوس نشان داده است بیشترین میزان استخراج عصاره به‌وسیله حلال آب انجام شده است (Yazaki, Collins, & Iwashina, 1993).

از مقایسه نتایج این آزمایش با تحقیقات پیشین نتیجه‌گیری می‌شود که حلال آب برای استخراج تانن از پوست سیب‌زمینی مناسب است. به‌علاوه حلال آب به دلیل سازگاری با محیط‌زیست حلال مناسبی برای استخراج می‌باشد.

نتایج استخراج و اندازه‌گیری تانن متراکم

میزان تانن متراکم قابل‌استخراج از پوست سیب‌زمینی با استفاده از حلال استون به روش فراصوت اندازه‌گیری شد. روش مذکور با حلال استون قابلیت اندازه‌گیری میزان تانن متراکم را دارد. نتایج در جدول ۴ گزارش شد.

ازکیل و همکاران (Ezekiel *et al.*, 2013) میزان تانن متراکم موجود در واریته‌های مختلف سیب‌زمینی را ۲۲–۳۶۸ میلی‌گرم در هر ۱۰ گرم پودر خشک سیب‌زمینی عنوان کردند و بیان کردند سیب‌زمینی می‌تواند به‌عنوان منبع آنتوسیانین طبیعی مورداستفاده قرار بگیرد؛ زیرا هزینه تولید سیب‌زمینی در مقایسه با سایر محصولات باغی نسبتاً پایین است. غلظت آنتوسیانین در انواع واریته‌های سیب‌زمینی متفاوت است.

جدول ٤– میزان تانن متراکم استخراج‌شده از پودر پوست سیب‌زمینی (میلی‌گرم بر ۱۰۰ گرم پودر)

Table 4- The amount of condensed tannin extracted from potato peel powder (mg/100 grams of powder)

آنتوسیانین Anthocyanin	10min دقیقه	15min دقیقه
استون Acetone	5.96	6.89

جانسن و فلم (Jansen & Flamme, 2006) نشان دادند محتوای آنتوسیانین سیب‌زمینی پس از ۱۳۵ روز نگهداری در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد تغییر قابل‌توجهی نداشته است. در نتیجه آنتوسیانین موجود در عصاره در طول مدت آزمایش از بین نمی‌روند.

بلو و همکاران (Bule *et al.*, 2020) میزان تانن متراکم موجود در پوست لوبیا را ۴۰/۶ $mg\ g^{-1}$ وزن خشک ماده گزارش کرده‌اند. این میزان برای زردآلو ۰/۸–۷/۳ $mg\ g^{-1}$، برای سیب ۲۷/۸–۴/۶ mg/g، برای هلو ۱۱–۲/۹ $mg\ g^{-1}$، برای آلو ۳۳/۴–۲–۳ $mg\ g^{-1}$، برای چای به‌طور میانگین ۱۹۱/۶ $mg\ g^{-1}$ برای پوست انگور ۱/۳۸۷ $mg\ g^{-1}$ برای هسته انگور ۲۸/۳–۱/۶ $mg\ g^{-1}$ و برای سورگوم ۱۲/۸ $mg\ g^{-1}$ گزارش شده است.

میزان کل تانن متراکم در پوست سیب‌زمینی به‌طور میانگین ۶/۴۲ (میلی‌گرم بر ۱۰۰ گرم پودر) می‌باشد. این مقدار تانن متراکم در عصاره و اختلاف آن با میزان کل تانن بیانگر این است که عصاره دارای میزان قابل‌توجهی تانن قابل هیدرولیز می‌باشد.

نتایج تجزیه واریانس میزان استخراج تانن متراکم

نتایج تجزیه واریانس جهت تأثیر زمان استخراج بر روی میزان تانن قابل‌استخراج از پوست سیب‌زمینی در جدول ۵ گزارش شده است.

جدول ٥– نتایج تجزیه واریانس برای میزان تانن متراکم

Table 5- Results of analysis of variance for condensed tannin content

عامل تغییرات Source	درجه آزادی Degrees of Freedom	مجموع مربعات Sum of Squares	میانگین مجموع مربعات Meen of Squares	F-Value	P-Value	F 5%	F 1%
زمان Time	1	6.43	6.43	0.84^{ns}	0.412	7.71	21.20
خطا Error	4	30.77	7.68				
کل Total	5	37.15					

ns: غیرمعنی‌دار، ns: not significant

همان‌گونه که در جدول ۴ مشاهده می‌شود مقدار احتمال بیش‌تر از ۰/۰۵ می‌باشد. این نشان می‌دهد اثر زمان روی میزان تانن متراکم معنی‌دار نمی‌باشد و تغییرات میزان تانن متراکم ناشی از تغییرات تصادفی است. همچنین مقایسه میانگین میان زمان‌های استخراج توسط آزمون دانکن انجام شد و مشاهده شد برای حلال استون اختلاف معناداری بین زمان‌های ۱۰ و ۱۵ دقیقه وجود نداشت. با افزایش زمان استخراج میزان تانن متراکم افزایش نمی‌یافت، انتظار می‌رود افزایش میزان تانن کل با افزایش زمان استخراج مربوط به افزایش میزان تانن قابل هیدرولیز استخراج‌شده در نمونه باشد.

نتیجه‌گیری

باتوجه به وجود تانن در پوست سیب‌زمینی و نیاز صنایع کشور به این ماده مهم اهمیت بررسی این ماده بر همگان روشن است. در این پژوهش میزان تانن موجود در پوست سیب‌زمینی تهیه شده از یک کارخانه فراوری محصول سیب‌زمینی اندازه‌گیری شد. برای این منظور ۲۰ کیلوگرم پوست سیب‌زمینی که به روش صنعتی پوست‌گیری شده بود مورد آزمون قرار گرفت. برای استخراج تانن از پوست سیب‌زمینی از روش فراصوت که روشی کم‌هزینه‌تر و سریع‌تر نسبت به سایر روش‌هاست و روش طیف‌سنجی و معرف فولین سیوکالتئو و منحنی استاندارد اسیدگالیک و طیف‌سنج فرابنفش- مرئی (یونیکو- آمریکا) استفاده شد. اثر حلال‌های مختلف در زمان‌های متفاوت استخراج بررسی گردید. نتایج نشان داد با بالابردن زمان استخراج با فراصوت از ۱۰ به ۱۵ دقیقه میزان استخراج تانن کل افزایش می‌یابد. اما مقدار نهایی تانن متراکم با افزایش زمان استخراج تغییر چشمگیری ندارد. بین حلال‌های مختلف حلال آب بیشترین میزان استخراج تانن را به خود اختصاص داد. آب به دلیل قطبیت بالا میزان استخراج تانن را افزایش می‌دهد. بعد از آب حلال متانول و سپس به‌ترتیب استون و اتانول در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. باتوجه‌به نتایج به‌دست‌آمده در تعیین میزان تانن پوست سیب‌زمینی که مقدار قابل‌توجهی است، می‌توان اقدام به استخراج تانن موجود در پوست سیب‌زمینی کرده و در صنایع غذایی، چرم، چسب، رنگ و دارو مورداستفاده قرار بگیرد. همچنین باتوجه‌به خاصیت ضدپوسیدگی تانن می‌توان تأثیر استفاده از تانن پوست سیب‌زمینی بر حفظ تازگی محصولات فرآوری‌شده سیب‌زمینی مانند چیپس سیب‌زمینی را مورد بررسی قرارداد.

مشارکت نویسندگان

فاطمه مرتضوی: جمع‌آوری داده‌ها، پردازش داده‌ها، تحلیل آماری، استخراج و تهیه متن اولیه

رسول خدابخشیان کارگر: نظارت و مدیریت، تحلیل آماری، اعتبارسنجی، ویرایش متن

رضا باغبانی: مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، مشاوره فنی، ویرایش متن

References

1. Beutner, S., Bloedorn, B., & Frixel, S. (2001). Quantitative assessment of antioxidant properties of natural colorants and phytochemicals: carotenoids, flavenoids, phenols and indigoids. The role of β- carotene in antioxidants functions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *81*, 559-568. https://doi.org/10.1002/jsfa.849
2. Bule, M., Khan, F., Nisar, M. F., & Niaz, K. (2020). Tannins (hydrolysable tannins, condensed tannins, phlorotannins, flavono-ellagitannins). *Elsevier*. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247298
3. Cama, M., & Hısıl, Y. (2010). Pressurised water extraction of polyphenols from pomegranate peels. *Journal of Food Chemistry*, 123, 878-885. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.05.011
4. Cigdem, K. O., & Hasan, O. (2012). Ultrasound extraction of valonea tannin and its effects on extraction yield. *Journal of American Leather Chemists Association*, *107*(11), 394-403.
5. Cuong, D. X., Hoan, N. X., Dong, D. H., Thuy, L. T. M., Thanh, N. V., Ha, H. T., Tuyen, D. T. T., & Chinh, D. X. (2020). Tannins: Structural Properties, Biological Properties and Current Knowledge. United Kingdom: *IntechOpen*. https://doi.org/10.5772/intechopen.80170
6. Eazadi, N., & Hayati, D. (2013). Waste reduction, future development. Quarterly Journal of Engineering and Agriculture. *Natural Resources*, *30*, 24-39.
7. Ebrahimi, P., & Sedghi, M. (2013). Tannin Chemistry. Hagerman, Ann., E. Makhtumaghli Faraghi Publications in collaboration with Gonbad Kavos University. Gonbad Kavos University. https://doi.org/10.2307/4002526
8. Ezekiel, R., Singh, N., Sharma, S., & Kaur, A. (2013). Beneficial phytochemicals in potato- a review. *Journal of Food Chemistry*, *50*(2), 487-496. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.04.025
9. Herrera, M. C., & Luque de Castro, M. D. (2004). Ultrasound-assisted extraction for the analysis of phenolic compounds in strawberries. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 379(7-8), 1106-12. https://doi.org/10.1007/s00216-004-2684-0

10. Jahanshahi, S., Tabarsa, T., Asghari, J., & Rasalti, H. (2019). Investigating the amount of tannic acid in the bark of Mazo tall oak (*Quercus castanifolia*). *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, *1*(1). https://doi.org/10.5658/WOOD.2023.51.2.81
11. Jahurul, M. H. A., Zaidul, I. S. M., Ghafoor, K., Al-Juhaimi, F. Y., Nyam, K., Norulaini, N. A. N. Sahena, F., & Omar, A. K. M. (2015). Mango (*Mangifera indica* L.) by-products and their valuable components: A review. *Journal of Food Chemistry*, *15*(183), 173-180. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.03.046
12. Jansen, G., & Flamme, W. (2006). Coloured potatoes (*Solanum Tuberosum* L.) Anthocyanin content and tuber quality. *Genetic Resources and Crop Evolution*, *53*, 1321-1331. https://doi.org/10.1007/s10722-005-3880-2
13. Kilicarislan, C., & Ozgunay, H. (2012). Ultrasound Extraction of Valonea Tannin and its Effects on Extraction Yield. *Jalca*, *107*, 394-403.
14. Labarbe, B., Cheynier, V., Brossaud, F., Souquet, J. M., & Moutounet, M. (1999). Quantitative fractionation of grape proanthocyanidins according to their degree of polymerization. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *47*(7), 2719-23. https://doi.org/10.1021/jf990029q
15. Laborde, J. L., Bouyer, C., Caltagirone, J. P., & Gérard, A. (1998). Acoustic bubble cavitation at low frequencies. *Ultrasonics*, *36*(1), 589-94. https://doi.org/10.3390/en13051126
16. Luckeneder, P., Gavino, J., Kuchernig, R., Petutschnigg, A., & Tondi, G. (2016). Sustainable phenolic fractions as basis for furfuryl alcohol-based co-polymers and their use as wood adhesives. *Journal of Polymers*, *8*, 396. https://doi.org/10.3390/polym8110396
17. Makkar, H. P. S., Bluemmel, M., Borowy, N. K., & Becker, K. (2001). Gravimetric determination of tannins and their correlations whit chemical and protein precipitation methods. *Journal of Science of Food and Agriculture*, *61*, 161-165. https://doi.org/10.1002/JSFA.2740610205
18. Moftakher, M., Samvati, & Zand Moghadam, A. (2013). *Optimizing extraction of antioxidant extract from potato skin using ultrasonic waves using the response surface method*. National Conference on Agricultural Pollutants and Food Health, Challenges and Solutions. 888-893. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.05.103
19. Mohagheghi, S. A., Pourazhang, H., Akhlaghi, H., Elhami-Rad, A. H., & Hematyar, N. (2017). Antioxidant activity of Raja potato peel extract. *Journal of Nutritional Sciences and Food Industries of Iran*, *3*, 23-32.
20. Mueller-Harvey, I. (2001). Analysis of hydrolysable tannins. *Animal Feed Science and Technology*, *91*, 3-20. https://doi.org/10.1016/S0377-8401(01)00227-9
21. Mussatto, S. I., Machado, E. M., Martins, S., & Teixeira, J. A. (2011). Production, composition, and application of coffee and its industrial residues. *Food and Bioprocess Technology*, *4*, 661-672. https://doi.org/10.1007/s11947-011-0565-z
22. Onyeneho, S. N., & Hattiarachchy, N. S. (1993). Antioxidant Activity, Fatty Acid and Phenolic Acids Compositions of Potato Peels. *Journal of Food Agriculature*, *63*, 345-350. https://doi.org/10.1002/JSFA.2740620406
23. Porter, L. J., Hrstich, L. N., & Chan, B. G. (1986). The conversion of procyanidins to cyaniding and delphinidin. *Ohytochemistry*, 25, 223-230. https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)94533-3
24. Schieber, A., & Saldana, A. M. (2009). Potato Peels: A source of Nutritionally and Pharmacologically Interesting Compounds- A Review. *Global Science Books, Food*, *3*(2), 23-29.
25. Schofield, P., Mbugua, D. M., & Pell, A. N. (2001). Analysis of condensed tannins: a review. *Animal Feed Science and Technology*, *91*, 21-40. https://doi.org/10.1016/S0377-8401(01)00228-0
26. Sukor, N. F., Selvam, V. P., Jusoh, R., Kamarudin, N. S., & Rahim, S. A. (2021). Intensified DES mediated ultrasound extraction of tannin acid from onion peel. *Journal of Food Engineering*, *296*, 110437. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110437
27. Sultan Toyeh, T., Ismailzadeh Kanari, R., & Nahidi, F. (2013). *Bioactive compounds and antioxidant properties of potato skin*. The second food science and industry conference.
28. Torti, S. D., Dearing, D. M., & Kursar, T. A. (2015). Extraction of phenolic compounds from fresh leaves: A comparison of methods. *Journal of Chemical Ecology*, *21*, 117-125. https://doi.org/10.1007/BF02036646
29. Wang, C., Shi, L., Fan, L., Ding, Y., Zhao, S., Liu, Y., & Ma, C. (2013). Optimization of extraction and enrichment of phenolics from pomegranate (*Punica granatum* L.) leaves. *Journal of Industrial Crops and Products*, *42*, 587-594. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.06.031
30. Wu, T., Yan, J., Liu, R., Marcone, M. F., Aisa, H. A., & Tsao, R. (2012). Optimization of microwave-assisted extraction of phenolics from potato and its downstreem waste using orthogonal array design. *Food Chemistry*, *133*, 1292-1298. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.08.002
31. Yazaki, Y., Collins, P. J., & Iwashina, T. (1993). Extractves from Blackbutt (*Eucalyptus Pilularis*) Wood which Affect Gluebond Quality of Phenolic Resins. *Holzforschung*, *47*(5), 412-418. https://doi.org/10.1515/hfsg.1993.47.5.412

Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 14, No. 3, 2024, p. 283-299

Investigating the Effect of Storage Time on the Mechanical Properties of Biodegradable Polylactic Acid Film Containing Zinc Oxide Nanoparticles

N. Tajari[1], H. Sadrnia[2*], F. Hosseini[3]

1- PhD Student, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
2- Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
3- Assistant Professor, Department of Food Additives, Iranian Academic Centre for Education Culture and Research (ACECR), Khorasan Razavi, Iran
(*- Corresponding Author Email: hassan.sadrnia@um.ac.ir)

Received: 10 April 2023
Revised: 17 May 2023
Accepted: 29 May 2023
Available Online: 01 September 2024

How to cite this article:
Tajari, N., Sadrnia, H., & Hosseini, F. (2024). Investigating the Effect of Storage Time on the Mechanical Properties of Biodegradable Polylactic Acid Film Containing Zinc Oxide Nanoparticles. *Journal of Agricultural Machinery*, *14*(3), 283-299. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.2023.81863.1160

Introduction

Polylactic acid (PLA) is a biodegradable polymer that can replace petroleum-based materials in packaging films due to its unique properties. However, sometimes the degradability of polymers can be considered a negative factor, such as when significant changes in the mechanical properties of the polymer occur during use. Another notable issue is the brittleness of polylactic acid, which can be modified to some extent by adding other materials. The addition of materials such as nanoparticles and plasticizers can improve the flexibility and mechanical properties of polymer films. Polymer films must possess acceptable physical, mechanical, thermal, and other relevant characteristics for use in the packaging industry. The acceptable level of these properties can be obtained by comparing them with the established standards for commonly used polymers in the industry. Low density polyethylene (LDPE) is a polymer widely used in the packaging industry, making it a good benchmark for comparison. This research focused on studying various factors affecting the quality of the produced films, including mechanical properties, light absorption, contact angle, and microstructures. Investigating the mechanical properties of the PLA films is crucial due to the polymer's degradability over time. Polylactic acid films with different compounds containing PEG 400 and Tween 80 as plasticizers and ZnO nanoparticles were investigated for 14 months (in the first, second, third, fourth, and fourteenth months) in terms of mechanical properties. Finally, the obtained values were compared with standard values for packaging and their mechanical behavior was analyzed.

Materials and Methods

Experiments were performed in the post-harvest and central laboratories of Ferdowsi University of Mashhad, Iran. The films were prepared using the solvent casting method. First, PLA granules were dried for 24 hours at 60 °C and then 1 g of PLA in 50 ml of dichloromethane was dissolved at room temperature by magnetic stirring for 12 hours. ZnO nanoparticles, PEG 400 and Tween 80 were incorporated into PLA and DCM solution, 1 wt% PLA, 20 wt% PLA, and 0.25 wt% solution, respectively. To prepare films containing nanoparticles, nanoparticles and dichloromethane were sonicated with an ultrasonic probe for 10 minutes and then added to the base solution and stirred for one hour.

Mechanical properties of the samples were determined based on the ASTM D882-02 standard method. A

©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).

https://doi.org/10.22067/jam.2023.81863.1160

texture analyzer (H5 KS, Manchester, U.K.) was used for this test. Light absorption was studied using a spectrophotometer (CAMSPECM550, UK). The contact angle of the samples was measured using a goniometer (model 200-00, Ramé-Hart Instrument Co, Succasunna, USA) in accordance with the ASTM D5946-04 standard. The surface morphology of the samples was visualized using scanning electron microscope (LMU TESCAN BRNO-Mira3, Czech Republic). The results were analyzed using Minitab software version 18 (Minitab Inc, USA) and the graphs were created in Microsoft Excel 2013.

Results and Discussion

The neat PLA film has a smooth surface, and with the addition of nanoparticles or plasticizers, the surfaces become uneven. The addition of nanoparticles and plasticizers caused more opacity of the film and better protection against ultraviolet rays. The presence of plasticizers, especially Tween 80, increased the hydrophilicity of the films. Packaging films should be flexible and have ductile behavior and the addition of plasticizers caused ductile behavior. However, Tween 80 was not able to create stable ductile behavior. The stress-strain diagram shows that most samples displayed ductile behavior over 14 months, except for the neat PLA film and the film containing Tween 80 and nanoparticles. The values of tensile strength, elastic modulus, and elongation at break for low density polyethylene have been reported as 11.7 MPa, 260.4 MPa, and 225%, respectively. The lowest value of tensile strength (18.56 MPa) and elastic modulus (1114.68 MPa) were related to P400/T80 film. This difference shows the acceptability of polylactic acid in the packaging industry. The elongation value is much lower than the standard, indicating the need to modify this parameter.

Conclusion

The research findings revealed a significant effect of film type on mechanical properties, as well as a remarkable impact of storage time on tensile strength and elongation at break. The effect of various factors such as changes in the texture of the film due to the presence of plasticizers or non-uniform distribution of nanoparticles makes it impossible to determine a consistent trend for the effect of time on the films. The elongation at break for the produced films was much lower than the standard, which still needs to be modified due to the importance and sensitivity of this parameter in packaging. Polylactic acid has high tensile strength and high elastic modulus. Therefore, it can be combined with other polymers, various plasticizers, or nanoparticles at higher percentage to improve flexibility. The presence of plasticizers and nanoparticles in the film substrate increased opacity and enhanced protection against ultraviolet rays. The produced films were more hydrophilic compared to low density polyethylene.

Acknowledgement

This research was supported by Ferdowsi University of Mashhad (Grant No. 54096). The authors would like to thank Dr. Mohammadreza Pajohi-Alamoti, Department of Food Hygiene and Quality Control, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran for providing polylactic acid granules.

Keywords: Elastic modulus, Elongation at break, Mechanical behavior, Packaging film, Tensile strength

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۱٤، شماره ۳، پاییز ۱٤۰۳، ص ۲۹۹-۲۸۳

بررسی تاثیر زمان نگهداری بر ویژگی‌های مکانیکی فیلم زیست‌تخریب‌پذیر پلی‌لاکتیک اسید حاوی نانو ذرات اکسید روی

ندا تجری[۱]، حسن صدرنیا[۲*]، فرشته حسینی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۲۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۰۸

چکیده

پلی‌لاکتیک‌اسید پلیمری زیست‌تخریب‌پذیر است که خواص مکانیکی آن می‌تواند تحت تاثیر زمان تغییر کند. در این تحقیق ویژگی‌های مکانیکی شش نوع فیلم تولیدشده بر پایه پلی‌لاکتیک‌اسید با ترکیبات مختلف (پلی‌اتیلن‌گلیکول ۴۰۰، توین ۸۰ و نانو ذرات اکسید روی) در بازه زمانی ۱۴ ماهه (ماه‌های اول، دوم، سوم، چهارم و چهاردهم) مورد بررسی قرار گرفت و نتایج با مقادیر استاندارد گزارش‌شده برای پلی‌اتیلن با چگالی کم مقایسه شدند. به‌منظور بررسی ساختار اولیه فیلم‌ها جذب نور و زاویه تماس اندازه‌گیری شد و ریزساختارها به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج آنالیز واریانس نشان داد که تاثیر زمان نگهداری و نوع فیلم بر استحکام کششی و کرنش نقطه شکست معنادار بود. بیشترین استحکام کششی، مدول الاستیسیته و کرنش نقطه شکست به‌ترتیب برای فیلم‌های پلی‌لاکتیک‌اسید خالص در ماه چهارم (۹۴/۰۸ مگاپاسکال)، پلی‌لاکتیک‌اسید خالص در ماه چهارم (۲۸۵۵/۷۹ مگاپاسکال) و پلی‌لاکتیک‌اسید/پلی‌اتیلن‌گلیکول ۴۰۰/نانو ذرات اکسید روی در ماه اول (۷۶/۸۲ درصد) به‌دست‌آمد. مقادیر کرنش نقطه شکست بسیار کمتر از استاندارد بود. با توجه به استحکام کششی و مدول الاستیسیته بسیار بالا پلی‌لاکتیک‌اسید می‌توان با استفاده از نرم‌کننده‌های مختلف با درصد بیشتر یا ترکیب کردن پلی‌لاکتیک‌اسید با سایر پلیمرها شکنندگی را کاهش داد.

واژه‌های کلیدی: استحکام کششی، رفتار مکانیکی، فیلم بسته‌بندی، کرنش نقطه شکست، مدول الاستیسیته

مقدمه

پلی‌لاکتیک‌اسید، بیوپلیمری است که به دلیل ویژگی‌های منحصر به‌فردش به‌عنوان جایگزینی برای مواد پلاستیکی بر پایه نفتی در صنایع بسته‌بندی مورد توجه قرار گرفته است. یکی از کاربردهای این بیوپلیمر در ساخت فیلم‌های بسته‌بندی می‌باشد. تجزیه‌پذیری، شفافیت، مدول الاستیسیته[۴] بالا و استحکام خوب از مهم‌ترین مزیت استفاده از پلی‌لاکتیک‌اسید می‌باشد و از طرف دیگر دمای انتقال شیشه‌ای پایین[۵] و در نتیجه آن شکنندگی بالا از مهم‌ترین معایب این بیوپلیمر است (Ruz-Cruz *et al.*, 2022). البته گاهی تجزیه‌پذیری پلیمرها را می‌توان یک عامل منفی در نظر گرفت. تخریب پلیمر می‌تواند شامل تغییراتی در خواص مکانیکی پلیمر باشد و اگر این تغییرات در طول استفاده از بسته‌بندی رخ دهد، مشکل محسوب می‌شود (Speight, 2020). همان‌طور که گفته شد پلی‌لاکتیک‌اسید یک پلیمر شیشه‌ای است که کرنش نقطه شکست[۶] آن کمتر از ده درصد است. برای برطرف کردن این نقص از انواع مختلف نرم‌کننده‌ها استفاده می‌شود (Sin & Tueen, 2019). نرم‌کننده، ماده‌ای است که با پلیمر ترکیب می‌شود و منجر به افزایش انعطاف‌پذیری ماده نهایی می‌شود. نرم‌کننده‌ها باعث افزایش فاصله بین مولکولی و کاهش استحکام نیروهای بین مولکولی و درون‌مولکولی می‌شوند (Caicedo, Diaz-Cruz, Jimenez-Regalado, & Aguirre-Loredo,

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۲- دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۳- استادیار، گروه صنایع غذایی، جهاد دانشگاهی خراسان رضوی، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: hassan.sadrnia@um.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jam.2023.81863.1160

4- Elastic Modulus
5- Glass transition temperature (Tg)
6- Elongation at break

2022). افزودن مواد دیگر مانند نانو ذرات نیز می‌توانند به بهبود خواص فیلم‌های پلیمری کمک کند. نانو ذرات می‌توانند با افزوده شدن به بستر پلیمر به‌طور موثری خواص مکانیکی، محافظت در برابر اشعه فرابنفش[1] و خواص ضد باکتریایی فیلم کامپوزیت را بهبود دهند. نانو ذرات اکسید روی سازگار با محیط‌زیست، ارزان قیمت، غیرسمی و در دسترس هستند. در نتیجه آن‌ها به‌عنوان یک انتخاب مناسب برای بهبود خواص مواد پلیمری در کاربردهای بسته‌بندی مواد غذایی در نظر گرفته شده‌اند (Yu, Fei, He, & Li, 2021).

هر فیلم پلیمری به‌منظور استفاده در صنعت بسته‌بندی باید از نظر خصوصیات مختلف مانند ظاهری، مکانیکی، حرارتی و غیره مورد بررسی قرار گیرد. ویژگی‌های مکانیکی، جذب نور[2]، زاویه تماس[3] و ریزساختارهای تشکیل‌دهنده فیلم از جمله موارد تاثیرگذار در کیفیت نهایی فیلم تولیدشده هستند. جذب نور در طول موج‌های ۲۸۰ و ۶۶۰ نانومتر به‌ترتیب برای بررسی میزان محافظت در برابر اشعه فرابنفش و سنجش کدورت استفاده می‌شود (Shankar & Rhim, 2019). به کمک اندازه‌گیری زاویه تماس می‌توان میزان آبدوستی یا آبگریزی فیلم تولیدشده را تعیین کرد. مواد آبدوست مانع رطوبتی ضعیفی هستند، استفاده از آن‌ها در بسته‌بندی می‌تواند باعث فساد ماده غذایی شود (Salunkhe, 2018). میزان قابل‌قبول ویژگی‌های ذکرشده را می‌توان از طریق دفترچه استاندارد مواد پلیمری و یا با بررسی تحقیقات صورت‌گرفته مشخص کرد (ASTM, 2008). پلی‌اتیلن با چگالی کم[4] یک پلیمر مصنوعی است که به دلیل انعطاف‌پذیری و خاصیت ارتجاعی معمولاً برای بسته‌بندی استفاده می‌شود و امکان تهیه فیلم پلاستیکی نازک‌تری را در مقایسه با سایر پلیمرهای مصنوعی فراهم می‌کند. این پلیمر استحکام مکانیکی قابل‌قبول و ماندگاری قابل‌توجهی دارد و همچنین مقاوم در برابر مواد شیمیایی، شفاف و ارزان‌قیمت است (Irwanto, Pidhatika, Nurhajati, & Harjanto, 2019; Szlachetka, Witkowska-Dobrev, Baryła, & Dohojda, 2021). از آن‌جایی‌که این پلیمر ویژگی‌های مناسبی برای استفاده در صنعت بسته‌بندی را دارد می‌تواند معیار خوبی برای سنجش کیفیت پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر باشد.

تحقیقات زیادی در زمینه تولید فیلم‌های پلی‌لاکتیک‌اسید دارای نرم‌کننده‌ها و نانو ذرات مختلف انجام شده است که در این بخش به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. در تحقیقی فیلم‌های پلی‌لاکتیک‌اسید با نانو ذرات اکسید روی و گرافن اکسید تقویت شد. نتایج نشان داد افزایش میزان نانو ذرات از صفر تا ۱/۵ درصد وزنی منجر به افزایش استحکام کششی[5] شد (Ching, Keesan, & Muhamad, 2022). بررسی ویژگی‌های مکانیکی فیلم‌های پلی‌لاکتیک اسید/کیتوسان[6]/نانو ذرات اکسید روی نشان داد که با افزودن نانو ذرات استحکام کششی، مدول الاستیسیته و کرنش نقطه شکست بهبود یافت (Rahman, Islam, & Li, 2018). محققان نشان دادند که افزودن نرم‌کننده پلی اتیلن‌گلیکول[7] (۱۰۰۰ و ۶۰۰۰) به مقدار ۲۰ درصد وزنی بر فیلم‌های پلی‌لاکتیک‌اسید منجر به بهبود خاصیت انعطاف‌پذیری فیلم شده در حالی‌که استحکام کششی و مدول الاستیسیته کاهش یافت (Holcapkova *et al.*, 2018). ویژگی‌های مکانیکی فیلم‌های تولیدشده از پلی‌لاکتیک‌اسید/ پلی‌هیدروکسی بوتیرات به همراه روغن زیتون و کارواکرول به‌عنوان نرم‌کننده در روزهای اول، هفتم و سی‌ام مورد بررسی قرار گرفت. استحکام کششی در طی سی روز مقدار قابل‌قبولی داشت اما ازدیاد طول در هنگام شکست با گذر زمان کاهش یافت (Briassoulis, Athanasoulia, & Tserotas, 2022). در پژوهشی اثر شکل و مقدار نانو ذرات اکسید روی بر رفتار خزشی نانو کامپوزیت تولیدشده با بستر پلی‌لاکتیک‌اسید بررسی شد. نتایج نشان داد وجود نانو ذرات سینتیک[8]، پیری پلی‌لاکتیک‌اسید را سرعت بخشیده است. آن‌ها همچنین گزارش کردند که با افزوده شدن نانو ذرات به بستر کدورت و جذب اشعه فرابنفش افزایش یافت (Lizundia, Ortellado, Guinault, Vilas, & Domenek, 2019). نتیجه پژوهشی نشان داد که اثر افزودن نانو ذرات اکسید روی بر زاویه تماس فیلم‌های پلی‌لاکتیک‌اسید/ پلی‌بوتیلن آدیپات کو ترفتالات[9] معنادار نبوده است (Shankar & Rhim, 2019). رفتار مکانیکی فیلم‌های پلی‌لاکتیک‌اسید که حاوی مالئیک اسید[10] و مشتقات پروپیل استر به‌عنوان نرم‌کننده بودند مورد بررسی قرار گرفت. در ساعات اولیه فیلم‌های دارای نرم‌کننده‌های مختلف استحکام تسلیم و سفتی[11] مشابهی را نشان دادند. بعد از ۷۲ ساعت فیلم‌های دارای مالئیک اسید رفتار پلاستیکی خود را از دست دادند و شکننده شدند. فیلم‌های دارای دی‌پروپیل مالئات[12] خاصیت پلاستیکی خود را برای مدت طولانی‌تری در بین همه فیلم‌ها حفظ کردند (Jr, Gross, Saatkamp, Pires, & Parize, 2020).

بررسی خصوصیات مکانیکی فیلم‌های تولیدشده از پلی‌لاکتیک‌اسید به دلیل تجزیه‌پذیری این پلیمر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا این ویژگی‌ها با گذر زمان می‌توانند تغییر کنند.

1- Ultraviolet (UV) radiation
2- Light absorbance
3- Contact angle
4- Low density polyethylene (LDPE)

5- Tensile strength
6- *Chitosan*
7- Polyethylene glycol
8- *Kinetics*
9- Poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT)
10- Maleic Acid
11- Rigidity
12- Dipropyl Maleate

این تغییرات اگر ساختار اصلی فیلم را تحت تاثیر قرار دهند باعث تخریب بسته‌بندی خواهند شد. در سال‌های گذشته تحقیقات زیادی در مورد این فیلم‌ها صورت گرفته است اما در مورد بررسی اثر زمان نگهداری بر فیلم‌های پلی‌لاکتیک‌اسیدی تحقیقات بسیار کمی صورت گرفته است. بنابراین در این تحقیق فیلم‌های پلی‌لاکتیک‌اسید با ترکیبات مختلف دارای نرم‌کننده و نانو ذرات به مدت ۱۴ ماه (در ماه اول، دوم، سوم، چهارم و چهاردهم) از لحاظ ویژگی‌های مکانیکی مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین تاثیر زمان نگه‌داری فیلم‌ها، نوع فیلم و اثرات متقابل این دو فاکتور از لحاظ آماری بر ویژگی‌های مکانیکی مورد سنجش قرار گرفت. جذب نور، زاویه تماس و ریزساختارها نیز به‌عنوان ویژگی‌های اولیه فیلم‌های تولیدی مورد مطالعه قرار گرفت و در انتها شکل‌های تنش-کرنش برای بررسی رفتار مکانیکی فیلم‌ها ترسیم شد.

مواد و روش‌ها

مواد

فیلم‌های پلیمری در پژوهشکده علوم و فناوری مواد غذایی جهاد دانشگاهی مشهد تولید شد. آزمایش کشش در آزمایشگاه پس از برداشت گروه بیوسیستم دانشگاه فردوسی مشهد و جذب نور، زاویه تماس و تصویربرداری از سطوح در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. گرانول‌های پلی‌لاکتیک‌اسید با وزن مولکولی ۱۹۷۰۰۰ گرم بر مول[1] از شرکت آلمانی FKuR Kunststoff GmbH تهیه شدند. نانو ذرات اکسید روی از شرکت پیشگامان نانو مواد ایران خریداری شد. این ذرات تقریباً کروی با خلوص بالای ۹۹ درصد و قطر متوسط آن‌ها حدود ۳۵ تا ۴۵ نانومتر بود (شکل ۱). پلی‌اتیلن‌گلیکول ۴۰۰ و پلی‌سوربات ۸۰[2] (توین ۸۰)[3] از شرکت مرک[4] (آلمان) و دی‌کلرومتان[5] از شرکت دکتر مجللی (ایران) خریداری شدند.

آماده‌سازی فیلم‌ها

فیلم‌ها با روش ریخته‌گری حلال مطابق با شکل ۲ تهیه شدند. ابتدا گرانول‌های پلی‌لاکتیک‌اسید به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند و سپس ۱ گرم از پلیمر در ۵۰ میلی‌لیتر دی‌کلرومتان به کمک همزن مغناطیسی به مدت ۱۲ ساعت در دمای اتاق حل شد. همزمان با حل شدن پلیمر در حلال، نانو ذرات اکسید روی (۱ درصد وزنی پلی‌لاکتیک‌اسید)، پلی‌اتیلن‌گلیکول ۴۰۰ (۲۰ درصد وزنی پلی‌لاکتیک‌اسید) و توین ۸۰ (۰/۲۵ درصد وزنی محلول) به محلول پلی‌لاکتیک‌اسید و دی‌کلرومتان افزوده شدند. مقادیر مواد مورداستفاده با مطالعه سایر پژوهش‌ها انتخاب شدند (Falqi, Bin-Dahman, Hussain, & Al-Harthi, 2018; Heydari-Majd, Ghanbarzadeh, Noghabi, & Abdolshahi, 2020; Jantrawut, Chaiwarit, Jantanasakulwong, Brachais, & Chambin, 2017; Luangtana-Anan, Nunthanid, & Limmatvapirat, 2010; Shankar, Wang, & Rhim, 2018). برای تهیه فیلم‌های نانو کامپوزیت، نانو ذرات و دی‌کلرومتان به مدت ۱۰ دقیقه با یک پروب اولتراسونیک هم‌زده‌شده و سپس به محلول پایه اضافه و به مدت یک ساعت با همزن مغناطیسی هم‌زده شدند. در نهایت محلول‌ها در پلیت‌های ۱۵ سانتی‌متری ریخته شده و به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق قرار گرفتند و شش نوع فیلم با ترکیبات متفاوت مطابق جدول ۱ تولید شد.

شکل ۱– تصاویر SEM مربوط به نانو ذرات اکسید روی
Fig.1. SEM image of zinc oxide nanoparticles

جذب نور

میزان جذب نور با استفاده از اسپکترو فتومتر[6] (CAMSPECM550, UK) و در طول موج ۲۰۰ تا ۸۰۰ نانومتر سنجش شد. برای انجام آزمایش نمونه‌ها به ابعاد ۴×۱ سانتی‌متر مربع برش داده شدند و سل[7] خالی به‌عنوان شاهد انتخاب شد (Heydari-Majd *et al.*, 2020).

زاویه تماس

زاویه تماس نمونه‌ها با گونیومتر (model 200-00, Ramé-Hart Instrument Co, Succasunna, USA) و طبق استاندارد ASTM D5946-04 اندازه‌گیری شد (ASTM, 2017). سه میکرولیتر آب مقطر در سه قسمت مختلف از هر نمونه فیلم (ابعاد ۵ × ۱/۵ سانتی‌مترمربع) قرار داده شد و زاویه تماس در ثانیه شصتم اندازه‌گیری شد.

