



انجمن مهندسان
مکانیک ایران

نشریه علمی

ماشین های کشاورزی



جلد ۱۴ شماره ۲

سال ۱۴۰۳

(شماره پیاپی: ۳۲)

شاپا: ۶۸۲۹-۲۲۲۸

عنوان مقالات

مقالات پژوهشی

- ۱۰۷..... بررسی میزان ضایعات برنج قهوه‌ای در فرآیند خشک کردن شلتوک.....
سینا شریفی، محمد حسین آق‌خانی، عباس روحانی
- ۱۲۱..... ارزیابی سریع و غیرمخرب مقادیر NPK درخت سیب مبتنی بر تجزیه و تحلیل طیفی برگ.....
رحیم آزادنیا، علی رجبی پور، بهاره جمشیدی، محمود امید
- ۱۳۷..... ارزیابی عملکرد پهبادسمپاش در کنترل شته کلزا.....
نیکروز باقری، محمود صفری، عزیز شیخی گرجان
- ۱۴۹..... طراحی، ساخت و بهینه‌سازی عملکرد کلاهک پاشش الکترودینامیکی سم‌پاش پستی موتوری ذره‌ای پاش.....
مریم رضائی، جلال خدائی، بندر آستین‌چپ
- ۱۶۵..... شبیه‌سازی فرکانس‌های طبیعی میوه پرتقال با استفاده از روش اجزای محدود.....
وحید کهریزی، ابراهیم احمدی، علی رضا شوشتری
- ارزیابی بازده انرژی جمع‌کننده سهموی مجهز به مواد تغییرفازدهنده درون لوله دریافت‌کننده در یک
آب‌شیرین‌کن خورشیدی.....
ژینا سیفی لاله، هادی صمیمی اخیجھانی، پیمان سلامی
- ۱۹۸..... شبیه‌سازی انتقال حرارت و جرم در خشک‌کن رفرکتنس ویندو برای ژل آلون‌ه‌ورا.....
آتنا شهرکی، مهدی خجسته‌پور، محمودرضا گلزاریان، الهام آذرپژوه
- ارائه الگوریتم بهینه‌سازی فرامکاشفه‌ای برای حل مسأله تخصیص منابع محدود به پروژه‌های مکانیزاسیون کشاورزی:
مطالعه موردی دشت مغان.....
عادل طاهری حاجی‌وند، کیمیا شیرینی، سینا صمدی قره‌ورن

نشریه ماشین های کشاورزی

با شماره پروانه ۸۹/۱۲۶۳۹ و درجه علمی - پژوهشی شماره ۳/۱۱/۳۷۸۱ از وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
۸۹/۳/۱۷ ۸۹/۶/۱۳

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

تابستان ۱۴۰۳

جلد ۱۴ شماره ۲

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد

مدیر مسئول: سید محمدرضا مدرس رضوی

سر دبیر: محمدحسین عباسپور فرد

اعضای هیئت تحریریه:

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

ناشر: دانشگاه فردوسی مشهد

مقالات این نشریه در پایگاه های معتبر زیر نمایه می شود:

DOAJ، CABI، Web of Science: Emerging Sources Citation Index™ (ESCI)، Scopus، AGRIS،
Internet Archive، Google scholar، EBSCO، 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> به صورت مقاله کامل نمایه شده است.

این نشریه به تعداد ۴ شماره در سال و به صورت آنلاین منتشر می شود.

مندرجات

مقالات پژوهشی

- ۱۰۷ بررسی میزان ضایعات برنج قهوه‌ای در فرآیند خشک کردن شلتوک
سینا شریفی، محمد حسین آق‌خانی، عباس روحانی
- ۱۲۱ ارزیابی سریع و غیرمخرب مقادیر NPK درخت سیب مبتنی بر تجزیه و تحلیل طیفی برگ
رحیم آزادنی، علی رجیبی پور، بهاره جمشیدی، محمود امید
- ۱۳۷ ارزیابی عملکرد پهبادسمپاش در کنترل شته کلزا
نیکروز باقری، محمود صفری، عزیز شیخی‌گرجان
- ۱۴۹ طراحی، ساخت و بهینه‌سازی عملکرد کلاهک پاشش الکترودینامیکی سم‌پاش پستی موتوری ذره‌ای پاش
مریم رضائی، جلال خدائی، بندر آستین‌چپ
- ۱۶۵ شبیه‌سازی فرکانس‌های طبیعی میوه پرتقال با استفاده از روش اجزای محدود
وحید کهریزی، ابراهیم احمدی، علی‌رضا شوشتری
- ۱۷۹ ارزیابی بازده انرژی جمع‌کننده سهموی مجهز به مواد تغییر فاز دهنده درون لوله دریافت‌کننده در یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی
ژینا سیفی لاله، هادی صمیمی اخیحجانی، پیمان سلامی
- ۱۹۸ شبیه‌سازی انتقال حرارت و جرم در خشک‌کن رفرکتنس ویندو برای ژل آلون‌ه‌ورا
آتنا شهرکی، مهدی خجسته‌پور، محمودرضا گلزاریان، الهام آذرپژوه
- ۲۱۷ ارائه الگوریتم بهینه‌سازی فرامکاشفه‌ای برای حل مسأله تخصیص منابع محدود به پروژه‌های مکانیزاسیون کشاورزی: مطالعه موردی
دشت مغان
عادل طاهری حاجی‌وند، کیمیا شیرینی، سینا صمدی قره‌ورن

Research Article

Vol. 14, No. 2, 2024, p. 105-118

Investigation of Brown Rice Losses in the Paddy Drying Process

S. Sharifi¹, M. H. Aghkhani^{2*}, A. Rohani²

1- MSc Graduate Student in Agricultural Mechanization, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

(*- Corresponding Author Email: aghkhani@um.ac.ir)

Received: 02 March 2021

Revised: 16 August 2021

Accepted: 08 September 2021

Available Online: 08 September 2021

How to cite this article:

Sharifi, S., Aghkhani, M. H., & Rohani, A. (2024). Investigation of Brown Rice Losses in the Paddy Drying Process. *Journal of Agricultural Machinery*, 14(2), 105-118. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2021.69208.1026>

Introduction

On the field and in the paddy milling factory dryer losses have always been challenging issues in the rice industry. Different forms of losses in brown rice may occur depending on the field and factory conditions. To reduce the losses, proper management during pre-harvest, harvesting, and post-harvest operations is essential. In this study, different on-field drying and tempering methods were investigated to detect different forms of brown rice losses.

Materials and Methods

The present study was conducted on the most common Hashemi paddy variety during the 2019-2020 season in Talesh, Rezvanshahr, and Masal cities in the Guilan province, Iran with 0.2 hectares and 5 paddy milling factory dryers. On the fields, the method and date of tillage, irrigation, and transplanting used in all experimental units were the same. Moreover, the same amount of fertilizer and similar spraying methods were used across all experiments. For the pre-drying process on the fields, the following three pre-drying methods were applied on the harvest day: A1) The paddies were spread on the cut stems for insulating, A2) The paddies were stacked and stored after being placed on the cut stems for 5h, and A3) The paddies were covered with plastic wrap and stored after 5h of insulating. The first method (A1) is the most common in the area and was chosen as the control treatment. For the second step of the process, the time interval between the on-field pre-drying and threshing was considered: B1) 14 to 19h post-harvest; B2) 20 to 24h post-harvest, and B3) 25 to 29h post-harvest. Afterward, methods A1 to A3 were combined with methods B1 to B3 and feed into an axial flow-thresher at 10 kg min⁻¹, 550 rpm PTO, and two levels of moisture content at 19 and 26 percent (% w.b). The third process was two-stage or three-stage tempering for 10 or 15 hours resulting in four levels (C1 to C4) and was done in the conventional batch type dryer under temperatures of 40 and 50 °C and airspeeds of 0.5 and 0.8 m s⁻¹ in paddy milling factories. At the end of each process, a 100g sample was oven-dried for 48h and a microscope achromatic objective 40x was used to detect incomplete horizontal or vertical cracks, tortoise pattern cracks, and immature and chalky grains. The equilibrium moisture content was determined to be 7.3 percent. Losses properties were analyzed using a completely randomized factorial design with a randomized block followed by Tukey's HSD test at the 5% probability and comparisons among the three replications were made.

Results and Discussion

Results demonstrated that the stack and plastic drying methods significantly increased the percentage of losses. In the plastic drying method, the percentage of chalky grains and tortoise pattern cracks was higher than other forms of loss. In the first process, irrespective of the pre-drying method, the losses were reduced at a lower level of moisture content. At the end of the first stage, losses in the spreading method were significantly lower at 19% moisture content. Threshing the plastic-wrapped paddies after 14 to 19 hours at 19% moisture content



©2021 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jam.2021.69208.1026>

resulted in the maximum threshing loss of 8.446% and over half of the grains were chalky or had tortoise pattern cracks. The threshing loss was halved (4.443%) for paddies threshed 25 to 29h after spreading at a moisture content of 26%. The mean of losses in the second step of the process were 7.229, 5.585, and 5.156% for the time interval between the on-field pre-drying and threshing of 14 to 19h, 20 to 24h, and 25 to 29h, respectively. In the last step of the process in paddy milling factory dryers, there was no significant difference in the minimum percent of losses between 10 and 15 hours of three-stage tempering at 40 °C and with 0.5 m s⁻¹ airspeed. Furthermore, maximum total losses with the most incomplete horizontal and vertical cracks occurred in the two-stage 10h tempering at 50 °C and with 0.5 and 0.8 m s⁻¹ airspeed.

Conclusion

Food security has always been a critical matter in developing countries. Furthermore, identifying the source of losses in the fields and the factories is one way to reduce losses and achieve food security. Stacking or wrapping the paddies in plastic after pre-drying on the fields for 5h is not recommended in terms of its effect on increasing the percentage of brown rice losses. Additionally, due to the importance of factory dryer scheduling in the management of the losses, it is recommended to use a three-stage 10h tempering at 40 °C and with 0.5 m s⁻¹ airspeed.