1- gram (moles)$^{-1}$
2- Polysorbate 80
3- Tween 80
4- Merck
5- Dichloromethane
6- UV-VIS spectrophotometer
7- Cell

شکل ۲- روش ساخت فیلم‌های تولیدشده

Fig.2. The method of producing polymer films

جدول ۱- ترکیبات فیلم‌های تولیدشده

Table 1- Compositions of produced films

نام اختصاری **Abbreviation**	ترکیبات مورد استفاده در فیلم‌های پلیمری **Compounds used in polymer films**	
PLA	PLA	پلی‌لاکتیک اسید
P400	PLA+ Polyethylene glycol 400	پلی‌لاکتیک‌اسید+ پلی‌اتیلن‌گلیکول ۴۰۰
P400/T80	PLA+ Polyethylene glycol 400+ Tween 80	پلی‌لاکتیک‌اسید+ پلی‌اتیلن‌گلیکول ۴۰۰+ توین ۸۰
P400/ZnO	PLA+ Polyethylene glycol 400+ ZnO nanoparticles	پلی‌لاکتیک‌اسید+ پلی‌اتیلن‌گلیکول ۴۰۰+ نانو ذرات اکسید روی
T80/ZnO	PLA+ Tween 80+ ZnO nanoparticles	پلی‌لاکتیک‌اسید+ توین ۸۰+ نانو ذرات اکسید روی
P400/T80/ZnO	PLA+ Polyethylene glycol 400+ Tween 80+ ZnO nanoparticles	پلی‌لاکتیک‌اسید+پلی‌اتیلن‌گلیکول ۴۰۰+ توین ۸۰+ نانو ذرات اکسید روی

میکروسکوپ الکترونی روبشی[1]

بررسی سطح نمونه‌ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی (LMU TESCAN BRNO-Mira3) ساخت کشور جمهوری چک در ولتاژ شتاب‌دهنده ۶ کیلوولت انجام شد. نمونه‌ها بر روی پایه‌های آلومینیومی نصب‌شده و با طلا پوشانده شد و پس از آن تصویربرداری انجام شد.

ویژگی‌های مکانیکی

خواص مکانیکی نمونه‌ها بر اساس روش استاندارد ASTM D882-02 تعیین شد (ASTM, 2010). برای این تست از یک دستگاه بافت‌سنج (H5KS) ساخت کشور انگلستان استفاده شد و تمام اندازه‌گیری‌ها حداقل در سه تکرار انجام شد. فاصله اولیه فک‌ها ۵۰ میلی‌متر و سرعت جابه‌جایی فک‌ها ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه تعیین شد. نمونه‌های فیلم به نوارهای ۱۰×۲ سانتی‌مترمربع بریده شدند و ضخامت آن‌ها به کمک میکرومتر دیجیتال (Mitutoyo, Japan) با دقت ۰/۰۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. قبل از انجام آزمایش، تمام نمونه‌ها از لحاظ رطوبت مشروط شدند. در نهایت استحکام کششی، کرنش نقطه شکست و مدول الاستیسیته در ماه‌های اول، دوم، سوم و چهارم به‌منظور بررسی پایداری مکانیکی و تغییرات ویژگی‌های مکانیکی در کوتاه‌مدت و ماه چهاردهم برای ارزیابی پایداری مکانیکی در بلندمدت اندازه‌گیری شدند.

تجزیه و تحلیل آماری و تفسیر داده‌ها

نتایج با استفاده از نرم‌افزار مینی تب نسخه ۱۸ (Minitab Inc, USA) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. معناداری پارامترهای اثر زمان و نوع فیلم توسط مدل خطی عمومی[2] و بررسی اختلاف معنادار ناشی از اثر زمان در فیلم‌های مختلف به کمک آنالیز واریانس

1- Scanning electron microscope (SEM)

2- General linear model

یک‌طرفه[1] ارزیابی شد. برای رسم نمودارها از نرم‌افزار مایکروسافت اکسل ۲۰۱۳ (Microsoft Excel 2013) استفاده شد.

نتایج و بحث

جذب نور

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، فیلم پلی‌لاکتیک‌اسید خالص از فیلم‌های دیگر شفاف‌تر است زیرا جذب آن در ۶۶۰ نانومتر کمتر از سایر فیلم‌ها است. همچنین این فیلم کم‌ترین میزان جذب را در طول موج ۲۸۰ نانومتر دارد، یعنی محافظ خوبی برای ماده غذایی در برابر اشعه فرابنفش نیست. اشعه فرابنفش می‌تواند باعث تخریب پلیمر شود و همچنین این اشعه یک عامل محرک برای اکسیداسیون لیپیدها[2] است. اکسیداسیون باعث تغییر در طعم غذا و تولید ترکیبات سمی می‌شود و در نتیجه کیفیت غذا به شدت کاهش می‌یابد (Khoirunnisa, Joni, Panatarani, Rochima, & Praseptiangga, 2018; Yuan *et al.*, 2020). مقدار کدورت گزارش‌شده برای پلی‌اتیلن با چگالی کم با ضخامت ۰/۰۰۶±۰/۰۶۷ میلی‌متر ۰/۰۴۳±۰/۵۹ میلی‌متر$^{-1}$ است (Pillai *et al.*, 2020). پلی‌اتیلن با چگالی کم نیز مانند پلی‌لاکتیک اسید محافظ خوبی در برابر اشعه فرابنفش نیست و جذبی حدود ۰/۲ در طول موج ۲۸۰ نانومتر دارد (Arrieta *et al.*, 2020). افزودن نانو ذرات اکسید روی باعث افزایش جذب اشعه فرابنفش در فیلم‌ها شده است. نانو ذرات اکسید روی غیرقابل نفوذ هستند و حضور آن‌ها در فیلم پلیمری از عبور اشعه فرابنفش جلوگیری می‌کند (Shankar *et al.*, 2018). نرم‌کننده‌ها نیز می‌توانند باعث افزایش جذب اشعه فرابنفش شوند. در تحقیقی نشان داده شد افزودن نرم‌کننده‌های گلیسرول[3]، سوربیتول[4] و پلی‌اتیلن‌گلیکول ۲۰۰ و ۴۰۰ باعث افزایش جذب اشعه فرابنفش در فیلم تولیدشده از صمغ گیاه کوردیا[5] شد (Haq, Jafri, & Hasnain, 2016). فیلم P400/ZnO بالاترین میزان جذب در ۲۸۰ نانومتر و فیلم P400/T80/ZnO بیشترین جذب در ۶۶۰ نانومتر را دارد.

زاویه تماس

شکل ۴ نتایج مربوط به زاویه تماس را نشان می‌دهد. زاویه تماس برای پلی‌اتیلن با چگالی کم ۹۸/۶۰ درجه گزارش شده است که بیشتر از تمامی مقادیر به‌دست‌آمده برای نمونه‌های تولیدشده است (Aktas *et al.*, 2023). فیلم‌های P400/T80 و P400/T80/ZnO بسیار آبدوست هستند که وجود ترکیبی از دو نرم‌کننده یا در واقع مقدار بیشتر نرم‌کننده را می‌توان علت آن دانست. در تحقیقی نشان داده شد وجود گلیسرول به‌عنوان نرم‌کننده باعث افزایش آبدوستی مواد تولیدشده بر پایه کیتوسان شد. محققین علت این پدیده را مولکول‌های گلیسرول که با گروه‌های قطبی کیتوسان پیوند هیدروژنی ندارند، دانستند. این مولکول‌ها می‌توانند به مولکول‌های آب متصل شوند و به افزایش آبدوستی سطح کمک کند (Chen, Xie, Tang, & McNally, 2021). نتایج نشان داد فیلم T80/ZnO آبدوست‌تر از فیلم P400/ZnO است زیرا توین ۸۰ با داشتن یک سر آبدوست توانایی بیشتری برای برقراری پیوند با مولکول‌های آب به نسبت پلی‌اتیلن‌گلیکول دارد (Hanani & Husna, 2018). زاویه تماس در فیلم‌های PLA، P400 و P400/ZnO با هم اختلاف معناداری نداشتند، اما آن‌ها با سایر فیلم‌ها اختلاف معناداری داشتند.

بررسی ریزساختاری فیلم‌ها

بررسی ریزساختارهای سطح فیلم‌های تولید شده به درک بهتر نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های مکانیکی کمک می‌کند. شکل ۵ تصاویر به‌دست‌آمده به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطوح فیلم‌های تولیدشده را نشان می‌دهد. فیلم پلی‌لاکتیک‌اسید خالص به‌صورت کاملا صاف و یکنواخت مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده‌ی شکنندگی بالای آن است (Sharma, Singh, Majumdar, & Butola, 2019). در فیلم P400 و P400/ZnO ناهمواری و حفرات زیادی مشاهده می‌شود. این ناهمواری‌ها از شکنندگی فیلم‌ها کاسته اما کاهش استحکام کششی را نیز به همراه داشته است. در تحقیق مشابه گزارش شد پلی‌اتیلن‌گلیکول وقتی‌که به مقدار ۱۰ درصد وارد بستر پلی‌لاکتیک‌اسید شد به‌صورت قطرات با مرز مشخص قابل‌مشاهده بود و کاهش استحکام کششی را نیز به‌همراه داشت (Bijarimi, Ahmad, Rasid, Khushairi, & Zakir, 2016). افزودن توین ۸۰ در فیلم‌های P400/T80 و P400/T80/ZnO باعث شده پلی‌اتیلن‌گلیکول بهتر با پلیمر ترکیب شود زیرا توین ۸۰ یک امولسیفایر است. توین ۸۰ حاوی یک گروه عاملی به‌عنوان سر آبدوست و یک گروه عاملی به‌عنوان دم آبگریز است که باعث می‌شود بتواند با مواد مختلف پیوند برقرار کند (Hanani & Husna, 2018). نانوذرات موجود در بستر فیلم‌ها و چگونگی پراکندگی آن‌ها با دایره‌های قرمز رنگ در شکل ۵ مشخص شده‌اند. توده نانو ذرات در تمامی نمونه‌های دارای نانو ذره وجود دارد. بیشترین قطر مربوط به این توده‌ها حدود یک میکرومتر است. پیوندهای Zn-O-Zn بین ذرات در اندازه‌های نانو یا میکرو به دلیل حضور مولکول‌های آب تشکیل می‌شوند که در نهایت منجر به تجمع ذرات می‌شوند (Kim

1- One-way ANOVA
2- Lipid
3- *Glycerol*
4- *Sorbitol*
5- Cordia

et al., 2019). نانو ذرات در فیلم P400/T80/ZnO توزیع بهتری به نسبت فیلم‌های P400/ZnO و T80/ZnO داشتند و این نشان می‌دهد ترکیب نرم‌کننده پلی‌اتیلن گلیکول و توین ۸۰ می‌تواند بستر بهتری برای نانو ذرات فراهم کند.

شکل ۳- طیف جذب نور فیلم‌های تولیدشده

Fig.3. Light absorbance spectra of the produced films

شکل ٤- زاویه تماس قطره آب با فیلم‌های تولیدشده؛ حروف متفاوت نشان‌دهنده‌ی تفاوت معنادار بین فیلم‌های مختلف است.

Fig.4. The contact angle of the water drop with the produced films; Different letters indicate significant difference between different films ($p<0.05$).

شکل ۵– تصاویر SEM از سطح فیلم‌های تولیدشده

Fig.5. SEM images of the surface of the produced films

ویژگی‌های مکانیکی

در میان ویژگی‌های مختلف پلیمرها، خواص مکانیکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است زیرا یکی از عوامل مهم در تعیین کاربرد صحیح مواد پلیمری است (Li *et al.*, 2019). جدول ۲ نشان‌دهنده‌ی تاثیر پارامترهای نوع فیلم و زمان نگه‌داری فیلم‌ها و همچنین اثرات متقابل آن‌ها بر ویژگی‌های مکانیکی است. اثر نوع فیلم بر استحکام کششی، مدول الاستیسیته و کرنش نقطه شکست در سطح یک درصد معنادار است یعنی افزودن نرم‌کننده‌ها و یا نانو ذره باعث تغییرات در ویژگی‌های مکانیکی شده است. اثر زمان نگه‌داری بر مدول الاستیسیته معنادار نبوده است ولی بر استحکام کششی در سطح پنج درصد و بر کرنش نقطه شکست در سطح یک درصد معنادار است. این بررسی‌ها نشان می‌دهد که کرنش نقطه شکست بیشتر از دو ویژگی مکانیکی دیگر تحت تاثیر زمان است. اثرات متقابل فقط برای کرنش نقطه شکست در سطح یک درصد معنادار است. اثرات متقابل نشان‌دهنده اثر بخشی تغییرات یک فاکتور بر فاکتور دیگر است پس می‌توان گفت فاکتورهای زمان نگه‌داری و نوع فیلم در مورد استحکام کششی و مدول الاستیسیته بر هم اثرگذار نیستند. اثر نوع فیلم پلی‌لاکتیک‌اسید/ پلی‌بوتیلن‌آدیپات کو ترفتالات/ ۱ ، ۵ و ۱۰ درصد فرولیک اسید[1] بر استحکام کششی و مدول الاستیسیته معنادار گزارش شد. کرنش نقطه شکست در این فیلم‌ها اختلاف معناداری نداشتند (Sharma, Jaiswal, Duffy, & Jaiswal, 2020).

پلی‌اتیلن با چگالی کم به‌عنوان پلیمر ایده‌آل برای تولید فیلم‌ها در مواد بسته‌بندی در نظر گرفته می‌شود که با توجه به شکل ۶ می‌توان فهمید استحکام کششی این پلیمر از استحکام کششی تمامی‌فیلم‌های تولیدشده و بررسی‌شده در مدت ۱۴ ماه کوچک‌تر است (ASTM, 2008). این نشان‌دهنده استحکام کششی بسیار بالای پلی‌لاکتیک‌اسید است که با افزوده شدن مواد مختلف و گذر زمان همچنان مقدار بالاتر از قابل‌قبول را دارد. بیشترین مقدار استحکام کششی مربوط به فیلم پلی‌لاکتیک‌اسید خالص و کمترین مربوط به فیلم‌های P400/T80/ZnO و P400/T80 که دارای دو نوع نرم‌کننده بوده‌اند، است. اختلاف معنادار ناشی از اثر زمان تنها در فیلم P400/T80 و در ماه چهاردهم مشاهده شد. وجود نانو ذره در فیلم P400/T80/ZnO را می‌توان دلیلی بر عدم کاهش معنادار در استحکام کششی با گذر زمان دانست. البته به علت پژوهش‌های بسیار

1- Ferulic acid

محدود در مورد اثر زمان بر فیلم‌های پلیمری، اثبات این موضوع نیازمند تحقیقات بیشتر است. از طرف دیگر نتایج نشان می‌دهد که افزودن نانو اکسید روی بهبود قابل‌توجهی در استحکام کششی ایجاد نکرده است. میانگین استحکام کششی به‌دست‌آمده در ماه‌های اندازه‌گیری‌شده برای فیلم‌های P400، P400/ZnO، P400/T80 و P400/T80/ZnO به‌ترتیب ۳۶/۷۴، ۳۴/۰۸، ۲۹/۷۶ و ۲۹/۵۳ مگاپاسکال بوده است. علت می‌تواند مقدار کم این نانو ذره و یا توزیع غیریکنواخت آن در بستر پلیمر باشد. در پژوهشی نشان داده شد که افزودن یک درصد نانو اکسید روی به فیلم پلی‌لاکتیک‌اسید/نانوکریستال سلولز اثر معناداری بر استحکام کششی نداشت (Yu *et al.*, 2021).

جدول ۲- تجزیه واریانس مربوط به بررسی اثر زمان نگه‌داری و نوع فیلم‌ها بر ویژگی‌های کششی

Table 2- Analysis of variance related to the effect of film type and storage time on tensile properties

منبع Source	F-value		
	استحکام کششی Tensile Strength	مدول الاستیسیته Elastic Modulus	کرنش نقطه شکست Elongation at Break
نوع Type	41.96**	44.37**	29.63**
زمان Time	2.56*	1.84ns	12.18**
نوع×زمان Type ×Time	1.72ns	1.17ns	3.41**

** نشان‌دهنده معناداری در سطح یک درصد، * معناداری در سطح ۵ درصد و ns عدم معناداری

**, *, and ns indicate significance at 1%, 5%, and non-significance, respectively

مدول الاستیسیته، نشان‌دهنده‌ی استحکام ماده در برابر تغییر شکل الاستیک است در نتیجه با کاهش آن احتمال شکست ساختاری پلیمر افزایش می‌یابد (Judawisastra, Claudia, Sasmita, & Toni Agung, 2018). شکل ۷ تغییرات مدول الاستیسیته در فیلم‌های تولیدشده در طی ۱۴ ماه و مقدار گزارش‌شده برای پلی‌اتیلن با چگالی کم را نشان می‌دهد (Kojnokova, Novy, Markovicova, & Liptakova, 2021). اثر زمان بر مدول الاستیسیته در هیچ‌یک از فیلم‌های تولیدشده معنادار نبوده است. یکی از ویژگی‌های بسیار مهم پلی‌لاکتیک‌اسید مدول الاستیسیته بالای آن است. مقدار میانگین مدول الاستیسیته برای پلی‌لاکتیک خالص در ماه‌های اندازه‌گیری‌شده ۲۶۶۰/۶۶ مگاپاسکال بود که حدودا ده برابر مقدار گزارش شده برای پلی‌اتیلن با چگالی کم است. بیشترین مقادیر مدول الاستیسیته برای فیلم پلی‌لاکتیک‌اسید خالص و T80/ZnO به‌دست آمد. فیلم‌های دارای پلی‌اتیلن‌گلیکول ۴۰۰ مقادیر کمتر مدول الاستیسیته را در بین فیلم‌های تولیدشده در تمامی‌ماه‌ها نشان دادند. نتایج یک پژوهش نشان داد که افزودن ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد وزنی نانو ذرات اکسید روی اثر معناداری بر مدول الاستیسیته فیلم‌های پلی‌لاکتیک‌اسید نداشت (Shankar *et al.*, 2018).

همان‌طور که در شکل ۸ مشخص است نمونه‌های P400/ZnO، P400 و P400/T80 به‌ترتیب به‌طور میانگین در طی ۱۴ ماه بیشترین مقادیر کرنش نقطه شکست را داشتند. مقدار استاندارد کرنش نقطه شکست برای پلی‌اتیلن با چگالی کم ۲۲۵ درصد است که بسیار بیشتر از تمامی مقادیر به‌دست‌آمده برای فیلم‌های تولیدشده است (ASTM, 2008). ساختار شیمیایی پلی‌اتیلن با چگالی کم به‌صورت زنجیرهایی با شاخه‌های فرعی فراوان است که منجر به انعطاف‌پذیری آن می‌شود اما پلی‌لاکتیک‌اسید دارای زنجیره‌های خطی است (Kim *et al.*, 2019). بیشترین مقدار این پارامتر برای فیلم P400/ZnO در ماه اول به‌دست آمد که برابر با ۷۶/۸۲ درصد بوده است که این مقدار ۳۴ درصد مقدار پلی‌اتیلن با چگالی کم است. مقدار میانگین کرنش نقطه شکست در طی ۱۴ ماه برای پلی‌لاکتیک‌اسید خالص تنها ۱/۳۸ درصد پلی‌اتیلن با چگالی کم است. اختلاف معنادار ناشی از اثر زمان در تمامی فیلم‌ها به‌جز فیلم PLA و P400/T80/ZnO قابل‌مشاهده است یعنی این دو فیلم پایداری ساختاری بهتری در گذر زمان داشته‌اند. نرم‌کننده‌ها پیوندهای بین مولکولی را با پیوندهای هیدروژنی که ضعیف‌تر هستند جایگزین می‌کنند و در نتیجه انعطاف‌پذیری فیلم‌ها را افزایش می‌دهند، با گذشت زمان و تحت تاثیر عوامل مختلف جدایش در پیوندهای ضعیف هیدروژنی رخ می‌دهد. نتیجه این پدیده جدایی فازی است که منجر به تغییر در خواص فیلم‌ها می‌شود (Avolio *et al.*, 2018; Jantrawut *et al.*, 2017).

شکل ٦– تغییرات استحکام کششی در فیلم‌های تولیدشده در طی ۱۴ ماه و مقایسه آن با مقدار استاندارد برای پلی‌اتیلن با چگالی کم؛ حروف متفاوت در هر نوع فیلم نشان‌دهنده اختلاف معنادار ناشی از اثر زمان است.

Fig.6. Changes in the tensile strength of the produced films during 14 months and comparing it with the standard value for LDPE; different letters in each type of film indicate significant differences due to the effect of time ($p<0.05$).

سه رفتار مکانیکی رایج در مواد پلیمری شکنندگی، پلاستیسیته و الاستیسیته است که در منحنی‌های تنش-کرنش قابل‌مشاهده است (Shahid & Gukhool, 2020). پلی‌اتیلن با چگالی کم، پلیمری با شکل‌پذیری[1] بالا است. سازندگان فیلم‌های پلیمری در صنعت بسته‌بندی نیز خواستار رفتاری مشابه در فیلم‌های تولیدی هستند. در واقع فیلم پلیمری مناسب برای بسته‌بندی باید پلاستیک شکل‌پذیر باشد. پلاستیک شکل‌پذیر، پلاستیکی است که ابتدا رفتار کشسانی دارد و سپس با اعمال نیروی بیشتر، رفتار پلاستیک رخ می‌دهد (Sangroniz *et al.*, 2019). شکل ۹ نمودارهای تنش-کرنش مربوط به برخی از نمونه‌های تولیدشده در طی ماه‌های اندازه‌گیری‌شده را نشان می‌دهد. به کمک این نمودارها می‌توان رفتار مکانیکی فیلم‌های پلیمری را با گذر زمان مورد بررسی قرار داد. شکل ۹(۱) نمودار مربوط به فیلم پلی‌لاکتیک‌اسید خالص است که رفتاری شکننده دارد و این رفتار در تمامی ماه‌ها ادامه پیدا کرده است. سطح

1- Ductile

زیر نمودار برای مواد شکننده کوچک است که نشان‌دهنده‌ی انرژی کم موردنیاز برای شکست یا چقرمگی کم است. شکل‌های (۲)۹، (۳)۹، (۴)۹ و (۶)۹ نمودارهای مربوط به فیلم‌هایی است که دارای نرم‌کننده پلی‌اتیلن‌گلیکول ۴۰۰ بوده است. در تمامی این فیلم‌ها شکل‌پذیری تا حدودی وجود دارد و در بازه زمانی اندازه‌گیری‌شده نیز این رفتار حفظ شده است. شکل (۵)۹ نمودار مربوط به فیلم دارای توین ۸۰ به‌عنوان نرم‌کننده و نانواکسید روی به‌عنوان تقویت‌کننده است. در ماه اول، دوم، سوم و چهارم رفتار نمونه‌های مورد بررسی تا حدودی انعطاف‌پذیر بوده اما در ماه چهاردهم رفتار شکننده مشاهده می‌شود. در واقع می‌توان گفت با گذر زمان اثر نرم‌کننده کاهش یافته است. در اکثر نمونه‌های تولیدشده شکل‌پذیری تا حدودی مشاهده شد اما کرنش نقطه شکست با استاندارد فاصله زیادی دارد. در نتیجه می‌توان گفت شکل‌پذیری فیلم‌های تولیدشده کافی نیست. در تولید فیلم‌های پلیمری تغییر شکل دادن بر پارگی فیلم ترجیح داده می‌شود زیرا با تغییر شکل دادن هنوز بسته قابلیت استفاده شدن را دارد (Odian, 2004).

شکل ۷- تغییرات مدول الاستیسیته در فیلم‌های تولیدشده در طی ۱۴ ماه و مقایسه آن با مقدار گزارش‌شده برای پلی‌اتیلن با چگالی کم؛ حروف متفاوت در هر نوع فیلم نشان‌دهنده‌ی اختلاف معنادار ناشی از اثر زمان است.

Fig.7. Changes in the elastic modulus of the produced films during 14 months and comparing it with LDPE; different letters in each type of film indicate significant differences due to the effect of time ($p<0.05$).

شکل ۸– تغییرات کرنش نقطه شکست در فیلم‌های تولیدشده در طی ۱۴ ماه و مقایسه آن با مقدار استاندارد برای پلی‌اتیلن با چگالی کم؛ حروف متفاوت در هر نوع فیلم نشان‌دهنده‌ی اختلاف معنادار ناشی از اثر زمان است.

Fig.8. Changes in the elongation at break of the produced films during 14 months and comparing it with the standard value for LDPE; different letters in each type of film indicate significant differences due to the effect of time ($p<0.05$).

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق معناداری اثر نوع فیلم را بر تمام ویژگی‌های مکانیکی اندازه‌گیری‌شده و اثر زمان نگه‌داری را بر استحکام کششی و کرنش نقطه شکست را نشان داد. به علت اثر عوامل مختلف مانند تغییرات در بافت فیلم به‌دلیل وجود نرم‌کننده‌ها و یا عدم پخش یکنواخت نانو ذرات نمی‌توان روند ثابتی برای تاثیر زمان بر فیلم‌ها مشخص کرد. کرنش نقطه شکست در فیلم پلی‌لاکتیک‌اسید بسیار کمتر از حد استاندارد بود که با توجه به مهم و حساس بودن این پارامتر در بسته‌بندی‌ها، نیاز به بهبود همچنان وجود دارد. پلی‌لاکتیک‌اسید به‌دلیل داشتن استحکام کششی و مدول الاستیسیته بسیار بالا این قابلیت را دارد که با نرم‌کننده‌های مختلف با درصد بیشتر، سایر پلیمرها و یا نانو ذرات ترکیب شود و از این طریق فیلم منعطف‌تری تولید کرد. نمودار تنش–کرنش وجود رفتار شکل‌پذیر در اکثر نمونه‌ها به غیر از فیلم پلی‌لاکتیک اسید خالص و فیلم دارای توین ۸۰ و نانو ذرات را در طی ۱۴ ماه را تایید می‌کند. حضور نرم‌کننده‌ها و نانو ذرات در بستر فیلم باعث افزایش کدورت و محافظت بهتر در برابر اشعه فرابنفش شد. فیلم‌های تولیدی در مقایسه با پلی‌اتیلن با چگالی کم‌آبدوست‌تر بودند.

سپاسگزاری

نویسندگان از حمایت مالی دانشگاه فردوسی مشهد (طرح پژوهشی شماره ۳ با کد ۵۴۰۹۶، تاریخ تصویب ۱۳۹۹/۱۲/۱۳) و از دکتر محمدرضا پژوهی الموتی (دانشیار گروه آموزشی بهداشت و کنترل کیفی مواد غذایی، دانشگاه بوعلی سینا همدان) برای فراهم کردن گرانول‌های پلی‌لاکتیک‌اسید قدردانی می‌کنند.

مشارکت نویسندگان

ندا تجری: جمع‌آوری داده‌ها، پردازش داده‌ها، تحلیل آماری، خدمات نرم‌افزاری، تصویرسازی نتایج، استخراج و تهیه متن اولیه، ویرایش متن

حسن صدرنیا: ویرایش متن، نظارت و مدیریت

فرشته حسینی: ویرایش متن، نظارت و مدیریت

۱- پلی‌لاکتیک‌اسید خالص
1. Neat PLA

۲- پلی‌لاکتیک‌اسید/پلی اتیلن گلیکول ۴۰۰
2. PLA/Polyethylene glycol 400

۳- پلی‌لاکتیک اسید/پلی اتیلن گلیکول ۴۰۰/ توین ۸۰
3. PLA/Polyethylene glycol 400/ Tween 80

۴- پلی‌لاکتیک اسید/پلی اتیلن گلیکول ۴۰۰/ نانو ذرات اکسید روی
4. PLA/Polyethylene glycol 400/ ZnO nanoparticles

۵- پلی‌لاکتیک‌اسید/ توین ۸۰/ نانو ذرات اکسید روی
5. PLA/ Tween 80/ ZnO nanoparticles

۶- پلی‌لاکتیک‌اسید/پلی‌اتیلن‌گلیکول ۴۰۰/ توین ۸۰/نانو ذرات اکسید روی
6. PLA+ Polyethylene glycol 400+ Tween 80+ ZnO nanoparticles

شکل ۹- نمودار تنش-کرنش مربوط به نمونه‌های تولیدشده در طی ۱۴ ماه

Fig.9. Stress-Strain diagram related to production samples during 14 months

References

1. Aktas, C., Polat, O., Beitollahpoor, M., Farzam, M., Pesika, N. S., & Sahiner, N. (2023). Force-Based Characterization of theWetting Properties of LDPE Surfaces Treated with CF_4 and H_2 Plasmas. *Polymers, 15*(9), 2132. https://doi.org/10.3390/polym15092132
2. Arrieta, M. P., Garrido, L., Faba, S., Guarda, A., Galotto, M. J., & Dicastillo, C. L. D. (2020). Cucumis metuliferus Fruit Extract Loaded Acetate Cellulose Coatings for Antioxidant Active Packaging. *Polymers, 12*(6), 1248. https://doi.org/10.3390/polym12061248
3. ASTM. (2008). Standard Specification for Polyethylene Films Made from Low-Density Polyethylene for General Use and Packaging Applications (Vol. D4635– 08a). USA.
4. ASTM. (2010). Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting (Vol. ASTM D882-02). USA.
5. ASTM. (2017). Standard Test Method for Corona-Treated Polymer Films Using Water Contact Angle Measurements (Vol. ASTM D5946-04). USA.
6. Avolio, R., Castaldo, R., Avella, M., Cocca, M., Gentile, G., Fiori, S., & Maria, E. E. (2018). PLA-based plasticized nanocomposites: Effect of polymer/plasticizer/filler interactions on the time evolution of properties. *Composites Part B, 152*, 267-274. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.07.011
7. Bijarimi, M., Ahmad, S., Rasid, R., Khushairi, M. A., & Zakir, M. (2016). *Poly(lactic acid)/ Poly(ethylene glycol) Blends: Mechanical, Thermal And Morphological Properties*. Paper presented at the AIP Conference Proceedings. https://doi.org/10.1063/1.4945957
8. Briassoulis, D., Athanasoulia, I. G., & Tserotas, P. (2022). PHB/PLA plasticized by olive oil and carvacrol solvent-cast films with optimised ductility and physical ageing stability. *Polymer Degradation and Stability, 200*, 1-21. https://10.1016/j.polymdegradstab.2022.109958
9. Caicedo, C., Diaz-Cruz, C. A., Jimenez-Regalado, E. J., & Aguirre-Loredo, R. Y. (2022). Effect of Plasticizer Content on Mechanical and Water Vapor Permeability of Maize Starch/PVOH/Chitosan Composite Films. *Materials, 15*(4), 1274. https://doi:10.3390/ma15041274
10. Chen, P., Xie, F., Tang, F., & McNally, T. (2021). Influence of plasticiser type and nanoclay on the properties of chitosan-based materials. *European Polymer Journal, 144*, 110225. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2020.110225
11. Ching, L. W., Keesan, F. W. M., & Muhamad, I. I. (2022). Optimization of ZnO/GO nanocomposite-loaded polylactic acid active films using response surface methodology. *Journal of King Saud University– Science, 34*(3). https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.101835
12. Falqi, F. H., Bin-Dahman, O. A., Hussain, M., & Al-Harthi, M. A. (2018). Preparation of Miscible PVA/PEG Blends and Effect of Graphene Concentration on Thermal, Crystallization, Morphological, and Mechanical Properties of PVA/PEG (10wt%) Blend. *International Journal of Polymer Science, 2018*. https://doi.org/10.1155/2018/8527693
13. Hanani, Z. A. N., & Husna, A. B. A. (2018). Effect of different types and concentrations of emulsifier on the functional properties of kappa-carrageenan films. *International Journal of Biological Macromolecules, 114*, 710-716. https://doi:10.1016/j.ijbiomac.2018.03.163
14. Haq, M. A., Jafri, F. A., & Hasnain, A. (2016). Effects of plasticizers on sorption and optical properties of gum cordia based edible film. *Journal of Food Science and Technology, 53*, 2606-2613. https://doi:10.1007/s13197-016-2227-7
15. Heydari-Majd, M., Ghanbarzadeh, B., Noghabi, M. S., & Abdolshahi, A. (2020). Poly (lactic acid) based bionanocomposites: effects of ZnO nanoparticles and essential oils on physicochemical properties. *Polymer Bulletin, 79*, 97-119. https://doi.org/10.1007/s00289-020-03490-z
16. Holcapkova, P., Hurajova, A., Kucharczyk, P., Bazant, P., Plachy, T., Miskolczi, N., & Sedlarik, V. (2018). Effect of polyethylene glycol plasticizer on long-term antibacterial activity and the release profile of bacteriocin nisin from polylactide blends. *Polymers for Advanced Technologies, 29*(8), 1-11. https://doi.org/10.1002/pat.4336
17. Irwanto, D., Pidhatika, B., Nurhajati, D. W., & Harjanto, S. (2019). Mechanical properties and crystallinity of linier low density polyethylene based biocomposite film. *Kulit, Karet, dan Plastik, 35*(2), 93-98. https://doi.org/10.20543/mkkp.v35i2.5624
18. Jantrawut, P., Chaiwarit, T., Jantanasakulwong, K., Brachais, C. H., & Chambin, O. (2017). Effect of Plasticizer Type on Tensile Property and In Vitro Indomethacin Release of Thin Films Based on Low-Methoxyl Pectin. *Polymers, 9*(7), 289. https://doi.org/10.3390/polym9070289
19. Jr, A. E., Gross, I. P., Saatkamp, R. H., Pires, A. T. N., & Parize, A. L. (2020). Evaluation of mechanical, thermal and morphological properties of PLA films plasticized with maleic acid and its propyl ester derivatives. *Polymer Testing, 88*. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106552
20. Judawisastra, H., Claudia, Sasmita, F., & Toni Agung, P. (2018). Elastic Modulus Determination of Thermoplastic Polymers with Pulse-Echo Method Ultrasonic Testing. *Materials Science and Engineering, 547*, 012047.

https://doi:10.1088/1757-899X/547/1/012047
21. Khoirunnisa, A. R., Joni, I. M., Panatarani, C., Rochima, E., & Praseptiangga, D. (2018). *UV-Screening, Transparency and Water Barrier Properties of Semi Refined Iota Carrageenan Packaging Film Incorporated with ZnO Nanoparticles*. Paper presented at the AIP Conference Proceedings. https://doi.org/10.1063/1.5021234
22. Kim, I., Viswanathan, K., Kasi, G., Sadeghi, K., Thanakkasaranee, S., & Seo, J. (2019). Poly (Lactic Acid)/ZnO Bionanocomposite Films with Positively Charged ZnO as Potential Antimicrobial Food Packaging Materials. *Polymers, 11*(9), 1-17. https://doi.org/10.3390/polym11091427
23. Kojnokova, T., Novy, F., Markovicova, L., & Liptakova, T. (2021). Changes of mechanical properties of protective polyethylene films applied in transport bottles and containers for liquid media after exposure to selected liquid media. *Transportation Research Procedia, 55*, 731-736. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.041
24. Li, Y., Li, W., Deng, Y., Shao, J., Ma, J., & Kou, H. (2019). Theoretical model for the tensile strength of polymer materials considering the effects of temperature and particle content. *Materials Research Express, 6*. https://doi.org/10.1088/2053-1591/aae91b
25. Lizundia, E., Ortellado, M. C. P., Guinault, A., Vilas, J. L., & Domenek, S. (2019). Impact of ZnO nanoparticle morphology on relaxation and transport properties of PLA nanocomposites. *Polymer Testing, 75*, 175-184. https://doi:10.1016/j.polymertesting.2019.02.009
26. Luangtana-Anan, M., Nunthanid, J., & Limmatvapirat, S. (2010). Effect of Molecular Weight and Concentration of Polyethylene Glycol on Physicochemical Properties and Stability of Shellac Film. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 58*, 12934-12940. https://doi:10.1021/jf1031026
27. Odian, G. (2004). *Principles pf polymerization* (4 ed.). New York: John Wiley & Sons.
28. Pillai, S. K., Sivakumar, D., Ray, S. S., Obianom, P., Eggers, S., & Mhlabeni, T. (2020). *Active nanocomposite films based on low density polyethylene/organically modified layered double hydroxides/thyme oil to retain retail shelf life and quality of Hass avocados*. Paper presented at the AIP Conference Proceedings. https://doi.org/10.1063/5.0029459
29. Rahman, M. M., Islam, M. S., & Li, G. S. (2018). Development of PLA/CS/ZnO nanocomposites and optimization its mechanical, thermal and water absorption properties. *Polymer Testing, 68*, 302-308. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.04.026
30. Ruz-Cruz, M. A., Herrera-Franco, P. J., Flores-Johnson, E. A., Moreno-Chulim, M. V., Galera-Manzano, L. M., & Valadez-Gonzalez, A. (2022). Thermal and mechanical properties of PLA-based multiscale cellulosic biocomposites. *Journal of Materials Research and Technology, 18*, 485-495. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.02.072
31. Salunkhe, S. R. (2018). Study of Contact Angle and Surface Energy of CuS Thin Film. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 05*(20), 1930-1933.
32. Sangroniz, A., Zhu, J. B., Tang, X., Etxeberria, A., Chen, E. Y. X., & Sardon, H. (2019). Packaging materials with desired mechanical and barrier properties and full chemical recyclability. *NATURE COMMUNICATIONS, 10*. https://doi.org/10.1038/s41467-019-11525-x
33. Shahid, S., & Gukhool, W. (2020). *Experimental Testing and Material Modeling of Anisotropy in Injection Moulded Polymer Materials.* (Master), Blekinge Institute of Technology, Karlskrona, Sweden. https://doi:10.13140/RG.2.2.12587.87846
34. Shankar, S., & Rhim, J. W. (2019). Effect of types of zinc oxide nanoparticles on structural, mechanical and antibacterial properties of poly(lactide)/poly(butylene adipate-coterephthalate) composite films. *Food Packaging and Shelf Life, 21*. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100327
35. Shankar, S., Wang, L. F., & Rhim, J. W. (2018). Incorporation of zinc oxide nanoparticles improved the mechanical, water vapor barrier, UV-light barrier, and antibacterial properties of PLA-based nanocomposite films. *Materials Science & Engineering C, 93*, 289-298. https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.08.002
36. Sharma, S., Jaiswal, A. K., Duffy, B., & Jaiswal, S. (2020). Ferulic acid incorporated active films based on poly(lactide) /poly(butylene adipate-co-terephthalate) blend for food packaging. *Food Packaging and Shelf Life, 24*. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100491
37. Sharma, S., Singh, A. A., Majumdar, A., & Butola, B. S. (2019). Tailoring the mechanical and thermal properties of polylactic acid-based bionanocomposite films using halloysite nanotubes and polyethylene glycol by solvent casting process. *Journal of Materials Science, 54*(12), 8971-8983. https://doi:10.1007/s10853-019-03521-9
38. Sin, L. T., & Tueen, B. S. (2019). Mechanical Properties of Poly(Lactic Acid). In L. T. Sin & B. S. Tueen (Eds.), *Polylactic Acid; A Practical Guide for the Processing, Manufacturing, and Applications of PLA* (Second Edition ed., pp. 167_202): William Andrew Publishing. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814472-5.00005-4
39. Speight, J. G. (2020). Monomers, polymers, and plastics *Handbook of Industrial Hydrocarbon Processes.* (pp. 499-537). United States: Gulf Professional Publishing. https://doi.org/10.1016/C2015-0-06314-6
40. Szlachetka, O., Witkowska-Dobrev, J., Baryła, A., & Dohojda, M. (2021). Low-density polyethylene (LDPE) building films – Tensile properties and surface morphology. *Journal of Building Engineering, 44*, 103386. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103386

41. Yu, F., Fei, X., He, Y., & Li, H. (2021). Poly(lactic acid)-based composite film reinforced with acetylated cellulose nanocrystals and ZnO nanoparticles for active food packaging. *International Journal of Biological Macromolecules*, *186*, 770-779. https://doi:10.1016/j.ijbiomac.2021.07.097
42. Yuan, H., Li, T., Wang, Y., Ma, P., Du, M., Liu, T., ..., & Dong, W. (2020). Photoprotective and multifunctional polymer film with excellent near-infrared and UV shielding properties. *Composites Communications*, *22*. https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100443

Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 14, No. 3, 2024, p. 301-318

Evaluation of Rice Mechanization Supply Chain Indicators with SCOR Model Approach

M. Zangeneh[1*], N. Banaeian[1]

1- Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran
(*- Corresponding Author Email: zanganeh@guilan.ac.ir)

Received: 19 April 2023 Revised: 06 August 2023 Accepted: 19 August 2023 Available Online: 01 September 2024	**How to cite this article:** Zangeneh, M., & Banaeian, N. (2024). Evaluation of Rice Mechanization Supply Chain Indicators with SCOR Model Approach. *Journal of Agricultural Machinery*, *14*(3), 301-318. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.2023.82005.1163

Introduction

Agricultural mechanization plays a crucial role in driving agricultural development and is considered one of the most capital-intensive inputs in the agricultural sector. Effective supply chain management is a crucial necessity for improving the quality of agricultural machinery and reducing operational expenses in agricultural mechanization. This is imperative for the advancement of agricultural mechanization. The present research aims to identify the primary structures of the supply chain for rice agricultural machinery in the provinces of Gilan and Mazandaran in Iran. The study also examined the important functional aspects of the chain members, including manufacturers, importers, retailers, and farmers who serve as the ultimate consumers of the chain's products. Furthermore, the research delved into the processes that govern the supply chain.