Keywords: Brown rice, Crack, Drying, Losses, Paddy milling factory

مقاله پژوهشی

جلد ۱۴، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۳، ص ۱۱۸-۱۰۵

بررسی میزان ضایعات برنج قهوه‌ای در فرآیند خشک کردن شلتوک

سینا شریفی^۱، محمد حسین آق‌خانی^{۲*}، عباس روحانی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۱۷

چکیده

فرآیندهای خشک کردن شلتوک، همواره چالشی‌ترین مسائل صنعت برنج می‌باشد. هدف تحقیق، بررسی میزان ضایعات خشک کردن در مزرعه و کارخانه در سه شهرستان گیلان بود. بدین منظور، اثرهای اصلی و متقابل فاکتورهای مستقل محتوای رطوبتی زمان برداشت (۱۹ و ۲۶ درصد)، زمان برداشت تا خرمنکوبی (۱۹-۱۴، ۲۴-۲۰ و ۲۹-۲۵ ساعت)، روش‌های خشک کردن در مزرعه (پخش کامل شالی بر روی ساقه‌ها، پخش پنج ساعت شالی بر روی ساقه‌ها+توده کردن، و پخش پنج ساعت شالی بر روی ساقه‌ها+استفاده از پلاستیک)، و استراحت‌دهی (دو مرحله‌ای و سه مرحله‌ای هر کدام با ۱۰ و ۱۵ ساعت استراحت‌دهی)، دمای خشک کن (۴۰ و ۵۰ درجه سلسیوس) و سرعت باد (۰/۵ و ۰/۸ متر بر ثانیه) بر فاکتورهای وابسته (دانه‌های نارس، گچی، دانه‌های دو و سه‌تَرک و تَرک لاک‌پشتی در برنج قهوه‌ای) در سال زراعی ۹۹-۱۳۹۸ بررسی شدند. از طرح آزمایشی فاکتوریل بر پایه بلوک کامل تصادفی استفاده شد. براساس نتایج، اثرهای اصلی فاکتورهای مستقل بر ایجاد ضایعات معنادار بودند ($P < 0.05$). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که کمینه ضایعات در روش پخش کردن کامل، در محتوای رطوبتی ۲۶ درصد، به میزان ۱/۴۶۵ درصد بود. بیشترین تاثیر استفاده از پلاستیک در شکل‌گیری ضایعات به شکل تَرک لاک‌پشتی و دانه‌گچی بود. در سطح مزرعه پس از ۱۴ تا ۱۹ ساعت پیش خشک کردن، بیشینه ضایعات به دست آمد، که سهم سه‌تَرک نا کامل طولی، دو تَرک نا کامل عرضی و دانه نارس به ترتیب به میزان ۱۱/۴۱۰، ۸/۷۳۰ و ۸/۴۷۱ درصد بود. در سطح کارخانه، کمترین ضایعات در ترکیب فاکتوری استراحت‌دهی سه مرحله‌ای ۱۵ ساعت، دمای خشک کن ۴۰ درجه سلسیوس و سرعت باد ۰/۵ متر بر ثانیه به میزان ۶/۰۲۷ درصد به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: برنج قهوه‌ای، تَرک، خشک کردن، ضایعات، کارخانه تبدیل شلتوک

مقدمه

استان گیلان دارای ۲۵۹/۶ هزار هکتار سطح زیرکشت انواع محصولات زراعی بوده که از این میزان، ۲۲۰ هزار هکتار برنج کشت می‌شود. میزان تولید انواع گونه‌های شلتوک کشور حدود ۳/۱ میلیون تن از مجموع سطوح زراعی بوده، که سهم استان گیلان ۱/۰۹ میلیون تن بوده است (Anonymous, 2018). محصول برنج به‌منظور استفاده خانوار بایستی از شالی و شلتوک به برنج سفید تبدیل شود.

رطوبت شالی وابسته به شرایط جوی زمان برداشت، روش برداشت، وارته و میزان رسیدگی دانه به‌طور معمول از ۱۵ تا ۲۶ درصد متغیر می‌باشد؛ برای نگه‌داری شلتوک در انبار و تبدیل، باید رطوبت محصول کاهش داده شود (Abayawickrama, Reinke, Fitzgerald, Harper, & Burrows, 2017; Heidari Soltanabadi, Malek, Ghazvini, Shaaker, & Hedayati Zadeh, 2010) با توجه به مطالعات اپیدمیولوژیکی سازمان بهداشت جهانی (Krzyżanowski, Kuna-Dibbert, & Schneider, 2005)، انرژی رایگان و پاک خورشیدی با توجه به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از سوخت‌های فسیلی، تاثیر چشم‌گیری بر سلامت بشر داشته است (Udomkun et al., 2020). همچنین، خشک کردن در معرض آفتاب در هنگام صبح، موجب افزایش راندمان برنج سفید شده است (Xangsayasane, Vongxayya, & Phongchanmisai, Mitchell, & Fukai, 2019). استفاده از این منبع برای خشک کردن شلتوک غیرقابل چشم‌پوشی است. در تحقیقی تاثیر زمان خشک کردن پس از برداشت رقم هاشمی

۱- دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد مکانیزاسیون کشاورزی، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۲- استاد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۳- دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
* - نویسنده مسئول:
(Email: aghkhani@um.ac.ir)

نشان داد که مراحل خشک کردن، اثر قابل توجهی بر درصد برنج قهوه‌ای و بازده تبدیل نداشته است، اما درصد برنج سالم طی خشک کردن سه مرحله‌ای در هر دو سال بیشترین، و روش‌های دو و یک مرحله‌ای به ترتیب کمترین مقدار را داشته است (Tajaddodi Talab, 2005). نتایج بررسی سطوح دمای خشک‌کن ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه سلسیوس و سرعت جریان هوای ۰/۴ و ۰/۶ متر بر ثانیه نشان داد که دما نسبت به سرعت جریان هوا، تاثیر بیشتری بر درصد ترک خوردگی شلتوک رقم هاشمی داشته است (Mohajeran, Khoshtaghaza, & Moazami Gudarzi, 2006). در تحقیقی، بررسی اثر خشک کردن به صورت متناوب و پیوسته بر ترک خوردگی شلتوک رقم‌های هاشمی و کوهسار مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل بیانگر آن بود که در دمای ۶۰ درجه سلسیوس تعداد دانه‌های دارای دو ترک و بیش از دو ترک نسبت به مقادیر مشابه در دو دمای ۳۰ و ۴۵ درجه سلسیوس بیشتر بوده است؛ همچنین مشاهده شده است که ۴۸ ساعت پس از خشک شدن، تعداد ترک‌ها نسبت به ترک‌های ایجاد شده بلافاصله پس از عملیات خشک کردن، به دلیل گسترش ترک‌های ریز ایجاد شده درون دانه، افزایش یافته است (Sadeghi, Ghasemi, & Mireei, 2016).

به منظور کاهش ضایعات ناشی از تنش‌های زیستی و غیرزیستی و جلوگیری از کاهش ارزش تغذیه‌ای محصول برنج مدیریت صحیح و به‌هنگام عملیات کشت و پرورش، برداشت و پس از برداشت ضروری است (Tajaddodi Talab, 2005; Gimenez, Salinas, & Manzano-Agugliaro, 2018). با توجه به اهمیت مدیریت ضایعات و تاثیر زیادی که مرحله خشک کردن بر ایجاد ضایعات دارد، بیشتر تحقیقات انجام شده پیرامون خشک کردن چند مرحله‌ای برای ارقام مختلف و تحت شرایط متفاوت در کارخانجات تبدیل و برنج سفید بوده است (Eshtavad, Kalantari, Hashemi, & Pirdashti, 2016; Li, Wang, Li, Jiang, & Lu, 2016; Dong, Lu, Liu, Koide, & Cao, 2010). اما تاثیر شرایط پیش از خشک کردن در مزرعه و همین‌طور شکل‌های مختلف ضایعات در نظر گرفته نشده است.

هدف از تحقیق پیش‌رو، بررسی میزان ضایعات در فرآیندهای خشک کردن در مزرعه و استراحت‌دهی در خشک‌کن‌های کارخانجات تبدیل برنج در سه شهرستان استان گیلان است. با توجه به تاثیر بسیار زیادی که فرآیندهای آغازین در تولید برنج بر ایجاد ضایعات دارند، تحقیق حاضر می‌تواند گامی موثر در راه رسیدن به آگاهی هرچه بیشتر دست‌اندرکاران بخش برنج کشور باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد بررسی

مطالعه حاضر در فصل زراعی ۹۹-۱۳۹۸ در پنج شالیزار هر کدام

بر راندمان برنج سفید سالم، از روش پخش کردن کامل شالی‌ها به مدت یک شبانه‌روز بررسی شد و نتایج نشان داده است که بیشترین راندمان برنج سفید سالم (۵۸/۷۸ درصد) در استفاده از خشک کردن در کارخانه بلافاصله پس از پیش خشک کردن در مزرعه بوده است (Allameh & Alizadeh, 2013). بررسی تاثیر فعالیت‌های میکروبی رقم‌های زودرس و دانه کوتاه در امریکا نشان داد که فاصله‌ی ۴۸ ساعت بین پیش خشک کردن در مزرعه تا خشک کردن در کارخانه برای شلتوک با محتوای رطوبتی ۱۷ تا ۲۱ درصد، هیچ افزایش معناداری در محتوای فرار ۱۰ فعالیت میکروبی در برنج سفید، ایجاد نکرده است؛ همین‌طور برای رطوبت‌های ۲۴ درصد و بیشتر از آن، محتوای فرار شش فعالیت میکروبی در برنج سفید با گذشت زمان افزایش چشم‌گیری داشته است (Champagne et al., 2004). دمای زیاد هوا و شدت تابش کم خورشید موجب اخلاخل در انتقال مواد ذخیره‌ای حاصل از فتوسنتز شده و باعث شده در سنبله‌های تحتانی نشاسته بیشتری ذخیره شود و نسبت به سنبله‌های فوقانی دارای درصد دانه گچی بیشتری باشد (Tsukaguchi & Iida, 2008). دانه‌های گچی و دانه‌های ترک‌دار از جمله صفاتی هستند که کیفیت تبدیل را تحت تاثیر قرار می‌دهند. شکاف‌های دانه زمانی اتفاق می‌افتد که میزان رطوبت بین مرکز و سطح دانه یکسان نباشد و جذب و دفع سریع رطوبت رخ دهد که این مسئله موجب افزایش گردیدان رطوبتی در لایه‌های سطحی، میانی و مرکزی و افزایش احتمال ایجاد ضایعات می‌شود (Abayawickrama et al., 2017; Mukhopadhyay & Siebenmorgen, 2018).

استراحت‌دهی^۱ مرحله موثر و پذیرفته شده برای کاهش گردیدان رطوبتی شلتوک در هنگام استفاده از خشک‌کن دمای بالا در کارخانه‌های شالی کوبی می‌باشد. دمای استراحت‌دهی بالاتر از دمای انتقال شیشه‌ای به کاهش تنش‌های درونی دانه کمک می‌کند؛ به‌ویژه که برای تسریع در فرآیند خشک کردن احتیاج به دمای خشک‌کن بالاتر نیاز است (Truong, Truong, Fukai, & Bhandari, 2012). تحقیقات متعددی به بررسی خشک کردن چند مرحله‌ای به روش بسترسیال و نیمه‌سیال پرداخته شده است (Poomsa-ad, Soponronnarit, Prachayawarakorn, & Terdyothin, 2002; Golmohammadi, Rajabi-Hamane, & Hashemi, 2012; Bootkote, Soponronnarit, & Prachayawarakorn, 2016).