Materials and Methods

Measuring supply chain performance involves utilizing the Supply Chain Operations Reference model (SCOR) with five distinct dimensions: cost (12 questions), responsiveness (22 questions), flexibility (16 questions), assets (13 questions), and reliability (30 questions). The study data were analyzed using SPSS software. Additionally, latent variables were generated at each level of the hierarchy by using the variables from the aforementioned model. The normality of the variables was assessed using the Kolmogorov-Smirnov test. The evaluation of normal variables was conducted through a one-sample t-test, while abnormal variables were evaluated with a one-sample Wilcoxon test. Furthermore, descriptive analysis of the expectations and constraints of manufacturers and importers regarding rice machines was carried out.

Results and Discussion

The Wilcoxon test results indicate the impact of commitment, cost management, and communication on the average test value. The variables of normal distribution such as human resource management, quality management, strategic organization, flexibility, responsiveness, performance, and reliability in stores, exhibit significant deviation from the mean value. The majority of store managers and agricultural rice machinery dealers lack formal education in the field of agricultural machinery. Including individuals with educational backgrounds in agricultural machinery at various stages of the supply chain will likely improve the dissemination of information throughout the chain. Employing dependable techniques for transmitting accurate information regarding consumers' quality requirements can assist suppliers in manufacturing or importing superior-quality machinery. This approach not only minimizes uncertainty in the supply chain and streamlines inventory management but also reduces the lead time for meeting consumer demands.

Conclusion

©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).

https://doi.org/10.22067/jam.2023.82005.1163

The continuous demand for rice agricultural machinery in Iran has resulted in the bullwhip effect phenomenon being perceived as a less significant challenge in the supply chain. Currently, local manufacturing enterprises have relatively limited knowledge regarding the market and technical needs of rice farmers compared to their foreign counterparts. It is advisable for manufacturing companies to broaden their comprehension of consumer behavior and needs by diversifying their market evaluation techniques.

Keywords: Importers, Manufacturers, Retailers, Supply chain

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۱٤، شماره ۳، پاییز ۱٤۰۳، ص ۳۱۸-۳۰۱

ارزیابی شاخص‌های زنجیره تأمین مکانیزاسیون برنج با رویکرد مدل اسکور

مرتضی زنگنه[1*]، نرگس بنائیان[1]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۳۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۸

چکیده

مکانیزاسیون کشاورزی موتور پیشران توسعه کشاورزی و یکی از سرمایه‌برترین نهاده‌های بخش کشاورزی است که توسعه آن مستلزم صرف هزینه زیاد و اختصاص اعتبارات کلان است. مدیریت صحیح زنجیره تأمین مکانیزاسیون کشاورزی در راستای کاهش هزینه‌های عملیاتی و افزایش کیفیت ماشین‌های کشاورزی یکی از الزامات توسعه مکانیزاسیون کشاورزی است. پژوهش حاضر به سنجش عملکرد زنجیره تأمین مکانیزاسیون برنج با استفاده از پنج بعد هزینه، پاسخگویی، انعطاف‌پذیری، دارایی و قابلیت اطمینان پرداخته است. علاوه بر این در هر یک از سطوح زنجیره، متغیرهای مکنون دیگری با استفاده از متغیرهای مدل مرجع عملیات زنجیره تأمین (اسکور) ساخته شد. نرمال بودن متغیرهای مکنون توسط آزمون کولموگروف سمیرنوف آزمون شد. متغیرهای نرمال با استفاده از آزمون t تک نمونه‌ای و متغیرهای غیرنرمال با استفاده از آزمون ویلکاکسون تک نمونه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج آزمون ویلکاکسون نشان می‌دهد که متغیرهای تعهد، مدیریت هزینه و ارتباط در خرده‌فروشی تفاوت معنی‌داری با مقدار متوسط آزمون دارند. در مورد متغیرهای دارای توزیع نرمال، مدیریت منابع انسانی، مدیریت کیفیت، داشتن راهبرد و سازمان‌دهی، انعطاف‌پذیری، پاسخ‌گویی، عملکرد و قابلیت اطمینان در فروشگاه‌ها دارای تفاوت معنی‌داری با مقدار متوسط هستند. همچنین انتظارات و محدودیت‌های سازندگان و واردکنندگان ماشین‌های برنج نیز به‌صورت توصیفی تحلیل شد. در مورد متغیرهای دارای توزیع نرمال، مدیریت منابع انسانی، مدیریت کیفیت، داشتن راهبرد و سازمان‌دهی، انعطاف‌پذیری، پاسخ‌گویی، عملکرد و قابلیت اطمینان در فروشگاه‌ها دارای تفاوت معنی‌دار با مقدار متوسط هستند. همچنین انتظارات و محدودیت‌های سازندگان و واردکنندگان ماشین‌های برنج نیز به‌صورت توصیفی مورد تحلیل قرار گرفت.

واژه‌های کلیدی: خرده‌فروش، زنجیره تأمین، سازندگان، واردکنندگان

مقدمه

زنجیره تأمین شبکه‌ای از تسهیلات و امکانات است که فعالیت‌هایی نظیر تهیه مواد اولیه، تبدیل این مواد به محصولات و توزیع آن‌ها به مشتریان را بر عهده دارد. مدیریت زنجیره تأمین شامل هماهنگ ساختن تولید، موجودی و حمل‌ونقل بین اجزای یک زنجیره تأمین است تا بهترین ترکیب ممکن از پاسخگویی و کارایی را برای اجزای زنجیره به دنبال داشته باشد (Shojaee, 2016). زنجیره تأمین از سه زیرمجموعه زیر تشکیل‌شده است: (۱) زنجیره تأمین بالادست: این بخش شامل تأمین‌کنندگان اولیه که خودشان می‌توانند مونتاژکننده یا سازنده باشند، است. فعالیت‌های اصلی این قسمت محدود به خرید و حمل است؛ (۲) زنجیره تأمین داخلی: این بخش شامل همه پردازش‌ها در تبدیل مواد حمل‌شده توسط تأمین‌کنندگان به محصول خروجی است. فعالیت‌ها در این مرحله شامل حمل مواد، مدیریت موجودی، ساخت و کنترل کیفیت است؛ (۳) زنجیره تأمین پایین‌دست: این بخش شامل همه فرآیندهای درگیر در توزیع و تحویل محصولات به مشتریان نهایی است (Azizi, Zargham Brujeni, Ziaei, & Taghavi Fard, 2022). در این مرحله، بسته‌بندی، انبارداری، حمل و فروش فعالیت‌های اصلی را تشکیل می‌دهد. مکانیزاسیون کشاورزی موتور پیشران توسعه کشاورزی و یکی از سرمایه‌برترین نهاده‌های بخش کشاورزی است که توسعه آن مستلزم صرف هزینه زیاد و اختصاص اعتبارات کلان است. مدیریت صحیح زنجیره تأمین مکانیزاسیون کشاورزی در راستای کاهش

۱- گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: zanganeh@guilan.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jam.2023.82005.1163

هزینه‌های عملیاتی و افزایش کیفیت ماشین‌های کشاورزی یکی از الزامات توسعه مکانیزاسیون کشاورزی است.

درگذشته، اکثر شرکت‌های تولیدی، مواد یا قطعات را از عرضه‌کنندگان مختلفی خریداری می‌کردند، بنابراین این شرکت‌ها به عملکرد نامطمئن تک‌تک عرضه‌کنندگان وابسته نبودند. اگر تأمین‌کننده‌ای کالای خود را به‌موقع تحویل نمی‌داد یا کالای بی‌کیفیت تحویل می‌داد و یا به هر دلیل دیگری از چرخه تولید خارج می‌شد، شرکت خریدار تأثیر چندانی از حذف این‌گونه تأمین‌کنندگان نمی‌پذیرفت؛ اما گسترش مفاهیم مربوط به کنترل کیفیت جامع باعث به‌وجود آمدن شیوه جدیدی با نام منبع‌یابی واحد شد. در این روش یک شرکت مواد یا قطعات خود را از تعداد کمی از تأمین‌کنندگان و اغلب تنها از یک تأمین‌کننده خریداری می‌کند. در این روش چنانچه شرکتی سهم عمده‌ای از حجم تجارت یک عرضه‌کننده را داشته باشد، در آن صورت می‌تواند بر کیفیت و زمان تحویل کالای عرضه‌کننده، کنترل بیشتر و دقیق‌تری داشته باشد. در مورد زنجیره تأمین فناوری‌های مکانیزه ایران به دلیل تعدد بسیار زیاد تأمین‌کنندگان ماشین‌های کشاورزی اعم از تولیدکنندگان داخلی و واردکنندگان، شرایط متفاوت است. اغلب شرکت‌های فعال در بازار مکانیزاسیون ایران، فاقد نمایندگی در تمام سطح کشور هستند و تأمین قطعات و خدمات پس از فروش وضعیت بسیار بغرنجی دارد. تعدد رقبای تأمین‌کننده ماشین‌های کشاورزی باعث کاهش حجم تجارت انفرادی هر یک از شرکت‌های فعال‌شده است که درنتیجه آن، توجیه اقتصادی برای تأمین خدمات پس از فروش از بین رفته است. این مسئله آسیب زیادی در دریافت خدمات پس از فروش به خریداران که اغلب با دریافت تسهیلات بانکی اقدام به خرید این محصولات می‌کنند، وارد کرده است.

ارزیابی عملکرد، فرآیند کمی‌سازی کارایی و اثربخشی فعالیت‌هاست. اثربخشی، شرایطی است که نیازمندی‌های مشتری در آن برآورده می‌شود و کارایی از طریق ارزیابی میزان اقتصادی بودن استفاده از منابع برای دستیابی به میزان مشخصی از رضایت مشتری به‌دست می‌آید. به‌منظور اندازه‌گیری میزان اطمینان از مشتری و مقدار پیشرفت مجموعه، سازمان‌ها همواره نیازمند اندازه‌گیری عملکرد خود هستند. سازمان‌ها بایستی فرآیند خود را درک کنند و بدانند در چه نقاطی نیاز به بهبود دارند، چه تصمیماتی عینی و کدام‌یک ذهنی هستند و اگر اقدامات بهبودی برنامه‌ریزی شد، واقعاً اجرایی و محقق شوند (Parker, 2000). در این راستا استفاده از ابزار مناسب و داشتن مقیاس عملکردی صحیح این امکان را برای سازمان فراهم می‌کند که موقعیت عملکردی خود را در مقایسه با دامنه عملکردی سایر رقبا بسنجد (Shahbandarzadeh & Abadi, 2016). بنابراین مهم‌ترین هدف اندازه‌گیری عملکرد یک زنجیره تأمین، ارزیابی، کنترل و بهبود فرآیندهای عملیاتی در زنجیره است.

به‌منظور بهبود کارایی در یک زنجیره تأمین، مطالعات مربوط به اندازه‌گیری و ارتقای کارایی بایستی در هر یک از مراحل زنجیره انجام شود اما برای موفقیت یک زنجیره تأمین، بهتر است تمام اجزای زنجیره تأمین، در جلب رضایت مصرف‌کننده به‌عنوان مهم‌ترین هدف مشترک زنجیره مشارکت داشته باشند. جلب رضایت مصرف‌کننده ضامن دستیابی به هدف غایی زنجیره یعنی بیشینه‌سازی سود برای تک‌تک مراحل زنجیره است. یک برنامه اندازه‌گیری کارایی زنجیره تأمین باید جامعیت داشته باشد؛ به جنبه‌های مهم کارایی در هر یک از ارتباطات بین اعضای زنجیره توجه داشته باشد؛ و برای نیازمندی‌های متفاوت اعضای زنجیره مناسب باشد (Gunasekaran, Patel & Tirtiroglu, 2001). یک برنامه خوب مدیریت زنجیره تأمین، فرآیند برنامه‌ریزی و کنترل کارکرد متقابل بهبودیافته و درون‌سازمانی و همچنین یکپارچه‌سازی زنجیره تأمین را به ارمغان خواهد آورد (Gunasekaran, Patel & McGaughey, 2004). با بررسی نتایج سنجش کارایی زنجیره تأمین کشاورزی، طرح‌ریزی‌هایی برای بهبودهای آتی زنجیره می‌توان انجام داد و به‌تبع آن اقدامات لازم صورت خواهد گرفت.

کیفیت، ایمنی، پایداری و بهره‌وری شاخص‌های اصلی و کلیدی کارایی را تشکیل می‌دهند و محرک‌های اتحاد و یکپارچه‌سازی عناصر یک زنجیره تأمین محصولات کشاورزی و غذایی از مزرعه تا مصرف‌کننده نهایی هستند (Manzini & Accorsi, 2013). در زمینه اندازه‌گیری کارایی زنجیره تأمین مطالعات، نظریه‌ها و روش‌های متنوعی در منابع ارائه‌شده است که کارت امتیازی متوازن[1] (Bhagwat & Sharma, 2007; Shafiee, Hosseinzadeh Lotfi, & Saleh, 2014)، مدل مرجع عملیات زنجیره تأمین[2] (مدل اسکور) (Grover, Agrawal, & Khan, 2006)، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی[3] (Shojaee, 2016) و تحلیل پوششی داده‌ها[4] (Olfat, BamdadSoofi, Amiri, & Azbari, 2012) از جمله آن‌ها هستند. مدل مرجع عملیات زنجیره تأمین در سال ۱۹۹۶ معرفی شد (Beamon, 1999). سنجه‌های عملکرد را می‌توان به دو گروه کمی و کیفی که به‌ترتیب شامل رضایت‌مندی مشتریان، پاسخ‌گویی، انعطاف‌پذیری، عملکرد تأمین‌کننده، هزینه و سایر اجزای کارایی مدل‌سازی زنجیره تأمین می‌شود، تقسیم کرد. در تحقیق دیگری یک چارچوب برای تعیین عملکرد زنجیره تأمین بر اساس سطوح راهبردی، تاکتیکی و عملیاتی پیشنهاد شد که شامل تحویل تأمین‌کننده، خدمات مشتری، هزینه انبارداری و لجستیک است (Gunasekaran &

1- Balanced Scorecard
2- Supply Chain Operations Reference model (SCOR)
3- Analytical Hierarchy process (AHP)
4- Data Envelopment Analysis

(Kobu, 2007). علاوه بر این مطالعات، مطالعات مشابه دیگری نیز وجود دارد که گروه‌های متنوعی از سنجه‌ها را برای سنجش عملکرد زنجیره تأمین مورد استفاده قرار دادند. از حیث روش نیز می‌توان به مطالعاتی اشاره کرد که از روش‌های آماری و یا روش‌های تحلیلی مانند AHP و ANP[1] برای ارزیابی عملکرد زنجیره تأمین استفاده کرده‌اند (Bhagwat & Sharma, 2007; Milind Kumar & Rajat, 2007). در پژوهشی از کارت امتیازی متوازن به‌منظور اندازه‌گیری و ارزیابی عملیات تجاری روزانه از چهار دیدگاه مختلف استفاده شد. در این پژوهش پیشنهاد شد که یک کارت امتیازی مدیریت زنجیره تأمین متوازن، می‌تواند پایه‌ای برای یک سامانه مدیریت زنجیره تأمین راهبردی باشد به‌شرط آن‌که دستورالعمل‌های توسعه به‌طور صحیح دنبال شود، معیارهای مناسب ارزیابی شود و بر موانع کلیدی غلبه شود (Bhagwat & Sharma 2007). در مطالعه دیگری یک روش بر پایه نظریه گراف‌های دوگانه به‌منظور حمایت از چارچوب سنجش کارایی و بهبود زنجیره سرد توسعه داده شد (Joshi, Banwet, Shankar, & Ganhdi, 2012). چارچوب پیشنهادشده در تحقیق فوق همراه با تحلیل حساسیت، توانست به تصمیم گیران در کمی کردن شاخص کارایی و همچنین درک ارتباطات پیچیده در میان ویژگی‌های زنجیره سرد یاری رساند. نظریه گراف، به‌عنوان ابزاری توانا در پژوهش عملیاتی ترکیبی، شبکه حمل‌ونقل، مدل‌سازی و تحلیل انواع مختلفی از سامانه‌ها در شاخه‌های مختلفی از علوم و مهندسی شناخته‌شده است (Faisal, Banwet, & Shankar, 2007; Grover *et al.*, 2006; Joshi *et al.*, 2012; Rao & Padmanabhan, 2007). سنجه‌هایی که قبلاً به‌صورت گسترده در منابع مورداستفاده قرار می‌گرفت معمولاً بر هزینه متمرکز بودند (Ballou, Gilbert, & Mukherjee, 2000; Ellram, Zsidisin,, Siferd, & Stanly, 2002). عدم انعطاف‌پذیری و یکپارچگی معیارهای بر پایه هزینه با انواع راهبردهای زنجیره تأمین باعث شد تا محققان به یافتن سنجه‌های حاوی جنبه‌های کمی و کیفی بپردازند. اگرچه تلاش‌های زیادی برای بهبود سنجه‌های ارزیابی زنجیره تأمین صورت گرفته است اما هنوز هم محدودیت‌هایی در این زمینه وجود دارد. فقدان معیارها و روش‌های اندازه‌گیری معتبر برای تجمیع سنجه‌های مختلف در یک شاخص یکی از این مشکلات است (Shafiee *et al.*, 2014). همچنین معیار یکپارچه‌ای برای اندازه‌گیری عملکرد کلی زنجیره تأمین که بتواند عملکرد زنجیره‌های مختلف را باهم مقایسه کند وجود ندارد. ازجمله مقالاتی که از مدل مراجع عملیات زنجیره تأمین استفاده کردند می‌توان به پژوهش گیاناکیس (Giannakis, 2011) که آن را برای اندازه‌گیری کارایی مدیریت زنجیره تأمین توسعه دادند اشاره کرد. مدل مرجع عملیات زنجیره تأمین یک ابزار عیب‌یاب است که به مدیران به‌منظور طراحی و مدیریت فرآیندهای زنجیره تأمین یک سازمان در سطوح مدیریت راهبردی و عملیاتی یاری می‌رساند. در پژوهش دیگری یک مدل جامع به‌منظور برنامه‌ریزی اقدامات بهبوددهنده برای تقویت کارایی تأمین‌کننده‌ها توسعه داده شد (Yang, 2010). به‌هرحال ارتقای کارایی یک جنبه جدایی‌ناپذیر از مدیریت است که نیازمند یک روش سامان‌مند برای کمک به مدیران است. باوجود مطالعات زیاد در زمینه انتخاب و به‌کارگیری سنجه‌های ارزیابی عملکرد زنجیره تأمین به دلیل تنوع صنایع و تفاوت ماهوی آن‌ها هنوز نیاز به مطالعات جدید برای یافتن سنجه‌های مناسب زنجیره‌های تأمین احساس می‌شود (Shafiee *et al.*, 2014). بهبود کارایی در بخش کشاورزی موضوعی بسیار مهم، به‌ویژه در کشورهای درحال‌توسعه است (Singbo, Lansink, & Emvalomatis, 2014). تولیدکنندگان در هر یک از مناطق در روش تولید خود با دیگران متفاوت هستند بنابراین راهبردهای ارتقا و بهبود کارایی باید برای هر یک به‌طور خاص باشد. تمام تلاش راهبردهای بهبود در همه بخش‌های تولیدی و خدمات معطوف به توسعه بهره‌وری است. برخی مقالات به‌منظور توسعه چنین راهبردهایی در ابتدا تصویر جامعی از وضعیت بهره‌وری در سامانه کشاورزی موردمطالعه ایجاد کردند مانند سوئینن و رانکن (Swinnen & Vranken, 2010) که چهار گروه از شاخص‌های کارایی را تحلیل کردند: راندمان نیروی کار (ستانده به‌ازای هر واحد زمین)، عملکرد محصول (ستانده به‌ازای هر واحد زمین)، مجموع بهره‌وری کل عوامل تولید و بهره‌وری کل عوامل تولید بر پایه داده‌های خُرد. در پژوهش دیگری، یک چارچوب تحلیلی تدوین شد که کارایی مالی، بهره‌وری، قیمت و محدودیت ظرفیت را در صنایع صیادی و معدن در نظر گرفت (Grifell-Tatje & Lovell, 2014). شجاعی (Shojaee, 2016) در پژوهشی برای بررسی عوامل مؤثر بر بهبود عملکرد مدیریت زنجیره تأمین از روش تحلیل سلسله مراتبی استفاده کرد. نتایج این مطالعه نشان داد که مدیریت اطلاعات بیشترین تأثیر را در بهبود عملکرد مدیریت زنجیره تأمین در صنایع غذایی دارد. مدیریت لجستیک و مدیریت روابط به‌ترتیب در رده‌های دوم و سوم اهمیت قرار گرفتند.

ازآن‌جا که تعداد قطعات تشکیل‌دهنده تراکتور و ماشین‌های کشاورزی بسیار زیاد است، قیمت، کیفیت و تحویل یک ماشین کشاورزی به‌طور قابل‌توجهی به اجزای آن و به‌تبع به کیفیت و کارایی همه اعضای موجود در زنجیره تأمین وابسته است. صنعت ماشین‌های کشاورزی تشابه بسیار زیادی به صنعت خودرو دارد. به دلیل اهمیت صنعت خودرو، مطالعات زیادی در زمینه زنجیره تأمین این صنعت صورت گرفته است. ازاین‌رو صنعت خودرو یکی از فعال‌ترین صنایع در زمینه توسعه زنجیره تأمین است.

در پژوهش حاضر، ساختارهای اصلی زنجیره تأمین ماشین‌های

1- Analytical Network Process

کشاورزی برنج در استان گیلان و مازندران موردشناسایی قرار گرفت و مهم‌ترین ابعاد عملکردی اعضای زنجیره شامل سازندگان، واردکنندگان و خرده فروشان و همچنین کشاورزان به‌عنوان مصرف‌کننده نهایی محصولات زنجیره و فرآیندهای حاکم بر آن بررسی شد.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و از نظر ماهیت روش تحقیق، توصیفی-پیمایشی-تحلیلی محسوب می‌شود. جامعه آماری این پژوهش نمایندگی‌های فروش ماشین‌های کشاورزی و کشاورزان برنج در استان‌های گیلان و مازندران هستند که به‌عنوان حلقه آخر زنجیره تأمین محسوب می‌شوند. مراحل روش تحقیق در شکل ۱ نشان داده شده است. این تحقیق در دو مرحله اصلی انجام شد. مرحله اول شامل طراحی و جمع‌آوری داده‌های مربوط به متغیرهای مدل مرجع عملیات زنجیره تأمین از سطح خرده‌فروشی‌ها و مصرف‌کنندگان ماشین‌های کشاورزی بود. در این تحقیق به دلیل پایین بودن حجم جامعه فروشگاه‌های مورد مطالعه، تعداد ۱۸ پرسشنامه مورد بررسی قرار گرفت. همچنین به‌منظور ارزیابی نظرات کشاورزان برنج‌کار در مورد فرآیند خرید ماشین‌های کشاورزی، تعداد ۱۷۰ نفر از آن‌ها مورد مصاحبه قرار گرفتند. تعداد نمونه به روش کوکران[1] محاسبه شد. پرسشنامه سازندگان ۵ مورد و واردکنندگان ۹ مورد بود. پرسشنامه استفاده‌شده برای جمع‌آوری داده‌های مدل مرجع عملیات زنجیره تأمین فروشندگان شامل پنج بخش و ۹۳ گویه است. برخی از گویه‌ها به‌صورت پرسش باز مطرح‌شده ولی پاسخ سایر گویه‌ها که درصد بیشتری از کل گویه‌ها را به خود اختصاص می‌دهد با استفاده از مقیاس ترتیبی لیکرت هفت‌گانه از بسیار کم تا بسیار زیاد جمع‌آوری شده است. برای سنجش سازه ابزار اندازه‌گیری عملکرد زنجیره تأمین در نمایندگی‌های فروش ماشین‌های برنج از ابعاد مدل اسکور یا مدل مرجع عملیات زنجیره تأمین که شامل پنج بعد هزینه (۱۲ گویه)، پاسخگویی (۲۲ گویه)، انعطاف‌پذیری (۱۶ گویه)، دارایی (۱۳ گویه) و هماهنگی و یکپارچگی (۳۰ گویه) است استفاده شد. در این تحقیق داده‌های جمع‌آوری‌شده با استفاده از نرم‌افزار SPSS مورد تحلیل قرار گرفت. پرسشنامه فروشگاه‌ها و نمایندگی‌های فروش به روش مصاحبه حضوری تکمیل شد. پرسشنامه مربوط به کشاورزان ۲۴ گویه داشت که به‌صورت حضوری و عمدتاً تلفنی تکمیل شد. پرسشنامه پس از جمع‌آوری پرسشنامه‌ها برای ارزیابی پایایی گویه‌های پرسشنامه از ضریب آلفای کرون باخ استفاده شد. به‌عنوان یک قاعده کلی، حدنصاب لازم برای شاخص آلفای کرون باخ ۰/۷ است. چنانچه مقدار ضریب آلفا بزرگ‌تر یا مساوی این مقدار باشد می‌توان نتیجه گرفت که ابزار اندازه‌گیری از پایایی مناسب برخوردار است (Zanganeh, Banaeian, Payman, & Khani, 2019).

با استفاده از نرم‌افزار SPSS میزان ضریب اعتماد با روش آلفای کرون باخ محاسبه شد. مقدار آلفا برای متغیرهای تحقیق در پرسشنامه‌های مختلف در جدول ۱ آورده شده است. بر اساس این نتایج می‌توان نتیجه گرفت که گویه‌های تمامی پرسشنامه‌ها از پایایی لازم برخوردار هستند.

بر اساس بررسی‌های انجام‌شده در تحقیق حاضر، زنجیره تأمین ماشین‌های کشاورزی برنج در استان‌های گیلان و مازندران به‌طورکلی از سه مرحله اصلی تشکیل‌شده است: (۱) تأمین‌کنندگان: شامل سازندگان و واردکنندگان، (۲) خرده‌فروشان: شامل فروشگاه‌ها، نمایندگی‌های فروش و نمایشگاه‌های سالانه که در آن معمولاً تأمین‌کنندگان به‌صورت مستقیم اقدام به عرضه ماشین‌های کشاورزی می‌کنند، (۳) کشاورزان که به‌عنوان مصرف‌کننده نهایی محسوب می‌شوند. به طور کلی سازندگان و واردکنندگان ماشین‌های کشاورزی محصولات خود را از سه روش به دست کشاورزان می‌رسانند که عبارت است از: فروشگاه‌ها و نمایندگی‌های فروش، نمایشگاه‌های سالانه، ارسال مستقیم به کشاورزان.

در بخش دوم تحقیق، تعدادی متغیر مکنون یا پنهان که به‌صورت مستقیم قابل‌اندازه‌گیری نبودند با استفاده از متغیرهای اندازه‌گیری شده (۹۳ گویه) ساخته شد تا ابعاد دیگری از وضعیت مدیریت زنجیره تأمین ماشین‌های برنج مورد بررسی قرار گیرد. به‌طور کلی از نظر قابلیت اندازه‌گیری، متغیرها به دو نوع مشاهده‌پذیر[2] و متغیر مکنون یا پنهان[3] تقسیم می‌شوند. منظور از متغیر مشاهده‌پذیر متغیرهایی هستند که به‌صورت مستقیم قابل‌اندازه‌گیری هستند (مانند هزینه، سود، حقوق، زمان تحویل و غیره). در حالی‌که متغیرهای پنهان یا مکنون به‌صورت مستقیم قابل‌اندازه‌گیری نیستند (مانند رضایت‌مندی، وفاداری، تعهد و غیره). بسیاری از متغیرهایی که در علوم انسانی و مدیریت استفاده می‌شوند از جنس متغیرهای پنهان هستند. از آن‌جایی که این‌گونه متغیرها به‌صورت مستقیم قابل‌اندازه‌گیری نیستند به‌صورت غیرمستقیم اندازه‌گیری می‌شوند. برای این کار از چند متغیر مشاهده‌پذیر استفاده می‌شود. به‌عنوان مثال در تحقیق حاضر از بین ۹۳ گویه اندازه‌گیری‌شده، گویه‌های مرتبط با متغیر پنهان تولید ناب یا داشتن تعهد استفاده می‌شود تا بدین‌وسیله مفهوم زنجیره تأمین مورد مطالعه از زوایای مختلف لمس و بررسی شود. این سؤالات به‌عنوان آیتم‌ها یا نشانگرهای متغیر پنهان نیز شناخته می‌شوند. در واقع از آن‌جایی‌که هیچ‌کدام از این گویه‌ها کامل و بی‌عیب نیستند، با استفاده

1- Cochran's sampling method

2- Observed variable

3- Latent variable

از چندین گویه ضمن کاهش خطای اندازه‌گیری، پایایی اندازه‌گیری متغیر مکنون افزایش داده می‌شود.

جدول ۱- مقدار آلفای کرون باخ پرسشنامه مدل مرجع عملیات زنجیره تأمین

Table 1- Cronbach's alpha value of supply chain operation for the reference model questionnaire

نوع پرسشنامه Questionnaire type	تعداد سؤالات پرسشنامه No. of Questions	ضریب آلفای کرونباخ Cronbach's alpha
فروشگاه‌ها و نمایندگی‌های فروش Stores and sales agencies	93	0.940
کشاورزان Farmers	24	0.804

شکل ۱- مراحل تحقیق

Fig.1. Research method

نتایج و بحث

مدیریت زنجیره تأمین جنبه‌های بسیار متعددی را در برمی‌گیرد. نظرات کشاورزان به‌عنوان آخرین مرحله از زنجیره تأمین ارزش زیادی در تحلیل‌ها دارد چرا که تمام تلاش‌های صورت‌گرفته در طول زنجیره تأمین به‌نوعی برای جلب رضایت مصرف‌کننده صورت می‌گیرد. بر اساس نتایج بررسی وضعیت نوسازی ناوگان مکانیزاسیون برنج (شکل ۲) مشخص شد حدود نیمی از کشاورزان استان‌های شمالی ماشین‌های خود را بین ۵ تا ۱۰ سال پس از خرید با ماشین نو جایگزین می‌کنند. سن جایگزینی مکانیزاسیون در محصولات کشاورزی دیگر بسیار بالاتر از این مقدار است. لذا در مقایسه با سایر محصولات کشاورزی، به نظر می‌رسد محصول برنج از حیث نوسازی ناوگان ماشینی وضعیت مناسب و قابل‌قبولی دارد. این موضوع نشان‌دهنده‌ی آن است که بازار ماشین‌های برنج در استان‌های برنج‌خیز کشور از تحرک خوبی برخوردار است. بنابراین نیاز است مدیریت زنجیره تأمین ماشین‌های برنج نیز به نحو احسن اصلاح شود تا عملکرد مناسبی در پاسخ به تقاضای مصرف‌کنندگان داشته باشد.

شکل ۲– درصد فراوانی زمان جایگزینی ماشین‌های فرسوده برنج با ماشین‌های نو توسط کشاورزان

Fig.2. The frequency of the farmers replacing used rice machines with new machines

بر اساس بررسی‌های به‌عمل‌آمده در این تحقیق، کشاورزان برنج هنگام انتخاب ماشین‌های کشاورزی به عوامل قیمت، کیفیت ساخت و قطعات و نام تجاری اهمیت بیشتری نسبت به سایر عوامل می‌دهند (شکل ۳). در این میان نتایج حاکی از آن است که کشاورزان کمترین اهمیت را به توصیه کارشناسان جهاد کشاورزی می‌دهند. این وضعیت نشان‌دهنده‌ی آن است که در این زمینه سازمان جهاد کشاورزی نقش‌آفرینی مناسبی ندارد. کشاورزان به‌عنوان آخرین عضو زنجیره تأمین از قیمت ماشین‌های برنج رضایت چندانی ندارند (شکل ۴). همچنین رضایت آن‌ها از محصولات وارداتی تقریباً دو برابر محصولات ساخت داخل است. در مجموع می‌توان گفت با وجود رویکرد شرکت‌های سازنده و واردکننده برای تأمین محصولات باکیفیت، تلاش آن‌ها نتوانسته است رضایت مشتریان در این رابطه را جلب نماید. بر اساس نتایج این تحقیق هزینه نگهداری موجودی توسط سازندگان و واردکنندگان نسبتاً کم (۳ از ۷) و توسط نمایندگی‌های فروش بیشتر از آن دو (۴ از ۷) است. در این زنجیره پس از دریافت سفارش مشتری توسط فروشگاه‌ها و نمایندگی‌های فروش، سفارش به تأمین‌کننده داده می‌شود. تأمین‌کننده نیز به تناسب نوع محصول و میزان موجودی، در یک بازه زمانی نسبتاً کوتاه (۳ از ۷) توسط سازندگان و واردکنندگان (۳/۸ از ۷) تدارک دیده می‌شود و برای مشتری ارسال می‌شود.

بررسی برخی از شاخص‌های عملکردی زنجیره تأمین از نظر مصرف‌کنندگان نشان می‌دهد که تحویل به‌موقع ماشین‌های کشاورزی بهترین وضعیت را بین سایر عوامل دارد (شکل ۵). ازنظر عواملی مانند میزان ایمنی ماشین‌های موجود، کیفیت قطعات و غیره که در شکل ۵ نیز نشان داده‌شده است، زنجیره تأمین ماشین‌های برنج وضعیت مناسبی ندارد.

شکل ۶ روش‌های تأمین مالی برای خرید ماشین‌های کشاورزی توسط کشاورزان را نشان می‌دهد. همان‌طوری مشاهده می‌شود بیشترین فراوانی روش تأمین مالی، مربوط به دریافت تسهیلات از بانک با معرفی جهاد کشاورزی است به‌نحوی‌که حدود نیمی از کشاورزان بدین روش ماشین‌های کشاورزی موردنیاز خود را خریداری می‌کنند. خرید اعتباری با استفاده از چک بیشترین فراوانی را پس از روش دریافت تسهیلات دارد. بدین ترتیب می‌توان گفت حدود ۷۰ درصد از کشاورزان، ماشین کشاورزی را به‌صورت غیرنقدی خریداری می‌کنند. نتایج نشان می‌دهد اکثر کشاورزان (۹۰ درصد) بین دو تا شش ماه برای اخذ تسهیلات خرید ماشین‌های برنج در انتظار می‌مانند (شکل ۷). باتوجه به وابستگی بیش از ۷۰ درصدی کشاورزان به روش خرید اعتباری، کاهش مدت‌زمان انتظار تسهیلات بانکی یکی از الزامات بهبود عملکرد زنجیره تأمین ماشین‌های برنج و تقویت و توسعه بخش مکانیزاسیون برنج است. بررسی زمان تحویل ماشین توسط نمایندگی‌ها به کشاورزان حاکی از آن است که در ۷۵ درصد موارد در کمتر از سه روز ماشین موردنظر به دست مصرف‌کننده می‌رسد. در بدترین حالت ممکن نیز تحویل ماشین حداکثر یک ماه به طول می‌انجامد.

شکل ۳- میزان اهمیت معیارهای انتخاب ماشین‌ها توسط کشاورزان

Fig.3. The importance of the criteria for choosing machines by farmers

شکل ٤- میزان رضایت کشاورزان از برخی عوامل مربوط به ماشین‌های برنج

Fig.4. Farmers' satisfaction with five factors related to rice machines

شکل ۵– وضعیت برخی از شاخص‌های زنجیره تأمین ماشین‌های برنج از دیدگاه کشاورزان

Fig.5. The status of some indicators of the supply chain of rice machines from the perspective of farmers

شکل ٦– روش‌های تأمین مالی کشاورزان برای خرید ماشین‌های کشاورزی برنج

Fig.6. Financing methods for farmers to buy rice farming machines

شکل ۷– درصد فراوانی مدت‌زمان سپری‌شده برای اخذ تسهیلات خرید ماشین‌های برنج توسط کشاورزان

Fig.7. The percentage of time spent by farmers to obtain loan for buying rice machines

بررسی ابعاد مدل مرجع عملیات زنجیره تأمین در همه سطوح زنجیره تأمین ماشین‌های برنج

در مورد وضعیت ابعاد مدل مرجع عملیات زنجیره تأمین در سطوح زنجیره تأمین ماشین‌های کشاورزی می‌توان گفت که بُعد هزینه بدترین وضعیت را دارد (شکل ۸). بر این اساس، کارایی فروشگاه‌ها و نمایندگی‌های فروش ماشین‌های کشاورزی از دو سطح دیگر زنجیره تأمین یعنی سازندگان و واردکنندگان پایین‌تر است. بنابراین نیاز است راه‌کارهایی برای بهبود وضعیت کارایی در این زنجیره تدوین شود. نتایج نشان می‌دهد سایر ابعاد مدل مرجع عملیات زنجیره تأمین بالاتر از حد متوسط قرار دارند.

شکل ۸– مقایسه ابعاد مدل مرجع عملیات زنجیره تأمین در اجزای زنجیره تأمین ماشین‌های برنج

Fig.8. Comparison of dimensions of the reference model of supply chain operation in the supply chain components of rice machines

آزمون همبستگی برای بررسی ارتباط بین ابعاد مدل مرجع عملیات زنجیره تأمین در سطوح مختلف زنجیره تأمین

در این مطالعه برای بررسی همبستگی بین ابعاد پنج‌گانه مدل مرجع عملیات زنجیره تأمین از آزمون همبستگی استفاده شد. ازآنجاکه داده‌های جمع‌آوری‌شده در این تحقیق از نوع ترتیبی (رتبه‌ای) هستند بنابراین از ضریب همبستگی رتبه‌ای کندال تائو b استفاده شد. شاخص کندال حالت تقارن دارد، به این معنا که برای محقق مهم نیست که کدام‌یک از متغیرهای موردمطالعه وابسته و کدام‌یک مستقل است. این شاخص مشخص می‌کند که تا چه میزان افزایش یا کاهش در یک متغیر با کاهش یا افزایش در متغیر دیگر همراه است. مقدار ضریب کندال همواره بین ۱- تا ۱+ در نوسان است (Kalantari, 2008). در چنین مواردی می‌توان از ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن نیز استفاده کرد اما ازآنجاکه در داده‌های مربوط به متغیرهای این تحقیق موارد هم‌رتبه زیاد وجود دارد، ضریب کندال تائو ترجیح داده شد. نتایج بررسی همبستگی در جدول ۲ نشان داده‌شده است. تعداد فروشگاه‌های مورد بررسی ۱۸، سازندگان ۵ و واردکنندگان ۹ عدد بود. با توجه به نتایج آزمون همبستگی در سطح خرده‌فروشی می‌توان گفت انعطاف‌پذیری با قابلیت اطمینان، پاسخ‌گویی با دارایی ارتباط وجود دارد. در سطح سازندگان همبستگی معناداری بین ابعاد مدل مشاهده نشد. در سطح واردکنندگان ماشین‌های کشاورزی برنج، به‌غیر از هزینه و پاسخ‌گویی، دارایی و پاسخ‌گویی سایر ابعاد با یکدیگر همبستگی نشان دادند. وجود همبستگی در ابعاد مدل مرجع عملیات زنجیره تأمین نشان‌دهنده‌ی سهولت امکان ارتقای وضعیت زنجیره تأمین با راه‌کارهای ترکیبی است. در سطح واردکنندگان، مدیریت زنجیره تأمین بسیار بهتر از سطح تولیدکنندگان انجام می‌شود و این به دلیل ساختار مدیریتی بهتر شرکت‌های واردکننده نسبت به شرکت‌های سازنده است. شرکت‌های سازنده ماشین‌های برنج در استان‌های شمالی ساختار کاملاً سنتی دارند و عملاً به‌صورت کارگاه‌های ساخت ماشین هستند. این کارگاه‌ها ساختار سازمانی مشخصی ندارند و صرفاً با روش سنتی و بدون برنامه بلندمدت در حال تولید و فروش محصولات خود هستند.

جدول ۲- همبستگی ناپارامتریک ابعاد مدل مرجع عملیات زنجیره تأمین در نمایندگی‌های فروش

Table 2- Non-parametric correlation of dimensions of reference model of supply chain operations in sales agencies

سطوح زنجیره تأمین Supply chain levels	ابعاد مدل مرجع عملیات زنجیره تأمین Dimensions of SCOR model	هزینه Cost	انعطاف‌پذیری Flexibility	پاسخ‌گویی Responsiveness	قابلیت اطمینان Reliability	دارایی Asset
خرده‌فروشی‌ها Retailers	Cost هزینه	1	0.099	0.187	0.148	0.283
	Flexibility انعطاف‌پذیری		1	0.334	0.485**	0.350
	Responsiveness پاسخ‌گویی			1	0.197	0.401*
	Reliability قابلیت اطمینان				1	0.281
	Asset دارایی					1
سازندگان Manufacturers	Cost هزینه	1	0.800	0.400	0.000	0.000
	Flexibility انعطاف‌پذیری		1	0.200	0.200	0.200
	Responsiveness پاسخ‌گویی			1	0.200	0.200
	Reliability قابلیت اطمینان				1	0.600
	Asset دارایی					1
واردکنندگان Importers	Cost هزینه	1	0.682*	0.458	0.681*	0.750*
	Flexibility انعطاف‌پذیری		1	0.682*	0.736*	0.834**
	Responsiveness پاسخ‌گویی			1	0.681*	0.750
	Reliability قابلیت اطمینان				1	0.681*
	Asset دارایی					1

** با اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار است، * با اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار است

* Significant with 95% confidence, ** Significant with 99% confidence

به‌منظور تبیین بهتر وضعیت زنجیره تأمین ماشین‌های برنج، گویه‌های مورد بررسی در ابعاد مدل مرجع عملیات زنجیره تأمین به متغیرهای مکنون دیگری تبدیل شد و مورد آزمون قرار گرفت. ابتدا برای سنجش نرمال بودن این متغیرهای جدید از آزمون کولموگروف سمیرنوف استفاده شد (جدول ۳). بدین منظور از میانگین مقادیر شاخص‌های مربوط به هر یک از متغیرهای مکنون استفاده شد. در

آزمون کولموگروف سمیرنوف چنانچه سطح معنی‌داری آزمون کمتر از ۵ درصد باشد آزمون معنی‌دار محسوب می‌شود و لذا فرض نرمال بودن توزیع متغیر مورد نظر رد می‌شود. همان‌طور که نتایج این آزمون نشان می‌دهد از بین ۱۴ متغیر موردبررسی، سه متغیر توزیع نرمال ندارند و بقیه دارای توزیع نرمال هستند. متغیرهای تعهد و راهبرد (CS)، مدیریت هزینه (CT) و ارتباط (RL) دارای توزیع نرمال نیستند. لذا برای آزمون معنی‌داری متغیرهای دارای توزیع نرمال از آزمون t تک‌نمونه‌ای و برای متغیرهای دارای توزیع غیرنرمال از آزمون ویلکاکسون تک‌نمونه‌ای استفاده شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده در مورد دیدگاه کشاورزان، هیچ‌یک از متغیرهای تحقیق در پرسشنامه مربوط به کشاورزان نرمال نیست. بنابراین برای آزمون همه متغیرهای مکنون مربوط به کشاورزان نیز از روش‌های ناپارامتری استفاده شد. در آزمون‌های پارامتری و ناپارامتری، مقادیر متغیرهای مکنون نمونه‌های مورد بررسی با مقدار متوسط ۴/۵ مورد مقایسه قرار گرفت و نتیجه معنی‌داری یا عدم معنی‌داری تفاوت با این عدد سنجیده شد. نتایج آزمون ویلکاکسون نشان داد که هر سه متغیر داشتن تعهد، مدیریت هزینه و ارتباط در نمایندگی‌های فروش ماشین‌های کشاورزی تفاوت معنی‌دار با مقدار آزمون (۴/۵) دارند. در مورد متغیرهای دارای توزیع نرمال، مدیریت منابع انسانی، مدیریت کیفیت، داشتن راهبرد و سازمان‌دهی، انعطاف‌پذیری، پاسخ‌گویی، عملکرد و قابلیت اطمینان در فروشگاه‌ها دارای تفاوت معنی‌دار با مقدار متوسط است.

جدول ۳- نتایج آزمون متغیرهای مکنون

Table 3- Test results of latent variables

متغیر Variable	متغیر مکنون Latent variables	آزمون کولموگروف-سمیرنوف Kolmogorov-Smirnov test	آزمون ویلکاکسون Wilcoxon test	آزمون T T test
مدل مرجع عملیات زنجیره تأمین Reference model of supply chain operations	Focus on the customer تمرکز بر مشتری	0.200		0.355
	Having commitment داشتن تعهد	0.015*	0.049*	
	Human resources management مدیریت منابع انسانی	0.133		0.000**
	Quality management مدیریت کیفیت	0.200		0.000**
عملکرد مدیریت زنجیره تأمین Supply chain management performance	Information management مدیریت اطلاعات	0.200		0.790
	Lean system سیستم ناب	0.175		0.592
	Management of business partners مدیریت شرکای تجاری	0.149		0.596
	Having strategy and organization داشتن راهبرد و سازمان‌دهی	0.200		0.000**
عملکرد فروشگاه‌ها Store performance	Cost management مدیریت هزینه	0.042*	0.009**	
	Flexibility انعطاف‌پذیری	0.113		0.000**
	Relationship ارتباط	0.010*	0.004**	
	Responsiveness پاسخ‌گویی	0.200		0.045*
	Performance عملکرد	0.200		0.000**
	Reliability قابلیت اطمینان	0.200		0.000**
دیدگاه کشاورزان Farmers' point of view	Financial مالی	0.000**		
	Machinery selection انتخاب ماشین	0.000**		
	Satisfaction of suppliers رضایت‌مندی از تأمین‌کنندگان	0.000**		
	Lean system سیستم ناب	0.000**		
	Responsiveness پاسخ‌گویی زنجیره	0.000**		
	Reliability قابلیت اطمینان زنجیره	0.000**		
	Information management مدیریت اطلاعات زنجیره	0.000**		

* معنی‌دار با اطمینان ۹۵ درصد، ** معنی‌دار با اطمینان ۹۹ درصد

* Significant with 95% confidence, ** Significant with 99% confidence

نتایج آزمون کولموگروف سمیرنوف برای سنجش نرمال بودن متغیرهای مورد بررسی در جامعه کشاورزان نشان داد که با اطمینان

۹۹ درصد، این جامعه نرمال نیست. باتوجه به نرمال نبودن متغیرهای مربوط به جامعه کشاورزان برای آزمودن این فرض که هر یک از متغیرهای تحقیق مربوط به کشاورزان از مقدار میانه (۴/۵) به‌طور معناداری تفاوت دارد یا خیر از آزمون ویلکاکسون استفاده شد. نتایج دو متغیر مکنون مهم مربوط به کشاورزان، یعنی انتخاب ماشین و رضایت‌مندی کشاورزان آن در جدول ۴ گزارش‌شده است.

بر اساس نتایج آزمون ویلکاکسون تک‌نمونه‌ای، میانه همه متغیرهای مربوط به معیارهای خرید ماشین توسط کشاورزان به‌غیر وجود نمایندگی در محل نسبت به مقدار میانه در نظر گرفته‌شده در این آزمون (۴/۵) تفاوت معنی‌دار دارند. در مورد میزان اهمیت معیارها نیز می‌توان گفت به‌غیر از توصیه کارشناسان جهاد کشاورزی برای خرید ماشین‌های کشاورزی، بقیه معیارها به‌صورت معنی‌داری از مقدار متوسط (عدد ۴/۵) بیشتر بوده‌اند. میانه همه متغیرهای مربوط به ابعاد رضایت‌مندی کشاورزان به‌غیر از متغیر رضایت از کیفیت ماشین‌های ساخت خارج نسبت به مقدار میانه در نظر گرفته‌شده در این آزمون (۴/۵) کمتر است. بررسی نظرات سطوح متخلف زنجیره تأمین برنج به‌صورت توصیفی نیز ابعاد دیگری از عملکرد و انتظارات زنجیره را مشخص می‌کند. با توجه به بررسی‌های به‌عمل‌آمده، انتظارات شرکت‌های سازنده ماشین‌های برنج به‌صورت زیر قابل‌بیان است: کمک در زمینه تسهیلات بانکی به‌منظور پوشش هزینه‌های مواد اولیه و نیروی انسانی، تسهیل پرداخت تسهیلات بانکی به کشاورزان برای خرید محصولات کارگاه‌های ساخت ماشین‌های برنج، افزایش مبلغ تسهیلات، کاهش سود تسهیلات، جلوگیری از واردات ماشین‌های کشاورزی دارای مشابه داخلی و عدم‌حمایت از واردات ماشین‌های برنج به‌خصوص از مبدأ چین. نتایج بررسی‌ها در مورد انتظارات شرکت‌های واردکننده به شرح زیر است: مرکز توسعه مکانیزاسیون دخالتی در بازار نداشته باشد، در بخش فنی ماشین‌های کشاورزی ورود نکنند، در امور شرکت‌های واردکننده دخالت نداشته باشند، جهاد کشاورزی در معرفی نمانام‌ها به کشاورزان کمک کنند، ضعف‌ها و قوت‌های عملکرد شرکت‌ها را به آن‌هاگوشزد کنند، در رسیدگی به امور مراجعه‌کنندگان در زمینه ماشین‌های کشاورزی تسریع نمایند، ازنظر ریالی برای شرکت‌ها تسهیلات تأمین کنند، ازنظر به‌روزرسانی ماشین‌ها به شرکت‌ها کمک کنند، نمایندگان بانک‌ها و جهاد کشاورزی جهت اطلاع از شرایط فروش ماشین‌های کشاورزی در شرکت‌های واردکننده حضور پیدا کنند. برخی از شرکت‌ها معتقدند به دلیل تعدد انواع ماشین‌های کشاورزی مرکز توسعه مکانیزاسیون تسلط لازم بر ماشین‌های کشاورزی ندارد و لازم است از مشاورین مسلط بر انواع ماشین‌ها برای مدیریت این حوزه استفاده نماید. برخی نیز خواستار جلوگیری از ورود ماشین‌های بی‌کیفیت هستند و این‌که مرکز توسعه نهایت همکاری را با شرکت‌های واردکننده به نفع کشاورزان داشته باشد.

علاوه بر انتظارات، بررسی محدودیت‌های سازندگان و واردکنندگان ماشین‌های کشاورزی نیز برای درک صحیح عملکرد زنجیره حائز اهمیت است. محدودیت‌های داخلی شرکت‌های سازنده به‌صورت زیر قابل تقسیم‌بندی است: کاهش نقدینگی سازنده به دلیل تأخیر در پرداخت تسهیلات و نقدی نبودن فروش، تولید و تأمین مواد اولیه، فنّاوری ساخت به دلیل به‌روز نبودن ماشین‌آلات و هزینه‌های بسیار زیاد به‌روز کردن آن‌ها محدودیت‌های بیرونی این شرکت‌ها نیز عمدتاً مربوط به امور گمرکی و مالیات است که فشار زیادی به سازندگان وارد می‌کند. عدم‌حمایت سازمان‌های متولی مانند مرکز توسعه مکانیزاسیون و جهاد کشاورزی و همچنین نوسان قیمت ازجمله محدودیت‌های دیگری است که گریبان‌گیر شرکت‌های سازنده ماشین‌های برنج است. محدودیت‌های شرکت‌های واردکننده شامل نوسانات قیمت، مسائل گمرکی مانند ترخیص کالا، قاچاق ماشین‌های کشاورزی، خواب دستگاه‌ها در گمرک، هزینه تبلیغات، وجود ماشین‌های بی‌کیفیت با قیمت پایین در بازار، وجود رقبای زیاد، برخی مشکلات اداری و مسائل سیاسی و اثر تحریم‌ها بر انجام معاملات با کشورهای خارجی (به‌جز چین)، بالابودن میزان سهم پرداختی کشاورز به بانک (نسبت به سایر کشورها)، استفاده برخی رقبا از ارز مرجع برای واردات ماشین‌های کشاورزی و کاهش قدرت خرید کشاورزان می‌باشد.

در صورتی می‌توان ادعا کرد که یک زنجیره تأمین به‌صورت هماهنگ کار می‌کند که اقدامات انجام‌شده در همه مراحل زنجیره باعث بیشینه‌سازی سود کل زنجیره شود. به همین دلیل برای ایجاد هماهنگی در زنجیره تأمین، باید هرکدام از مراحل زنجیره تأثیر اقدامات و تصمیمات خود را بر سایر مراحل در نظر بگیرند. در شکل ۹ میانگین ابعاد مدل مرجع عملیات زنجیره تأمین در کل زنجیره تأمین ماشین‌های کشاورزی برنج نشان داده‌شده است. مقدار هماهنگی و یکپارچگی در این زنجیره حدود ۴/۵ از ۷ است که تقریباً متوسط محسوب می‌شود. به دو دلیل ممکن است میزان هماهنگی در زنجیره تأمین کم باشد: (۱) هرکدام از مراحل زنجیره دارای اهداف متضاد و متفاوت باهم باشند که معمولاً به دلیل عدم مالکیت یکپارچه در کل مراحل زنجیره تأمین رخ می‌دهد و در مورد زنجیره ماشین‌های برنج نیز صادق است، (۲) حرکت اطلاعات در طول زنجیره با تأخیر انجام شود یا به‌طور ناخواسته تحریف شود. در این مورد نیز زنجیره تأمین ماشین‌های برنج مشکلاتی دارد. به‌عنوان‌مثال مرحله نمایندگی‌های فروش در زمینه اشتراک و دسترسی به اطلاعات تأمین‌کنندگان ضعف دارند اما اطلاعات رد و بدل‌شده فروشگاه‌ها و تأمین‌کنندگان از صحت بالایی برخوردار است.

دلیل تحریف‌شدن اطلاعات با حرکت در زنجیره تأمین این است

که اطلاعات به‌صورت کامل بین مراحل زنجیره به اشتراک گذاشته نمی‌شوند. ازنظر میزان صحت، جامعیت و کفایت اطلاعات تبادل‌شده در اعضای زنجیره تأمین ماشین‌های کشاورزی می‌توان گفت وضعیت قابل‌قبولی برای نمایندگی‌ها و واردکنندگان وجود دارد اما برای سازندگان شرایط مناسب نیست. بنابراین می‌توان گفت برای بهبود حرکت اطلاعات در طول زنجیره تأمین ماشین‌های برنج باید تلاش بیشتری صورت گیرد. یکی از دلایل عدم جریان صحیح اطلاعات در زنجیره تأمین ماشین‌های برنج عدم ارتباط تحصیلات مدیران فروشگاه‌ها و نمایندگی‌های فروش استان‌های موردمطالعه با حوزه ماشین‌های کشاورزی است. وجود افرادی با تحصیلات مرتبط با موضوع ماشین‌های کشاورزی در مراحل مختلف زنجیره تأمین باعث بهبود جریان اطلاعات در طول زنجیره خواهد شد.

جدول ٤- نتایج آزمون ویلکاکسون تک‌نمونه‌ای متغیرهای مربوط به کشاورزان

Table 4- The results of one-sample Wilcoxon test of variables related to farmers

	متغیر **Variable**	سطح معنی‌داری **Sig. Level**	نتیجه آزمون **Test result**
انتخاب ماشین Machinery selection	قیمت Price	0.000**	میانه بیشتر از 4.5 است median > 4.5
	کیفیت Quality	0.000**	میانه بیشتر از 4.5 است median > 4.5
	شرایط فروش Terms of sale	0.000**	میانه بیشتر از 4.5 است median > 4.5
	تایید کشاورزان Approval of farmers	0.000**	میانه بیشتر از 4.5 است median > 4.5
	توصیه کارشناسان دولتی The advice of government experts	0.000**	میانه کمتر از 4.5 است median < 4.5
	دسترسی به ماشین Access to the Machinery	0.001**	میانه بیشتر از 4.5 است median > 4.5
	خدمات پس از فروش After sale services	0.029*	میانه بیشتر از 4.5 است median > 4.5
	نمانام[1] Brand	0.000**	میانه بیشتر از 4.5 است median > 4.5
	وجود نمایندگی در محل Presence of representative on site	0.820	میانه مساوی 4.5 است Median=4.5
رضایت‌مندی کشاورزان Farmers' satisfaction	از قیمت From the price	0.000**	میانه کمتر از 4.5 است median < 4.5
	از کیفیت ماشین‌های ساخت داخل From the quality of domestically manufactured machines	0.000**	میانه کمتر از 4.5 است median < 4.5
	از کیفیت ماشین‌های وارداتی From the quality of imported machines	0.041*	میانه کمتر از 4.5 است median < 4.5
	از طراحی و عملکرد ماشین‌ها From the design and performance of machines	0.000**	میانه کمتر از ۴/۵ است median < 4.5

* معنی‌دار با اطمینان ۹۵ درصد، ** معنی‌دار با اطمینان ۹۹ درصد

* Significant with 95% confidence, ** Significant with 99% confidence

1- Brand

شکل ۹– میانگین ابعاد مدل مرجع عملیات زنجیره تأمین در کل زنجیره تأمین ماشین‌های کشاورزی برنج در استان‌های گیلان و مازندران

Fig.9. The average dimensions of the reference model of supply chain operations in the entire supply chain of rice agricultural machinery in Gilan and Mazandaran provinces

نتیجه‌گیری

تعدد محصولات باعث می‌شود شدت تحریف اطلاعات در زنجیره تأمین افزایش یابد. تعداد ماشین‌های موردنیاز در برنج چندان زیاد نیست اما تعداد نام‌های تجاری که از هر نوع ماشین در بازار عرضه می‌شود قابل‌توجه است به‌نحوی‌که بیش از ۴۰ تأمین‌کننده در زنجیره ماشین‌های برنج در استان‌های گیلان و مازندران فعالیت می‌کنند. ایجاد هماهنگی در زنجیره‌های تامینی که دارای تعداد زیادی مالک متفاوت هستند و تنوع محصولات نیز در آن‌ها بالاست یک مسئله بسیار جدی به‌شمار می‌رود. بررسی برخی از شاخص‌های عملکردی زنجیره تأمین از نظر مصرف‌کنندگان نشان داد که تحویل به‌موقع ماشین‌های کشاورزی بهترین وضعیت را بین سایر عوامل دارد و ازنظر عواملی مانند میزان ایمنی ماشین‌های موجود، کیفیت قطعات و غیره زنجیره تأمین ماشین‌های برنج وضعیت مناسبی ندارد.

بررسی‌های انجام‌شده نشان داد که ماشین‌های کشاورزی در طول زنجیره انباشته نمی‌شوند. به دلیل وجود سیستم تولید و تأمین کششی در زنجیره تأمین ماشین‌های کشاورزی، پدیده اثر شلاق چرمی چالش مهمی محسوب نمی‌شود. باتوجه به وابستگی بیش از ۷۰ درصدی کشاورزان به روش خرید اعتباری، کاهش مدت‌زمان انتظار تسهیلات بانکی یکی از الزامات بهبود عملکرد زنجیره تأمین ماشین‌های برنج و تقویت و توسعه بخش مکانیزاسیون برنج است. در مورد وضعیت ابعاد مدل مرجع عملیات زنجیره تأمین در سطوح زنجیره تأمین ماشین‌های کشاورزی می‌توان گفت که بُعد هزینه بدترین وضعیت را دارد. همچنین برای کاهش مشکلات مربوط به هماهنگی و یکپارچگی ناشی از عدم وجود مالکیت یکپارچه و به دلیل تعدد محصولات جاری در زنجیره تأمین ماشین‌های کشاورزی برنج در استان‌های شمالی، پیشنهاد می‌شود تولیدکنندگان و واردکنندگان مختلف اقدام به تشکیل اتحادیه‌های تجاری کنند تا بتوانند تمامی مراحل زنجیره را به تحت مالکیت اتحادیه درآورند و به‌صورت یکپارچه مدیریت کنند. مدیران فروشگاه‌ها و نمایندگی‌های فروش ماشین‌های کشاورزی برنج عمدتاً تحصیلات مرتبط با ماشین‌های کشاورزی ندارند و این موضوع می‌تواند جریان صحیح اطلاعات از طرف مصرف‌کننده به سمت تأمین‌کنندگان را دچار اختلال کند. وجود افرادی با تحصیلات مرتبط با موضوع ماشین‌های کشاورزی در مراحل مختلف زنجیره تأمین باعث بهبود جریان اطلاعات در طول زنجیره خواهد شد. ازاین‌رو پیشنهاد می‌شود در هر یک از مراحل زنجیره تأمین به‌ویژه در انتهای زنجیره یعنی فروشگاه‌ها و نمایندگی‌های فروش نیروهای با تحصیلات مرتبط با ماشین‌های کشاورزی به‌کار گرفته شوند. به‌کارگیری روش‌های مطمئن برای ارسال اطلاعات صحیح از نیازهای کیفی مصرف‌کننده، می‌تواند تأمین‌کنندگان را در تولید یا واردات ماشین‌های باکیفیت‌تر راهنمایی کند تا علاوه بر کاهش عدم اطمینان در زنجیره تأمین و بهینه‌سازی موجودی زنجیره تأمین، زمان تدارک تقاضای مصرف‌کنندگان نیز کاهش یابد. در حال حاضر شرکت‌های سازنده نسبت به شرکت‌های واردکننده نسبت به بازار و نیازهای فنی کشاورزان برنج‌کار اطلاعات کم‌تری دارند. بهتر است شرکت‌های سازنده شناخت خود از نیاز مصرف‌کننده را با متنوع کردن روش‌های ارزیابی بازار گسترش دهند. به‌منظور انجام تحقیقات بیشتر در مورد زنجیره تأمین ماشین‌های برنج پیشنهاد می‌شود موانع ایجاد هماهنگی در این زنجیره شامل موانع تشویقی، موانع اطلاعاتی، موانع عملیاتی، موانع قیمت‌گذاری، موانع رفتاری و سایر، موردمطالعه قرار گیرد.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه گیلان به دلیل حمایت مالی از این طرح در قالب طرح پژوهشی شماره ۱۳۲۵ و همچنین از تمام کسانی که به نحوی در اجرای این طرح یاری رسانند کمال تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

مشارکت نویسندگان

مرتضی زنگنه: مفهوم‌سازی، نظارت و مدیریت، جمع‌آوری داده‌ها، پردازش داده‌ها

نرگس بنائیان: مشاوره فنی، ویرایش متن

References

1. Azizi, O., Zargham Brujeni, H., Ziaei, M., & Taghavi Fard, M. T. (2022). Value creation framework through integrated electronic supply chain of tourism services. *Two Quarterly Journal of Tourism Social Studies*, *10*(19), 91-114. https://doi.org/10.52547/journalitor.36273.10.19.91
2. Ballou, R. H., Gilbert, S. M., & Mukherjee A. (2000). New managerial challenges from supply chain opportunities. *IEEE Engineering Management Review*, *28*(3), 7-16. https://doi.org/10.1016/S0019-8501(99)00107-8
3. Beamon, B. M. (1999). Measuring supply chain performance. *International Journal of operations & Production Management 19*(3), 275-292. https://doi.org/10.1108/01443579910249714
4. Bhagwat, R., & Sharma, M. K. (2007). Performance measurement of supply chain management: A balanced SCOR ecard approach. *Computers & Industrial Engineering 53*(1), 43-62. https://doi.org/10.1016/j.cie.2007.04.001
5. Ellram, L. M., Zsidisin, G. A., Siferd, S. P., & Stanly, M. J. (2002). The impact of purchasing and supply management activities on corporate success. *Journal of Supply Chain Mangement, 38*, 4-7. https://doi.org/10.1111/j.1745-493X.2002.tb00116.x
6. Faisal, M. N., Banwet, D. K., & Shankar, R. (2007). Information risk management in supply chains: an assessment and mitigation framework. *Journal of Enterprise Information Management 20*(6), 677-699. https://doi.org/10.1108/17410390710830727
7. Giannakis, M. (2011). Management of service supply chains with a service oriented reference model: the case of management consulting source. *Supply Chain Management: An International Journal 16*(5), 346-361. https://doi.org/10.1108/13598541111155857
8. Grifell-Tatje, E., & Lovell, C. A. K. (2014). Productivity, price recovery, capacity constraints and their financial consequences. *Journal of Productivity Analysis*, *41*, 3-17. https://doi.org/10.1007/s11123-013-0373-8
9. Grover, S., Agrawal, V. P., & Khan, I. A. (2006). Role of human factors in SCOR: a graph theoretic approach. Benchmarking: *An International Journal 13*(4), 447-468. https://doi.org/10.1108/14635770610676290
10. Gunasekaran, A., & Kobu, B. (2007). Performance measures and metrics in logistics and supply chain management: a review of recent literature (1995-2004) for research and applications. *International Journal of Production Research*, *45*(12), 2819-2840. https://doi.org/10.1080/00207540600806513
11. Gunasekaran, A., Patel, C., & Tirtiroglu, E. (2001). Performance Measures and Metrics in a Supply Chain Environment. *International Journal of Operations & Production Management*, *21*, 71-87. https://doi.org/10.1108/01443570110358468
12. Gunasekaran, A., Patel, C., & McGaughey, R. E. (2004). A framework for supply chain performance measurement. *International Journal of Production Economics*, *87*(3), 337-347. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2003.08.003
13. Joshi, R., Banwet, D. K., Shankar, R., & Ganhdi, J. (2012). Performance improvement of cold chain in an emerging economy. *Production Planning and Control*, *23*(10-11), 817-836. https://doi.org/10.1080/09537287.2011.642187
14. Kalantari, K. (2008). *Data processing and analysis in socio-economic research*. Tehran, Farhang Saba. (In Persian).
15. Manzini, R., & Accorsi, R. (2013). The new conceptual framework for food supply chain assessment. *Journal of Food Engineering*, *115*, 251-263. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.10.026
16. Milind Kumar, S., & Rajat, B. (2007). An integrated BSC- AHP approach for supply chain management evaluation. *Measuring Business Excellence*, *11*(3), 57-68. https://doi.org/10.1108/13683040710820755
17. Olfat, L., BamdadSoofi, J., Amiri, M., & Azbari, M. E. (2012). A model for supply chain performance evaluation using by network data envelopment analysis model (Case of: Supply chain of pharmaceutical companies in Tehran Stock Exchange. *Industrial Management Studies*, *10*(26), 9-34.
18. Parker, C. (2000). Performance measurement. *Work Study*, *49*, 63-66. https://doi.org/10.1108/00438020010311197
19. Rao, R. V., & Padmanabhan, K. K. (2007). Rapid prototypeing process selection using graph theory and matrix approach. *Journal of Materials Processing Technology*, *194*(1-3), 81-88.

https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.04.003
20. Shafiee, M., Hosseinzadeh Lotfi, F., & Saleh, H. (2014). Supply chain performance evaluation with data envelopment analysis and balanced ecard approach. *Applied Mathematical Modelling*, *38*(21), 5092-5112. https://doi.org/10.1016/j.apm.2014.03.023
21. Shahbandarzadeh, H., & Abadi, F. (2016). Evaluation of supply chain performance with supply chain operational reference model approach, case study of Iran-Sadra Marine Industries Company. *Commercial Surveys*, *79*(14), 37-49. (In Persian)
22. Shojaee, H. S. (2016). Assessing Effective Factors on Improving Supply Chain Performance Using Analytical Hierarchy Process in Food Industries. *Journal of Value Chain Management*, *1*(2), 1-16. (In Persian)
23. Singbo, A. G., Lansink, A. O., & Emvalomatis, G. (2014). Estimating farmers' productive and marketing inefficiency: an application to vegetable producers in Benin. *Journal of Productivity Analysis*, *42*, 157-169. https://doi.org/10.1007/s11123-014-0391-1
24. Swinnen, J. F. M., & Vranken, L. (2010). Reforms and agricultural productivity in Central and Eastern Europe and the Former Soviet Republics: 1989-2005. *Journal of Productivity Analysis*, *33*, 241-258. https://doi.org/10.1007/s11123-009-0162-6
25. Yang, C. L. (2010). Improving supplier performance using a comprehensive scheme. *Production Planning and Control*, *21*(7), 653-663. https://doi.org/10.1080/09537280903517655
26. Zanganeh, M., Banaeian, N., Payman, S. H., & Khani, M. (2019). Performance Evaluation of Rice Farm Machinery Dealers using SCOR Model and DEA Method. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, *50*(2), 281-292. https://doi:10.22059/ijbse.2018.262708.665079

Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 14, No. 3, 2024, p. 319-336

Assessment of Riverine Currents to Estimate the Theoretical Hydrokinetic Power and Energy Using Hydraulic Geometry

M. Sadeghi-Delooee[1], R. Alimardani[2*], H. Mousazadeh[3]

1- PhD Candidate, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agriculture, Campus of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
2- Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agriculture, Campus of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
3- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agriculture, Campus of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
(*- Corresponding Author Email: rmardani@ut.ac.ir)

Received: 15 May 2023
Revised: 11 August 2023
Accepted: 22 August 2023
Available Online: 01 September 2024

How to cite this article:
Sadeghi-Delooee, M., Alimardani, R., & Mousazadeh, H. (2024). Assessment of Riverine Currents to Estimate the Theoretical Hydrokinetic Power and Energy Using Hydraulic Geometry. *Journal of Agricultural Machinery, 14*(3), 319-336. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.2023.82429.1166

Introduction

There are two types of hydropower harvesting methods: conventional and unconventional. In the conventional method, the potential energy of water is harvested using a dam or barrage. However, in the unconventional method, the kinetic energy of flowing water is extracted using hydrokinetic turbines. Resource assessment is a pivotal step in developing hydrokinetic energy sites. Power density (power per unit area) is used to estimate the theoretical hydrokinetic power of a site. Flow velocity and cross-sectional area are the two variables that constitute the power density. Researchers use various methods such as numerical simulation, direct velocity measurement, or indirect velocity calculation using discharge data to conduct resource assessment. In the latter method, the Manning equation is used to convert the discharge data into velocity values. While this method is straightforward for canals, given their fixed and known geometry, it is cumbersome to calculate the hydraulic radius in rivers. To overcome this challenge, numerous researchers have proposed the utilization of hydraulic geometry (HG) to estimate the width and depth of a river reach, and then calculate the hydraulic radius based on these estimated values. The main objective of this study is to present and implement a fast method for assessing theoretical hydrokinetic power using the HG and the Manning equation.

Materials and Methods

In the present study, two hydrometry stations (Gachsar and Siera-Karaj) were selected in the Karaj dam watershed in Iran to implement resource assessment based on HG. A computer code comprising the following four steps was developed in Python using the Google COLAB environment.

1. Data Preparation: The monthly-averaged discharge, Manning roughness coefficient, and slope were collected and imported into the code. The roughness coefficient could be determined directly or indirectly. In the present study, it was considered to be 0.045 for the Karaj River according to the literature review. ArcGIS software and the Digital Elevation Model (DEM) were used to extract the local slope of each hydrometry station. For this purpose, the stream network of Alborz province was first extracted, and then the longitudinal elevation profile was measured using the 3D Analyst tools.

2. Discharge Data Processing: The flow duration curve (FDC) is one of the computational tools used by engineers to describe the hydrological regime of watersheds. FDC is a graphical representation of the cumulative

©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).

https://doi.org/10.22067/jam.2023.82429.1166

distribution of flows. In the present study, an all-time record FDC for each station was constructed, and fitted with five different probability distribution functions (PDF). The results of PDF fittings were evaluated by different goodness-of-fit indices, and the best PDF was selected.

3. Calculations of HG and the Manning Equation: The HG formulas were used to calculate the width and depth of flow using the reconstructed FDC from the previous step. These values, along with the roughness coefficient and slope, were used to calculate flow velocity using the Manning equation. After obtaining the flow velocity values, the power density was easily computed.

4. Generating Outputs: In the final step, two categories of outputs are generated: (1) duration curves for width, depth, flow velocity, and power density, and (2) theoretical and turbine-extracted energy diagrams.

Results and Discussion

The goodness-of-fit indices for PDF fitting indicated that the log-normal PDF is the most suitable distribution to describe the FDC with a coefficient of determination of 0.99. The calculated average discharge (Q_{50}) for the Gachsar and Siera stations was 2.34 and 7.68 m^3s^{-1}, respectively. These values are consistent with findings from previous studies. The results of the Manning equation calculations revealed that the flow velocity does not differ significantly between these stations (8% higher at Siera). The base flow depth at the Gachsar and Siera stations is less than 1 m. Therefore, as indicated in the literature review, axial flow (propeller) turbines are not suitable for installation in these rivers because they need to be fully submerged and require at least 1 m of depth. Overall, the use of wide and short turbines, such as Savonius turbines, is suggested in the Karaj River. The energy analysis results show that the maximum monthly theoretical energy at Gachsar and Siera equals 38,500 and 125,500 kWh, respectively. However, considering a turbine with a 1 m^2 swept area and a power coefficient of 0.2, the maximum monthly extracted energy is limited to 940 and 1,142 kWh at these two stations.

Conclusion

This study presents a fast method for the theoretical assessment of hydrokinetic power, which was applied to two hydrometry stations in the Karaj dam watershed. The results of HG calculations revealed that the base velocity (V_{90}) of 1.34 and 1.49 m s^{-1} is present at the Gachsar and Siera stations, respectively. According to the available depths at these stations, the use of wide and short turbines such as Savonius turbines is suggested. Each individual Savonius turbine with a unit swept area at Gachsar and Siera is estimated to extract a maximum monthly energy of 940 and 1,142 kWh, respectively.