اما با توجه به این که بیشتر خشک‌کن‌های برنج شمال کشور از نوع بستر ثابت جریان همرفتی است، بنابراین لزوم تحقیق در این زمینه احساس می‌شود. در این راستا، در تحقیقی اثر خشک کردن یک مرحله‌ای و چند مرحله‌ای بر بازده تبدیل و مدت زمان خشک کردن رقم دانه بلند خزر طی دو سال زراعی بررسی شد. نتایج این تحقیق

ساعت پس از برداشت؛ پخش کامل شالی در این فاصله زمانی در محتوای رطوبتی ۱۹ درصد بر پایه وزن تر به دلیل مرسوم بودن روش به عنوان تیمار شاهد انتخاب شد، و B₃ تا ۲۵ تا ۲۹ ساعت پس از برداشت، بررسی شدند. هر کدام از روش‌های A₁ تا A₃، با روش‌های B₁ تا B₃ برای تبدیل شالی به شلتوک ترکیب شدند تا از خرمکوب جریان‌محوری با نرخ خوراک‌دهی ۱۰ کیلوگرم بر دقیقه، دور PTO ۵۵۰ RPM (Khodabakhshi Pour, Alizadeh, Bolouki, & Ghasemi, 2011) و محتوای رطوبتی ۱۹ و ۲۶ درصد بر پایه وزن تر استفاده شود. در فرآیند سوم خشک کردن، شلتوک‌های ترکیب‌شده در دو فرآیند قبلی به تفکیک روش‌های سه‌گانه پیش خشک کردن در سطوح رطوبت نهایی زمان برداشت به نسبت‌های مساوی با سطح‌های فاصله‌های زمانی پس از برداشت به خشک‌کن‌های کارخانجات تبدیل، انتقال داده شدند. خشک‌کن‌های کارخانجات، از جنس سیمان و در کف دارای صفحه مشبک فلزی جهت ورود هوای گرم مشعل بودند. این خشک‌کن‌ها دارای طول ۶ متر، عرض ۲ متر و عمق یک متر بودند، که تا عمق ۳۰ سانتی‌متری از شلتوک پر شدند. از چهار روش C₁ تا C₄ در خشک‌کن‌های همرفتی صنعتی غیرپیوسته بستر افقی استفاده شد. C₁ استراحت‌دهی دو مرحله‌ای (تیمار شاهد): مرحله اول خشک کردن تا رطوبت ۱۵ تا ۱۶ درصد و سپس توقف و خاموشی دستگاه به مدت ۱۰ ساعت و مرحله دوم خشک کردن تا رطوبت نهایی ۱۳ درصد؛ این روش با دمای خشک‌کن ۴۰ درجه سلسیوس و سرعت هوای ۰/۸ متر بر ثانیه روش مرسوم و متداول برای خشک کردن شلتوک می‌باشد؛ C₂ استراحت‌دهی دو مرحله‌ای: مرحله اول خشک کردن تا رطوبت ۱۵ تا ۱۶ درصد و سپس توقف و خاموشی دستگاه به مدت ۱۵ ساعت و مرحله دوم خشک کردن تا رطوبت نهایی ۱۳ درصد؛ C₃ استراحت‌دهی سه مرحله‌ای: مرحله اول خشک کردن تا رطوبت ۱۵ تا ۱۶ درصد و سپس توقف و خاموشی دستگاه به مدت ۱۰ تا ۱۴ درصد و توقف مجدد خشکاندن تا رطوبت ۱۳ تا ۱۴ درصد و توقف مجدد خشکاندن به مدت ۱۰ ساعت و مرحله سوم خشک کردن تا رطوبت نهایی ۱۳ درصد و C₄ استراحت‌دهی سه مرحله‌ای: مرحله اول خشک کردن تا رطوبت ۱۵ تا ۱۶ درصد و سپس توقف و خاموشی دستگاه به مدت ۱۵ ساعت و مرحله دوم خشک کردن تا رطوبت ۱۳ تا ۱۴ درصد و توقف مجدد خشکاندن به مدت ۱۵ ساعت و مرحله سوم خشک کردن تا رطوبت نهایی ۱۳ درصد. پس از اتمام هر مرحله از استراحت‌دهی، از عمق ۳۰ سانتی‌متری ۱۰۰ گرم دانه سالم به‌طور تصادفی انتخاب شدند تا به‌وسیله رطوبت‌سنج مدل Gwon-GMK با دقت ۰/۰۱ تعیین رطوبت شوند. همچنین، پس از اتمام هر فرآیند خشک کردن در سطوح مزارع و کارخانجات تبدیل، پس از جداسازی مواد خارجی معدنی و آلی، مقدار ۸۰۰ گرم از شلتوک به‌طور تصادفی با دقت ۰/۰۱ وزن شدند. برای آماده‌سازی،

به مساحت ۰/۲ هکتار و پنج کارخانه تبدیل برنج در سه شهرستان تالش، رضوانشهر و ماسال در عرض جغرافیایی بین ۳۷°۲۱'۰۰" تا ۳۷°۴۸'۰۱" درجه شمالی و طول جغرافیایی بین ۴۸°۵۴'۰۱" تا ۴۹°۰۹'۰۱" درجه شرقی صورت گرفت. مرحله پیش‌آزمون برای بررسی شکل‌های مختلف ضایعات، در برنج قهوه‌ای سه روز پیش از شروع مرحله اصلی داده‌برداری، انجام شد.

شرایط کشت، پرورش و برداشت

شلتوک مورد بررسی، رقم هاشمی یکی از ارقام دانه‌بلند و غالب منطقه بود. زمان کشت نشاءها هفته دوم و سوم اردیبهشت و عملیات واکاری در دو مرحله به‌ترتیب پس از گذشت یک ماه و ۵۰ روز انجام شد. همچنین، از نشاءکار جهت کشت محصول به‌صورت چهار گیاهچه در هر کپه، به فاصله ۲۰×۲۰ سانتی‌متر استفاده شد. آبیاری غرقابی قطعات آزمایشی ۳۰ روز پس از شروع خوشه‌دهی ادامه داشت. میانگین ارتفاع آب در مزرعه سه سانتی‌متر بود. میزان استفاده از کود نیتروژن به‌صورت خالص (از منبع اوره) ۹۰ کیلوگرم در هکتار بود که یک سوم آن در زمان تهیه زمین، یک سوم آن در مرحله حداکثر پنجه‌زنی و یک سوم دیگر در مرحله ظهور خوشه در زمین پخش شد. همچنین، ۵۰ کیلوگرم در هکتار فسفر خالص (از منبع سوپر فسفات) و ۵۰ کیلوگرم در هکتار پتاس خالص (از منبع کلرید پتاسیم) قبل از تسطیح زمین به خاک افزوده شد. عملیات وجین علف‌های هرز، در تمام واحدهای آزمایشی یکسان به‌طور دستی و در دو مرحله صورت گرفت. به‌منظور مبارزه با آفت‌های کرم ساقه‌خوار نواری برنج (*Chilosuppressalis*) و کرم سبزی برگ‌خوار برنج (*Narangaanescens*) از محلول پنج درصد دیازینون، در زمان‌های وجین و گلدهی (زایشی) استفاده شد. برداشت محصول، هفت روز پس از مشاهده ۸۰ درصد حالت شیرینی سفت انجام شد. عملیات برداشت با داس، هفته آخر مرداد و در سه زمان پیش و پس از ظهر و هنگام غروب آفتاب در دو سطح محتوای رطوبتی ۱۹ و ۲۶ درصد انجام شد.

آزمون‌های خشک کردن

در فرآیند اول پیش خشک کردن^۱ در سطح مزرعه، سه روش مجزای ذیل در نظر گرفته شدند. A₁ شالی‌ها بر روی ساقه‌های بریده‌شده، قرار داده شدند و این روش به‌دلیل متداول بودن در منطقه، به‌عنوان تیمار شاهد انتخاب شد؛ A₂ شالی‌ها، پس از پنج ساعت قرارگیری بر روی ساقه‌های بریده‌شده، هنگام غروب از سطح مزرعه جمع‌آوری و توده شدند و A₃ شالی‌ها، پس از پنج ساعت، هنگام غروب با پوشش پلاستیکی پوشانده شدند. در فرآیند دوم، فاصله‌های زمانی خشک کردن شالی‌ها در سطح مزرعه تا خرمکوبی در نظر گرفته شدند. B₁ ۱۴ تا ۱۹ ساعت پس از برداشت؛ B₂ ۲۰ تا ۲۴

بیان شده از آزمون ۱۰۰ گرمی جداسازی شدند. برای تثبیت ترک دانه‌های پوست گرفته‌شده، بررسی ترک‌ها ۴۸ ساعت پس از خروج از آون انجام شد (Sadeghi et al., 2016). برای تعیین درصد وزنی از میکروسکوپ با عدسی شیئی آکروماتیک ۴۰x استفاده شد. بررسی میزان ضایعات بر روی آزمون ۱۰۰ گرمی پس از اتمام هر فرآیند صورت پذیرفت. ملاک تشخیص ضایعات، بازتاب نور دانه‌های پوست گرفته‌شده زیر میکروسکوپ بود که ترک‌های واضح محتمل به شکست، دانه‌های گچی، و سبز و نارس را نشان داد. ضایعات موجود شامل دانه‌های دو ترک ناکامل عرضی (به اختصار دو ترک)، سه ترک ناکامل طولی (به اختصار سه ترک) و ترک‌های لاک‌پستی، دانه‌های گچی، و دانه‌های نارس بودند (شکل ۱).

طرح آماری مورد استفاده

در این پژوهش از طرح فاکتوریل بر پایه بلوک تصادفی برای بررسی میزان ضایعات به‌عنوان متغیر وابسته در نتیجه متغیرهای مستقل استفاده شد. در فرآیند اول، سه روش پیش خشک کردن در مزرعه (A₁ تا A₃) در دو سطح رطوبتی زمان برداشت ۱۹ و ۲۶ درصد متغیرهای مستقل، در پنج بلوک (شهرستان تالش و رضوانشهر هر کدام دو بلوک و شهرستان ماسال یک بلوک) و در سه تکرار با ۹۰ ترکیب فاکتوری بررسی شدند. در فرآیند دوم ترکیبی از فرآیند اول در شش سطح (سه روش پیش خشک کردن در مزرعه × دو سطح رطوبتی ۱۹ و ۲۶)، با زمان پیش از خرمکوبی در سه سطح (B₁ تا B₃) به‌عنوان متغیرهای مستقل، در سه شهرستان به‌عنوان بلوک و در سه تکرار با ۱۶۲ ترکیب فاکتوری مورد مطالعه قرار گرفتند. در واقع فرآیند اول و دوم فرآیندهایی پیوسته بودند و اطلاعات به‌دست‌آمده در فرآیند دوم از مزارع مورد پژوهش در فرآیند اول بود. در فرآیند سوم، روش‌های استراحت‌دهی در خشک‌کن کارخانه با چهار سطح (C₁ تا C₄)، دما ۴۰ و ۵۰ درجه سلسیوس، و سرعت باد ۰/۵ و ۰/۸ متر بر ثانیه به‌عنوان متغیرهای مستقل، در پنج بلوک (شهرستان تالش و رضوانشهر هر کدام دو بلوک و شهرستان ماسال یک بلوک) و در سه تکرار با ۲۴۰ ترکیب فاکتوری در نظر گرفته شدند. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها و بررسی آزمون مقایسه میانگین‌ها از آزمون توکی در سطح پنج درصد در نرم‌افزار Minitab[®] نسخه ۱۷ استفاده شد.

نتایج و بحث

فرآیند اول

برای مشخص شدن ضایعات برنج قهوه‌ای در سطح مزرعه، سه روش پیش خشک کردن و محتوای رطوبتی زمان برداشت، در پنج بلوک به‌عنوان شهرستان مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج تجزیه واریانس، اثرهای روش خشک کردن در سطح مزرعه و محتوای رطوبتی بر درصد ضایعات، در جدول ۱ نشان داده شده است. براساس

نمونه‌ها در بسته‌های نایلونی زیپ‌کیپ بسته‌بندی و در یخچال با دمای چهار درجه سلسیوس به مدت ۱۲ ساعت نگهداری شدند (Sadeghi et al., 2016). برای تعیین محتوای رطوبتی دانه‌ها و درستی داده‌های به‌دست‌آمده از آون آزمایشگاهی، ۱۰ نمونه ۱۰ گرمی شلتوک را در آون با دمای ۱۳۰ درجه به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شدند. سپس وزن نمونه‌ها قبل و بعد از خروج از آون ثبت و طبق رابطه (۱)، رطوبت نمونه‌ها براساس وزن تر محاسبه و دستگاه کالیبره شود (ASAE, 1998).

$$MC_w = \frac{G_w - G_D}{G_w} \times 100 \quad (1)$$

بر اساس رابطه (۱)، MC_w: محتوای رطوبتی بر پایه تر (درصد)، G_w: جرم اولیه محصول (kg) و G_D: جرم نهایی محصول پس از خشک شدن در آون (kg) بود. به دلیل وجود محتوای رطوبتی ۱۵ تا ۱۶ درصد محصول پس از اتمام فرآیند اول و دوم، از خشک کردن دو مرحله‌ای با استراحت‌دهی پنج ساعت برای کاهش رطوبت تا سطح ۱۳ درصد استفاده شد.

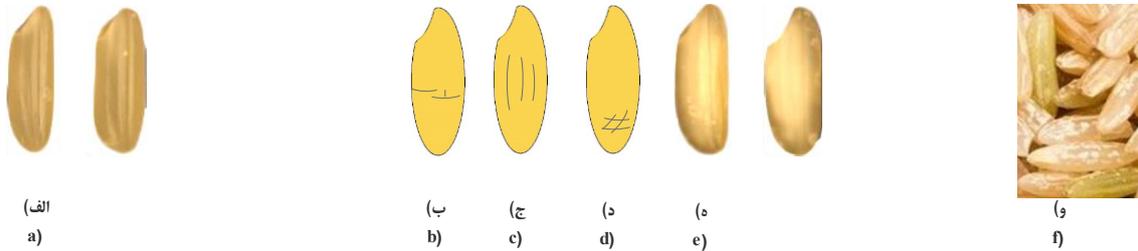
به‌طور معمول محتوای رطوبتی لازم برای تبدیل کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد (Gazor & Moumeni, 2019). برای خشک کردن یکسان، ملایم و خروج رطوبت از دانه به کمک آون آزمایشگاهی از دو شرایط خشک کردن برای دستیابی به رطوبت تعادلی استفاده شد. از محتوای رطوبت تعادلی^۱ برای به تعادل رساندن محتوای رطوبتی محصول با هوای اطراف دانه به‌منظور به صفر رساندن تبادل رطوبتی محصول و هوای اطراف آن استفاده شد. در زمان تعادل رطوبتی هیچ‌گونه جذب و دفع بین محصول و هوای اطراف صورت نمی‌گیرد که منجر به ترک و شکست شود. در شرایط اول برای تبدیل حالت ناشسته‌ای به حالت شیشه‌ای دانه‌های برنج، رطوبت نسبی و دما به ترتیب برابر با ۲۰ درصد و ۳۰ درجه سلسیوس تنظیم شدند. سپس، برای خروج رطوبت دانه‌های برنج و تغییر حالت شیشه‌ای به حالت لاستیکی و کشسانی، دما و رطوبت نسبی به ترتیب برابر با ۲۷ درصد و ۵۰ درجه سلسیوس تعیین شدند. در این شرایط محتوای رطوبت تعادلی برابر با ۷/۳ درصد تعیین شدند. محتوای رطوبت تعادلی با استفاده از نمودار سایکرومتری بیان می‌شود که در محور Xها میزان رطوبت‌های نسبی (درصد) و در محور Yها میزان رطوبت تعادلی بر پایه وزن تر (درصد) نشان داده می‌شوند (ASAE, 1998). مقدار ۷/۳ درصد بدین معناست رطوبت شلتوک در ارتباط با هوای اطراف به میزان ۷/۳ درصد می‌باشد که در این مقدار هیچ‌گونه جذب و دفع سطحی اتفاق نمی‌افتد.

بررسی ضایعات

برای محاسبه درصد وزنی در نمونه‌ها، دانه‌های دارای مشخصات

نداشت ($P > 0.05$). مقدار ضریب تبیین اصلاح شده ۹۸/۸۳ درصد، نشان داد که تغییرات مربوط به عوامل مورد بررسی تقریباً با کل تغییرات برابر بود.

نتایج جدول ۱، اثرهای اصلی فاکتور رطوبت نهایی برداشت و روش پیش خشک کردن و اثر متقابل دو فاکتور رطوبت و روش پیش خشک کردن، در سطح پنج درصد بر ایجاد ضایعات برنج قهوه‌ای معنادار بود ($P < 0.05$). اثر بلوک بندی، تاثیری در نتایج آزمایش



شکل ۱- الف) نمونه‌های مطلوب برنج قهوه‌ای، ب) دانه‌های دو ترک ناکامل عرضی، ج) سه ترک ناکامل طولی، د) ترک لاک‌پشتی، ه) دانه‌های گچی، و و) دانه‌های نارس

Fig.1. a) Desirable brown rice samples, b) Two incomplete horizontal cracks, c) Three incomplete vertical cracks, d) Tortoise pattern cracks, e) Chalky grains, and f) Immature grains

جدول ۱- تجزیه واریانس اثرهای روش پیش خشک کردن، محتوای رطوبتی، و اثرهای متقابل بر درصد ضایعات

Table 1- Analysis of variance of pre-drying method, moisture content, and interaction effects on the losses

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات اصلاح شده	میانگین مربعات اصلاح شده	F مقدار	P مقدار
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
روش پیش خشک کردن	2	455.470	227.735	3465.10	0.000*
Pre-drying method					
محتوای رطوبتی	1	2.304	2.304	35.06	0.000*
Moisture content					
بلوک (شهرستان)	4	0.060	0.015	0.23	0.922 ^{ns}
Block (County)					
اثر متقابل دو فاکتور	2	4.668	2.334	35.51	0.000*
2-Way interactions					
خطا	80	5.258	0.066		
Error					
مجموع	89	482.939			
Total					

ضریب تبیین اصلاح شده
R²-adjusted=98.83%

* معنی دار در سطح احتمال پنج درصد، ns غیرمعنی دار

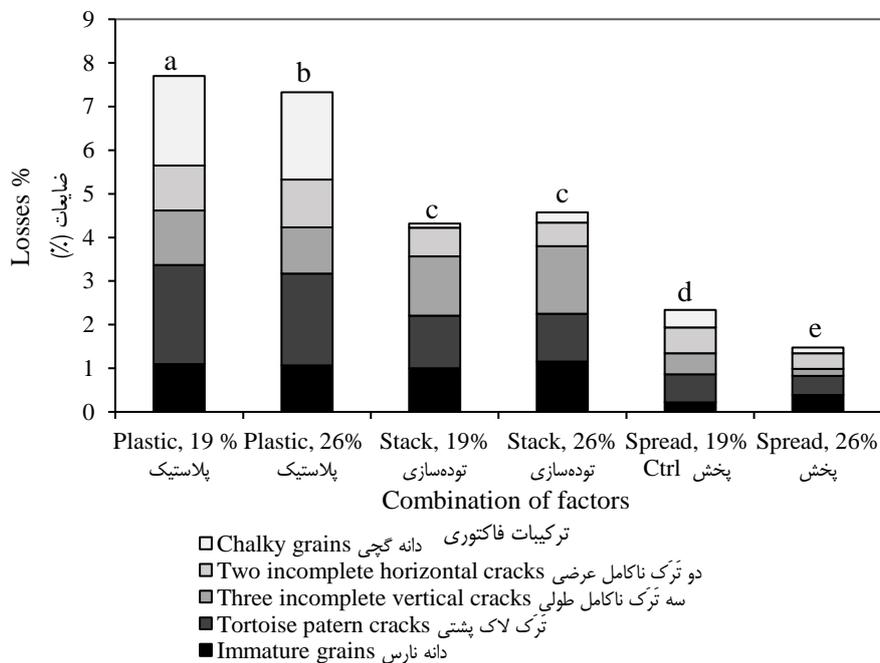
* Significant at 5% of probability level, ns= Non-Significant

اندوسپرم در زمان پرشدگی تاثیر می‌گذارند (Zhou et al., 2016; Gilani, AlamiSaeed, Siadat, & SeyyedNejad, 2012). دانه‌های گچی بر طعم و بوی محصول اثری ندارد، ولی بر بازده تبدیل موثرند. افزایش درصد دانه‌های گچی و نیز میزان ضایعات کل در دو روش پخش+پلاستیک و پخش کامل، با کاهش درصد رطوبت و در روش پخش پنج ساعت و توده (پخش+توده) با افزایش درصد رطوبت، رابطه مستقیم داشت. میانگین ضایعات کل در روش پخش+پلاستیک و پخش+توده نسبت به روش پخش کامل به ترتیب ۳/۹۵۸ برابر و ۲/۳۳۴ برابر بیشتر بود. میانگین ضایعات کل در سطح

با توجه به نتایج مقایسات میانگین (شکل ۲)، تفاوت چشم‌گیری در ایجاد دانه‌های گچی در استفاده از روش خشک کردن پنج ساعت و استفاده از پوشش پلاستیک (پخش+پلاستیک) وجود داشت. بدین صورت که دانه‌های گچی ناشی از قرارگیری در معرض دمای بالا و کمبود بسترهای نشاسته‌ای در اندوسپرم ظاهر شدند (Morita, Wada, & Matsue, 2016). همچنین، دانه‌های گچی علاوه بر شرایط تنش حرارتی، با توجه به تاثیری که از توزیع ناهمگون کود ازت و تراکم ناصحیح در فرآیندهای کشت و پرورش می‌گیرند، ایجاد می‌شوند و این دو عامل بر انباشت مواد به فرم نشاسته و پرشدن

با شروع تابستان دمای هوا افزایش یافته و از میزان بارندگی‌ها کم شده، و تبخیر و تعرق محصول افزایش می‌یابد. بنابراین ممکن است محصول در این دوره تا حدودی با کمبود آب مواجه شده و حدی از تنش خشکی را تجربه کند. تداوم این شرایط می‌تواند در هنگام پرشدن دانه‌ها، میزان فتوسنتز خالص و هدایت روزنه‌ای را در گیاه برنج کاهش داده و پیری برگ‌ها را تسریع کند (Zou et al., 2007)؛ که به تبع دستگاه فتوسنتزی تخریب شده و مقدار کلروفیل کاهش یافته و در نهایت دانه‌ها دارای ضایعات خواهند بود. در روش پخش+توده بین رطوبت‌های زمان برداشت تفاوت معناداری بر بروز ضایعات وجود نداشت.

رطوبتی ۲۶ و ۱۹ درصد به ترتیب ۴/۴۵۵ و ۴/۷۸۸ درصد بود. وجود دانه‌های نارس سبز در زمان برداشت در محتوای رطوبت بالاتر (۲۶ درصد)، در هر سه روش بیشتر بود که از این منظر با نتایج (Perdon, Siebenmorgen, & Mauromoustakos, 2000; Jodari & Linscombe, 1996) هم‌خوانی داشت. همین‌طور دماهای بالاتر، دلیل دیگر افزایش دانه‌های نارس در نواحی غربی و شمال شرقی ژاپن عنوان شده است (Terashima et al., 2001). محققین بیان کرده‌اند که دانه‌های برنج نارس، همواره بسته به نوع و شرایط آب و هوایی تا حدودی تشکیل می‌شوند (Bhattacharya & Ali, 2015). همین‌طور، دانه‌های نارس افزایش ۳۵/۷۱ درصدی در محتوای اسیدهای چرب آزاد و حساسیت بالا به فسادپذیری در زمان قرارگیری سه ماهه در دمای اتاق از خود نشان داده‌اند (Yilmaz, Yilmaz)



شکل ۲- درصد ضایعات برنج قهوه‌ای در ترکیب فاکتوری مختلف

Fig.2. Brown rice losses under different processing methods

مزرعه، ترکیبی از فرآیند اول (روش پیش خشک کردن و محتوای رطوبتی زمان برداشت) و فاصله‌های زمانی خشک کردن شالی در سطح مزرعه تا خرمکوبی در سه شهرستان بررسی شدند. اثر نتایج تجزیه واریانس اثرهای بلوک‌بندی، زمان خشک کردن و ترکیب‌های فاکتوری پیش خشک کردن در سطح مزرعه بر میزان ضایعات در جدول ۲ آورده شده است. با توجه به نتایج جدول ۲ به دلیل معناداری اثر مدل خطی، اثرهای اصلی فاکتور مرحله اول خشک کردن و فاکتور زمان و اثر متقابل دو فاکتور در سطح ۵ درصد مشخص شد که رابطه تاثیرگذاری بین تیمار، مدلی خطی، و نیز فاکتورها و متغیر وابسته وجود داشت ($P < 0.05$). همین‌طور اثر بلوک‌بندی در انجام این

کمترین و بیشترین درصد ضایعات بین ترکیب‌های فاکتوری، به ترتیب در سطح‌های رطوبتی ۲۶ و ۱۹ درصد در روش‌های پخش کامل و پخش+پلاستیک به‌طور میانگین، به‌میزان ۱/۴۶۵ درصد و ۷/۷۱۰ درصد مشاهده شد. همچنین، در روش پخش+توده در سطح رطوبتی ۱۹ درصد از بهترین ترکیب فاکتوری (پخش کامل در رطوبت ۲۶ درصد) دانه گچی کمتری به‌دست آمد. مجموع میزان ضایعات در روش پخش کامل در سطح رطوبتی ۲۶ درصد به‌طور چشم‌گیری از پخش کامل در سطح رطوبتی ۱۹ درصد (تیمار شاهد) کمتر بود.