Keywords: Flow duration curve, Hydraulic radius, Manning equation, Monthly energy, Probability distribution

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ١٤، شماره ٣، پاییز ١٤٠٣، ص ٣٣٦-٣١٩

ارزیابی جریان رودخانه‌ها به‌منظور تخمین توان و انرژی آبی‌جنبشی نظری با بهره‌گیری از هندسه هیدرولیک

مهران صادقی دلوئی[1]، رضا علیمردانی[2*]، حسین موسی زاده[3]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۳۱

چکیده

توربین‌های آبی‌جنبشی با قرارگیری درون رودخانه و بدون نیاز به ساخت سد یا بند آبگیر قادر به استحصال انرژی جنبشی آب و تولید برق هستند. یکی از موضوعاتی که در به‌کارگیری این فناوری بسیار حائز اهمیت است موضوع پتانسیل‌سنجی و تخمین توان و انرژی نظری به‌منظور انتخاب مناطق مستعد نصب چنین تجهیزاتی است. از بین روش‌های متنوع پتانسیل‌سنجی، در این پژوهش استفاده از هندسه هیدرولیک و محاسبه سرعت جریان از معادله مانینگ انتخاب شد. به‌منظور پیاده‌سازی این روش یک کد کامپیوتری توسعه یافت که طی ۴ مرحله سرعت، چگالی توان و انرژی نظری سایت‌های موردنظر را محاسبه و در اختیار کاربر قرار می‌دهد. برای پیاده‌سازی این روش دو ایستگاه هیدرومتری گچسر و سیرا در حوضه آبخیز سد کرج در استان البرز انتخاب شدند. ابتدا منحنی تداوم جریان هر ایستگاه با توابع توزیع احتمال برازش شد و سپس با استفاده از هندسه هیدرولیک و معادله مانینگ، سرعت، چگالی توان و انرژی جریان محاسبه شد. منحنی تداوم جریان هر دو ایستگاه مورد ارزیابی با توزیع لوگ نرمال و ضریب تعیین ۰/۹۹ برازش شدند. چگالی توان نظری برای ایستگاه‌های گچسر و سیرا با احتمال ۹۰٪ و بیشتر به‌ترتیب برابر ۱/۲ و ۱/۶۷ کیلووات بر مترمربع برآورد شد. با توجه به عمق کم جریان، استفاده از توربین‌های ساونیوس برای این دو سایت پیشنهاد می‌شود. بیشینه انرژی ماهانه تولیدی توسط یک دستگاه توربین با مساحت جاروب واحد در گچسر و سیرا نیز به‌ترتیب برابر ۹۴۰ و ۱۱۴۲ کیلووات ساعت برآورد شد.

واژه‌های کلیدی: انرژی ماهانه، توزیع احتمال، شعاع هیدرولیک، معادله مانینگ، منحنی تداوم جریان

مقدمه

انرژی برق‌آبی[4] با حرکت آب در چرخه هیدرولوژیک (چرخه آب)[5] تأمین می‌شود. چرخه آب توان خود را از انرژی خورشیدی تأمین می‌کند، به‌گونه‌ای که تابش خورشیدی به سطح زمین رسیده، به گرما تبدیل شده و آب را تبخیر می‌کند. نزدیک به ۵۰٪ از کل انرژی خورشیدی ورودی به زمین برای تبخیر استفاده می‌شود و تبدیل به انرژی نهان[6] در بخار آب می‌شود. مقداری از بخار آب (۲۲٪) به خشکی‌ها وارد می‌شود که بعداً به‌صورت ابر متراکم شده و به شکل نزولات جوی می‌بارد. مقداری از نزولات جوی که بر روی سطح زمین می‌ریزد رواناب تولید می‌کند و تحت تأثیر گرانش به سمت دریاها و دریاچه‌ها باز می‌گردد. از آن‌جایی‌که توان چرخه آب از انرژی خورشیدی تأمین می‌شود، تا زمانی‌که خورشید می‌تابد این چرخه نیز

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
۲- استاد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
۳- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: rmardani@ut.ac.ir)

https://doi.org/10.22067/jam.2023.82429.1166

4- Hydropower
5- Hydrological Cycle (Water Cycle)
6- Latent Energy

ادامه خواهد داشت و انرژی آبی را به یک منبع انرژی تجدیدپذیر و پایدار تبدیل می‌کند (Killingtveit, 2022). بهره‌برداری از انرژی برق‌آبی را می‌توان به دو صورت مرسوم و غیرمرسوم انجام داد. به‌صورت مرسوم از انرژی پتانسیل آب استفاده می‌شود، اما در روش غیرمرسوم انرژی جنبشی آب با استفاده از مبدل‌های آبی‌جنبشی به برق تبدیل می‌شود که آن را انرژی آبی‌جنبشی[1] می‌نامند. امروزه روش غیرمرسوم تولید انرژی برق‌آبی بیشتر مورد توجه است زیرا اثرات ناچیزی بر روی جریان طبیعی آب دارد. مبدل‌های آبی‌جنبشی می‌توانند بدون ساخت یک سد، بند آبگیر و مسیر انحرافی روی جریان طبیعی به تولید انرژی بپردازند (Saini & Saini, 2023). اصل کار مبدل‌های انرژی آبی‌جنبشی شبیه به یک توربین بادی است، فقط محیط کاری از هوا به آب تغییر می‌کند (Killingtveit, 2019). شکل ۱ اجزا و فرآیند تبدیل انرژی در این نوع مبدل‌ها را نشان می‌دهد (Yadav, Kumar, & Jaiswal, 2023). این مبدل‌ها طی ۴ مرحله انرژی الکتریکی را تولید و ذخیره می‌کنند: (۱) توربین انرژی جنبشی موجود در آب جاری را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کند (انرژی مکانیکی محور دوار توربین)، (۲) مجموعه‌ای از چرخ‌دنده‌ها برای بهینه‌سازی سرعت و گشتاور محور دوار استفاده می‌شود که مولد انرژی الکتریکی را به حرکت درمی‌آورد (مولد انرژی الکتریکی باید با سرعت ثابتی کار کند زیرا هر دستگاه برای کار در بسامد ثابت ساخته می‌شود)، (۳) ژنراتور الکتریکی انرژی مکانیکی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند، (۴) در مرحله آخر یا انرژی الکتریکی تولیدی مستقیماً به شبکه متصل می‌شود یا از یک باتری برای ذخیره‌سازی آن استفاده می‌شود.

حوزه‌های تحقیقاتی مهمی که امروزه همچنان به‌منظور بهبود فناوری آبی‌جنبشی ضروری است شامل مطالعات ارزیابی و پتانسیل‌سنجی، انتخاب و بهبود توربین، ارزیابی بازده تبدیل انرژی و اثرات زیست‌محیطی می‌شود (Ibrahim, Mohamed, & Ismail, 2021). جنکینسون (Jenkinson, 2010) اولین دستورالعمل جامع برای سنجش پتانسیل انرژی آبی‌جنبشی را تدوین کرد. خلیق و کوسینو (Khaliq & Cousineau, 2020) در گزارش جامع خود با عنوان «ارزیابی انرژی آبی‌جنبشی کانادا» بیان کردند که توان جنبشی یک سیال در حال حرکت را می‌توان با استفاده از چگالی سیال، سرعت سیال و مساحت سطح مقطعی که انرژی از آن استحصال می‌شود محاسبه نمود (رابطه ۱)، که در آن P_K توان جنبشی در دسترس، ρ چگالی سیال، A مساحت سطح مقطع و V سرعت سیال است؛ آن‌ها همچنین افزودند که توان آبی‌جنبشی به‌صورت چگالی توان (PD)[2] نیز ارائه می‌شود (رابطه ۲) که درواقع همان توان به ازای سطح واحد است. در جریان‌های رودخانه‌ای می‌توان این فرض را داشت که حتی با تغییرات دما، تغییری در چگالی رخ نمی‌دهد و چگالی ثابت می‌ماند. بر این اساس مساحت و سرعت سیال تنها متغیرهایی هستند که برای تعیین توان آبی جنبشی مورد نیاز است. لذا تعیین سرعت، مخصوصاً توزیع سرعت میانگین[3]، درون یک رودخانه فاکتور اساسی در ارزیابی توان آبی‌جنبشی نظری[4] یک رودخانه است. از طرفی میزان انرژی نظری[5] ($E_{Theoretical}$) موجود در یک مقطع رودخانه در یک بازه زمانی (T) را می‌توان از رابطه (۳) محاسبه نمود که این بازه زمانی برحسب ساعت بوده و برای ماه‌های مختلف برابر تعداد روز هر ماه ضرب‌در عدد ۲۴ است (Ibrahim *et al.*, 2021). بر این اساس انرژی تولیدی هر دستگاه توربین ($E_{Turbine}$) از رابطه (۴) محاسبه می‌شود که در آن A_s مساحت جاروب[6] و C_p ضریب توان[7] توربین است (Niebuhr, van Dijk, Neary, & Bhagwan, 2019). ضریب توان نیز طبق رابطه (۵) برابر نسبت توان استحصالی توربین ($P_{Turbine}$) به کل توان جریان هم‌مساحت با توربین (P_{Flow}) است (Khani, Shahsavani, Mehraein, & Kisi, 2023).

$$P_K = \frac{1}{2}\rho A V^3 \quad (۱)$$

$$PD = \frac{P_K}{A} = \frac{1}{2}\rho V^3 \quad (۲)$$

$$E_{Theoretical} = P_K . T = \frac{1}{2}\rho A V^3 T \quad (۳)$$

$$E_{Turbine} = P_K . C_p . T = \frac{1}{2}\rho A_s V^3 C_p T \quad (۴)$$

$$C_p = \frac{P_{Turbine}}{P_{Flow}} \quad (۵)$$

مطالعات متعددی به روش‌های مختلف برای ارزیابی انرژی آبی‌جنبشی رودخانه‌های سراسر جهان در سطوح محلی و منطقه‌ای انجام شده است (Kirby, Ferguson, Rennie, Nistor, & Cousineau, 2022). در تعدادی از پژوهش‌ها، شبیه‌سازی عددی جریان رودخانه به‌منظور محاسبه سرعت جریان و تعیین دقیق محل نصب توربین‌های آبی‌جنبشی استفاده شده است. در پژوهشی توسط لاتاگارسیا و همکاران (Lata-García, Jurado, Fernández-Ramírez, & Sánchez-Sainz, 2018) که با هدف توسعه یک

1- Hydrokinetic Energy

2- Power Density (PD)
3- Time-Averaged Velocity Distribution
4- Theoretical Hydrokinetic Power
5- Theoretical Energy
6- Swept Area
7- Coefficient of Power

سامانه هیبریدی فوتوولتائیک–آبی‌جنبشی انجام شد، از نرم‌افزار HEC-RAS برای ارزیابی پتانسیل و همچنین تعیین مکان بهینه توربین در رودخانه گواپاس در جنوب اکوادور استفاده شد و نتایج نشان‌دهنده‌ی تطابق بالا بین بیشینه سرعت حاصل از شبیه‌سازی (۲/۳۴ متر بر ثانیه) و اندازه‌گیری‌های تجربی (۲/۲۶ متر بر ثانیه) بودند. در مطالعاتی روی حوضه آبخیز رودخانه آمازون برای پتانسیل‌سنجی و مکان‌یابی نقاط بهینه نصب توربین از شبیه‌سازی هیدرودینامیکی (تخمین سرعت و عمق آب) در نرم‌افزار ANSYS-CFX (dos Santos, Camacho, Tiago Filho, Botan, & Vinent, 2019) و کد SisBaHia® (Henrique da Costa Oliveira *et al.*, 2021) استفاده شد.

شکل ۱– اجزای توربین‌های آبی‌جنبشی و فرآیند تولید برق (با کمی تغییرات (Yadav *et al.*, 2023))

Fig.1. Components of hydrokinetic turbines and the process of electricity generation

ارزیابی پتانسیل انرژی آبی‌جنبشی در رودخانه توکانتینس برزیل با به‌کارگیری یک مدل دوبعدی هیدرودینامیک و معادله سنت‌ونان انجام شد و مقایسه نتایج آن با داده‌های ای‌دی‌سی‌پی[1] نشان داد شبیه‌سازی خطای میانگین ۸/۷۷٪ و بیشینه ۲۲٪ را به همراه داشته است (Da Silva Holanda *et al.*, 2017). در دو مطالعه توسط علی و همکاران (Ali *et al.*, 2020) و آدگون و همکاران (Adeogun, Ganiyu, Ladokun, & Ibitoye, 2020) از SWAT در GIS برای شبیه‌سازی هیدرولوژیک رودخانه و ارزیابی انرژی آبی‌جنبشی نظری استفاده شد و نتایج آن تطابق خوبی با داده‌های مشاهداتی داشتند که نشان‌دهنده‌ی قدرت این نرم‌افزار در شبیه‌سازی هیدرولوژیک حوضه‌های آبخیز است.

در بعضی از مطالعات مستقیماً از داده‌های تجربی سرعت استفاده شده است. سائینی و همکاران (Saini, Kumar, & Saini, 2021) با استفاده از داده‌های سرعت به بررسی انرژی آبی‌جنبشی یک کانال آبیاری در هند پرداختند و میزان تولید انرژی توسط آرایش مختلف توربین‌ها محاسبه شد. نابتسه و همکاران (Nhabetse, Cuamba, Kucel, & Mungoi, 2017) به‌منظور ارزیابی تولید برق با استفاده از توربین‌های آبی‌جنبشی و امکان‌سنجی نصب آن‌ها با تحلیل فراوانی داده‌های تاریخی سرعت رودخانه به تولید منحنی‌های تداوم سرعت[2] پرداختند. ساوپی و همکاران (Saupi, Mailah, Radzi, Ahmad, & Soh, 2018) با بیان این‌که داده‌های سالانه سرعت آب دارای اهمیت بالایی در ارزیابی انرژی آبی‌جنبشی است به کمبود و ناکافی بودن این داده‌ها در پایگاه‌های داده محلی اشاره کردند و روشی نوین ارائه دادند که با استفاده از داده‌های دبی و بارش باران بتوان سرعت آب را تخمین زد. آن‌ها با مدل‌سازی رگرسیونی دو معادله با ضریب تعیین ۸۷/۴٪ و ۸۷/۹٪ به‌ترتیب برای تخمین ارتفاع سطح و سرعت آب توسعه دادند.

با توجه به عدم وجود داده‌های سرعت جریان در بسیاری از رودخانه‌ها و کانال‌های آب‌رسانی، عموماً در مطالعات تجربی از داده‌های دبی استفاده می‌شود و آن‌ها با به‌کارگیری معادله مانینگ (رابطه ۶) و معلوم بودن ویژگی‌های هیدرولیکی جریان (شعاع هیدرولیک (R)، ضریب زبری مانینگ (n) و شیب سطح آب (S)) به سرعت جریان (V) تبدیل می‌شوند. به‌عنوان‌مثال ابراهیم و همکاران (Ibrahim *et al.*, 2021) به بررسی پتانسیل انرژی آبی‌جنبشی در حوضه رودخانه پاهانگ مالزی با استفاده از داده‌های مشاهداتی دبی در ۱۰ سایت پرداختند. در این پژوهش برای تحلیل انرژی، منحنی تداوم جریان[3] در سایت‌های دارای پتانسیل رسم شد و با استفاده از معادله مانینگ دبی به سرعت جریان تبدیل گشت. در پژوهشی دیگر جان و وارگس (John & Varghese, 2021a, 2021b) برای طراحی

1- Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)
2- Velocity Duration Curve (VDC)
3- Flow Duration Curve (FDC)

یک سامانه هیبریدی فوتوولتائیک–آبی‌جنبشی از داده‌های دبی یک کانال ذوزنقه‌ای آبیاری استفاده کردند و با استفاده از معادله مانینگ (رابطه ۶) سرعت جریان را محاسبه نمودند.

$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (۶)$$

چالش اساسی در استفاده از معادله مانینگ در رودخانه‌ها تعیین پارامترهای هندسی (عرض و عمق) جریان برای محاسبه شعاع هیدرولیک است، زیرا در بسیاری از مقاطع رودخانه‌ها این پارامترها ثبت نمی‌شود. شعاع هیدرولیک یک مقطع رودخانه معمولاً با گذر زمان به‌خاطر دینامیک بودن سطح تراز رودخانه تغییر می‌کند. با فرض مستطیلی بودن بستر رودخانه، می‌توان شعاع هیدرولیک (رابطه ۷) که برابر نسبت مساحت (A) به محیط خیس‌شده (P) است را به‌صورت تابعی از عمق (d) و عرض (w) رودخانه نوشت (Khaliq & Cousineau, 2020; Kirby *et al.*, 2022; Schulze, Hunger, & Döll, 2005).

$$R = \frac{A}{P} = \frac{d.w}{2d + w} \quad (۷)$$

در همین راستا شولتز و همکاران (Schulze *et al.*, 2005) که به دنبال رویکردی برای تعیین سرعت رودخانه‌ها بودند، استفاده توام از هندسه هیدرولیک و معادله مانینگ را پیشنهاد داده و بیان کردند که روش مناسب ارزیابی سرعت رودخانه بایستی به‌قدری ساده باشد تا با استفاده از داده‌های در دسترس محاسبه شود و از طرفی آن‌قدر پیچیدگی داشته باشد که مقدار نسبتاً واقعی سرعت جریان در شرایط مختلف محیطی را در اختیار پژوهشگران قرار دهد.

رابطه بین مشخصه‌های رودخانه و دبی در طول زمان را هندسه هیدرولیک گویند که در یک سایت منجر به دو دسته هندسه هیدرولیک ایستگاهی[1] و هندسه هیدرولیک پایین‌دست[2] می‌شود (Singh, 2022). در روش ایستگاهی نیاز به اندازه‌گیری‌های میدانی تکراری در یک سطح مقطع خاص است، اما در روش پایین‌دست نیاز به اندازه‌گیری میدانی با یک دوره زمانی خاص بین سطح مقطع‌های مختلف یک رودخانه یا دیگر رودخانه‌ها است (Ridgill, Lewis, Robins, Patil, & Neill, 2022). مفهوم هندسه هیدرولیک در ابتدا توسط لئوپلد و مادوک (Leopold & Maddock Jr, 1953) مطرح و روابط آن به شکل توابع توانی (روابط ۸ و ۹) ارائه شد. که در آن w عرض جریان، d عمق جریان، Q دبی جریان، b و f توان‌ها و a و c ثابت‌های تناسب هستند. در روابط هندسه هیدرولیک، دبی تنها متغیر مستقل کلیدی برای کنترل سایر متغیرها است و تغییرات آن منجر به تغییر در مشخصه‌های رودخانه، یعنی عرض و عمق جریان، می‌شود (Singh, 2022).

$$w = a.Q^b \quad (۸)$$

$$d = c.Q^f \quad (۹)$$

هدف این پژوهش ارائه و پیاده‌سازی یک روش سریع برای تخمین سرعت در رودخانه‌ها و ارزیابی توان و انرژی آبی‌جنبشی نظری موجود در آن‌ها بر پایه استفاده از هندسه هیدرولیک و معادله مانینگ است. داده‌های دبی ثبت‌شده در ایستگاه‌های هیدرومتری، ورودی کلیدی این روش سنجش است که با تلفیق آن با داده‌های شیب محلی و ضریب زبری مانینگ می‌توان به تخمینی از توان و انرژی نظری موجود در هر بازه‌ای از رودخانه دست‌یافت.

مواد و روش‌ها

منطقه موردمطالعه و کلیات روش پتانسیل‌سنجی

در این پژوهش برای بررسی توان و انرژی آبی‌جنبشی نظری رودخانه‌ها دو ایستگاه هیدرومتری گچسر و سیرا–کرج (جدول ۱) در حوضه آبخیز سد کرج انتخاب شدند. این حوضه قسمتی از دامنه جنوبی ارتفاعات البرز در شمال شرق استان البرز است و در تقسیم‌بندی حوضه‌های آبخیز کشور جزو دریاچه نمک است که مساحت آن ۷۱۶ کیلومترمربع در محل ایستگاه هیدرومتری سیرا–کرج است.

برای پیاده‌سازی این روش یک کد به زبان پایتون در محیط گوگل کولب[3] توسعه یافت. در این کد ابتدا دبی‌های میانگین ماهانه[4] مربوط به یک دوره آماری ۱۰ ساله، ضریب زبری و شیب محلی برای هر ایستگاه دریافت شده و سپس منحنی تداوم جریان با بهترین تابع توزیع احتمال برآورد می‌شود، در محله بعد با بهره‌گیری از روابط هندسه هیدرولیک و معادله مانینگ، به محاسبه عرض، عمق، شعاع هیدرولیک و سرعت جریان پرداخته می‌شود تا نهایتاً پارامترهای چگالی توان و انرژی ماهانه هر ایستگاه حاصل شود. در شکل ۲ روندنمای روش توسعه‌یافته برای ارزیابی میزان توان و انرژی آبی‌جنبشی نظری در این پژوهش در ۴ مرحله آمده است و در ادامه هر مرحله به‌تفصیل شرح داده شده است.

1- At-a-station Hydraulic Geometry (AHG)
2- Downstream Hydraulic Geometry (DHG)
3- Google COLAB
4- Monthly-Averaged Discharges

جدول ۱– مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری موردمطالعه (Hydrometry Stations Data, 2023)

Table 1- Details of the assessed hydrometry stations

ایستگاه Station	رودخانه River	کد Code	ارتفاع Elevation (m)	طول جغرافیایی Longitude	عرض جغرافیایی Latitude	طول دوره آماری Statistical Period
گچسر Gachsar	گاجره Gajereh	41-253	2220	51-20-00	36-07-00	1387-1397 2008-2018
سیرا-کرج Siera-Karaj	کرج Karaj	41-110	1790	51-09-00	36-02-00	1387-1397 2008-2018

شکل ۲– روندنمای روش توسعه‌یافته برای ارزیابی توان و انرژی آبی‌جنبشی نظری

Fig.2. Flowchart of the developed method for theoretical hydrokinetic power and energy assessment

مراحل ارزیابی توان و انرژی

مرحله ۱- آماده‌سازی داده‌ها

در این بخش ابتدا داده‌های دبی روزانه استان البرز از پورتال ارائه آمار پایه شرکت مدیریت منابع آب ایران به آدرس www.stu.wrm.ir دانلود شده و پس‌ازآن داده‌های دوره آماری مدنظر تفکیک و میانگین ماهانه آن‌ها محاسبه می‌شود.

ضریب زبری به درجه مقاومت در مقابل جریان گفته می‌شود و یکی از مهم‌ترین پارامترهای لازم برای طراحی و محاسبات هیدرولیکی رودخانه‌ها است. عوامل زیادی بر ضریب زبری آبراهه اصلی تأثیر دارند که مهم‌ترین آن‌ها عبارت است از قطر دانه‌های رسوب در بستر، عمق جریان، لزجت جریان، شکل بستر، پوشش گیاهی بستر و غلظت رسوب جریان. در این پژوهش مقدار میانگین پیشنهادشده توسط آرمان (Arman, 2006) که برابر ۰/۰۴۵ است برای مدل‌سازی سرعت جریان در رودخانه کرج انتخاب شد. هرچند در صورت عدم اطلاع دقیق از ضریب زبری می‌توان مقدار ۰/۰۴ را به‌صورت جهانی برای اکثر رودخانه‌ها فرض کرد (Fiedler & Döll, 2010).

در گام بعد مقادیر شیب محلی ایستگاه‌های هیدرومتری (یا به‌طورکلی هر بازه رودخانه[1] موردمطالعه) با استفاده از تحلیل نقشه رقومی ارتفاع محدوده موردمطالعه استخراج می‌شود (جدول ۳). برای انجام این کار بایستی ابتدا شبکه آبراهه‌های منطقه موردمطالعه استخراج شود تا با در نظر گرفتن مختصات ایستگاه هیدرومتری با

1- River reach

استفاده از ابزار 3D Analyst پروفیل طولی ارتفاع در بالا و پایین‌دست ایستگاه در راستای رودخانه استخراج شود. در انتها با محاسبه اختلاف ارتفاع (Δh) و فاصله طولی (L) می‌توان شیب ایستگاه ($S = \frac{\Delta h}{L}$) را محاسبه نمود.

جدول ۳- مراحل استخراج شیب محلی ایستگاه‌های هیدرومتری در نرم‌افزار ArcGIS

Table 3- Steps for extracting local slope of hydrometry stations using ArcGIS software

گام Step	جعبه‌ابزار Toolbox	عملیات Operation
استخراج شبکه آبراهه‌ها Extraction of the stream network	Hydrology	فراخوانی نقشه DEM محدوده موردمطالعه Importing the DEM map of the studied area اجرای دستور *Fill* به‌منظور تصحیح پستی‌وبلندی‌های نامتعارف مدل رقومی Executing the *Fill command* in order to correct the unusual heights of the digital model اجرای دستور *Flow Direction* به‌منظور تعیین جهت جریان Executing the *Flow Direction command* in order to determine the flow direction اجرای دستور *Flow Accumulation* به‌منظور محاسبه تجمع جریان Executing the *Flow Accumulation command* in order to calculate the accumulated flow اجرای دستور *Map Algebra* و تعیین یک حد آستانه برای استخراج شبکه آبراهه‌ها Executing the *Map Algebra command* and determining a threshold limit to extract the stream network
استخراج پروفیل طولی ارتفاع Extraction of the longitudinal elevation profile	3D Analyst	استفاده از *3D Analyst* برای استخراج پروفیل طولی ارتفاع در بالا و پایین‌دست ایستگاه‌ها Using the *3D Analyst* to extract the longitudinal profile of height upstream and downstream of the stations

مرحله ۲- پردازش داده‌های دبی

در برنامه‌ریزی‌های مدیریت منابع آب، ابزارهای محاسباتی زیادی در اختیار محققان و مهندسان قرار دارد که در میان آن‌ها، منحنی تداوم جریان[1] برای توصیف رژیم هیدرولوژیک حوضه آبخیز استفاده می‌شود (Burgan & Aksoy, 2020). منحنی تداوم جریان یک تصویر گرافیکی از توزیع تجمعی[2] جریان‌ها در یک حوضه آبخیز است. با داشتن داده‌های ثبت‌شده جریان برای یک بازه زمانی خاص، منحنی تداوم جریان را می‌توان با رتبه‌بندی[3] جریان‌ها و تخمین احتمال فراگذشت[4] رسم کرد. منحنی حاصل، که رابطه‌ای بین احتمالات فراگذشت (یا تداوم زمانی جریان) و دبی است، نشان‌دهنده‌ی درصد زمانی است که یک مقدار جریان معین در یک دوره تاریخی برابر آن بوده یا فراتر از آن رفته است (Eshra, Zobaa, & Abdel Aleem, 2021; Vogel & Fennessey, 1995). منحنی‌های تداوم جریان هرسال را به‌صورت جداگانه (یک منحنی تداوم جریان برای هر یک سال داده) یا کل دوره ثبت‌شده (یک منحنی تداوم جریان برای کل دوره) در نظر می‌گیرند. اولی برای ارزیابی تغییرات سال‌به‌سال جریان مفید است، درحالی‌که دومی را می‌توان به‌عنوان یک برآورد پایا از کل رژیم هیدرولوژیک در طول دوره موردبررسی در نظر گرفت که برای توسعه و مدیریت منابع آب ضروری هستند و به‌طورمعمول در طراحی نیروگاه‌های برق‌آبی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Luan, Liu, Lin, & Huang, 2021; Pugliese, Farmer, Castellarin, Archfield, & Vogel, 2016).

در پردازش داده‌های دبی، ابتدا منحنی تداوم جریان در سه گام اصلی (Eshra *et al.*, 2021) محاسبه و رسم می‌شود: (۱) محاسبه و تهیه لیست دبی‌های میانگین ماهانه برای یک دوره معین که دارای n مقدار است (مثلاً برای دبی‌های ماهانه در ۱۰ سال عدد n برابر ۱۲۰ است)، (۲) مرتب کردن مقادیر دبی طوری که بیشترین مقدار در ابتدای لیست و کمترین در انتهای لیست قرار گیرد و به هر دبی یک عدد R نسبت داده شود. عدد R نشان‌دهنده‌ی موقعیت رتبه‌بندی‌شده دبی است، به‌گونه‌ای که بیشترین دبی عدد ۱ و کمترین دبی عدد ۱۲۰ را به خود اختصاص می‌دهد، (۳) محاسبه احتمال فراگذشت (EP) برای هر دبی بر اساس رابطه (۱۰) و رسم نمودار منحنی تداوم

1- Flow Duration Curve (FDC)
2- Cumulative Distribution
3- Ranking
4- Exceedance Probability

جریان (احتمال فراگذشت–دبی).

$$EP = \frac{R}{n+1} \quad (۱۰)$$

پس‌ازاین بخش، منحنی تداوم جریان مرسوم با استفاده از توابع توزیع احتمال (جدول ۴) مدل‌سازی می‌شود. سپس توزیع‌های احتمال برازش‌شده به کمک شاخص‌های نکوئی (جدول ۵) مورد ارزیابی قرار گرفته و بهترین توزیع انتخاب می‌شود تا یک برآورد کلی دقیق از شرایط هیدرولوژیک منطقه حاصل شود.

جدول ٤– توابع توزیع احتمال (Langat, Kumar, & Koech, 2019; Luan *et al.*, 2021)

Table 4- Probability distribution functions

توزیع Distribution	تابع Function	محدوده پارامترها Range of Parameters
نرمال Normal	$f(x) = \frac{\exp(-\frac{x^2}{2})}{\sqrt{2\pi}}$	$x \in \mathbb{R}$
گاما* Gamma	$f(x,a) = \frac{x^{a-1}e^{-x}}{\Gamma(a)}$	$x \geq 0, a > 0$
وایبول Weibull	$f(x,c) = cx^{c-1}\exp(-x^c)$	$x > 0, c > 0$
گامبل Gumbel	$f(x) = \exp(-(x + e^{-x}))$	$x > 0$
لوگ–نرمال** Log-normal	$f(x,s) = \frac{1}{sx\sqrt{2\pi}}\exp(-\frac{\log^2(x)}{2s^2})$	$x > 0, s > 0$

* $\Gamma(a)$: تابع گاما
Gamma Function
** s: انحراف از معیار استاندارد
Standard Deviation

جدول ۵– شاخص‌های نکوئی برازش (Babaei, Jalili, Aminzadeh, Soleimani, & Hazbavi, 2022; Luan *et al.*, 2021)

Table 5-Goodness-of-fit indices

شاخص Index	رابطه Equation	دامنه تغییرات Variability Range
ضریب تعیین Coefficient of Determination	$R^2 = \frac{\sum[(P_o - \bar{P}_o)(P_m - \bar{P}_m)]^2}{\sum(P_o - \bar{P}_o)^2 \sum(P_m - \bar{P}_m)^2}$	$0 \leq R^2 \leq 1$
ریشه مربعات خطا Root Mean Square Error (RMSE)	$RSME = \sqrt{\frac{\sum(P_o - P_m)^2}{N}}$	$0 \leq RSME \leq \infty$
میانگین قدر مطلق خطا Mean Absolute Error (MAE)	$MAE = \frac{\sum\lvert P_o - P_m\rvert}{N}$	$0 \leq MAE \leq \infty$
خطای میانگین Mean Error (ME)	$ME = \frac{1}{n}\sum(P_o - P_m)$	$-\infty \leq ME \leq \infty$

مرحله ۳- محاسبات هندسه هیدرولیک و معادله مانینگ

در پژوهش‌های (Bomhof, 2014)، (Punys *et al.*, 2015) و (Tigabu, Wood, & Admasu, 2020)، با موجود بودن داده‌های هندسی (عرض و تراز آب) و دبی، ضرایب و توان‌های روابط (۱۱) و (۱۲) با استفاده از رگرسیون برای هر رودخانه موردمطالعه محاسبه شد، اما در این پژوهش به دلیل فقدان و همچنین عدم دسترسی راحت به چنین داده‌هایی در مقاطع دارای آمار در سطح کشور از مقادیر توصیه‌شده توسط آلن و همکاران (Allen, Arnold, & Byars, 1994) استفاده شد. این پژوهشگران با انجام تحلیل رگرسیونی روی ۶۷۴ مقطع رودخانه در آمریکا و کانادا بهترین ضرایب (a و c) و نماهای (b و f) در معادلات را برای دبی مقطع‌پر[1] (Q_b) استخراج نمودند. این مقادیر دارای ضریب تعیین ۰/۸۸ و ۰/۷۵ برای عرض و عمق هستند. استفاده از روابط (۱۱) و (۱۲) در بسیاری از پژوهش‌های هیدرولیک و مهندسی رودخانه در مناطق مختلف دنیا در

1- Bank-Full Discharge

سطح برنامه‌ریزی و پیش‌شناسایی رایج و معتبر است. خلاصه‌ای از این پژوهش‌ها در جدول ۶ آمده است.

$$W = 2.71Q_b^{0.557} \quad (۱۱)$$

$$D = 0.349Q_b^{0.341} \quad (۱۲)$$

جدول ٦- خلاصه پژوهش‌هایی که در آن برای تعیین ابعاد هندسی رودخانه‌ها از روابط (Allen *et al.*, 1994) استفاده شده است.

Table 6- Summary of the articles in which the hydraulic geometry proposed by (Allen *et al.*, 1994) was utilized

منطقه جغرافیایی Geographical zone	پارامتر(های) هندسی Geometrical parameters	هدف پژوهش Research objective	منبع Reference
حوضه آبخیز رودخانه موزل Moselle River basin	عرض و عمق Width and depth	توسعه یک مدل پیش‌بینی سیلاب Development of a flood forecasting model	Gerlinger & Demuth, 2000
جهانی Global	عرض، عمق Width and depth	تغییرات ماهانه و روزانه جریان‌ها و ذخیره آب قاره‌ای Monthly and daily variations of continental water storage and flows	Fiedler & Döll, 2010
استرالیا، تاسمانی Australia, Tasmania	عمق Depth	تخمین نرخ بار ورودی مواد مغذی (فسفر کل و نیتروژن کل) به رودخانه‌ها Estimating nutrient generation rates (total P and total N) into rivers	Broad & Corkrey, 2011
قاره اروپا Europe	عرض و عمق Width and depth	مدل‌سازی سرعت جریان متغیر رودخانه در مقیاس قاره‌ای Modeling variable river flow velocity on a continental scale	Verzano *et al.*, 2012
اعمال‌شده روی یک منحنی تداوم جریان فرضی Implemented on a model FDC	عرض و عمق Width and depth	بررسی قابلیت اطمینان پره‌های توربین‌های آبی‌جنبشی Reliability analysis for hydrokinetic turbine blades	Hu & Du, 2012
هیمالیای غربی، رودخانه سوتلج Western Himalaya, Sutlej River	عرض و عمق Width and depth	بررسی سهم باران، برف و یخچال‌ها در دبی رودخانه Differentiating between rain, snow, and glacier contributions to river discharge	Wulf, , Bookhagen, & Scherler, 2016
چین ، رودخانه یانگ‌تسه China, Yangtze River	عمق Depth	مدل‌سازی غلظت و توزیع هیدروکربن آروماتیک چند حلقه‌ای Modeling of the Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) concentration and distribution	Zhu *et al.*, 2019
جهانی Global	عرض Width	توسعه کتابخانه هیدرواستریمر (نسخه ۱) در نرم‌افزار R جهت بررسی جریان در شبکه رودخانه‌ها Development of an R package, a software library Hydrostreamer V1.0, aiming to estimate streamflow in river networks	Kallio, Guillaume, Virkki, Kummu, & Virrantaus, 2021
پاکستان، رودخانه پونچ Pakistan, Poonch River	عرض و عمق Width and depth	طراحی و بهینه‌سازی یک سامانه هیبریدی انرژی دارای توربین آبی‌جنبشی Design and optimization of a hybrid on-site energy generation system including hydeokinetic turbines	Tahir *et al.*, 2021

شایان‌ذکر است که مطالعات زیادی بر جنبه‌های مختلف رودخانه کرج ازجمله بررسی جریان‌های سیلابی (Karam, Safari, & Hajehforosh Nia, 2015; Khatooni, Hooshyaripor, MalekMohammadi, & Noori, 2023)، بررسی رسوب معلق (Arabkhedri, Sedarati, & Esmali, 2017; Keihani, Akhoondali, & Fathian, 2021) و بررسی تغییرات هیدرومورفولوژیک (Ghaforpur-Anbaran, Ahmadabadi, Ghanavati, & Yasi, 2023; Samadi & Azizian, 2021) انجام شده است، اما تنها در موارد معدودی به بررسی هندسه طبیعی رودخانه و تخمین آن از طریق پارامترهای هیدرولیک پرداخته‌شده است (Khosravi, Sheikh Khozani, & Cooper, 2021; Tahershamsi & Imanshoar, 2010). در این پژوهش‌ها که تمرکز بر تعیین دقیق هندسه رودخانه با در نظر گرفتن چرخه رسوب‌گذاری و فرسایش در آبراهه‌های رسوبی بود، پژوهشگران با ارائه روابطی بر اساس داده‌های صحرایی که اثر پارامترهای قطر مؤثر و غلظت وزنی ذرات رسوب (Tahershamsi & Imanshoar, 2010) و همچنین تنش شیلدز (Khosravi *et al.*, 2021) را در نظر می‌گرفت به این نتیجه رسیدند که استفاده از این روابط که مختص رودخانه کرج است از دقت بالاتری به نسبت سایر روابط تجربی همراه

است، اما در این پژوهش چون هدف ارائه روشی صرفاً برای تخمین هندسه رودخانه در مقیاس کشور است (مشابه پژوهش‌های جدول ۶) استفاده از روابط (۱۱) و (۱۲) توصیه و به‌کارگرفته می‌شود.