فرآیند دوم

برای بررسی حالت‌های مختلف ضایعات، در فرآیند دوم در سطح

درصد ضایعات در شرایط خرمکوبی ۱۴ تا ۱۹ ساعت پس از پخش+پلاستیک در سطح رطوبتی ۱۹ درصد به میزان ۸/۴۴۶ درصد بود که در این ترکیب فاکتوری، سهم دانه‌های ترک لاک‌پستی و دانه‌های گچی در مجموع ۵۶/۳۳ درصد بود.

آزمایش بی‌تاثیر بود ($P>0.05$). مقدار ضریب تبیین اصلاح‌شده، نشان داد که ۹۶/۷۹ درصد از داده‌ها توسط مدل توضیح، توجیه و پوشش داده شدند. علاوه بر این، نتایج مقایسات میانگین در شکل ۳ نشان داده شده است. براساس نتایج مقایسات میانگین (شکل ۳)، بیشترین

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس اثرهای پیش خشک‌کردن، زمان، و اثرهای متقابل بر درصد ضایعات

Table 2- Analysis of variance of pre-drying, time, and interaction effects on the loss percentage

منبع تغییرات Source	درجه آزادی DF	مجموع مربعات اصلاح‌شده Adj SS	میانگین مربعات اصلاح‌شده Adj MS	مقدار F F-Value	مقدار P P-Value
مدل Model	19	186.705	9.8266	256.43	0.000*
بلوک (شهرستان) Block (City)	2	0.029	0.0144	0.38	0.687 ^{ns}
مدل خطی Linear model	7	160.068	22.8668	596.72	0.000*
روش پیش خشک‌کردن Pre-drying method	5	31.198	6.2395	162.82	0.000*
زمان Time	2	128.870	64.4349	1681.47	0.000*
اثر متقابل دو فاکتور 2-Way interactions	10	26.609	2.6609	69.44	0.000*
خطا Error	142	5.442	0.0383		
مجموع Total	161	192.147			

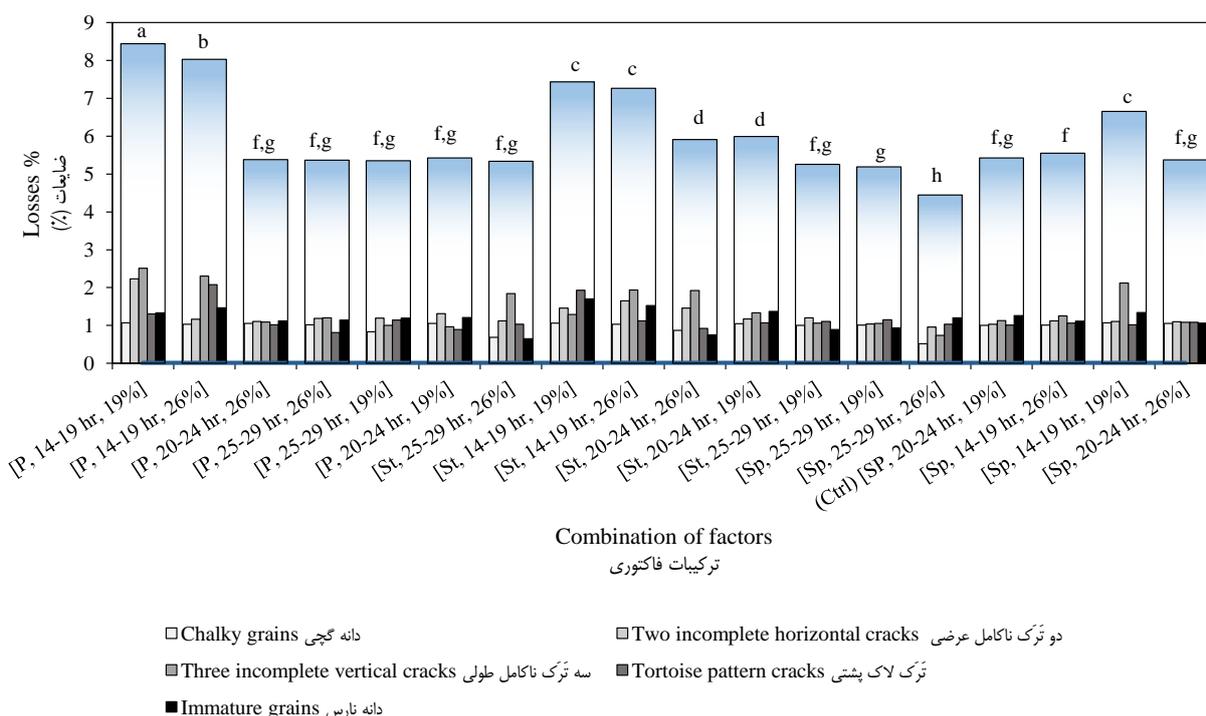
ضریب تبیین اصلاح‌شده
R²-adjusted= 96.79%

* معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد، ns غیرمعنی‌دار

* Significant at 5% of probability level, ns= Non-Significant

رطوبت نهایی زمان برداشت محصول را در بازده تبدیل موثر دانستند. بارش در طول دوره رشد محصول امری ناگزیر است. تغییرات آب و هوایی در فصل برداشت می‌تواند باعث ایجاد ترک شود؛ علاوه بر این، تنوع در روش‌های خشک‌کردن و نیز شرایط محیطی می‌تواند توزیع محتوای رطوبتی خاصی در مرکز و سطح دانه ایجاد کند که به واسطه قرارگیری در شرایط آب و هوایی مختلف، شکل‌های مختلفی از ترک ایجاد می‌شود (Siebenmorgen, Bautista, & Counce, 2007). در میان شکل‌های مختلف ضایعات، دانه‌های گچی در ترکیب‌های فاکتوری، درصد تقریباً ثابت‌تری داشت. همچنین، نتایج شکل ۳ نشان داد که مجموع ضایعات در سطح‌های رطوبتی ۱۹ و ۲۶ درصد بین فاصله زمانی ۲۰ تا ۲۴ ساعت روش خشک‌کردن پخش+توده و همچنین ۲۵ تا ۲۹ ساعت روش خشک‌کردن پخش+پلاستیک اختلاف معنادار آماری وجود نداشت. همچنین ۱۴ تا ۱۹ ساعت پخش+توده تفاوت آماری بین سطح‌های رطوبتی ۱۹ و ۲۶ درصد مشاهده نشد.

نتایج مقایسات میانگین (شکل ۳) نشان داد که کمترین میزان ضایعات در فاصله زمانی ۲۵ تا ۲۹ ساعت خرمکوبی پس از پخش کامل در سطح رطوبتی ۲۶ درصد به میزان ۴/۴۴۳ درصد بود. در این ترکیب فاکتوری، به ترتیب سهم دانه‌های ترک لاک‌پستی، دانه نارس و دو ترک ناکامل عرضی از مجموع ضایعات به ترتیب ۲۳/۱۸۳، ۲۷/۰۰۹ و ۲۱/۵۴۰ درصد بود که به‌طور معناداری از ضایعات دانه‌های گچی و سه ترک بیشتر بود. سهم دانه‌های ترک‌دار در تیمار شاهد (پخش کامل ۲۰ تا ۲۴ ساعت و برداشت در محتوای رطوبتی ۱۹ درصد)، ۵۸/۳۲۰ درصد بود. دماهای بالای روز در طول مرحله پرشدن دانه در ایجاد ترک، تاثیر مستقیم دارد (Abayawickrama et al., 2017). علاوه بر این، در تیمار سوم، ترک‌ها، به دلیل افزایش گرادیان رطوبتی ناشی جذب سطحی ناشی از محبوس بودن دانه در زیر پوشش و قرارگیری در توده، و عدم امکان تنفس مطلوب و رطوبت نسبی بالای هوای اطراف دانه، ایجاد شد (Jodari & Linscombe, 1996). ایشان علاوه بر رطوبت نسبی محیط، بارش و



شکل ۳- درصد ضایعات برنج قهوه‌ای در ترکیب فاکتوری مختلف (P: روش پخش+پلاستیک، St: روش پخش+توده، Sp: روش پخش کامل، hr: ساعت پیش از خرمکوبی، %: محتوای رطوبتی زمان برداشت، Ctrl: تیمار شاهد)

Fig.3. Brown rice losses percent under different combinations of processing methods (P: Spread+Plastic, St: Spread+Stack, Sp: Spread, hr: hour before threshing, %: Moisture contents, and Ctrl: Control treatment)

ناکامل طولی به ترتیب به میزان ۹۴/۳۷۹ و ۵۲/۱۶۲ درصد داشت و فقط این ترکیب فاکتوری از نظر آماری اختلاف چشم‌گیری در کاهش ضایعات کل (۲۲/۲۲۳ درصد) نسبت به تیمار شاهد داشت. در میان شکل‌های مختلف ضایعات، دانه‌های گچی در ترکیب‌های فاکتوری، درصد تقریباً ثابت‌تری داشتند.

فرآیند سوم

برای مشخص شدن شکل‌های مختلف ضایعات، اثرهای روش خشک کردن در سطح کارخانجات (استراحت‌دهی)، سرعت باد و دمای خشک کردن، در قالب پنج بلوک (شهرستان) بررسی شدند. نتایج تجزیه واریانس در جدول ۳ آمده است. نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان از معناداری اثرهای تیمار، مدل خطی، و اثرهای اصلی فاکتورهای روش استراحت‌دهی، سرعت هوا و دما، و اثر متقابل دو فاکتور روش و دمای خشک کردن و روش استراحت‌دهی و سرعت هوا داشت. با توجه به نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳)، فاکتور دما در تقابل با سرعت هوا تاثیر چشم‌گیری بر متغیر پاسخ، در سطح پنج درصد نداشت ($P > 0.05$). مقدار ضریب تبیین اصلاح شده ۸۸/۱۴ درصد، نشان از صحت بالای مدل داشت. علاوه بر این، نتایج

علاوه بر این، با توجه به شکل ۳، تفاوت معنادار آماری در سطح رطوبتی ۱۹ درصد در فاصله زمانی ۲۰ تا ۲۴ ساعت و ۲۶ درصد در فاصله زمانی ۱۴ تا ۱۹ ساعت در خشک کردن پخش+توده وجود داشت. دانه‌های ضعیف در تیمار اول به دلیل قرارگیری در معرض تابش بیشتر خورشید، شکننده‌تر شده و این عامل موجب ایجاد ترک شد. به طور معمول سه هفته تا یک ماه پس از شروع خوشه‌زایی، دانه به شکل سبز نارس می‌باشد (Hoon, Kim, Ha, & Park, 2016). نتایج تحقیقی که بر روی برنج دانه بلند مزارع کالیفرنیا انجام شده، نشان داده است که هرچه مدت ماندگاری شالی‌ها در مزارع کمتر باشند (محتوای رطوبت محصول بیشتر باشند) و زودتر وارد مرحله‌ی خشک کردن در کارخانه‌های تبدیل شوند، افزایش چشم‌گیری در سطوح متابولیت‌های میکروبی فرار و ضایعات ناشی از آن‌ها می‌شوند (Champagne et al., 2004). میانگین ضایعات در فاصله زمانی ۱۴ تا ۲۰، ۱۹ تا ۲۴ و ۲۵ تا ۲۹ ساعت به ترتیب ۵/۱۵۶، ۵/۵۸۵، ۷/۲۲۹ درصد بود. همین‌طور، استفاده از روش پخش کامل ۲۵ تا ۲۹ ساعت و برداشت در محتوای رطوبتی ۲۶ درصد نسبت به پخش کامل ۲۰ تا ۲۴ ساعت و برداشت در محتوای رطوبتی ۱۹ درصد (تیمار شاهد)، بیشترین تاثیر را از لحاظ کاهش درصد دانه‌های گچی و سه‌ترک

نسبت به تیمار شاهد عملکرد بهتری داشتند. نتایج بررسی نشان داده است سرعت باد ۲/۶۵ نسبت به چهار متر بر ثانیه در دمای خشک کردن ۵۰ درجه سلسیوس تاثیر چشم‌گیری بر کاهش درصد شکست دانه داشته است (Ghodrati & Kalantari, 2016). نتایج مطالعه‌ای بر روی شلتوک با محتوای رطوبتی ۱۶ و ۲۰/۵ درصد با رطوبت نسبی هوا ۱۳ و ۵۷ درصد در سه آهنگ جریان هوا ۰/۳۶، ۰/۴۶ و ۰/۵۶ متر مکعب بر ثانیه نشان داده که هرچه شدت خشک کردن بیشتر باشد و محتوای رطوبتی کمتر از حالت تعادل باشد، میزان گردیدان مواد نشاسته‌ای دانه بیشتر شده که این مسئله موجب درصد ترک بیشتر شده است (Mukhopadhyay & Siebenmorgen, 2018). نتایج بررسی دیگری نشان داده است که سرعت جریان هوا تاثیر معناداری در سطح ۵ درصد بر برنج سفید سالم نداشته است؛ همین‌طور حالت بهینه متغیرها در دمای ۲۵ درجه سلسیوس، زمان خشک کردن ۶۰۰ دقیقه، و سرعت جریان باد یک متر بر ثانیه با میزان برنج سفید سالم ۷۳/۹۳ درصد مشاهده شده است (Soomro, Chen, & Soomro, 2020).

مقایسات میانگین در شکل ۴ آمده است. نتایج مقایسات میانگین، نشان داد بیشینه و کمینه میزان ضایعات به ترتیب در روش‌های دو مرحله‌ای با ده ساعت استراحت‌دهی و سه مرحله‌ای با ۱۵ ساعت استراحت‌دهی، دمای خشک کن ۵۰ و ۴۰ درجه سلسیوس، و سرعت باد ۰/۸ و ۰/۵ متر بر ثانیه صورت پذیرفت. علی‌رغم این‌که، از نظر کمترین میزان ضایعات، تفاوت معناداری در روش سه مرحله‌ای در زمان استراحت‌دهی ۱۰ ساعت و ۱۵ ساعت در دمای ۴۰ درجه سلسیوس و سرعت باد ۰/۵ متر بر ثانیه وجود نداشت. همین‌طور در سرعت باد ۰/۸ متر بر ثانیه تفاوت معنادار آماری بین روش‌های مختلف استراحت‌دهی در دمای بین ۴۰ و ۵۰ درجه سلسیوس مشاهده نشد. همچنین، از میان روش‌های استراحت‌دهی در سرعت باد ۰/۵ متر بر ثانیه، با افزایش دما میزان ضایعات به‌طور معناداری افزایش یافت. اگرچه در سرعت باد ۰/۸ متر بر ثانیه به‌جز در روش استراحت‌دهی دو مرحله‌ای ۱۰ ساعت، چنین روندی وجود نداشت. همچنین، بررسی مقایسه‌ها نشان داد که همه روش‌های استراحت‌دهی غیر از روش استراحت‌دهی دو مرحله‌ای ۱۰ ساعت، در دمای ۵۰ درجه سلسیوس و سرعت هوای ۰/۵ و ۰/۸ متر بر ثانیه

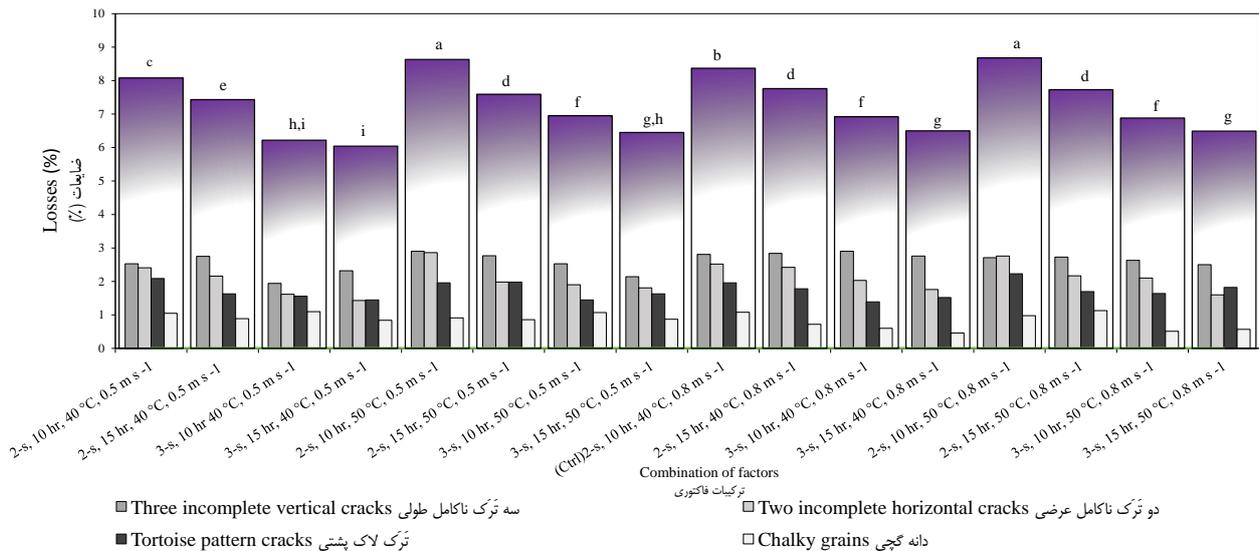
جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس اثرهای روش استراحت‌دهی، سرعت هوا، دما، و اثرهای متقابل بر درصد ضایعات

Table 3- Analysis of variance of tempering method, air velocity and temperature, and interaction effects on the losses

منبع تغییرات Source	درجه آزادی DF	مجموع مربعات اصلاح شده Adj SS	میانگین مربعات اصلاح شده Adj MS	F مقدار F-Value	P مقدار P-Value
مدل Model	19	168.084	8.8465	94.49	0.000*
بلوک (شهرستان) Block (City)	4	0.227	0.0568	0.61	0.658*
مدل خطی Linear model	5	163.341	32.6682	348.93	0.000*
دما Temperature	1	4.499	4.4991	48.05	0.000*
سرعت هوا Air velocity	1	3.179	3.1786	33.95	0.000*
استراحت‌دهی Tempering	3	155.663	51.8877	554.21	0.000*
اثر متقابل دو فاکتور 2-Way interactions	7	3.854	0.5506	5.88	0.000*
استراحت‌دهی × سرعت هوا Air velocity × Tempering	3	2.752	2.7520	29.39	0.000*
استراحت‌دهی × دما Temperature × Tempering	3	0.894	0.2979	3.18	0.025*
دما × سرعت هوا Temperature × Air velocity	1	0.209	0.0695	0.74	0.528 ^{ns}
اثر متقابل سه فاکتور 3-Way interactions	3	0.662	0.2206	2.36	0.073 ^{ns}
خطا Error	220	20.597	0.0936		
مجموع Total	239	188.681			
ضریب تبیین اصلاح شده R ² -adjusted= 88.14%					

* معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد، ns غیرمعنی‌دار

*Significant at 5% of probability level, ns= Non-Significant



شکل ۴- درصد ضایعات برنج قهوه‌ای در ترکیب‌های فاکتوری (2, 3-S): دو و سه مرحله‌ای، hr: زمان استراحت‌دهی، °C: دمای خشک‌کردن، سه ترک ناکامل طولی، ترک لاک پشتی، ترک ناکامل عرضی، دانه گچی

Fig.4. Brown rice losses percent under different processing methods (2, 3-S: 2, 3-stage, hr: Tempering hours, °C: Drying temperature, m s⁻¹: Air velocity, and Ctrl: Control treatment)

سرعت باد ۰/۵ متر بر ثانیه، تحت دمای ۴۰ درجه سلسیوس تفاوت چشم‌گیر آماری در سطح ۵ درصد وجود نداشت. از این روی، پیشنهاد می‌شود به لحاظ اهمیت زمان‌بندی در مدیریت واحد خشک‌کن‌ها از سریع‌ترین زمان استراحت‌دهی مطلوب استفاده شود. مجموع ضایعات در ترکیب فاکتوری تیمارهای شاهد ۱۶/۱۳۵ درصد بود. این در حالی است که نتیجه تحقیق حاضر نشان داد در بهترین ترکیب فاکتوری از پیش خشک‌کردن در مزرعه تا پس از خشک‌کردن در کارخانه (استراحت‌دهی) می‌توان این میزان را به ۱۱/۹۳۳ درصد کاهش داد، که لزوم توجه هرچه بیشتر شالی‌کاران و مدیریت کارخانجات تبدیل را می‌طلبد.

سپاسگزاری

از معاونت محترم پژوهشی و فناوری دانشگاه فردوسی مشهد برای تأمین اعتبار این پژوهش سپاسگزاری می‌شود.