در این روش فرض می‌شود که شعاع هیدرولیک غیر مقطع‌پر از همان قواعد هندسی پیروی می‌کند که دبی مقطع پر نیز پیروی می‌کند. بر این اساس از روابط (۱۱) و (۱۲) برای محاسبه شعاع هیدرولیک طبق رابطه (۱۰) استفاده می‌شود. با فرض این‌که اکثر رودخانه‌ها تقریباً یک بستر صاف دارند و عرض آن‌ها بیشتر از عمق است، فرض مقطع مستطیلی برای دبی مقطع پر قابل‌قبول است. برای دبی کمتر از مقطع‌پر عرض و عمق کوچک می‌شوند اما نسبت آن‌ها تقریباً ثابت می‌ماند (Khaliq & Cousineau, 2020; Schulze *et al.*, 2005)

مرحله ۴- تولید خروجی‌ها

در مرحله آخر ۲ دسته خروجی به‌صورت (۱) منحنی‌های تداوم (عرض، عمق، سرعت و چگالی توان) و (۲) نمودارهای انرژی ماهانه (نظری و استحصالی توربین) ایجاد خواهد شد. در بررسی منحنی‌های تداوم جریان ۴ نقطه احتمالی ۹۰٪، ۷۰٪، ۵۰٪ و ۲۰٪ دارای اهمیت است که در تعیین اندازه و تعداد توربین‌ها کاربرد دارند. دو نقطه ۷۰٪ و ۲۰٪ برای تقسیم‌بندی منحنی تداوم جریان به سه ناحیه جریان زیاد[1] (۲۰٪-۰٪)، جریان میانی[2] (۷۰٪-۲۰٪) و جریان کم[3] (۱۰۰٪-۷۰٪) است و نقاط ۹۰٪ و ۵۰٪ مشخص‌کننده جریان متوسط و پایه هستند (Chilkoti, Bolisetti, & Balachandar, 2019; Sojka, 2022). از سوی دیگر، خروجی دوم میزان انرژی نظری ماهانه موجود در هر ایستگاه و همچنین میزان انرژی تولیدی ماهانه توسط یک نوع توربین با سطح مقطع واحد (یک مترمربع) را نمایش می‌دهد.

نتایج و بحث

نتایج شیب محلی

در این بخش که هدف ارائه یک روش سنجش‌ازدور برای محاسبه شیب محلی برای هر بازه موردنظر از رودخانه برای محاسبه توان آبی‌جنبشی بود، در ابتدا شبکه آبراهه‌های استان البرز محاسبه (خطوط آبی در شکل ۳) و سپس ارتفاع دو نقطه (یکی در ۴۰۰ متر بالادست و دیگری ۴۰۰ متر پایین‌دست هر ایستگاه هیدرومتری) استخراج و مقادیر شیب ۰/۰۱۸۸ و ۰/۰۱۲۵ به‌ترتیب برای ایستگاه‌های گچسر و سیرا-کرج محاسبه شد (شکل ۳). قابل‌ذکر است که هرچه وضوح (رزولوشن) نقشه رقومی ارتفاع بیشتر باشد (مثلاً نقشه‌های تولیدشده توسط لایدار) مقادیر شیب با دقت بالاتری محاسبه می‌شوند، اما دسترسی به چنین داده‌هایی برای هر منطقه به‌سادگی میسر نیست.

شکل ۳- نتایج تحلیل مدل رقومی ارتفاع استان البرز و استخراج شیب محلی برای ایستگاه‌های هیدرومتری گچسر و سیرا

Fig.3. DEM analysis results of the Alborz province and the extraction of local slope for Gachsar and Siera hydrometry stations

نتایج پردازش دبی‌ها

دبی‌های میانگین ماهانه در سال‌های آبی ۸۸-۸۷ تا ۹۷-۹۶ برای ایستگاه‌های هیدرومتری گچسر و سیرا-کرج فراخوانی و هیستوگرام و منحنی تداوم جریان به روش مرسوم برای این دو ایستگاه محاسبه و رسم شد (شکل ۴). همان‌طور که از هیستوگرام داده‌ها (شکل ۴ (a)) مشخص است تجمع داده‌های دبی ایستگاه گچسر و سیرا به‌ترتیب تقریباً در محدوده ۲/۵-۱ مترمکعب بر ثانیه و ۱۰-۲/۵ مترمکعب بر ثانیه است، این اعداد دقیقاً متناظر همان قسمت از منحنی تداوم جریان هستند که شیب کمتری داشته و در دامنه احتمالی ۴۰٪ الی ۱۰۰٪ واقع شده است (شکل ۴ (b)).

به‌منظور برازش منحنی تداوم جریان ۵ تابع توزیع احتمال نرمال، گاما، گامبل، وایبول و لوگ-نرمال روی داده‌های دبی هر ایستگاه اعمال شد (شکل ۵) و با ۵ معیار نکویی برازش (ضریب تعیین، ریشه مربعات خطا، میانگین قدرمطلق خطا و خطای میانگین) مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس جدول ۷، توزیع لوگ نرمال بهترین مدل برازش‌شده روی داده‌های دبی هر دو ایستگاه با ضریب تعیین ۰/۹۹ بوده است. استفاده از توزیع لوگ نرمال برای داده‌های رودخانه‌ای که عموماً چولگی راست (مثبت)[4] دارند در پژوهش‌های (Punys *et al.*, 2015)، (Langat *et al.*, 2019) و (Luan *et al.*, 2021) تایید

1- High-Flow
2- Mid-Flow
3- Low-Flow

4- Right (Positive) Skewness

شده است و یافته پژوهش حاضر با آن‌ها مطابقت دارد.

شکل ٤– تحلیل داده‌های کل دوره آماری برای ایستگاه‌های گچسر و سیرا: (a) هیستوگرام، (b) منحنی تداوم جریان

Fig.4. Analysis of All-Time-of-Record data for Gachsar and Siera-Karaj stations: (a) Discharge histogram, (b) Flow Duration Curve (FDC)

منحنی‌های تداوم جریان در شکل ۵ (c) و (f) نشان می‌دهند که ایستگاه گچسر و سیرا دبی میانگین (Q_{50}) معادل ۲/۳۴ و ۷/۶۸ مترمکعب بر ثانیه را دارند. میزان جریان کم (Q_{90}) برای آن‌ها به‌ترتیب برابر ۱/۱۴ و ۳/۹۲ مترمکعب بر ثانیه است که بسیار در طراحی و تعیین اندازه مبدل‌های انرژی اثرگذار است. نتایج تحقیقات (Karimi *et al.*, 2021) نشان می‌دهد که دبی ایستگاه گچسر معمولاً از ۰/۸۷ تا ۴/۱۵ مترمکعب بر ثانیه و دبی ایستگاه سیرا بین ۳/۱۸ تا ۱۷/۵ مترمکعب در ثانیه متغیر است که تقریباً مشابه مقادیر برآوردشده در این پژوهش است.

نتایج محاسبات هندسه هیدرولیک و معادله مانینگ در شکل ۶ برای ایستگاه‌های هیدرومتری گچسر و سیرا نشان داده شده است. شکل ۶ (a) نشان می‌دهد که عرض تخمینی جریان در ۹۰٪ اوقات و بیشتر (w_{90}) در سیرا برابر ۵/۸ متر است که این مقدار تقریباً ۲ برابر عرض ایستگاه گچسر (۲/۹۱ متر) در احتمال متناظر است. نسبت تقریبی ۲ بین عرض جریان در ایستگاه سیرا و گچسر در سایر احتمال‌های ۷۰٪، ۵۰٪ و ۲۰٪ نیز حفظ می‌شود. عمق تقریبی ۰/۵۶ متر در ۹۰٪ اوقات و بیشتر (d_{90}) برای ایستگاه سیرا در شکل ۶ (b) مشخص شده که تقریباً ۱/۵ برابر عمق تخمینی ایستگاه گچسر (۰/۳۶ متر) در احتمال متناظر است. مشابه عرض، نسبت عمق بین ایستگاه سیرا و گچسر در سایر احتمال‌ها نیز به مقدار ۱/۵ ثابت است. بر این اساس همواره نسبت تقریبی مساحت جریان سیرا به گچسر تقریباً برابر ۲/۹ است، لذا با افزایش دبی در ایستگاه سیرا (پایین‌دست رودخانه کرج) سرعت افزایش چشمگیری نداشته و سرعت در ایستگاه سیرا به‌طور متوسط ۸٪ بیشتر از سرعت جریان در ایستگاه گچسر (بالادست رودخانه کرج) است. نسبت عرض به عمق ($\frac{w}{d}$) در ایستگاه گچسر بین ۸/۱ ($(\frac{w}{d})_{90} = \frac{2.91}{0.36}$) تا ۱۱ ($(\frac{w}{d})_{20} = \frac{6.77}{0.61}$) تغییر می‌کند، این در حالی است که این مقادیر برای ایستگاه سیرا برابر ۱۰/۵ در جریان کم و ۱۴/۳ در جریان زیاد می‌باشد.

طبق گزارش کرکه (Kirke, 2019) در رودخانه‌های متوسط و کوچک معمولاً در نقاطی که سرعت جریان بیش از ۱ متر بر ثانیه است عمق رودخانه کمتر از دو متر است. در اینجا طبق تخمین انجام‌شده ایستگاه سیرا ازنظر عمق وضعیت مناسب‌تری را نسبت به گچسر دارد، هرچند این مقادیر متوسط و تقریبی هستند و در مراحل بعد برای شناسایی دقیق‌تر نقاط مناسب نصب بایستی اندازه‌گیری‌های میدانی و شبیه‌سازی‌های هیدرولیک انجام شود تا بالاترین راندمان تبدیل انرژی حاصل شود.

بر اساس بررسی‌های محققان (Kirke, 2020; Tan, Kirke, & Anyi, 2021) توربین‌های جریان محوری (پروانه‌ای)، برای استحصال توان قابل‌توجه از رودخانه‌ها مناسب نیستند، مگر این‌که آب عمیق و با جریان سریع وجود داشته باشد، زیرا این توربین‌ها برای غوطه‌وری کامل[1] به عمقی بیشتر از قطر روتور (D) نیاز دارند و مساحت جاروب آن‌ها برابر است با $\pi\left(\frac{D}{2}\right)^2$. برای مثال یک توربین جریان محوری با قطر ۱ متر دارای مساحت جاروب تقریبی ۰/۸ مترمربع است و برای عملکرد بهینه به عمق بیش از ۱ متر نیاز دارد، اگرچه در حالت غوطه‌وری جزئی[2] نیز کار خواهد کرد اما مساحت

1- Full immersion
2- Partial immersion

مؤثر آن برای دریافت انرژی جریان بسیار کم می‌شود و عملکرد ضعیفی خواهد داشت این در حالی است که عمق تخمینی جریان گچسر و سیرا در ۹۰٪ اوقات و بیشتر به‌ترتیب معادل ۰/۳۶ و ۰/۵۶ متر محاسبه شده‌اند.

شکل ۵- نتایج برازش توابع توزیع احتمال: (a) هیستوگرام و توابع توزیع احتمال ایستگاه گچسر، (b) منحنی‌های تداوم جریان مشاهده‌ای و برازش‌شده ایستگاه گچسر، (c) منحنی تداوم جریان برازش‌شده با توزیع لوگ نرمال ایستگاه گچسر، (d) هیستوگرام و توابع توزیع احتمال ایستگاه سیرا، (e) منحنی‌های تداوم جریان مشاهده‌ای و برازش‌شده ایستگاه سیرا، (f) منحنی تداوم جریان برازش‌شده با توزیع لوگ نرمال ایستگاه سیرا

Fig.5. Results of PDF fitting: (a) Histogram and PDFs of Gachsar station, (b) Observed and fitted FDCs of Gachsar station, (c) Log-normal fitted FDC of Gachsar station, (d) Histogram and PDFs of Siera station, (e) Observed and fitted FDCs of Siera station, and (f) Log-normal fitted FDC of Siera station

جدول ۷- مقادیر شاخص‌های نکوئی برای توابع برازش‌شده

Table 7- Values for goodness-of-fit (GOF) indices for the fitted functions

شاخص‌های نکوئی برازش GOF Indices	Station ایستگاه									
	Siera سیرا					Gachsar گچسر				
	توزیع Distribution									
	Normal	Gamma	Gumbel	Weibull	Log-normal	Normal	Gamma	Gumbel	Weibull	Log-normal
R^2	0.840	0.97	0.90	0.97	0.99	0.80	0.97	0.88	0.98	0.99
RMSE	0.111	0.048	0.089	0.050	0.030	0.127	0.040	0.097	0.037	0.026
MAE	0.095	0.039	0.075	0.037	0.024	0.108	0.035	0.081	0.030	0.022
ME	0.041	-0.019	0.029	0.031	-0.005	0.047	-0.009	0.039	-0.007	0.001

شکل ٦- نتایج محاسبات هندسه هیدرولیک و معادله مانینگ: منحنی تداوم (a) عرض، (b) عمق، (c) سرعت، (d) چگالی توان

Fig.6. Results of the hydraulic geometry and Manning equation calculations: Duration curves of (a) width, (b) depth, (c) velocity, and (d) power density

به‌منظور به حداکثر رساندن مساحت جاروب در آب‌های کم‌عمق همانند ایستگاه‌های گچسر و سیرا (یا به‌طورکلی رودخانه کرج)، به یک توربین عریض و کم‌عمق یا به یک آرایه از چندین توربین کوچک در سراسر جریان نیاز است. کرکه (Kirke, 2020) استفاده از توربین‌های ساونیوس را برای آب‌های کم‌عمق و رودخانه‌های کوهستانی پیشنهاد کرده است که ضریب توان آن‌ها را می‌توان به‌طور متوسط ۰/۲ فرض کرد.

انرژی نظری (انرژی موجود در کل سطح مقطع یک رودخانه) برآورد شده برای ایستگاه‌های گچسر و سیرا در شکل ۷ (a) آمده است. در ایستگاه گچسر در فصول کم‌آب سال انرژی نظری ماهانه ۳۸۵۰ کیلووات ساعت (شهریور) تا ۱۰۶۹ کیلووات ساعت (بهمن) موجود است، درحالی‌که در حالت بیشینه خود در خردادماه این عدد به حدود ۳۸۵۰۰ کیلووات ساعت در ماه می‌رسد. در ایستگاه سیرا نیز در فصول کم‌آب مقدار انرژی نظری ماهانه بین ۱۰۳۰۰ کیلووات ساعت

(شهریور) تا ۶۷۴۰ کیلووات ساعت (بهمن) متغیر است و در حالت بیشینه خود در اردیبهشت به مقدار تقریبی ۱۲۵۵۰۰ کیلووات ساعت در ماه می‌رسد. این در حالی است که با توجه به محدودیت‌های مساحت جریان و ضریب توان توربین‌های مختلف، مقادیر انرژی ماهانه قابل‌استحصال بسیار پایین‌تر از مقادیر نظری است.

شکل ۷ (b) میزان انرژی تولیدی ماهانه یک توربین ساونیوس با مساحت جاروب ۱مترمربع در ایستگاه‌های گچسر و سیرا را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است در حالت بیشینه انتظار می‌رود هر دستگاه توربین در ایستگاه گچسر و سیرا به‌ترتیب انرژی ماهانه معادل ۹۴۰ و ۱۱۴۲ کیلووات ساعت تولید کنند. باید خاطرنشان کرد که چون عرض جریان در ایستگاه سیرا بیشتر است می‌توان از تعداد توربین‌های متعدد در هر سطح مقطع عرضی استفاده نمود، اما در ایستگاه گچسر، به دلیل محدودیت عرض، استفاده از بیش از یک توربین در عرض امکان‌پذیر نیست.

شکل ۷– انرژی ماهانه ایستگاه‌های گچسر و سیرا: (a) انرژی نظری، (b) انرژی استحصالی هر دستگاه توربین

Fig.7. Monthly energy at Gachsar and Siera stations: (a) Theoretical energy and (b) Turbine extracted energy

نتیجه‌گیری

در این پژوهش روشی سریع برای ارزیابی و تخمین توان و انرژی آبی‌جنبشی رودخانه‌های کشور بر اساس به‌کارگیری هندسه هیدرولیک و معادله مانینگ معرفی و به‌کار گرفته شد. در این روش، از داده‌های دبی جریان ثبت‌شده در ایستگاه‌های هیدرومتری به‌عنوان ورودی کلیدی استفاده شد و منحنی تداوم جریان به روش مرسوم برای هر ایستگاه رسم شد. به‌منظور مدل‌سازی دقیق منحنی تداوم جریان توابع توزیع احتمال روی آن‌ها برازش شد و با ۵ معیار نکویی برازش مورد ارزیابی قرار گرفت. توزیع لوگ نرمال با ضریب تعیین ۰/۹۹ به‌عنوان بهترین توزیع انتخاب شد. در گام بعدی با استفاده از هندسه هیدرولیک عرض و عمق جریان و به‌تبع آن شعاع هیدرولیک محاسبه و سرعت از معادله مانینگ حاصل شد. از سرعت برای محاسبه چگالی توان استفاده شد و منحنی‌های تداوم چگالی توان برای دو ایستگاه گچسر و سیرا در حوضه آبخیز سد کرج ترسیم شد. نتایج نشان داد که چگالی توان برای ایستگاه گچسر و سیرا در ۹۰٪ اوقات و بیشتر به‌ترتیب برابر ۱/۲ و ۱/۶۷ کیلووات بر مترمربع است. بر اساس وضعیت عمق رودخانه استفاده از توربین‌های ساونیوس در رودخانه کرج پیشنهاد می‌شود. انتظار می‌رود که هر دستگاه توربین در ایستگاه‌های گچسر و سیرا بیشینه انرژی ماهانه به‌ترتیب برابر ۹۴۰ و ۱۱۴۲ کیلووات ساعت تولید کنند. با توجه به یافته‌های این پژوهش درباره شرایط هندسی جریان (عرض و عمق) و چگالی توان، محدوده ایستگاه سیرا محلی مناسب برای به‌کارگیری توربین‌های آبی جنبشی به‌منظور تولید بخشی از انرژی الکتریکی روستای سیرا است.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله نویسندگان از حمایت دانشگاه تهران در قالب رساله دکتری با پیشنهادنامه شماره ۷۹۴۸۹۵۳ قدردانی می‌نمایند.

مشارکت نویسندگان

مهران صادقی دلوئی: مفهوم‌سازی، جمع‌آوری و پردازش داده‌ها،

تحلیل آماری، خدمات نرم‌افزاری، اعتبارسنجی، تصویرسازی، استخراج و تهیه متن اولیه — متن اولیه

حسین موسی زاده: مشاوره فنی، استخراج و تهیه متن اولیه

رضا علیمردانی: مفهوم‌سازی، نظارت و مدیریت، استخراج و تهیـه

References

1. Adeogun, A. G., Ganiyu, H. O., Ladokun, L. L., & Ibitoye, B. A. (2020). Evaluation of hydrokinetic energy potentials of selected rivers in Kwara State, Nigeria. *Environmental Engineering Research*, *25*(3), 267-273. https://doi.org/10.4491/eer.2018.028
2. Ali, F., Srisuwan, C., Techato, K., Bennui, A., Suepa, T., & Niammuad, D. (2020). Theoretical hydrokinetic power potential assessment of the U-Tapao River Basin using GIS. *Energies*, *13*(7), 1749. https://doi.org/10.3390/en13071749
3. Allen, P. M., Arnold, J. C., & Byars, B. W. (1994). Downstream channel geometry for use in planning-level models 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, *30*(4), 663-671. https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1994.tb03321.x
4. Arabkhedri, M., Sedarati, K., & Esmali, A. (2017). The trend of suspended sediment changes of Karaj and Jajroud rivers during recent decades. *Watershed Engineering and Management*, *9*(1), 22-33. https://doi.org/10.22092/ijwmse.2017.108755
5. Arman, N. (2006). *Calibrating Manning's roughness coefficient in Karaj river reaches and analyzing it with HEC-RAS software* University of Tehran. https://noordoc.ir/thesis/19284
6. Babaei, L., Jalili, M. H., Aminzadeh, Z., Soleimani, F., & Hazbavi, Z. (2022). Modeling of monthly flow duration curve using nonlinear regression method for un-gauged watersheds of Ardabil Province. *Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems*, *9*(4), 1-18. http://jircsa.ir/article-1-439-fa.html
7. Bomhof, J. (2014). *Estimating flow, hydraulic geometry, and hydrokinetic power at ungauged locations in Canada* University of Ottawa. http://hdl.handle.net/10393/30383
8. Broad, S., & Corkrey, R. (2011). Estimating annual generation rates of total P and total N for different land uses in Tasmania, Australia. *Journal of Environmental Management*, *92*(6), 1609-1617. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.01.023
9. Burgan, H. I., & Aksoy, H. (2020). Monthly Flow Duration Curve Model for Ungauged River Basins. *Water*, *12*(2). https://doi.org/10.3390/w12020338
10. Chilkoti, V., Bolisetti, T., & Balachandar, R. (2019). Diagnostic evaluation of hydrologic models employing flow duration curve. *Journal of Hydrologic Engineering*, *24*(6), 05019009. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001778
11. Da Silva Holanda, P., Blanco, C. J. C., Mesquita, A. L. A., Junior, A. C. P. B., de Figueiredo, N. M., Macêdo, E. N., & Secretan, Y. (2017). Assessment of hydrokinetic energy resources downstream of hydropower plants. *Renewable Energy*, *101*, 1203-1214. https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.011
12. dos Santos, I. F. S., Camacho, R. G. R., Tiago Filho, G. L., Botan, A. C. B., & Vinent, B. A. (2019). Energy potential and economic analysis of hydrokinetic turbines implementation in rivers: An approach using numerical predictions (CFD) and experimental data. *Renewable Energy*, *143*, 648-662. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.018
13. Eshra, N. M., Zobaa, A. F., & Abdel Aleem, S. H. E. (2021). Assessment of mini and micro hydropower potential in Egypt: Multi-criteria analysis. *Energy Reports*, *7*, 81-94. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.11.165
14. Fiedler, K., & Döll, P. (2010). Monthly and daily variations of continental water storage and flows. *System Earth via Geodetic-Geophysical Space Techniques*, 407-415. https://doi.org/10.1007/978-3-642-10228-8_35
15. Gerlinger, K., & Demuth, N. (2000). Operational flood forecasting for the Moselle River Basin. Proceedings of the European Conference on Advances in Flood Research, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam, Germany.
16. Ghaforpur-Anbaran, P., Ahmadabadi, A., Ghanavati, E., & Yasi, M. (2023). Hydro-Morphological Analysis of Karaj River in the Urban Area from Beylqan to the Railway Bridge. *Geography and Environmental Sustainability*, *13*(1), 21-39. https://doi.org/10.22126/ges.2022.8026.2552
17. Henrique da Costa Oliveira, C., de Lourdes Cavalcanti Barros, M., Alves Castelo Branco, D., Soria, R., & Cesar Colonna Rosman, P. (2021). Evaluation of the hydraulic potential with hydrokinetic turbines for isolated systems in locations of the Amazon region. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *45*, 101079. https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101079
18. Hu, Z., & Du, X. (2012). Reliability analysis for hydrokinetic turbine blades. *Renewable Energy*, *48*, 251-262. https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.05.002
19. Hydrometry Stations Data. (2023). Iranian Water Resources Management Company. Retrieved 5/10/2023 from www.stu.wrm.ir
20. Ibrahim, W., Mohamed, M., & Ismail, R. (2021). The potential of hydrokinetic energy harnessing in Pahang river

basin. *Proceedings of the 12th National Technical Seminar on Unmanned System Technology 2020: NUSYS'20*, 1163-1176. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2406-3_85

21. Ibrahim, W., Mohamed, M., Ismail, R., Leung, P., Xing, W., & Shah, A. (2021). Hydrokinetic energy harnessing technologies: A review. *Energy Reports*, *7*. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.04.003
22. Jenkinson, R. (2010). Assessment of Canada's hydrokinetic power potential.
23. John, B., & Varghese, J. (2021a). Optimum sizing of hydrokinetic turbine integrated photovoltaic-battery system incorporating uncertainties of resources. *International Journal of Green Energy*, *18*(6), 645-655. https://doi.org/10.1080/15435075.2021.1875472
24. John, B., & Varghese, J. (2021b). Sizing and techno-economic analysis of hydrokinetic turbine based standalone hybrid energy systems. *Energy*, *221*, 119717. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119717
25. Kallio, M., Guillaume, J. H., Virkki, V., Kummu, M., & Virrantaus, K. (2021). Hydrostreamer v1. 0–improved streamflow predictions for local applications from an ensemble of downscaled global runoff products. *Geoscientific Model Development*, *14*(8), 5155-5181. https://doi.org/10.5194/gmd-14-5155-2021
26. Karam, A., Safari, A., & Hajehforosh Nia, S. (2015). Analysis of flood and fluvial processes in the occurrence of environmental hazards (Case Study: Arange Basin, Karaj River). *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, *2*(2), 53-68. https://doi.org/10.18869/acadpub.jsaeh.2.2.53
27. Karimi, S., Pourebrahim, S., Salajegheh, A., Malekian, A., Strauch, M., Volk, M., & Witing, F. (2021). Environmental flow requirements of Karaj River's sub-watersheds using Flow Duration Curve and Indicators of Hydrological Alteration. *Journal of Pasture and Watershed Management*, *74*(2), 393-405. https://doi.org/10.22059/jrwm.2021.270394.1322
28. Keihani, A., Akhoondali, A., & Fathian, H. (2021). Multivariate Frequency Analysis of Peak Discharge and Suspended and Bed Sediment Load in Karaj Basin. *Iran Water Resources Management*, *17*(1), 47-67.
29. Khaliq, M., & Cousineau, J. (2020). *Assessment of Canada's Hydrokinetic Resources: A Review of Hydrologic Considerations*. National Research Council Canada= Conseil national de recherches Canada.
30. Khani, M. S., Shahsavani, Y., Mehraein, M., & Kisi, O. (2023). Performance evaluation of the savonius hydrokinetic turbine using soft computing techniques. *Renewable Energy*, *215*, 118906. https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.118906
31. Khatooni, K., Hooshyaripor, F., MalekMohammadi, B., & Noori, R. (2023). A combined qualitative–quantitative fuzzy method for urban flood resilience assessment in Karaj City, Iran. *Scientific Reports*, *13*(1), 241. https://doi.org/10.1038/s41598-023-27377-x
32. Khosravi, K., Sheikh Khozani, Z., & Cooper, J. R. (2021). Predicting stable gravel-bed river hydraulic geometry: A test of novel, advanced, hybrid data mining algorithms. *Environmental Modelling & Software*, *144*, 105165. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105165
33. Killingtveit, Å. (2019). 8- Hydropower. In T. M. Letcher (Ed.), *Managing Global Warming* (pp. 265-315). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814104-5.00008-9
34. Killingtveit, Å. (2022). Hydropower Resources Assessment—Potential for Further Development. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819727-1.00069-8
35. Kirby, K., Ferguson, S., Rennie, C., Nistor, I., & Cousineau, J. (2022). Assessments of available riverine hydrokinetic energy: a review. *Canadian Journal of Civil Engineering*, *49*(6), 839-854. https://doi.org/10.1139/cjce-2021-0178
36. Kirke, B. (2019). Hydrokinetic and ultra-low head turbines in rivers: A reality check. *Energy for Sustainable Development*, *52*, 1-10. https://doi.org/10.1016/j.esd.2019.06.002
37. Kirke, B. (2020). Hydrokinetic turbines for moderate sized rivers. *Energy for Sustainable Development*, *58*, 182-195. https://doi.org/10.1016/j.esd.2020.08.003
38. Langat, P. K., Kumar, L., & Koech, R. (2019). Identification of the most suitable probability distribution models for maximum, minimum, and mean streamflow. *Water*, *11*(4), 734. https://doi.org/10.3390/w11040734
39. Lata-García, J., Jurado, F., Fernández-Ramírez, L. M., & Sánchez-Sainz, H. (2018). Optimal hydrokinetic turbine location and techno-economic analysis of a hybrid system based on photovoltaic/hydrokinetic/hydrogen/battery. *Energy*, *159*, 611-620. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.183
40. Leopold, L. B., & Maddock Jr, T. (1953). *The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications* [Report](252). (Professional Paper, Issue. U. S. G. P. Office. http://pubs.er.usgs.gov/publication/pp252
41. Luan, J., Liu, D., Lin, M., & Huang, Q. (2021). The construction of the flow duration curve and the regionalization parameters analysis in the northwest of China. *Journal of Water and Climate Change*, *12*(6), 2639-2653. https://doi.org/10.2166/wcc.2021.324
42. Nhabetse, T., Cuamba, B., Kucel, S., & Mungoi, N. (2017). *Assessment of hydrokinetic potential in the Umbeluzi Basin, Mozambique*. Proceedings of the ISES Solar World Congress 2017 with IEA SHC Solar Heating and Cooling Conference, Abu Dhabi, UAE.
43. Niebuhr, C. M., van Dijk, M., Neary, V. S., & Bhagwan, J. N. (2019). A review of hydrokinetic turbines and

enhancement techniques for canal installations: Technology, applicability and potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *113*. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.047
44. Pugliese, A., Farmer, W. H., Castellarin, A., Archfield, S. A., & Vogel, R. M. (2016). Regional flow duration curves: Geostatistical techniques versus multivariate regression. *Advances in Water Resources*, *96*, 11-22. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.06.008
45. Punys, P., Adamonyte, I., Kvaraciejus, A., Martinaitis, E., Vyciene, G., & Kasiulis, E. (2015). Riverine hydrokinetic resource assessment. A case study of a lowland river in Lithuania. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *50*, 643-652. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.155
46. Ridgill, M., Lewis, M. J., Robins, P. E., Patil, S. D., & Neill, S. P. (2022). Hydrokinetic energy conversion: A global riverine perspective. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, *14*(4), 044501. https://doi.org/10.1063/5.0092215
47. Saini, G., Kumar, A., & Saini, R. P. (2021). Assessment of hydrokinetic energy– A case study of eastern Yamuna canal. *Materials Today: Proceedings*, *46*, 5223-5227. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.595
48. Saini, G., & Saini, R. P. (2023). Hydrokinetic as an Emerging Technology. *Smart Energy and Advancement in Power Technologies*, 711-721. https://doi.org/10.1007/978-981-19-4971-5_52
49. Samadi, A., & Azizian, A. (2021). Investigation of hydromorphological changes of Karaj River due to the implementation of water resources development and river engineering projects. *Journal of Hydraulics*, *16*(1), 93-110. https://doi.org/10.30482/JHYD.2021.265438.1499
50. Saupi, A. F. M., Mailah, N. F., Radzi, M. A. M., Ahmad, S. Z., & Soh, A. C. (2018). Hydrokinetic Energy Assessment in Unregulated River for Hydrokinetic Performance Analysis Studies in East Malaysia. https://doi.org/10.20944/preprints201804.0357.v1
51. Schulze, K., Hunger, M., & Döll, P. (2005). Simulating river flow velocity on global scale. *Advances in Geosciences*, *5*, 133-136. https://doi.org/10.5194/adgeo-5-133-2005
52. Singh, V. (2022). *Handbook of Hydraulic Geometry*. Cambridge University Press.
53. Sojka, M. (2022). Directions and Extent of Flows Changes in Warta River Basin (Poland) in the Context of the Efficiency of Run-of-River Hydropower Plants and the Perspectives for Their Future Development. *Energies*, *15*(2). https://doi.org/10.3390/en15020439
54. Tahershamsi, A., & Imanshoar, F. (2010). Determination of River Regime Equations Based on Stream Power Equation. *Journal of Civil and Surveying Engineering*, *44*(1). https://jcse.ut.ac.ir/article_20753.html
55. Tahir, M. U. R., Amin, A., Baig, A. A., Manzoor, S., Haq, A., Asgha, M. A., & Khawaja, W. A. G. (2021). Design and optimization of grid Integrated hybrid on-site energy generation system for rural area in AJK-Pakistan using HOMER software. *AIMS Energy*, *9*(6), 1113-1135. https://doi.org/10.3934/energy.2021051
56. Tan, K. W., Kirke, B., & Anyi, M. (2021). Small-scale hydrokinetic turbines for remote community electrification. *Energy for Sustainable Development*, *63*, 41-50. https://doi.org/10.1016/j.esd.2021.05.005
57. Tigabu, M. T., Wood, D. H., & Admasu, B. T. (2020). Resource assessment for hydro-kinetic turbines in Ethiopian rivers and irrigation canals. *Energy for Sustainable Development*, *58*, 209-224. https://doi.org/10.1016/j.esd.2020.08.005
58. Verzano, K., Bärlund, I., Flörke, M., Lehner, B., Kynast, E., Voß, F., & Alcamo, J. (2012). Modeling variable river flow velocity on continental scale: Current situation and climate change impacts in Europe. *Journal of Hydrology*, *424*, 238-251. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.005
59. Vogel, R. M., & Fennessey, N. M. (1995). Flow duration curves II: A review of applications in water resources planning 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, *31*(6), 1029-1039. https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1995.tb03419.x
60. Wulf, H., Bookhagen, B., & Scherler, D. (2016). Differentiating between rain, snow, and glacier contributions to river discharge in the western Himalaya using remote-sensing data and distributed hydrological modeling. *Advances in Water Resources*, *88*, 152-169. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.12.004
61. Yadav, P. K., Kumar, A., & Jaiswal, S. (2023). A critical review of technologies for harnessing the power from flowing water using a hydrokinetic turbine to fulfill the energy need. *Energy Reports*, *9*, 2102-2117. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.01.033
62. Zhu, Y., Tao, S., Sun, J., Wang, X., Li, X., Tsang, D. C., Zhu, L., Shen, G., Huang, H., & Cai, C. (2019). Multimedia modeling of the PAH concentration and distribution in the Yangtze River Delta and human health risk assessment. *Science of the Total Environment*, *647*, 962-972. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.075

Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 14, No. 3, 2024, p. 337-353

The Efficiency of Cold Plasma Treatment on *Aspergillus Niger* Disinfection and Quality Properties Preservation of Grapes during the Post-harvest Period

A. Khalaj[1], E. Ahmadi[2*], S. Mirzaei[3], F. Ghaemizadeh[4], R. Abbaszadeh[5]

1- MSc Student, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran
2- Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran
3- Assistant Professor, Department of Plant Protection, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran
4- Assistant Professor, Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran
5- Assistant Professor, Iranian Research Organization for Science and Technology, Tehran, Iran
(*- Corresponding Author Email: eahmadi@basu.ac.ir)

Received: 21 September 2023
Revised: 21 October 2023
Accepted: 04 November 2023
Available Online: 01 September 2024

How to cite this article:
Khalaj, A., Ahmadi, E., Mirzaei, S., Ghaemizadeh, F., & Abbaszadeh, R. (2024). The Efficiency of Cold Plasma Treatment on Aspergillus Niger Disinfection and Quality Properties Preservation of Grapes during the Post-harvest Period. *Journal of Agricultural Machinery*, *14*(3), 337-353. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.2023.84550.1191

Introduction

Grape is a major horticultural crop with a high nutritional value in the world. The optimal geographic and climatic conditions in Iran have positioned it as one of the most important regions for grape cultivation in the world. Black rot, caused by *Aspergillus niger*, is a highly destructive fungal disease that affects the grapes by targeting wounded areas. It causes crushing of the grapes, the falling of berries, and reduces transportation and storage properties (Ponsone *et al.*, 2011). Various methods, such as fumigating bunches with sulfur dioxide and storing them in a modified atmosphere, have been used to control fungal rot and prolong the shelf life of grapes. However, each method has its limitations. Grape fumigation with sulfur gas is harmful to human health (Duarte-Sierra *et al.*, 2016) and the efficiency of modified atmospheric storage on rot control and maintaining the quality of grapes depends on the type of variety, storage temperature, and especially gas concentration (Himelrick, 2003).

Given the lack of efficiency in traditional methods, it is imperative to introduce modern techniques that can effectively disinfect microorganisms. These advanced methods offer several advantages, including the preservation of crop quality, an increase in crop shelf life, the promotion of good health, and substantial economic benefits. A technique of this type includes using non-thermal (cold) plasma (NTP) technology to eliminate food microorganisms (Bourke *et al.*, 2018). The effect of cold plasma at atmospheric pressure on the reduction of bacterial populations in food products such as lettuce, tomato, strawberry, and cherry tomato has been reported (Bermúdez-Aguirre *et al.*, 2013; Pasquali *et al.*, 2016; Ziuzina *et al.*, 2014). Research has shown that cold plasma can effectively inactivate *Aspergillus* in various orchard and agricultural products (Butscher *et al.*, 2016; Ghorashi *et al.*, 2020; Selcuk *et al.*, 2008). The effect of cold plasma on the quality characteristics of the product during the post-harvest period has also been investigated. Blueberries treated with cold plasma for less than 15 minutes showed remarkable results: after 10 days, the fruit exhibited reduced lipid peroxidation and darkening, with no impact on the total anthocyanin content, pH, or firmness of the product (Hu *et al.*, 2021). In a study by Rana et al. (2020), it was found that subjecting strawberries to 15 minutes of cold plasma with packaging after 5 days of storage at 25°C had no significant impact on pH, TSS, and moisture content of the fruit.

The review of the literature reveals the absence of research on fungal disease control and grape quality

©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).

https://doi.org/10.22067/jam.2023.84550.1191

evaluation following the use of NTP. This study aims to investigate the efficiency of plasma treatment in reducing the infection with *Aspergillus* fungi, along with examining the physical, chemical, and mechanical properties of Fakhri grape.

Materials and Methods

This research was conducted as a completely randomized design in a factorial experiment at four plasma levels (0, 10, 20, and 40 s) and five storage periods (1, 2, 3, 4, and 5 weeks) with three replications at 4°C. A plasma generator was first designed and manufactured in this study. A specifically designed and fabricated plasma application probe was also developed for grape berries. The individual grape berries were then sterilized with 1% sodium hypochlorite under a laminar hood for 2 minutes. Afterward, they were rinsed three times with sterile distilled water to remove any remaining disinfectant residue from their surfaces. Sterilized berries were immersed in *Aspergillus* spore suspension with 105 spores.ml^{-1} concentration. Finally, all samples were dried on paper filters and prepared for different plasma treatment durations (0, 10, 20, and 40 s). The treated samples were stored at 4°C, and the infection percentage and microbial load were measured on a weekly basis. To assess the preservation quality, chemical parameters such as pH, TSS, and TA, physical parameters (color change and weight loss), and mechanical properties were measured every week. Additionally, thermal imaging was performed weekly.

Results and Discussion

Plasma application during storage significantly reduced the infection percentage and microbial load in *Aspergillus*-inoculated samples. At the end of the storage period, the infection percentage and microbial load in the 40-second plasma treatment were 5% and 2.5 CFU g^{-1} respectively, while in the control group, the infection percentage was 100% and the microbial load was 4 CFU g^{-1}. At the end of the storage period, the lowest pH level in the plasma was observed for 40 s plasma. This could be attributed to effective contamination control, as fungal contamination leads to alkalization of the environment. The highest amount of TSS was also observed in control and 40 s plasma. But in the 10 and 20 s plasma treatment, the process of changes was gradual and not significant. The higher TSS level of control and 40 s plasma can be due to the weight loss caused by the spread of contamination and moisture leakage caused by damage to the tissue. This decrease in moisture leads to an apparent increase in the TSS index. Research has shown that plasma primarily affects the surface characteristics of products, and when applied with the appropriate voltage and duration, it does not alter the internal chemical properties (Hu *et al.*, 2021). Over time, weight loss increased in all treatments. This increasing trend during the storage period is higher in control and 40 s plasma compared to 10 and 20 s plasma. Therefore, the weight loss in the control can be due to the spread of contamination and aging of the product over time. However, the weight loss in the 40-second plasma treatment can be due to the destruction of the fruit tissue caused by longer duration of the plasma application.

In the current research, by increasing the duration of plasma application to 40 s, a significant decrease in L*, a*, and b* indices and an overall change in the color of the product was observed. Research shows that in blueberries, inappropriate duration of plasma treatment causes the loss of wax on the fruit surface and leads to darkening of the product (Hu *et al.*, 2021). The highest and lowest changes in temperature drop were observed in the control treatment (5°C) and 10 and 20 s plasma (3 and 3.5°C, respectively). According to research, an increase in fungal contamination leads to a decrease in humidity, increases weight loss, and subsequently a decrease in product temperature. A decline in mechanical characteristics was noted for the control and plasma treated samples during the storage period. The lowest value for indicators was observed in the 40 s plasma treatment. However, no significant difference was observed in samples treated with plasma for less than 20 seconds compared to the control group up to the middle of the storage period. According to a report by Misra et al. (2014), plasma application can reduce tissue softness. Therefore, optimizing its plasma duration and intensity is very important (Pan *et al.*, 2021).

Conclusion

Our experiments aimed to investigate the effect of NTP treatment on controlling *Aspergillus* infections while preserving the quality properties of Fakhri grapes. The obtained results are important for two main reasons. Firstly, an innovative probe was designed for plasma applications, specifically tailored to the shape and size of individual grapes in order to thoroughly cover them with plasma. Secondly, application of plasma was carried out for the first time and yielded valuable results, indicating that this technique can control fungal infections and preserve the chemical, physical, and mechanical properties of grapes.

Keywords: Chemical properties, Cold plasma, Mechanical properties, Microbial load, Physical properties

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۱٤، شماره ۳، پاییز ۱٤۰۳، ص ۳۵۳-۳۳۷

بررسی کارایی پلاسمای سرد بر غیرفعال‌سازی قارچ *آسپرژیلوس نایجر* و حفظ ویژگی‌های کیفی انگور طی دوران پس از برداشت

علی خلج[۱]، ابراهیم احمدی[۲*]، سهیلا میرزائی[۳]، فهیمه قائمی زاده[٤]، روزبه عباس‌زاده[۵]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۳۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۱۳

چکیده

کپک سیاه حاصل از قارچ *آسپرژیلوس نایجر* یکی از زیان‌بارترین بیماری‌های پس از برداشت انگور است. پلاسمای سرد در فشار اتمسفر، یک روش نوین به‌منظور میکروب‌زدایی از محصولات کشاورزی طی دوران پس از برداشت محصول می‌باشد. از این رو هدف از انجام این تحقیق بررسی تاثیر سطوح مختلف پلاسمای سرد در فشار اتمسفر (با مدت زمان صفر، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ ثانیه) بر نرخ پوسیدگی کپک سیاه و بار میکروبی همراه با برخی از پارامترهای کیفی انگور (*Vitic vinifera*) تلقیح‌شده با قارچ *آسپرژیلوس نایجر* طی انبارداری در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد بود. نتایج نشان داد پلاسما به‌طور موثری باعث کاهش بار میکروبی و درصد پوسیدگی کپک سیاه طی دوران انبارداری می‌شود. بالاترین میزان میکروب‌زدایی در پلاسما ۴۰ ثانیه صورت گرفت. برای پارامترهای کیفی پس از برداشت، پلاسمای کمتر از ۴۰ ثانیه (۱۰ و ۲۰ ثانیه) حداقل تاثیر را در شاخص‌های شیمیایی (pH، TSS و TA)، دمای محصول، شاخص‌های رنگ‌سنجی، تغییر رنگ، افت وزن، شاخص‌های مکانیکی و در نهایت سفتی بافت در انتهای دوره انبارداری داشت. بالاترین تغییرات در خواص شیمیایی، مکانیکی و فیزیکی انگور در انتهای انبارداری و در پلاسما ۴۰ ثانیه به دلیل آسیب به بافت به‌ویژه در محل دم میوه صورت گرفت. در کل به نظر می‌رسد تیمارهای کوتاه‌مدت پلاسما بتواند راهکار مناسبی هم‌زمان برای کاهش پوسیدگی‌های قارچی همراه با حفظ پارامترهای کیفی انگور و طی دوره نگهداری باشد.

واژه‌های کلیدی: بار میکروبی، پلاسمای سرد، خواص فیزیکی، خواص شیمیایی، خواص مکانیکی

مقدمه

انگور تازه‌خوری یک محصول مهم باغبانی و با ارزش اقتصادی بالا در دنیا می‌باشد. انگور غنی از مواد معدنی، ویتامین، کربوهیدرات و آنتی‌اکسیدان بوده و در سرتاسر دنیا و با اهداف مختلف کشت می‌شود (Pezzuto, 2008). ایران نیز به علت برخورداری از شرایط جغرافیایی و اقلیمی مناسب برای کشت و پرورش انگور، یکی از عمده‌ترین تولیدکنندگان این محصول در دنیا است. میزان تولید و سطح زیر کشت انگور در سال ۱۳۹۹ در ایران به‌ترتیب ۱۸۸۸۸۰۲تن و ۱۴۶۹۲۷ هکتار بوده است (Fao, 2021).

به دلیل ماهیت فیزیولوژیکی انگور نظیر پوست نازک، بافت گوشتی و آبدار، اسیدیته پایین و ترکیبات غذایی بالا، این گیاه مستعد حمله پاتوژن‌ها و به‌ویژه قارچ‌ها می‌باشد (Meng, Qin, & Tian, 2010). به طوری‌که پوسیدگی‌های قارچی نظیر گونه‌های مختلف جنس آسپرژیلوس[۵] از مهم‌ترین عوامل تلفات پس از برداشت و زیان اقتصادی در انگور است (Kasfi, Taheri, Jafarpour, & Tarighi,

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
۲- استاد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
۳- استادیار گروه گیاه‌پزشکی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
۴- استادیار گروه باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
۵- استادیار سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: eahmadi@basu.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jam.2023.84550.1191

5- *Aspergillus*

2018). *آسپرژیلوس نایجر*[6] یکی از گونه‌های مخرب این جنس بوده و از نواحی زخمی میوه حمله کرده و منجر به پوسیدگی سیاه در سطح آن می‌شود (Ponsone, Chiotta, Combina, Dalcero, & Chulze, 2011). علائم ظهور بیماری در زمان رسیدگی میوه به علت بالا بودن میزان قند افزایش می‌یابد. گسترش بیماری منجر به از دست رفتن آب، لهیدگی و ریزش حبه‌ها شده و قابلیت حمل و نقل و انبارداری را کاهش می‌دهد (Zahavi *et al.*, 2000). گونه‌های مختلف این جنس مایکوتوکسین نیز تولید می‌کنند که برای انسان بسیار سمی است (Arfaoui *et al.*, 2019).

تاکنون از روش‌های مختلفی به منظور کنترل پوسیدگی قارچی و افزایش ماندگاری انگور استفاده شده است. اما هر یک دارای محدودیت‌هایی می‌باشند. تدخین خوشه‌های انگور با دی‌اکسید گوگرد و استفاده از قارچ‌کش‌ها به‌طور موثری باعث کنترل پوسیدگی‌های قارچی در انگور می‌شود، اما کاربرد دی‌اکسید گوگرد باعث کاهش کیفیت و طعم نامناسب محصول شده و بقایای آن به‌صورت لکه‌های سفید روی میوه باقی می‌ماند (Duarte-Sierra *et al.*, 2016; Gabler & Smilanick, 2001; Lu, Yang, Li, Shen, & Ma, 2013). استفاده مداوم از قارچ‌کش‌ها نیز باعث ایجاد مقاومت به آن‌ها شده و کارایی استفاده از قارچ‌کش را کاهش داده است (Oliver & Hewitt, 2014). در مجموع به دلیل اثرات زیست‌محیطی و تاثیرات منفی بر سلامت انسان استفاده از روش‌های شیمیایی به‌ویژه در مورد انگور تازه‌خوری بسیار محدود شده است (De Simone *et al.*, 2020).

کارایی استفاده از انبار با اتمسفر تعدیل‌یافته و بسته‌بندی در اتمسفر تعدیل‌یافته بر کنترل پوسیدگی و حفظ کیفیت انگور به نوع رقم، دمای نگهداری و به‌ویژه غلظت گاز بستگی دارد (Himelrick, 2003; Sanchez-Ballesta, Alvarez, Escribano, Merodio, & Romero, 2020). گاز CO_2 در کنترل پوسیدگی‌های قارچی موثر است اما غلظت بالای ۱۰ درصد CO_2 باعث کاهش کیفیت طعم و قهوه‌ای شدن خوشه و حبه می‌شود (Crisosto, 2002; De Simone *et al.*, 2020). روش‌های پوشش‌دهی و فیلم‌های بسته‌بندی نیز دارای مشکلاتی نظیر ناپایداری، تخریب آسان و خاصیت هیدروفیلی بالای ترکیبات می‌باشند (Olivas & Barbosa-Canovas, 2009).

در نهایت ارایه روش‌های نوین که ضمن مقابله با میکروارگانیسم‌ها منجر به حفظ کیفیت محصول طی دوره انبارداری شده، حافظ سلامتی انسان بوده و صرفه اقتصادی بالا نیز داشته باشد، بسیار کارآمد خواهد بود. از جمله این روش‌ها می‌توان به تکنولوژی استفاده از پلاسمای غیر حرارتی (پلاسمای سرد) جهت حذف میکروارگانیسم‌های غذایی اشاره کرد (Bourke, Ziuzina, Boehm, Cullen, & Keener, 2018). سودمندی استفاده از این تکنیک در میکروب‌زدایی رنج وسیعی از میکروارگانیزم‌ها و در بسیاری از میوه‌ها و سبزیجات، آب‌میوه و خشکبار مشخص شده است (Wiktor *et al.*, 2020). تاثیر پلاسمای سرد در فشار اتمسفر بر کاهش جمعیت باکتری در محصولاتی نظیر کاهو، گوجه‌فرنگی، توت‌فرنگی و گوجه گیلاسی گزارش شده است (Bermúdez-Aguirre, Wemlinger, Pedrow, Barbosa-Cánovas, & Garcia-Perez, 2013; Pasquali *et al.*, 2016; Ziuzina *et al.*, 2014). همچنین تحقیقات نشان داده است پلاسمای سرد بر غیرفعال‌سازی *آسپرژیلوس* در برخی از محصولات باغی و زراعی (Selcuk, Oksuz, & Basaran, 2008; Butscher, Zimmermann, Schuppler, & Von Rohr, 2016) و کاهش مخمر و پوسیدگی ناشی از *بوتریتیس*[2] در برخی گیاهان باغی موثر بوده است (Dong & Yang, 2019; Rana, Mehta, Bansal, Shivhare, & Yadav, 2020).

تاثیر پلاسمای سرد بر ویژگی‌های کیفی محصول طی دوره پس از برداشت نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در بلوبری پلاسمای سرد به مدت زمان کمتر از ۱۵ دقیقه و پس از ۱۰ روز باعث تیرگی میوه و کاهش پروکسیداسیون[3] لیپید شده اما تاثیری بر محتوای آنتوسیانین کل، pH و سفتی محصول نداشته است (Hu *et al.*, 2021). در توت‌فرنگی نیز ۱۵ دقیقه پلاسمای سرد همراه با بسته‌بندی پس از ۵ روز نگهداری در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد بر میزان pH، TSS و محتوای رطوبت میوه تاثیری نداشته است (Rana *et al.*, 2020).

تاکنون کارایی پلاسمای سرد بر کنترل پوسیدگی سیاه حاصل قارچ *آسپرژیلوس نایجر* همراه با حفظ ویژگی‌های کیفی انگور مورد بررسی قرار نگرفته است. با توجه به این‌که پوسیدگی سیاه یکی از مهم‌ترین عوامل فساد و زیان اقتصادی در انگور می‌باشد، این پژوهش با هدف بررسی تاثیر سطوح مختلف پلاسما سرد بر کاهش میزان آلودگی به قارچ *آسپرژیلوس نایجر* همراه با بررسی خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی طی دوره پس از برداشت در انگور رقم فخری انجام شد.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی انگور و تلقیح مصنوعی با سوسپانسون اسپور قارچ

انگور رقم فخری از باغات استان همدان برداشت و در سردخانه با دمای یک درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شدند. سپس

6- *Niger*

2- *Botrytis*
3- Lipid peroxidation

خوشه‌های یکنواخت از نظر رنگ، سایز و بلوغ و بدون نشانه‌هایی از آسیب مکانیکی و پوسیدگی قارچی انتخاب شدند. ابتدا خوشه‌های سالم به مدت یک دقیقه با آب جاری شسته و حبه‌های انگور بدون هرگونه آسیب به بافت آن به همراه دم میوه جدا شدند. حبه‌های انگور زیر هود لامینار به مدت ۲ دقیقه با هیپوکلریت سدیم ۱ درصد، استریل و به‌منظور حذف باقی‌مانده ماده ضدعفونی‌کننده از سطح حبه‌ها سه بار آبشویی با آب مقطر استریل انجام شد. نمونه‌های استریل‌شده پس از آبشویی با استفاده از کاغذ صافی استریل زیر هود لامینار خشک و در سوسپانسیون اسپور قارچ *آسپرژیلوس* با غلظت 10^5 اسپور در میلی‌لیتر غوطه‌ور شدند. در نهایت نمونه‌ها روی کاغذ صافی استریل خشک و تحت تیمار پلاسما قرار گرفتند (Hu *et al.*, 2021).

تیمار پلاسما

طراحی و ساخت دستگاه مولد پلاسما

در این تحقیق دستگاه مولد پلاسما و پروب اختصاصی برای اعمال پلاسما روی حبه انگور طراحی و ساخته شد (شکل ۱) ساختار الکترودی پروب شامل یک استوانه‌ی شیشه‌ای (دی‌الکتریک) به قطر ۲۰ میلی‌متر بود که جدار بیرونی آن با یک ورقه مسی پیچیده شد. الکترود دوم نیز یک پنس فلزی بودکه با یک سیم به زمین متصل گردید. از این پنس به‌منظور نگهداری حبه انگور در استوانه شیشه‌ای و اعمال پلاسما استفاده شد.

شکل ۱- تصویر شماتیکی از منبع مولد پلاسما و پروب طراحی‌شده در آزمایشگاه بیوسیستم (دانشگاه بوعلی سینا): ۱- پاور، ۲- سیم انتقال پلاسما، ۳- پروب شامل دی‌الکتریک (a و c) و الکترود مس (b)، ۴- نمونه انگور، ۵- پلاسما با ستاره نشان داده شده است، ۶- الکترود دوم برای تخلیه پلاسما، ۷- سیم اتصال به زمین، ۸- پایه

Fig.1. Schematic diagram of the cold plasma source and probe designed at the Institute of Biosystems lab (Bu-Ali Sina University, Iran): 1- Power supply, 2- Wire transfer plasma, 3- Probe consisting of dielectric (a and c) and copper electrode (b), 4- Grape sample, 5- Plasma showed by stars, 6- Second electrode for plasma discharge, 7- Earth wire, and 8- Stand

تیمار نمونه‌ها با پلاسما

اعمال تیمار پلاسما با ولتاژ ۱۰ کیلوولت و با فرکانس ۸/۴ کیلوهرتز در چهار سطح صفر (عدم پلاسما)، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ ثانیه در شرایط تقریبا استریل انجام گرفت. به‌منظور کنترل آلودگی‌های ثانویه دستگاه مولد پلاسما، ظروف نگهداری نمونه‌ها و پنس با استفاده از اتانول ۷۰ درصد ضدعفونی شده و اعمال پلاسما زیر هود ضدعفونی‌شده انجام گرفت. به‌منظور جلوگیری از تماس حبه‌های تیمارشده با یکدیگر و گسترش آلودگی، صفحه مشبکی از جنس پلکسی ساخته و در ظروف شفاف قرار داده شدند. سپس حبه‌ها داخل این فضاهای مشبک قرار گرفته و در دمای ۱±۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. ارزیابی صفات نیز هر هفته یک بار و برای ۳۵ روز انجام شد.

بار میکروبی و پوسیدگی ظاهری انگور

برای محاسبه بار میکروبی در هر مرحله از نمونه‌برداری سه حبه انگور از هر تیمار جدا و در یک فالکون حاوی ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر استریل هموژنیزه شدند. سپس ۱۰۰ میکرولیتر از محلول هموژنیزه‌شده به‌آرامی در سطح پتری حاوی محیط سیب‌زمینی- دکستروز- آگار پخش شد. به دنبال آن نمونه‌ها در دمای ۲۲-۲۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شده و محاسبه تعداد کلونی‌ها پس از ۱۲

ساعت صورت گرفت. در نهایت تعداد کلونی‌های تشکیل‌شده[1] در محیط کشت شمارش و بار میکروبی بر اساس رابطه (۱) محاسبه گردید (Hu *et al.*, 2021).

Microbial load= Log (100**number of colonies*/3) (۱)

به‌منظور محاسبه میزان پوسیدگی (٪) هر هفته شکل ظاهری حبه‌ها بررسی و میزان آن بر اساس رابطه (۲) در هر تیمار محاسبه گردید (Hu *et al.*, 2020).

Infection percentage= (N2/N1)*100 (۲)

N1= تعداد کل حبه‌های مورد بررسی، N2= تعداد حبه‌های آلوده

ارزیابی کیفی انگور

خواص فیزیکی (کاهش وزن، رنگ ظاهری میوه)

کاهش وزن میوه با توزین میوه‌های ثابت در آغاز آزمایش و اندازه‌گیری مجدد در هر دوره ارزیابی صفت و با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ تعیین شد، سپس درصد کاهش وزن با استفاده از رابطه (۳) محاسبه گردید (Ahmadi & Khodamoradi, 2020).

Weight loss percentage= (*W1-W2*)/*W1**100 (۳)

W1= وزن میوه قبل از انبار کردن، W2= وزن میوه در مراحل انبار کردن

رنگ ظاهری حبه انگور با استفاده از دستگاه رنگ‌سنج دیجیتالی مدل hp-200 ساخت کشور چین و بر اساس روش L.a.b ارزیابی شد. بدین منظور تعداد ۳ نمونه از هر تیمار به‌طور تصادفی انتخاب، شماره‌گذاری و رنگ‌سنجی شد. سپس مقادیر L، a و b به‌دست‌آمده از دستگاه ثبت و مقدار ΔE (اختلاف رنگ) از رابطه (۴) محاسبه گردید (Ahmadi & Khodamoradi, 2020).

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2} \quad (۴)$$

ΔL تغییرات روشنایی، Δa تغییرات رنگ قرمز–سبز و Δb تغییرات رنگ زرد–آبی.

خواص مکانیکی

برای ارزیابی خواص مکانیکی انگور از آزمون پانچری و دستگاه تست مواد غذایی Zowick/roell مدل Bbt1-Fro.5th.D14 ساخت کشور آلمان استفاده شد. بدین منظور از پروب مسطح به قطر ۵ میلی‌متر با سرعت ۳۰۰ میلی‌متر بر دقیقه برای انجام این تست استفاده گردید. بدین صورت که پروب تا عمق معین (۱۵ درصد قطر نمونه) به درون نمونه‌ها نفوذ کرده و نمودار نیرو–جابه‌جایی توسط دستگاه ثبت گردید. در هر آزمایش مدول الاستیسیته، تغییرات نیروی نفوذ و انرژی آن اندازه‌گیری شد.

1- Colony forming units (CFU)

تصویربرداری حرارتی

دمای سطح انگور طی دوره نگهداری با استفاده از یک سیستم بررسی دمای مادون قرمز متشکل از یک دوربین حرارتی (FLIR T420، آمریکا) اندازه‌گیری شد. همچنین به‌منظور کنترل نواسانات محیطی تمامی عکس‌ها در ساعت یکسانی از روز و در شرایط ثابت دستگاه (میزان نور یکسان، پشت‌زمینه ثابت و آزمایشگر ثابت) در دمای ۰/۵±۲۵ درجه سانتی‌گراد گرفته شد. مشخصات دوربین مورد استفاده به شرح زیر بود.

میدان دید: ۱۹°*۲۰، حساسیت حرارتی: < دمای ۰/۰۴۵ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد، نرخ فریم: ۶۰ هرتز، فاصله کانونی: ۵/۷ تا ۱۳ میکرومتر، صفحه نمایشگر: ۳/۵ اینچ

خواص شیمیایی (TSS، pH و TA)

مواد جامد محلول با رفراکتومتر آتاگو مدل PAL-2 ساخت ژاپن و بر حسب درجه بریکس در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و pH آب‌میوه با استفاده از دستگاه pH متر مدل PHS3-W3B ساخت ایتالیا و با دقت ۰/۰۱ اندازه‌گیری شد. میزان اسید کل میوه با روش تیتراسیون اندازه‌گیری شد . برای این منظور ۲ میلی‌لیتر از آب‌میوه با ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر همگن و با سود ۰/۱ نرمال تا رسیدن به پی‌اچ ۸/۲±۰/۱ تیتر شد. اسید قابل تیتراسیون با استفاده از رابطه (۵) محاسبه و مقدار آن بر حسب درصد اسید غالب میوه (اسید سیتریک) بیان شد.

$$C=(N.V_b .E/V_j) \times 0.1, \quad (۵)$$

C اسید کل میوه بر حسب میلی‌گرم در ۱۰۰میلی‌لیتر، N نرمالیته سود مصرفی، Vb حجم سود مصرفی (میلی‌لیتر)، E وزن اکی والان اسید سیتریک (۶۴)، VJ حجم نمونه آب میوه (میلی‌لیتر)

آنالیز آماری

تمامی آزمایش‌ها به‌صورت آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح کاملا تصادفی در ۳ تکرار انجام شد. تجزیه واریانس داده‌ها با آزمون آنوا و مقایسه میانگین با آزمون چند دامنه‌ای دانکن انجام شد. تجزیه و تحلیل آماری داده‌های حاصل از آزمایش‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS صورت گرفت.

نتایج و بحث

محاسبه بار میکروبی و پوسیدگی سیاه در انگور

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۱، اثر متقابل سطوح مختلف پلاسما و مدت زمان انبارداری بر بارمیکروبی و درصد پوسیدگی قارچی در سطح ۱ درصد معنی‌دار شد. در مدت زمان بار

میکروبی در هفته اول از ۲/۵ و ۲ $\log^{CFUg-1}$ به‌ترتیب در پلاسما ۰ و ۱۰ ثانیه، و به صفر $\log^{CFUg-1}$ در پلاسمای ۲۰ و ۴۰ ثانیه کاهش یافت. با گذشت مدت زمان انبارمانی بار میکروبی در شاهد و تیمار پلاسما افزایش یافت و در هفته ۴ و ۵ انبارداری به بالاترین میزان خود در شاهد ($\log^{CFUg-1}$ ۹/۳) رسید اما در تمامی زمان‌ها بار میکروبی در انگور تیمارشده با پلاسما کمتر از شاهد بود (شکل ۲-a).

جدول ۱– نتایج تجزیه واریانس اثر سطوح مختلف پلاسما (صفر، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ ثانیه) و مدت زمان نگهداری (۱تا ۵ هفته) بر درصد پوسیدگی قارچی و بارمیکروبی در انگور تلقیح‌شده با قارچ *آسپرژیلوس نایجر*

Table 1- Variance analysis of the effect of plasma treatment (0, 10, 20, and 40 s) and storage time (1- 5 weeks) on microbial load and fungal decay percentage of grape inoculated with *Aspergillus Niger*

	میانگین مربعات Average of squares			
منابع تغییرات Source of variation	درجه آزادی Degree of freedom	درصد پوسیدگی قارچی Fungal decay	درجه آزادی Degree of freedom	بار میکروبی Microbial load
سطوح پلاسما Plasma	3	8420**	3	25.2**
دوره نگهداری Storage	4	4380**	5	9.93**
سطوح پلاسما * دوره نگهداری Plasma*Storage	12	8811**	15	0.7**
اشتباه آزمایشی Error	40	0.6	48	0.03
ضریب تغییر (درصد) (CV)		9.3		10.6

** Significant at 1% level ** معنی‌دار در سطح ۱ درصد.

مقایسه بین مدت زمان پلاسما نیز نشان داد که در پلاسما ۲۰ و ۴۰ ثانیه (بیشتر از ۱۰ ثانیه) تا هفته دوم بار میکروبی صفر $\log^{CFUg-1}$ بود. همچنین کمترین میزان بار میکروبی طی دوره انبارداری در پلاسما ۴۰ ثانیه مشاهده شد که گواه بر تاثیر افزایش مدت زمان پلاسما بر تاخیر بروز علایم بیماری و کاهش بار میکروبی می‌باشد (شکل ۲-a). در مجموع نتایج حاصل در این تحقیق کارآمدی تیمار پلاسما بر کنترل آلودگی میکروبی انگور پس از ۵ هفته نگهداری در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۲-b نشان داده شده است. پلاسما باعث کاهش درصد پوسیدگی میوه در مقایسه با شاهد شد. در شاهد و تیمار پلاسما با گذشت زمان درصد آلودگی افزایش یافت، اما در تیمار پلاسما به‌ویژه پلاسما ۴۰ ثانیه درصد آلودگی در تمامی زمان‌ها از شاهد و سایر زمان‌های پلاسما کمتر بود. در انتهای دوره آزمایش درصد آلودگی در پلاسما ۴۰ ثانیه ۶/۵ درصد و پلاسما ۲۰ ثانیه ۲۰ درصد بود در حالی‌که در شاهد از هفته ۴ و ۵ به ۱۰۰ درصد رسید. همچنین ظهور علایم در شاهد و پلاسما ۱۰ ثانیه به‌ترتیب از هفته اول و دوم مشخص شد. در حالی‌که در پلاسما ۳۰ و ۴۰ ثانیه از هفته سوم مشاهده شد. در شکل ۳ تصویر فیزیکی انگورهای تیمارشده با پلاسما و شاهد و گسترش کپک سیاه ناشی از آسپرژیلوس بر روی انگور به‌خوبی نشان داده شده است. همچنین عدم وجود قارچ در نمونه‌های تیمارشده با پلاسما نیز تاییدی بر کنترل آلودگی و بار میکروبی میوه می‌باشد.

تاثیر تیمار پلاسما در کنترل بیماری‌های قارچی و باکتریایی و در بسیاری از محصولات کشاورزی بررسی شده است. بر اساس تحقیقات صورت‌گرفته، کاربرد پلاسمای سرد در شرایط اتمسفری در میوه توت فرنگی، سیکل لگاریتمی باکتری کل، کپک و مخمر را کاهش داده است (Misra, Keener, Bourke, Mosnier, & Cullen, 2014) و در کاهو و سیب‌زمینی باعث کاهش سیکل لگاریتمی باکتری سالمونلا[1] شد (Fernandez, Noriega, & Thompson, 2013). بر اساس گزارش پاسکوالی و همکاران (Pasquali *et al.*, 2016) کاربرد پلاسمای سرد بر سبزیجات برگی نظیر شیکوره قرمز نیز بدون تاثیر بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی محصول به‌طور قابل‌توجهی باعث کاهش بار میکروبی محصول می‌گردد. در بلوبری تیمار پلاسمای سرد منجر به از بین رفتن مخمر، کاهش بار میکروبی قارچ و پوسیدگی خاکستری ناشی از بوتریتیس شد (Dong &Yang, 2019; Lacombe *et al.*, 2015; Rana *et al.*, 2020). تاثیر پلاسما بر غیرفعال‌سازی اسپور قارچ آسپرژیلوس در پسته، غلات و لگوم نیز موثر بوده است (Ghorashi, Tasouji, & Kargarian, 2020; Ott, Appleton, Shi, Keener, & Mellata, 2021; Selcuk *et al.*, 2008).

بر اساس تحقیقات صورت‌گرفته عامل اصلی خاصیت ضدمیکروبی تیمار پلاسمای سرد در فشار اتمسفر وجود انواع RONS[2] می‌باشد که به هنگام فرایند تخلیه بار الکتریکی هنگام تولید پلاسما تولید می‌شوند (Hu *et al.*, 2021). RONS از طریق ایجاد تنش‌های اکسیداتیو[3] در سلول‌ها منجر به آسیب‌های اکسیداتیو

1- Salmonella
2- Reactive oxygen and nitrogen species
3- Oxidative

در غشا سلولی و اجزای درون‌سلولی میکروارگانیزم و در نهایت مرگ سلول آن‌ها می‌شوند (Dobrynin, Fridman, Friedman, & Fridman, 2009; Ma *et al.*, 2016; Xu *et al.*, 2020). از سوی دیگر پلاسمای سرد با تخریب DNA و اکسیداسیون گوانین منجر به نابودی میکروارگانیزم نیز می‌شود (Rana *et al.*, 2020).

در پژوهش حاضر نیز پلاسما به‌صورت موثری بار میکروبی قارچ آسپرژیلوس و همچنین نرخ پوسیدگی در انگور تلقیح‌شده با اسپور قارچ *آسپرژیلوس نایجر* را کاهش داد، که می‌تواند به دلیل تاثیر RONS باشد. همچنین بیشترین تاثیر بر کنترل *آسپرژیلوس نایجر* در تیمار پلاسما ۴۰ ثانیه مشاهده شد، که با نتایج سایر محققان مبنی بر تاثیر افزایش مدت زمان پلاسما بر کنترل بار میکروبی مطابقت دارد (Hu *et al.*, 2021; Rana *et al.*, 2020).

شکل ۲- تاثیر تیمار پلاسما سرد (صفر، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ ثانیه) بر تعداد قارچ (a) و درصد پوسیدگی قارچی (b) در انگور تلقیح‌شده با قارچ *آسپرژیلوس نایجر* طی دوره نگهداری در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد. اعداد میانگین ۳ تکرار می‌باشند. حروف a تا h نشان‌دهنده‌ی وجود تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد بین تیمارهای مختلف پلاسما طی دوره نگهداری می‌باشند.

Fig.2. Effective inhibition of fungal number and decay percentage of grapes inoculated with *Aspergillus Niger* by cold plasma treatment (0, 10, 20, and 40 s) during storage at 4°C. (a) Fungal count and (b) Fugal decay (%) of treated grapes. Values are the mean value of three replications. Columns labeled with different letters (a-h) indicate significant differences among different cold plasma treatments during storage time ($P \leq 0.05$).

شکل ۳- تصاویر انگور تیمارشده با پلاسما (صفر، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ ثانیه) در هفته اول و پنجم دوره نگهداری در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد

Fig.3. Images of grape with cold plasma treatment (0, 10, 20, and 40 s) during storage (1 and 5 weeks) at 4°C

تاثیر پلاسما سرد بر خواص فیزیکی انگور

علاوه بر کنترل بیماری بر اساس شکل ۴ –a با گذشت زمان افت وزن در تمامی تیمارها افزایش یافت. بالاترین افت وزن در انتهای دوره در نمونه شاهد (۱/۶ درصد) مشاهده شد. در مقایسه بین زمان‌های مختلف پلاسما تا هفته دوم تفاوت معنی‌داری در افت وزن مشاهده نشد اما در هفته سوم بیشترین میزان افت وزن در پلاسما ۴۰ ثانیه رویت شد (۱/۲ درصد). در مجموع می‌توان گفت که این روند افزایشی طی دوره نگهداری در نمونه‌های شاهد و پلاسمای ۴۰ ثانیه در مقایسه با پلاسمای ۱۰ و ۲۰ ثانیه بالاتر است. محتوای آب درونی و رطوبت انگور بسیار بالاست. لذا به شرایط نگهداری دوران پس از برداشت بسیار حساس می‌باشند. آلودگی قارچی نیز افت وزن را نیز تشدید می‌کند (Lacombe *et al.*, 2015). لذا افت وزن در نمونه‌های شاهد می‌تواند به دلیل گسترش آلودگی و پیری محصول طی زمان باشد. اما افت وزن در تیمار پلاسمای ۴۰ ثانیه می‌تواند به دلیل تخریب بافت میوه ناشی از مدت زمان اعمال پلاسما و خروج رطوبت از دم میوه باشد. در تیمار ۱۰ و ۲۰ ثانیه پلاسما، درصد آلودگی در مقایسه با شاهد کمتر بود. همچنین تاثیر تخریبی پلاسما بر نمونه و در نهایت میزان افت وزن در مقایسه با پلاسمای ۴۰ ثانیه پایین‌تر است.

مین و همکاران (Min *et al.*, 2018) نشان دادند که اعمال سطوح مناسب پلاسمای سرد تاثیر معنی‌داری بر افت وزن گوجه‌فرنگی نگهداری‌شده در دمای ۱۰ و ۲۵ درجه سانتی‌گراد ندارد. تیمار پلاسمای سرد در کاهو بدون تاثیر بر افت وزن محصول به‌طور قابل‌توجهی بار میکروبی را کاهش داد (Song *et al.*, 2015). در توت‌فرنگی نیز پلاسما بر درصد رطوبت میوه پس از انبارداری تاثیری نداشت (Rana *et al.*, 2020). در پژوهش حاضر نیز در هفته اول آزمایش تفاوتی در افت وزن نمونه شاهد و نمونه‌های تیمارشده با پلاسما وجود نداشت. همچنین با گذشت زمان میزان افت وزن در پلاسما ۱۰ و ۲۰ ثانیه در مقایسه با شاهد بسیار کمتر بود.

در مقایسه سطوح پلاسما به نظر می‌رسد تیمار پلاسمای ۲۰ ثانیه کارایی بالاتری داشته باشد. اگرچه درصد کنترل بیماری در این تیمار کمتر از تیمار ۴۰ ثانیه پلاسما می‌باشد، اما تاثیر کمتری بر افت وزن دارد. لذا این تیمار منجر به حفظ کیفیت محصول نیز می‌گردد.

رنگ میوه به‌عنوان یک شاخص مهم در کیفیت ظاهری انگور پس از تیمار پلاسما و طی دوره نگهداری ارزیابی شد. شاخص L^*، a^* و b^* به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی درجه روشنایی، رنگ سبز/قرمز و آبی/ زرد می‌باشد. همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده است با افزایش مدت زمان انبارداری در شاهد و تیمار پلاسما شاخص L، a و b به‌طور معنی‌داری کاهش یافتند. در هفته اول آزمایش بین شاهد و تیمار پلاسما تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. اما با گذشت زمان این روند تا حدودی تغییر کرد به طوری‌که در هفته سوم کمترین میزان شاخص L و a در شاهد و کمترین میزان شاخص b در تیمار ۴۰ ثانیه صورت گرفت (جدول ۲). مقایسه بین زمان‌های مختلف پلاسما نیز نشان داد که با گذشت زمان بیشترین کاهش در شاخص‌های رنگ‌سنجی در پلاسما ۴۰ ثانیه صورت گرفته است. بر اساس شکل b۴ شاخص تغییر رنگ طی دوره نگهداری در شاهد و در تمامی سطوح پلاسما روند افزایشی دارد. بیشترین میزان تغییر رنگ پس از ۳ هفته و در شاهد (۴/۳) مشاهده شد. در مقایسه بین زمان‌های مختلف پلاسما نیز بالاترین میزان تغییر رنگ در پلاسما ۴۰ ثانیه صورت گرفت درحالی‌که تفاوت معنی‌داری بین پلاسمای ۱۰ و ۲۰ ثانیه مشاهده نشد (شکل ۴–b).

شکل ٤ -تاثیر تیمار پلاسما سرد (صفر، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ ثانیه) بر کاهش وزن (a) و تغییرات رنگ (b) در انگور طی دوره نگهداری در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد. اعداد، میانگین ۳ تکرار می‌باشند. حروف a تا e نشان‌دهنده‌ی وجود تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد بین تیمارهای مختلف پلاسما طی دوره نگهداری می‌باشند.

Fig.4. (a) Weight loss and (b) color changes of grapes with cold plasma treatment (0, 10, 20, and 40 s) during storage at 4 °C. Values are the mean value of three replications. Columns labeled with different letters (a-e) indicate significant differences among different cold plasma treatments during storage time ($P \leq 0.05$).

تشعشات حاصل از پلاسما قدرت انتشار و عمر کوتاهی دارند و لذا تاثیر آن‌ها عموما سطحی بوده و بر ویژگی‌های ظاهری محصول نظیر رنگ موثر می‌باشند (Xu *et al.*, 2021). همچنین شدت و مدت زمان اعمال پلاسما نیز می‌تواند بر تغییرات رنگ محصول موثر باشد.

در پژوهش حاضر قبل از گسترش پوسیدگی سیاه حاصل از آسپرژیلوس تغییر رنگ معنی‌داری در نمونه شاهد و پلاسمای ۱۰ و ۲۰ ثانیه مشاهده نشد. اما به دلیل گسترش آلودگی در هفته سوم نمونه شاهد تیره‌تر شد. محققان تغییر رنگ ناشی از اعمال پلاسما را

به دلایل متفاوتی نظیر اکسیداسیون و تخریب رنگدانه‌ها توسط گونه‌های واکنش‌گر با افزایش ولتاژ و تولید ازون و رادیکال‌های هیدروکسیل تولیدشده ناشی از افزایش مدت زمان اعمال پلاسما نسبت داده‌اند (Jayasena *et al.*, 2015; Ramazzina *et al.*, 2015). در تحقیق حاضر نیز با افزایش مدت زمان اعمال پلاسما به ۴۰ ثانیه کاهش قابل‌توجهی در شاخص‌های L*، a* و b* و در نهایت تغییر رنگ محصول مشاهده شد. تحقیقات نشان می‌دهد اعمال پلاسما در مدن زمان مناسب تاثیری در شاخص‌های رنگی و تغییر رنگ گوجه‌فرنگی، کاهو و هویج و توت‌فرنگی نداشت (Bermúdez-Aguirre *et al.*, 2013; Misra *et al.*, 2014) اما در بلوبری تیمار مدت زمان نامناسب پلاسما باعث از بین رفتن واکس سطحی میوه شده و منجر به تیرگی محصول می‌گردد (Hu *et al.*, 2021; Lacombe *et al.*, 2015).