نتیجه‌گیری

در بررسی عوامل موثر بر ایجاد ضایعات در برنج قهوه‌ای، روش پخش کردن کامل در سطح مزرعه (با محتوای رطوبت نهایی برداشت ۲۶ درصد در بازه زمانی ۲۵ تا ۲۹ ساعت خشک‌کردن پیش از خرمکوبی)، کمترین میزان ضایعات را نسبت به تیمار شاهد (برداشت در محتوای رطوبتی ۱۹ درصد در بازه زمانی ۲۰ تا ۲۴ ساعت خشک‌کردن پیش از خرمکوبی) داشت. پیش خشک‌کردن پنج ساعت و استفاده از توده‌سازی و پوشش پلاستیک به لحاظ تأثیری که بر افزایش میزان ضایعات برنج قهوه‌ای دارند، توصیه نمی‌شود. علاوه بر این، در سطح کارخانجات تبدیل، روش استراحت‌دهی سه مرحله‌ای ۱۵ ساعت، سرعت باد ۰/۵ متر بر ثانیه و دمای ۴۰ درجه سلسیوس با اختلاف مقدار میانگین ۲/۶۲۰ درصد نسبت به روش استراحت‌دهی دو مرحله‌ای ۱۰ ساعت، سرعت باد ۰/۸ متر بر ثانیه و دمای ۴۰ درجه سلسیوس (تیمار شاهد) کمترین میزان ضایعات را داشت، اما بین ۱۰ و ۱۵ ساعت زمان استراحت‌دهی در روش استراحت‌دهی سه مرحله‌ای با

References

1. Abayawickrama, A. S. M. T., Reinke, R. F., Fitzgerald, M. A., Harper, J. D., & Burrows, G. E. (2017). Influence of high daytime temperature during the grain filling stage on fissure formation in rice. *Journal of Cereal Science*, 74, 256-262. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.02.013>
2. Allameh, A., & Alizadeh, M. R. (2013). Evaluating rice losses in delayed rough rice drying. *International Journal of Agronomy and Plant Production*, 4(4), 799-804.
3. Anonymous. (2018). Crops. Office of statistics and information technology. Department of Planning and Economics. Ministry of Jihad-e-Agriculture of Iran. pp.87. (In Persian).
4. ASAE. (1998). ASAE Standard D245.5: Moisture Relationships of Plant-based Agricultural Products. St. Joseph,

- MI.
5. Bhattacharya, K. R., & Ali, S. Z. (2015). *An introduction to rice-grain technology*. CRC Press. USA. <https://doi.org/10.1201/b18904>
 6. Bootkote, P., Soponronnarit, S., & Prachayawarakorn, S. (2016). Process of producing parboiled rice with different colors by fluidized bed drying technique including tempering. *Food and Bioprocess Technology*, 9(9), 1574-1586. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11947-016-1737-7>
 7. Champagne, E. T., Thompson, J. F., Bett-Garber, K. L., Mutters, R., Miller, J. A., & Tan, E. (2004). Impact of storage of freshly harvested paddy rice on milled white rice flavor. *Cereal Chemistry*, 81(4), 444-449. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.2004.81.4.444>
 8. Dong, R., Lu, Z., Liu, Z., Koide, S., & Cao, W. (2010). Effect of drying and tempering on rice fissuring analysed by integrating intra-kernel moisture distribution. *Journal of Food Engineering*, 97(2), 161-167. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.10.005>
 9. Eshtavad, R., Kalantari, D., Hashemi, S., & Pirdashti, H. (2016). Influence of drying rate and tempering period on the paddy breakage in the thin layer drying method. *Journal of Research and Innovation in Food Science and Technology*, 5(1), 87-104. (In Persian). <https://doi.org/10.22101/JRIFST.2016.06.01.517>
 10. Gazor, H., & Moumeni, A. (2019). Comparison of the paddy drying process and milling quality between re-circulating and conventional batch type dryers. *Journal of Agricultural Machinery*, 9(2), 365-374. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jam.v9i2.72761>
 11. Ghodrati, A., & Kalantari, D. (2016). Investigation the influence of variety, temperature and air velocity parameters in qualitative performance of a thin layer paddy dryer. *Innovative Food Technologies*, 4(1), 93-102. (In Persian). <https://doi.org/10.22104/jift.2016.331>
 12. Gilani, A., AlamiSaeed, K., Siadat, S. A., & SeyyedNejad, M. (2012). Study of heat stress effect on rice cultivars grain milling quality in Khuzestan. *Crop Physiology*, 4(14), 5-21. (In Persian).
 13. Gimenez, E., Salinas, M., & Manzano-Agugliaro, F. (2018). Worldwide research on plant defense against biotic stresses as improvement for sustainable agriculture. *Sustainability*, 10(2), 391. <https://doi.org/10.3390/su10020391>
 14. Golmohammadi, M., Rajabi-Hamane, M., & Hashemi, S. J. (2012). Optimization of drying-tempering periods in a paddy rice dryer. *Drying Technology*, 30(1), 106-113. <https://doi.org/10.1080/07373937.2011.618281>
 15. Heidari Soltanabadi, M., Malek, S., Ghazvini, H. R., Shaaker, M., & Hedayati Zadeh, M. (2010). Losses in blade and abrasive systems by moisture content for three rice varieties. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 11(1), 67-84. (In Persian).
 16. Hoon, K., Kim, O. W., Ha, A.W., & Park, S. (2016). Determination of optimal harvest time of chuchung variety green rice® (*Oryza sativa* L.) with high contents of GABA, γ -oryzanol, and α -tocopherol. *Preventive Nutrition and Food Science*, 21(2), 97. <https://doi.org/10.3746/pnf.2016.21.2.97>
 17. Jodari, F., & Linscombe, S. D. (1996). Grain fissuring and milling yields of rice cultivars as influenced by environmental conditions. *Crop Science*, 36(6), 1496-1502. <https://doi.org/10.2135/CROPSCI1996.0011183X003600060014X>
 18. Khodabakhshi Pour, M., Alizadeh, M. R., Bolouki, M. S., & Ghasemi, A. (2011). Effect of paddy moisture content, drum speed and feed rate on the qualitative losses in a paddy axial flow-thresher. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 42(1), 37-41. (In Persian).
 19. Krzyżanowski, M., Kuna-Dibbert, B., & Schneider, J. (Eds.). (2005). Health effects of transport-related air pollution. WHO Regional Office Europe.
 20. Li, X. J., Wang, X., Li, Y., Jiang, P., & Lu, H. (2016). Changes in moisture effective diffusivity and glass transition temperature of paddy during drying. *Computers and Electronics in Agriculture*, 128, 112-119. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.08.025>
 21. Mohajeran, S. H., Khoshtaghaza, M. H., & Moazami Gudarzi, A. (2006). Effect of rough rice temperature and air velocity on grain crack during infrared radiation drying. *Food Science and Technology*, 3(9), 57-66. (In Persian).
 22. Morita, S., Wada, H., & Matsue, Y. (2016). Counter measures for heat damage in rice grain quality under climate change. *Plant Production Science*, 19(1), 1-11. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2015.1128114>
 23. Mukhopadhyay, S., & Siebenmorgen, T. J. (2018). Effect of airflow rate on drying air and moisture content profiles inside a cross-flow drying column. *Drying Technology*, 36(11), 1326-1341. <https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1402024>
 24. Perdon, A., Siebenmorgen, T. J., & Mauromoustakos, A. (2000). Glassy state transition and rice drying: Development of a brown rice state diagram. *Cereal Chemistry*, 77(6), 708-713. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.2000.77.6.708>
 25. Poomsa-ad, N., Soponronnarit, S., Prachayawarakorn, S., & Terdyothin, A. (2002). Effect of tempering on subsequent drying of paddy using fluidisation technique. *Drying Technology*, 20(1), 195-210. <https://doi.org/10.1081/DRT-120001374>
 26. Sadeghi, M., Ghasemi, A., & Mireei, S. A. (2016). Rough rice stress fissuring with respect to conditions of drying and tempering processes. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 47(2), 278-269. (In Persian).

- <https://doi.org/10.22059/ijbse.2016.58776>
27. Siebenmorgen, T. J., Bautista, R. C., & Counce, P. A. (2007). Optimal harvest moisture contents for maximizing milling quality of long-and medium-grain rice cultivars. *Applied Engineering in Agriculture*, 23(4), 517-527. <https://doi.org/10.13031/2013.23476>
 28. Soomro, S. A., Chen, K., & Soomro, S. A. (2020). Mathematical modelling and optimisation of low-temperature drying on quality aspects of rough rice. *Journal of Food Quality*, 2020(3), 1-10. <https://doi.org/10.1155/2020/6501257>
 29. TajaddodiTalab, K. (2005). The effect of multi passes drying on milling yield and drying time of paddy. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 6, 113-124. (In Persian).
 30. Terashima, K., Saito, Y., Sakai, N., Watanabe, T., Ogata, T., & Akita, S. (2001). Effects of high air temperature in summer of 1999 on ripening and grain quality of rice. *Japanese Journal of Crop Science*, 70(3), 449-458. (Japanese with English abstract). <https://doi.org/10.1626/JCS.70.449>
 31. Truong, T., Truong, V., Fukai, S., & Bhandari, B. (2012). Changes in cracking behavior and milling quality of selected Australian rice varieties due to post drying annealing and subsequent storage. *Drying Technology*, 30(16), 1831-1843. <https://doi.org/10.1080/07373937.2012.710692>
 32. Tsukaguchi, T., & Iida, Y. (2008). Effects of assimilate supply and high temperature during grain-filling period on the occurrence of various types of chalky kernels in rice plants (*Oryza sativa* L.). *Plant Production Science*, 11(2), 203-210. <https://doi.org/10.1626/pps.11.203>
 33. Udomkun, P., Romuli, S., Schock, S., Mahayothee, B., Sartas, M., Wossen, T., Njukwe, E., Vanlauwe, B., & Müller, J. (2020). Review of solar dryers for agricultural products in Asia and Africa: An innovation landscape approach. *Journal of Environmental Management*, 268, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110730>
 34. Xangsayasane, P., Vongxayya, K., Phongchanmisai, S., Mitchell, J., & Fukai, S. (2019). Rice milling quality as affected by drying method and harvesting time during ripening in wet and dry seasons. *Plant Production Science*, 22(1), 98-106. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2018.1544463>
 35. Yılmaz, F., Yılmaz Tuncel, N., & Tuncel, N. B. (2018). Stabilization of immature rice grain using infrared radiation. *Food Chemistry*, 253, 269-276. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.01.172>
 36. Zhou, C., Huang, Y., Jia, B., Wang, Y., Wang, Y., Xu, Q., Li, R., Wang, S., & Dou, F. (2016). Effects of cultivar, nitrogen rate, and planting density on rice-grain quality. *Agronomy*, 8(11), 246. <https://doi.org/10.3390/agronomy8110246>
 37. Zou, G. H., Liu, H. Y., Mei, H. W., Liu, G. L., Yu, X. Q., Li, M. S., Wu, J. H., Chen, L., & Luo, L. J. (2007). Screening for drought resistance of rice recombinant inbred populations in the field. *Journal of Integrative Plant Biology*, 49(10), 1508-1516. <https://doi.org/10.1111/j.1672-9072.2007.00560.x>

Research Article

Vol. 14, No. 2, 2024, p. 119-133

Rapid and Non-destructive Estimation of Apple Tree NPK Contents based on Leaf Spectral Analysis

R. Azadnia¹, A. Rajabipour^{2*}, B. Jamshidi³, M. Omid²

1- PhD Student, Biosystems Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran, Iran

2- Professor, Biosystems Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran, Iran

3- Associate Professor, Smart Agricultural Research Department, Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization, Karaj, Iran

(*- Corresponding Author Email: arajabi@ut.ac.ir)

Received: 17 September 2022

Revised: 02 November 2022

Accepted: 13 November 2022

Available Online: 13 November 2022

How to cite this article:

Azadnia, R., Rajabipour, A., Jamshidi, B., & Omid, M. (2024). Rapid and Non-destructive Estimation of Apple Tree NPK Contents based on Leaf Spectral Analysis. *Journal of Agricultural Machinery*, 14(2), 119-133. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2022.78770.1125>

Introduction

Apple is one of the most frequently consumed fruits in the world. It is a source of minerals, fiber, various biological compounds such as vitamin C, and phenolic compounds (natural antioxidants). The amount of nutrients plays a significant role in the growth, reproduction, and performance of agricultural products and plants. Chemical inputs can be accurately managed by predicting these elements. Thus, timely and accurate monitoring and managing the status of crop nutrition is crucial for adjusting fertilization, increasing the yield, and improving the quality. This approach minimizes the application of chemical fertilizers and reduces the risk of environmental degradation. In crop plants, leaf samples are typically analyzed to diagnose nutrient deficiencies and imbalances, as well as to evaluate the effectiveness of the current nutrient management system. Therefore, the main aim of this study is to estimate the level of Nitrogen (N), Phosphorus (P), and Potassium (K) elements in the leaves of the apple tree using the non-destructive method of Visible/Near-infrared (Vis/NIR) spectroscopy at the wavelength range of 500 to 1000 nm coupled with chemometrics analysis.