جدول ۲– تاثیر سطوح مختلف پلاسما (صفر، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ ثانیه) بر شاخص‌های رنگ‌سنجی (L*- a* - b*) طی دوره نگهداری در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد

Table 2- Color parameters (L*- a* - b*) of grapes with cold plasma treatment (0, 10, 20, and 40 s) during storage at 4°C

شاخص‌های رنگ‌سنجی Color parameters	مدت زمان تیمار Treatment time (s)	مدت زمان انبارداری Storage time (Week)		
		1	2	3
L*	0	35.8^{ab}	34.59^{ef}	34.05^{h}
	10	36.53^{a}	35.11^{bc}	34.34^{efg}
	20	36.42^{a}	34.76^{de}	34.60^{ef}
	40	35.83^{ab}	35.14^{bc}	34.23^{g}
a*	0	-1.36^{a}	-2.15^{bc}	-2.83^{e}
	10	-1.46^{a}	-1.81^{ab}	-2.58^{cd}
	20	-1.47^{a}	-1.82^{ab}	-2.57^{cd}
	40	-1.40^{a}	-1.73^{ab}	-2.68^{d}
b*	0	15.5^{a}	13.53^{cd}	13.02^{f}
	10	15.77^{a}	14.59^{b}	13.19^{d}
	20	15.83^{a}	14.59^{b}	13.48^{cd}
	40	15.76^{a}	14.50^{b}	12.29^{e}

حروف a تا h نشان‌دهنده‌ی تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد می‌باشند.

Data presented as mean ± SD. Values in the same column followed by different letters (a–h) are significantly different ($P \leq 0.05$).

تاثیر پلاسما سرد بر خواص شیمیایی انگور

روش‌های کنترل بیماری به‌طور معمول اثرات منفی بر ویژگی‌های کیفی محصول دارند، از این روز تاثیر مدت زمان‌های مختلف پلاسما بر خواص شیمیایی انگور طی دوره پس از برداشت در دمای ۴ درجه مورد بررسی قرار گرفت.

بر اساس جدول ۳، در تمامی زمان‌های آزمایش تفاوت معنی‌داری در شاخص pH بین شاهد و پلاسمای کمتر از ۴۰ ثانیه مشاهده نشد اما در پلاسما۴۰ ثانیه میزان pH در مقایسه با شاهد کاهش یافت. افزایش دوره نگهداری باعث افزایش میزان pH هم در شاهد و هم در تیمار پلاسما شد. بیشترین تغییرات میزان pH در مقایسه با هفته اول در شاهد و در پلاسما ۴۰ ثانیه مشاهده شد اما در پلاسما ۱۰ و ۲۰ ثانیه روند تغییرات تدریجی بود و معنی‌دار نشد.

مقایسه میانگین اثر متقابل پلاسما طی دوره نگهداری در ارتباط با شاخص TSS نشان داد که با گذشت زمان در تمامی سطوح پلاسما میزان TSS افزایش می‌یابد (جدول ۳). بالاترین میزان TSS در تمامی دوره نگهداری در شاهد و پلاسما ۴۰ ثانیه بالاتر از پلاسمای ۱۰ و ۲۰ ثانیه بود. تفاوت معنی‌داری بین پلاسما ۱۰ و ۲۰ ثانیه طی دوره نگهداری مشاهده نشد (جدول ۳). در مجموع پس از ۳ هفته نگهداری در دمای ۴ درجه تفاوتی در شاخص TSS بین شاهد و پلاسما مشاهده نشد. به‌طور کلی با افزایش میزان pH و TSS طی دوره نگهداری میزان TA نیز کاهش می‌یابد. نتایج حاصل در این پژوهش نشان داد که با افزایش زمان در تمامی سطوح پلاسما میزان TA کاهش می‌یابد. در تمامی زمان‌ها کمترین میزان TA در شاهد و بیشترین TA در پلاسما ۴۰ ثانیه رویت شد (جدول ۳).

به دلیل افزایش تنفس، گسترش آلودگی و تسریع فرایند پیری، میزان pH طی دوره نگهداری در محصول به‌تدریج افزایش یافته و قلیایی می‌گردد. همچنین بالا رفتن غلظت آب‌میوه در اثر اتلاف آب و افت وزن طی دوره نگهداری منجر به افزایش TSS می‌شود (Kader & Watkins, 2000). در نهایت با افزایش TSS و pH طی دوره نگهداری میزان TA نیز کاهش می‌یابد. بر اساس

نتایج این پژوهش در انتهای دوره نگهداری کمترین میزان PH در پلاسما ۴۰ ثانیه مشاهده شد که می‌تواند به دلیل کنترل آلودگی باشد زیرا آلودگی قارچی منجر به قلیایی شدن محیط می‌گردد. بیشترین میزان TSS نیز در زمان‌های مورد بررسی در شاهد و پلاسمای ۴۰ ثانیه مشاهده شد. بالاتر بودن میزان TSS شاهد و پلاسمای ۴۰ ثانیه می‌تواند به‌ترتیب به دلیل افت وزن ناشی از گسترش آلودگی (در شاهد) و خروج رطوبت ناشی از آسیب به بافت محل اتصال دم به میوه (در پلاسما ۴۰ ثانیه) باشد. این کاهش رطوبت منجر به افزایش ظاهری شاخص TSS می‌شود.

تحقیقات صورت‌گرفته در ارتباط با تاثیر پلاسما سرد بر خواص شیمیایی محصول نشان داده است که تاثیر پلاسما عموما بر خواص ویژگی‌های سطحی محصول بوده و در ولتاژ و مدت زمان مناسب تاثیری بر خواص شیمیایی درونی محصول ندارد (Hu *et al.*, 2021). در بلوبری پلاسما کمتر از ۱۵ دقیقه پس از ۱۰ روز و در توت‌فرنگی، ۱۵ دقیقه پلاسما سرد همراه با بسته‌بندی پس از ۵ روز نگهداری بر میزان pH و TSS تاثیری نداشته است (Hu *et al.*, 2021; Rana *et al.*, 2020). پژوهش‌های صورت‌گرفته در محصولاتی نظیر قارچ، گوجه‌فرنگی، کیوی، آب پرتقال و سیب نیز نشان داد پلاسما تاثیری بر میزان pH ندارد (Dasan & Boyaci, 2018; Misra *et al.*, 2014; Ramazzina *et al.*, 2015).

جدول ۳- تاثیر سطوح مختلف پلاسما (صفر، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ ثانیه) بر خواص شیمیایی انگور (pH، TSS و TA) طی دوره نگهداری در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد

Table 3- Chemical parameters (pH, TSS, and TA) of grapes after cold plasma treatment (0, 10, 20, and 40 s) during storage at 4 °C

شاخص‌های شیمیایی Chemical parameters	مدت زمان تیمار Treatment time (s)	زمان انبارداری Storage time (Week)		
		1	2	3
pH	0	3.96^{bc}	4.16^{b}	4.30^{a}
	10	3.98^{bc}	4.2^{ab}	4.28^{ab}
	20	3.98^{bc}	4.17^{b}	4.23^{ab}
	40	3.82^{d}	3.91^{c}	3.98^{bc}
TSS	0	20.97^{e}	22.78^{b}	23.45^{a}
	10	20.10^{g}	21.72^{cd}	23.20^{ab}
	20	20.18^{g}	21.80^{cd}	23.28^{ab}
	40	21.30^{de}	22.06^{c}	23.86^{a}
TA	0	0.76^{cde}	0.74^{de}	0.67^{f}
	10	0.85^{b}	0.78^{cd}	0.70^{ef}
	20	0.85^{b}	0.78^{cd}	0.76^{de}
	40	0.93^{a}	0.88^{ab}	0.81^{bc}

حروف a تا g نشان‌دهنده‌ی تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد می‌باشند.

Data presented as mean ± SD. Values in the same column followed by different letters (a–g) are significantly different ($P \leq 0.05$).

تاثیر پلاسما سرد بر دمای سطحی محصول

اعمال پلاسما همراه با تولید انرژی و گرما می‌باشد لذا اندازه‌گیری دمای سطح محصول اهمیت دارد. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است طی دوره نگهداری و در سطوح مختلف پلاسما، دمای محصول کاهش یافت. در هفته اول و دوم آزمایش بین سطوح مختلف پلاسما تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. اما در هفته سوم میانگین دما بین سطوح پلاسما به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. در هفته چهارم کمترین میزان دما در تیمار شاهد (۲۰/۷ درجه سانتی‌گراد) و بیشترین دما در پلاسمای ۱۰ ثانیه و ۲۰ ثانیه (۲۳/۳ درجه سانتی‌گراد) مشاهده شد. لذا بیشترین و کمترین تغییرات افت دما به‌ترتیب در تیمار شاهد (۵ درجه سانتی‌گراد) و پلاسمای ۱۰ و ۲۰ ثانیه (بین ۳ تا ۳/۵ درجه سانتی‌گراد) صورت گرفت (شکل ۵).

بر اساس تحقیقات صورت‌گرفته افت وزن و کاهش رطوبت محصول طی دوره نگهداری باعث کاهش دمای محصول نیز می‌شود. از سوی دیگر افزایش آلودگی‌های قارچی منجر به کاهش رطوبت و افزایش افت وزن و به دنبال آن کاهش دمای محصول می‌گردد. در تحقیق حاضر نیز کاهش دما پس از ۴ هفته در شاهد به دلیل گسترش آلودگی و افت وزن و در پلاسما ۴۰ ثانیه به دلیل افت وزن ناشی از اثر تخریبی پلاسما بالاتر بود. در حالی‌که کمترین میزان افت دما در تیمار ۱۰ و ۲۰ ثانیه صورت گرفت. در مجموع نتایج نشان داد هرچه میزان تخریب بافت وکاهش رطوبت بالاتر باشد، دما بیشتر کاهش می‌یابد. همچنین هر عاملی که منجر به پیری محصول و گسترش آلودگی گردد دمای آن را نیز کاهش می‌دهد (Chelladurai, Jayas, & White, 2010; Hellebrand, Beuche, & Linke, 2002; Varith, Hyde, Baritelle,

Fellman, & Sattabongkot, 2003).

تاثیر پلاسمای سرد بر خواص مکانیکی انگور

بر اساس جدول ۴ روند کاهشی در مدول الاستیسیته، نیروی نفوذ و کار نفوذ (w) طی دوره نگهداری در شاهد و تمامی زمان‌های اعمال پلاسما مشاهده شد. تا هفته دوم دوره نگهداری تفاوت معنی‌داری بین شاهد و زمان‌های مختلف پلاسما در شاخص نیروی نفوذ مشاهده نشد. اما در این زمان مدول الاستیسیته و کار نفوذ در پلاسما ۴۰ ثانیه (به‌ترتیب ۰/۰۱۴۲ و ۱۹/۷۲) در مقایسه با شاهد (به‌ترتیب ۰/۰۱۵۵ و ۲۲/۶۲) و سایر زمان‌های پلاسما به‌طور معنی‌داری کمتر بود. این روند در ارتباط با هر سه شاخص در هفته سوم تغییر کرد و کمترین میزان در شاخص‌های مکانیکی بدون اختلاف معنی‌دار برای شاهد و پلاسما ۴۰ ثانیه صورت گرفت.

شکل ۵- تصاویر حرارتی از انگور تیمارشده با پلاسما (صفر، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ ثانیه) طی انبارداری (۱ تا ۴ هفته) در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد

Fig.5. Thermal images of grapes after cold plasma treatment (0, 10, 20, and 40 s) during storage (1 to 4 weeks) at 4°C

ویژگی بافت محصول یکی از مهم‌ترین پارامترهای کیفی در ارزیابی عمر ماندگاری انگور می‌باشد. طی دوره انبارداری و در اثر فعالیت آنزیم‌های تجزیه‌کننده دیواره سلولی از بین رفته و میوه نرم می‌شود. کاهش وزن و از دست رفتن رطوبت محصول نیز می‌تواند منجر به تسریع فرایند پیری و کاهش خواص مکانیکی گردد. گسترش پوسیدگی قارچی نیز تخریب دیواره سلولی، کاهش سفتی و در نهایت فرایند پیری را افزایش می‌دهد (Rux *et al.*, 2015).

کاهش شاخص‌های مکانیکی نظیر مدول الاستیسیته و نیروی نفوذ نشان‌دهنده کاهش کیفیت و نرمی محصول طی دوره نگهداری می‌باشد. در پژوهش حاضر نیز طی انبارداری و با گسترش آلودگی در نمونه شاهد شاخص‌های مکانیکی کاهش یافت. در توت‌فرنگی تیمارشده با پلاسما نیز به دلیل کنترل پوسیدگی قارچی در مقایسه با شاهد بافت سفت‌تری داشتند (Misra *et al.*, 2014). در این تحقیق کمترین میزان شاخص‌ها در پلاسما ۴۰ ثانیه صورت گرفت در حالی‌که در پلاسمای کمتر از ۲۰ و شاهد تا اواسط دوره نگهداری تفاوتی نداشتند. بر اساس گزارش میرسا و همکاران (Misra *et al.*, 2014) اعمال پلاسما می‌تواند سفتی بافت را کاهش دهد. لذا بهینه‌سازی مدت و شدت آن بسیار اهمیت دارد (Pan, Cheng, & Sun, 2021) تحقیقات صورت‌گرفته نشان می‌دهد اعمال سطوح مناسب پلاسما بر برشی‌های طالبی، کیوی، سیب، بلوبری و توت‌فرنگی تاثیری بر سفتی بافت نداشته است (Hu *et al.*, 2021; Ramazzina *et al.*, 2015; Tappi *et al.*, 2016; Zhou, Li, Cong, Suo, & Wu, 2022; Ziuzina *et al.*, 2020)، اما افزایش مدت زمان اعمال پلاسما و سطوح نامناسب آن باعث کاهش سفتی در توت‌فرنگی شد (Aday, Büyükcan, Temizkan, & Caner, 2013). در بلوبری تیمار پلاسمای سرد کمتر از ۱۵ دقیقه تاثیری بر سفتی بافت نداشت اما ۲۰ دقیقه پلاسما منجر به نرمی میوه

شد (Hu *et al.*, 2021). در مجموع به نظر می‌رسد در تحقیق حاضر به دلیل گسترش آلودگی در نمونه شاهد و در انتهای آزمایش و در پلاسمای ۴۰ ثانیه به دلیل تخریب بافت و خروج رطوبت از محل اتصال دم به میوه، سفتی محصول کاهش می‌یابد.

جدول ٤– شاخص‌های مکانیکی (Emod, Fmax and W) در انگور تیمارشده با پلاسما (صفر، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ ثانیه) طی دوره نگهداری در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد

Table 4- Mechanical parameters (Emod, Fmax, and W) of grapes with cold plasma treatment (0, 10, 20, and 40 s) during storage at 4°C

شاخص‌های مکانیکی Mechanical parameters	مدت زمان تیمار Treatment time (s)	مدت زمان انبارداری Storage time (Week) 1	2	3
Emod	0	0.0177^{ab}	0.0155^{cd}	0.0123^{f}
	10	0.0169^{ab}	0.0156^{cd}	0.0157^{cd}
	20	0.018^{a}	0.0156^{cd}	0.0154^{d}
	40	0.0166^{bc}	0.0142^{e}	0.0125^{f}
Fmax	0	8.35^{a}	5.25^{cd}	5.14^{d}
	10	7.91^{ab}	5.36^{cd}	5.51^{cd}
	20	6.64^{bc}	6.64^{bc}	5.88^{cd}
	40	6.31^{c}	5.44^{cd}	5.16^{d}
W	0	27.95^{ab}	22.62^{c}	15.63^{f}
	10	27.7^{ab}	22.26^{c}	17.81^{e}
	20	28.21^{a}	22.21^{c}	17.42^{e}
	40	26.55^{b}	19.72^{d}	15.3^{f}

حروف a تا f نشان‌دهنده‌ی تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد می‌باشند.

Data presented as mean ± SD. Values in the same column followed by different letters (a–f) are significantly different ($P \leq 0.05$).

نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر نشان داد که تیمار پلاسمای سرد در فشار اتمسفر یک روش پس از برداشت موثر در کنترل پوسیدگی سیاه حاصل از قارچ *آسپرژیلوس نایجر* همراه با حفظ ویژگی‌های کیفی انگور طی ۳ هفته نگهداری در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. با این حال شایان ذکر است که مدت زمان تیمار پلاسمای سرد در فشار اتمسفر بر حفظ کیفیت انگور در دوره نگهداری اهمیت دارد چرا که افزایش مدت زمان می‌توان باعث کاهش برخی از پارامترهای کیفی محصول انگور شود. بالاترین میزان کنترل پوسیدگی سیاه در پلاسما ۴۰ ثانیه صورت رفت. در حالی‌که به دلیل آسیب به بافت میوه در این تیمار کیفیت میوه کاهش یافت. در تیمار پلاسمای ۱۰ و ۲۰ ثانیه کمترین میزان تغییرات در خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی صورت گرفت و تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نداشتند. اما در ارتباط با کنترل پوسیدگی سیاه پلاسما ۲۰ ثانیه کارآمدتر بود. در مجموع با توجه به ساختار انگور اعمال پلاسما باید در مدت زمان مناسبی صورت گیرد تا علاوه بر کنترل بیماری به بافت میوه نیز آسیب نرسد.

سپاسگزاری

از معاونت محترم پژوهشی و فناوری دانشگاه بوعلی سینا برای تأمین اعتبار این پژوهش سپاسگزاری می‌شود.

مشارکت نویسندگان

علی خلج: جمع‌آوری داده‌ها، اعتبارسنجی
ابراهیم احمدی: نظارت و مدیریت، پردازش داده‌ها
سهیلا میرزایی: مشاوره فنی
فهیمه قائمی‌زاده: تحلیل آماری، تهیه متن اولیه
روزبه عباس‌زاده: مشاوره فنی

Rreferences

1. Aday, M. S., Büyükcan, M. B., Temizkan, R., & Caner, C. (2013). Role of ozone concentrations and exposure times in extending the shelf life of strawberry. *Ozone: Science and Engineering*, *36*(1), 43-56. https://doi.org/10.1080/01919512.2013.833851
2. Arfaoui, M., Vallance, J., Bruez, E., Rezgui, A., Melki, I., Chebil, S., & Rey, P. (2019). Isolation, identification, and in vitro characterization of grapevine rhizobacteria to control ochratoxigenic *Aspergillus spp*. on grapes. *Biological Control*, *129*, 201-211. https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2018.10.019
3. Bermúdez-Aguirre, D., Wemlinger, E., Pedrow, P., Barbosa-Cánovas, G., & Garcia-Perez, M. (2013). Effect of

atmospheric pressure cold plasma (APCP) on the inactivation of *Escherichia coli* in fresh produce. *Food Control*, *34*(1), 149-157. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.04.022

4. Bourke, P., Ziuzina, D., Boehm, D., Cullen, P. J., & Keener, K., (2018). The potential of cold plasma for safe and sustainable food production. *Trends in Biotechnology*, *36*(6), 615-626. https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2017.11.001
5. Butscher, D., Zimmermann, D., Schuppler, M., & Von Rohr, P. R. (2016). Plasma inactivation of bacterial endospores on wheat grains and polymeric model substrates in a dielectric barrier discharge. *Food Control*, *60*, 636-645. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.09.003
6. Chelladurai, V., Jayas, D. S., & White, N. D. G. (2010). Thermal imaging for detecting fungal infection in stored wheat. *Journal of Stored Products Research*, *46*(3), 174-179. https://doi.org/10.1016/j.jspr.2010.04.002
7. Crisosto, C. H. (2002). Mitchell, F.G. Postharvest Handling Systems: Table grapes. *In Postharvest Technology of Horticultural Crops*; Kader, A.A., Ed.; University of California Agricultural and Natural Resources Pub: Davis, CA, USA. pp. 357-363.
8. Dasan, G. B., & Boyaci, I. H. (2018). Effect of cold atmospheric plasma on inactivation of Escherichia coli and physicochemical properties of apple, orange, tomato juices, and sour cherry nectar. *Food and Bioprocess Technology*, *11*(2), 334-343. https://doi.org/10.1007/s11947-017-2014-0
9. De Simone, N., Pace, B., Grieco, F., Chimienti, M., Tyibilika, V., Santoro, V., & Russo, P. (2020). Botrytis cinerea and table grapes: A review of the main physical, chemical, and bio-based control treatments in post-harvest. *Foods*, *9*(9), 1138. https://doi.org/10.3390/foods9091138
10. Dobrynin, D., Fridman, G., Friedman, G., & Fridman, A. (2009). Physical and biological mechanisms of direct plasma interaction with living tissue. *New Journal of Physics*, *11*, 115020. https://doi.org/10.1088/1367-2630/11/11/115020
11. Dong, X. Y., & Yang, Y. L. (2019). A novel approach to enhance blueberry quality during storage using cold plasma at atmospheric air pressure. *Food and Bioprocess Technology*, *12*(8), 1409-1421. https://doi.org/10.1007/s11947-019-02305-y
12. Duarte-Sierra, A., Aispuro-Hernández, E., Vargas-Arispuro, I., Islas-Osuna, M. A., González-Aguilar, G. A., & Martínez-Téllez, M. Á. (2016). Quality and PR geneexpression of table grapes treated with ozone and sulfur dioxide to control fungal decay. *Journal of Science and Food Agriculture*, *96*, 2018-2024. https://doi.org/10.1002/jsfa.7312
13. FAO. (2021). http://www.faostat.fao.org/. Access date 24 March 2023.
14. Fernandez, A., Noriega, E., & Thompson, A. (2013). Inactivation of Salmonella enterica serovar Typhimurium on fresh produce by cold atmospheric gas plasma technology. *Food Microbiology*, *33*(1), 24-29. https://doi.org/10.1016/j.fm.2012.08.007
15. Gabler, F. M., & Smilanick, J. L. (2001). Postharvest control of table grape gray mold on detached berries with carbonate and bicarbonate salts and disinfectants. *American Journal of Enology and Viticulture*, *52*, 12-2. https://doi.org/10.5344/ajev.2001.52.1.12
16. Ghorashi, A. H., Tasouji, M. R., & Kargarian, A. (2020). Optimum cold plasma generating device for treatment of *Aspergillus flavus* from nuts surface. *Journal of Food Science and Technology*, *57*, 3988-3994. https://doi.org/10.1007/s13197-020-04429-y
17. Hellebrand, H. J., Beuche, H., & Linke, M. (2002). Thermal imaging: A promising high-tec method in agriculture and horticulture. *Physical Methods in Agriculture: Approach to Precision and Quality*, 411-427. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0085-8_22
18. Himelrick, D. G. (2003). Handling, storage and postharvest physiology of Muscadine grapes: A review. *Small Fruits Review*, *2*(4), 45-62. https://doi.org/10.1300/J301v02n04_06
19. Hu, X., Sun, H., Yang, X., Cui, D., Wang, Y., Zhuang, J., & Jiao, Z. (2021). Potential use of atmospheric cold plasma for postharvest preservation of blueberries. *Postharvest Biology and Technology*, *179*, 111564. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.111564
20. Jayasena, D. D., Kim, H. J., Yong, H. I., Park, S., Kim, K., Choe, W., & Jo, C. (2015). Flexible thin-layer dielectric barrier discharge plasma treatment of pork butt and beef loin: Effects on pathogen inactivation and meat-quality attributes. *Food Microbiology*, *46*, 51-57. https://doi.org/10.1016/j.fm.2014.07.009
21. Kader, A. A., & Watkins, C. B. (2000). Modified atmosphere packaging-toward 2000 and beyond. *HortTechnology*, *10*(3), 483-486. https://doi.org/10.21273/HORTTECH.10.3.483
22. Kasfi, K., Taheri, P., Jafarpour, B., & Tarighi, S. (2018). Characterization of antagonistic microorganisms against *Aspergillus spp*. from grapevine leaf and berry surfaces. *Journal of Plant Pathology*, *100*, 179-190. https://doi.org/10.1007/s42161-018-0042-x
23. Khodamoradi, S., & Ahmadi, E. (2019). Effect of Chitosan Coating on Physical, Mechanical and Chemical Properties of Grapes during Storage. *Journal of Agricultural Machinery*, *9*(2), 347-364. (In Persian). https://doi.org/10.22067/jam.v9i2.69423
24. Lacombe, A., Niemira, B. A., Gurtler, J. B., Fan, X. T., Sites, J., Boyd, G., & Chen, H. Q. (2015). Atmospheric

cold plasma inactivation of aerobic microorganisms on blueberries and effects on quality attributes. *Food Microbiology*, *46*, 479-484. https://doi.org/10.1016/ j.fm.2014.09.010
25. Lu, S. L., Yang, X. Z., Li, X. H., Shen, L. M., & Ma, H. Y. (2013). Effect of sulfur dioxide treatment on storage quality and SO_2 residue of victoria grape. *Advanced Materials Research*, *798*, 1033-1036. https://www.scientific.net/AMR.798-799.1033
26. Ma, R. N., Yu, S., Tian, Y., Wang, K. L., Sun, C. D., Li, X., Zhang, J., Chen, K. S., & Fang, J. (2016). Effect of non-thermal plasma-activated water on fruit decay and quality in postharvest Chinese bayberries. *Food Bioprocess Technology*, *9*(11), 1825-1834. https://doi.org/10.1007/s11947-016-1761-7
27. Meng, X. H., Qin, G. Z., & Tian, S. P. (2010). Influences of preharvest spraying Cryptococcus laurentii combined with postharvest chitosan coating on postharvest diseases and quality of table grapes in storage. *LWT-Food Science and Technology*, *43*(4), 596-601. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2009.10.007
28. Min, S. C., Roh, S. H., Niemira, B. A., Boyd, G., Sites, J. E., Fan, X., Sokorai, K., & Jin, T. Z. (2018). In-package atmospheric cold plasma treatment of bulk grape tomatoes for microbiological safety and preservation. *Food Research International*, *108*, 378-386. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.03.033
29. Misra, N. N., Keener, K. M., Bourke, P., Mosnier, J. P., & Cullen, P. J. (2014). In-package atmospheric pressure cold plasma treatment of cherry tomatoes. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, *118*(2), 177-182. https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2014.02.005
30. Olivas, G. I., & Barbosa-Cánovas, G. (2009). *Edible films and coatings for fruits and vegetables*: In: Huber, K., Embuscado, M. (eds), Edible films and coatings for food applications, Springer, New York, pp. 211-244. NY. https://doi.org/10.1007/978-0-387-92824-1_7
31. Oliver, R. P., & Hewitt, H. G. (2014). *Fungicides in crop protection*. Published by Cabi.
32. Ott, L. C., Appleton, H. J., Shi, H., Keener, K., & Mellata, M. (2021). High voltage atmospheric cold plasma treatment inactivates *Aspergillus flavus* spores and deoxynivalenol toxin. *Food Microbiology*, *95*, 103669. https://doi.org/10.1016/j.fm.2020.103669
33. Pan, Y. W., Cheng, J. H., & Sun, D. W. (2021). Inhibition of fruit softening by cold plasma treatments: Affecting factors and applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *61*(12), 1935-1946. https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1776210
34. Pasquali, F., Stratakos, A. C., Koidis, A., Berardinelli, A., Cevoli, C., Ragni, L., Mancusi, R., Manfreda, G., & Trevisani, M. (2016). Atmospheric cold plasma process for vegetable leaf decontamination: A feasibility study on radicchio (red chicory, *Cichorium intybus* L.). *Food Control*, *60*, 552-559. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.08.043
35. Pezzuto, J. M. (2008). Grapes and human health: a perspective. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *56*(16), 6777-6784. https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/jf800898p
36. Ponsone, M. L., Chiotta, M. L., Combina, M., Dalcero, A., & Chulze, S. (2011). Biocontrol as a strategy to reduce the impact of ochratoxin A and *Aspergillus* section Nigri in grapes. *International Journal of Food Microbiology*, *151*(1), 70-77. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2011.08.005
37. Ramazzina, I., Berardinelli, A., Rizzi, F., Tappi, S., Ragni, L., Sacchetti, G., & Rocculi, P. (2015). Effect of cold plasma treatment on physico-chemical parameters and antioxidant activity of minimally processed kiwifruit. *Postharvest Biology and Technology*, 107, 55-65. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.04.008
38. Rana, S., Mehta, D., Bansal, V., Shivhare, U. S., & Yadav, S. K. (2020). Atmospheric cold plasma (ACP) treatment improved in-package shelf-life of strawberry fruit. *Journal of Food Science and Technology*, *57*, 102-112. https://doi.org/10.1007/s13197-019-04035-7
39. Rux, G., Mahajan, P., Linke, M., Saengerlaub, S., Pant, A., Caleb, O., & Geyer, M. (2015). Application of humidity-regulating trays for packaging of fresh strawberry and tomato. *In III International Conference on Fresh-Cut Produce: Maintaining Quality and Safety*, *1141*, 263-268. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1141.32
40. Sanchez-Ballesta, M. T., Alvarez, I., Escribano, M. I., Merodio, C., & Romero, I. (2020). Effect of high CO_2 levels and low temperature on stilbene biosynthesis pathway gene expression and stilbenes production in white, red and black table grape cultivars during postharvest storage. *Plant Physiology and Biochemistry*, *151*, 334-341. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.03.049
41. Selcuk, M., Oksuz, L., & Basaran, P. (2008). Decontamination of grains and legumes infected with *Aspergillus* spp. and Penicillum spp. by cold plasma treatment. *Bioresource Technology*, *99*(11), 5104-5109. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.09.076
42. Song, A. Y., Oh, Y. J., Kim, J. E., Song, K. B., Oh, D. H., & Min, S. C. (2015). Cold plasma treatment for microbial safety and preservation of fresh lettuce. *Food Science and Biotechnolgy*, *24*, 1717-1724. https://doi.org/10.1007/s10068-015-0223-8
43. Tappi, S., Gozzi, G., Vannini, L., Berardinelli, A., Romani, S., Ragni, L., & Rocculi, P. (2016). Cold plasma treatment for fresh-cut melon stabilization. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, *33*, 225. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.12.022
44. Varith, J., Hyde, G. M., Baritelle, A. L., Fellman, J. K., & Sattabongkot, T. (2003). Noncontact bruise detection in

apples by thermal imaging. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *4*(2), 211-218. https://doi.org/10.1016/S1466-8564(03)00021-3

45. Wiktor, A., Hrycak, B., Jasinski, M., Rybak, K., Kieliszek, M., Krasniewska, K., & Witrowa- Rajchert, D. (2020). Impact of atmospheric pressure microwave plasma treatment on quality of selected spices. *Applied Sciences-Basel*, *10* (19), 6815. https://doi.org/10.3390/app10196815
46. Xu, H. B., Ma, R. N., Zhu, Y. P., Du, M. R., Zhang, H., & Jiao, Z. (2020). A systematic study of the antimicrobial mechanisms of cold atmospheric-pressure plasma for water disinfection. *Science of Total Environment*, *703*, 134965 https://doi.org/10.1016/j. scitotenv.2019.134965
47. Xu, H. B., Zhu, Y. P., Du, M. R., Wang, Y. Q., Ju, S. Y., Ma, R. N., & Jiao, Z. (2021). Subcellular mechanism of microbial inactivation during water disinfection by cold atmospheric-pressure plasma. *Water Research*, *188*, 116513 https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116513
48. Zahavi, T., Cohen, L., Weiss, B., Schena, L., Daus, A., Kaplunov, T., & Droby, S. (2000). Biological control of *Botrytis*, *Aspergillus* and *Rhizopus* rots on table and wine grapes in Israel. *Postharvest Biology and Technology*, *20*(2), 115-124. https://doi.org/10.1016/S0925-5214(00)00118-6
49. Zhou, D., Li, T., Cong, K., Suo, A., & Wu, C. (2022). Influence of cold plasma on quality attributes and aroma compounds in fresh-cut cantaloupe during low temperature storage. *Food Science and Technology*, *154*, 112893. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112893
50. Ziuzina, D., Misra, N. N., Han, L., Cullen, P. J., Moiseev, T., Mosnier, J. P., & Bourke, P. (2020). Investigation of a large gap cold plasma reactor for continuous in-package decontamination of fresh strawberries and spinach. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *59*, 102229. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102229
51. Ziuzina, D., Patil, S., Cullen, P. J., Keener, K. M., & Bourke, P. (2014). Atmospheric cold plasma inactivation of Escherichia coli, Salmonella enterica serovar Typhimurium and Listeria monocytogenes inoculated on fresh produce. *Food Microbiology*, *42*, 109-116. https://doi.org/10.1016/j.fm.2014.02.007

Contents

Research Articles

Evaluation of Dielectric Spectroscopy in Fusion with Vis-SWNIR Spectroscopy for the Measurement of Sugar Concentration in Sugarcane Stalk Samples 235
M. Naderi-Boldaji, M. Tohidi, M. Ghasemi-Varnamkhasti

Study on Drying Process of Farmed Shrimp Meat in a Hot Air Convective Dryer and Variation of Some Related Parameters 253
M. Almaei, S. M. Nassiri, M. A. Nematollahi, D. Zare, M. Khorram

Comparing and Examining the Tannin Content of Potato Peel with Four Different Solvents 271
F. Mortazavi, R. Khodabakhshian, M. Moeenfard

Investigating the Effect of Storage Time on the Mechanical Properties of Biodegradable Polylactic Acid Film Containing Zinc Oxide Nanoparticles 283
N. Tajari, H. Sadrnia, F. Hosseini

Evaluation of Rice Mechanization Supply Chain Indicators with SCOR Model Approach 301
M. Zangeneh, N. Banaeian

Assessment of Riverine Currents to Estimate the Theoretical Hydrokinetic Power and Energy Using Hydraulic Geometry 319
M. Sadeghi-Delooee, R. Alimardani, H. Mousazadeh

The Efficiency of Cold Plasma Treatment on *Aspergillus Niger* Disinfection and Quality Properties Preservation of Grapes during the Post-harvest Period 337
A. Khalaj, E. Ahmadi, S. Mirzaei, F. Ghaemizadeh, R. Abbaszadeh

Journal of Agricultural Machinery

Vol. 14 No. 3 2024

Published by: Ferdowsi University of Mashhad, (College of Agriculture), Iran

Editor in charge: Prof. M. R. Modarres Razavi, Dept. of Mechanical Eng. Ferdowsi University of Mashhad

General Chief Editor: Prof. M. H. Abbaspour-Fard, Dept. of Biosystems Eng. Ferdowsi University of Mashhad

Editorial Board:

Abbaspour-Fard, M. H.	Professor, Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
Aboonajmi, M.	Associate Professor, Department of Agrotechnology, College of Abouraihan, University of Tehran, Tehran, Iran
Aghkhani, M. H.	Professor, Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
Alimardani, R.	Professor, Department of Faculty of College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
Emadi, B.	Adjunct Professor, Department of Chemical and Biological Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada
Ghazanfari Moghaddam, A.	Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran
Kadkhodayan, M.	Professor, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
Khoshtaghaza, M. H.	Professor, Department of Biosystems Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran. Iran
Loghavi, M.	Professor, Department of Biosystems Engineering, Shiraz University, Iran
Modarres Razavi, M.	Professor, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
Mohtasebi, S. S.	Professor, Department of Faculty of College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran
Nasirahmadi, A.	Department of Agricultural Engineering University of Kassel, Nordbahnhofstrasse, Witzenhausen, Germany
Pourreza, A.	Assistant Professor, Department of Biological and Agricultural Engineering, University of California, Davis, United States of America
Raji, A.	Professor, Department of Agricultural and Environmental Engineering, Faculty of Technology, University of Ibadan, Nigeria
Rohani, A.	Professor, Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
Saiedirad, M. H.	Associate Professor, Agricultural Engineering Research Institute, Mashhad, Iran
Sayasoonthorn, S	Assistant Professor, Department of Farm Mechanics, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Thailand

Publisher: Ferdowsi University of Mashhad

Address: College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

P.O. BOX: 91775-1163

Fax: +98-05138787430

E-Mail: jame@um.ac.ir

Web Site: http://jame.um.ac.ir

Ferdowsi University of Mashhad

Vol. 14 No. 3

2024

Journal of Agricultural Machinery

Iranian Society of Mechanical Engineers (ISME)

ISSN: 2228-6829

Contents

Research Articles

Evaluation of Dielectric Spectroscopy in Fusion with Vis-SWNIR Spectroscopy for the Measurement of Sugar Concentration in Sugarcane Stalk Samples 235
M. Naderi-Boldaji, M. Tohidi, M. Ghasemi-Varnamkhasti

Study on Drying Process of Farmed Shrimp Meat in a Hot Air Convective Dryer and Variation of Some Related Parameters 253
M. Almaei, S. M. Nassiri, M. A. Nematollahi, D. Zare, M. Khorram

Comparing and Examining the Tannin Content of Potato Peel with Four Different Solvents 271
F. Mortazavi, R. Khodabakhshian, M. Moeenfard

Investigating the Effect of Storage Time on the Mechanical Properties of Biodegradable Polylactic Acid Film Containing Zinc Oxide Nanoparticles 283
N. Tajari, H. Sadrnia, F. Hosseini

Evaluation of Rice Mechanization Supply Chain Indicators with SCOR Model Approach 301
M. Zangeneh, N. Banaeian

Assessment of Riverine Currents to Estimate the Theoretical Hydrokinetic Power and Energy Using Hydraulic Geometry 319
M. Sadeghi-Delooee, R. Alimardani, H. Mousazadeh

The Efficiency of Cold Plasma Treatment on *Aspergillus Niger* Disinfection and Quality Properties Preservation of Grapes during the Post-harvest Period 337
A. Khalaj, E. Ahmadi, S. Mirzaei, F. Ghaemizadeh, R. Abbaszadeh