Materials and Methods

This research investigated the potential of the Vis/NIR spectroscopy coupled with chemometrics analysis for predicting NPK nutrient levels of apple trees. In this study, 80 leaf samples of apple trees were randomly picked and transferred to the laboratory for spectral measurement. The Green-Wave spectrometer (StellarNet Inc, Florida, USA) was utilized to collect the spectral data. In the next step, the spectral data were transferred to the laptop using the Spectra Wiz software (StellarNet Inc, Florida, USA). For this purpose, spectroscopy of the leaf samples was done in interactance mode. Ten random points were selected on each leaf to capture reflectance spectra and the averaged spectrum was used to determine the reflectance (R). The data was then transformed into absorbance ($\log 1/R$) for chemometrics analysis. Following the spectroscopy measurements, the NPK contents were measured using reference methods. Afterward, Partial Least Square (PLS) multivariate calibration models were developed based on the reference measurements and spectral information using different pre-processing techniques. To remove the unwanted effects, various pre-processing methods were utilized to obtain an accurate calibration model. To evaluate the proposed models, the Root Mean Square Error of calibration and prediction sets (RMSEC and RMSEP), as well as the correlation coefficient of calibration and prediction sets (r_c and r_p), and Residual Predictive Deviation (RPD) were calculated.



©2022 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jam.2022.78770.1125>

Results and Discussion

The statistical metrics were calculated for the evaluation of PLS models and the results indicated that the PLS models could efficiently predict the NPK contents with satisfactory accuracy. The model with the best performance for nitrogen prediction was based on the standard normal variate pre-processing method in combination with the second derivative (SNV+D2) and resulted in $r_c=0.988$, $RMSEC=0.028\%$, $r_p=0.978$, $RMSEP=0.034\%$, and RPD of 7.47. The best model for P content prediction resulted in $r_c=0.967$, $RMSEC=0.0051\%$, $r_p=0.958$, $RMSEP=0.0057\%$, and RPD of 5.96. Additionally, the PLS model based on MSC+D2 pre-processing method resulted in $r_c=0.984$, $RMSEC=0.017\%$, $r_p=0.976$, $RMSEP=0.021\%$, and RPD of 7.10, indicating the high potential of PLSR model in predicting K content. Moreover, the weakest performing model was related to the estimation of P content without pre-processing with $r_c=0.774$, $RMSEC=0.013\%$, $r_p=0.685$, $RMSEP=0.018\%$, and RPD value of 1.87. Based on the obtained results, the proposed PLS models coupled with suitable pre-processing methods were able to predict the nutrient content with high precision.

Conclusion

Field spectroscopy has recently gained popularity due to its portability, ease of use, and low cost. Consequently, the use of a portable system for estimating nutrient levels in the field can significantly save time and lower laboratory expenses. Therefore, due to the accuracy of the Vis/NIR spectroscopy technique and according to the obtained results, this method can be used to actualize a portable system based on Vis/NIR spectroscopy to estimate the nutrient elements needed by the apple trees in the orchards and to increase the productivity of the orchards.

Keywords: Nutrients, Partial Least Squares, Pre-processing, Spectroscopy, Visible/Near-infrared

مقاله پژوهشی

جلد ۱۴، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۳، ص ۱۱۹-۱۳۳

ارزیابی سریع و غیرمخرب مقادیر NPK درخت سیب مبتنی بر تجزیه و تحلیل طیفی برگ

رحیم آزادنیا^۱، علی رجیبی پور^{۲*}، بهاره جمشیدی^۳، محمود امید^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۲۲

چکیده

میزان عناصر مغذی نقش به‌سزایی در رشد، تکثیر و عملکرد محصولات کشاورزی و گیاهان دارند. با پیش‌بینی این عناصر می‌توان به‌صورت دقیق نهاده‌های شیمیایی را مدیریت کرد. هدف از این مطالعه ارزیابی غیرمخرب میزان عناصر NPK با استفاده از طیف‌سنجی مرئی / فروسرخ نزدیک (Vis/NIR) در بازه طول موجی ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر بود. برای این منظور، طیف‌سنجی از نمونه‌های برگ درختان سیب در مد اندازه‌گیری برهم‌کنش انجام گرفت. برای حذف اثرات ناخواسته از روش‌های مختلف پیش‌پردازش استفاده شد تا مدل واسنجی دقیق حاصل شود. در این راستا، مدل واسنجی چندمتغیره حداقل مربعات جزئی (PLS) بر پایه اندازه‌گیری‌های مرجع و اطلاعات طیفی با روش‌های مختلف پیش‌پردازش مورد بررسی قرار گرفت. بهترین مدل ارائه‌شده مبتنی بر روش پیش‌پردازش توزیع نرمال استاندارد در ترکیب با مشتق دوم (SNV+D2) با مقادیر $r_c=0/988$ ، $r_p=0/978$ ، $RMSEC=0/028$ ، $RMSEP=0/034$ ، $RPD=7/47$ متعلق به پیش‌بینی نیتروژن بود. بهترین مدل برای ارزیابی میزان پتاسیم و فسفر نیز براساس روش پیش‌پردازش تصحیح پراکنش افزایشده در ترکیب با مشتق دوم (MSC+D2) به‌ترتیب $r_p=0/976$ ، $RMSEP=0/021$ ، $RPD=7/10$ و $r_p=0/958$ ، $RMSEP=0/057$ ، $RPD=5/96$ به‌دست آمد. نتایج به‌دست‌آمده حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که طیف‌سنجی Vis/NIR می‌تواند به‌عنوان یک ابزار غیرمخرب، سریع و قابل‌اعتماد برای پیش‌بینی مقدار عناصر مغذی درخت سیب استفاده و از مصرف بیش از حد نهاده‌های شیمیایی و پیامدهای ناشی از آن جلوگیری شود.

واژه‌های کلیدی: پیش‌پردازش، حداقل مربعات جزئی، طیف‌سنجی، عناصر مغذی، مرئی / فروسرخ نزدیک

مقدمه

برگ و موقعیت قرارگیری روی درخت و سن درختان بستگی دارد. نیتروژن (N)، فسفر (P) و پتاسیم (K) عناصر مغذی اصلی برگ درختان هستند که به‌طور چشمگیری روی رشد، عملکرد و فاکتورهای کیفی اثر می‌گذارند. اطلاع به‌موقع از میزان مواد مغذی محصولات اهمیت ویژه‌ای دارد تا نیازهای غذایی به‌اندازه کافی تعیین و نرخ کوددهی دقیق مشخص شود. چراکه بهینه‌سازی برنامه کوددهی از طرفی سبب به حداکثر رساندن عملکرد میوه با کیفیت شده و از طرف دیگر میزان کودهای شیمیایی مصرفی را به حداقل می‌رساند تا اثرات زیست‌محیطی کاهش یابد (Erel, Dag, Ben-Gal, Schwartz, & Yermiyahu, 2008).

برگ درخت یکی از عوامل ارزیابی میزان عناصر مغذی آن است، چراکه برگ گیاهان متابولیسم فعالی دارند و منبع اصلی ذخیره مواد مغذی و کربوهیدرات برای درختان هستند (Embleton, Jones, Labanauskas, & Reuther, 1973). بنابراین تجزیه شیمیایی برگ مهم‌ترین ابزار برای ارزیابی وضعیت عناصر غذایی درختان و مدیریت

عناصر مغذی یکی از عوامل مهم در بهبود کمی و کیفی محصول به‌شمار می‌آید که باعث بهبود رنگ، طعم و شکل میوه، کاهش ریزش میوه، افزایش مقاومت در برابر آفات و بیماری‌ها و ایجاد مقاومت در برابر سرما می‌شود (Taiz, Zeiger, Møller, & Murphy, 2015). این عناصر اجزای اصلی کلروفیل، آنزیم‌ها و پروتئین‌ها را تشکیل می‌دهند. میزان این عناصر به عواملی چون رشد گیاه، نوع خاک، سن

- ۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی و تکنولوژی کشاورزی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
 - ۲- استاد، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی و تکنولوژی کشاورزی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
 - ۳- دانشیار، بخش تحقیقات هوشمندسازی کشاورزی، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
- *- نویسنده مسئول: (Email: arajabi@ut.ac.ir)

 <https://doi.org/10.22067/jam.2022.78770.1125>

که روش طیف‌سنجی Vis/NIR می‌تواند برای توسعه سامانه‌های قابل حمل به منظور غربالگری خیارها بر پایه بیشینه مجاز سطح نیترات در محصول استفاده شود (Jamshidi & Yazdanfar, 2022).

فرهادی و همکاران (Farhadi, Afkari-Sayyah, Jamshidi, & Gorji, 2020) با استفاده از طیف‌سنجی Vis/NIR تغییرات ترکیبات داخلی سیب‌زمینی در حین ذخیره‌سازی را بررسی کردند. طیف‌سنجی در محدوده طیفی ۴۵۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر برای پیش‌بینی نشاسته، میزان قند و رطوبت نمونه‌های سیب‌زمینی انجام گرفت. به‌منظور ایجاد رابطه خطی بین طیف‌های جذبی و اندازه‌گیری‌های مرجع از دو روش PLS استفاده شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که مدل ارائه‌شده می‌تواند با ضریب همبستگی بالای ۹۰ درصد میزان قند سیب‌زمینی را پیش‌بینی نماید. در مطالعه‌ای دیگر با استفاده از طیف‌سنجی Vis/NIR همراه با روش‌های تجزیه و تحلیل شیمی‌سنجی^۵ بار میکروبی نمونه‌های کاهو در محدود طیفی ۳۵۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر بررسی شد. در این تحقیق از پنج الگوریتم SVM^۶، SIMCA^۷، PLS-DA^۸، PCA^۹ و HCA^{۱۰} برای تشخیص نمونه‌های کاهوی آلوده به میکروب استفاده شد. نتایج نشان داد که بهترین مدل ارائه‌شده با استفاده از الگوریتم نظارت‌شده PLS-DA همراه با روش پیش‌پردازش SNV+D2 به‌دست آمد. ضریب همبستگی بین داده‌های طیفی Vis/NIR و داده‌های مرجع $r_c=0.989$ به‌دست آمد، که توانایی این تکنیک در تشخیص آلودگی نمونه‌های کاهو را نشان می‌دهد (Rahi, Mobli, Jamshidi, Azizi, & Sharifi, 2020).

وانگ و همکاران (Wang et al., 2019) برای ارزیابی میزان عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم در برگ‌های نیشکر از طیف‌سنجی Vis/NIR استفاده کردند. به‌منظور به‌دست آوردن طیف‌های بازتابی برگ از یک طیف‌سنج درون مزرعه‌ای استفاده شد. برای ایجاد رابطه بین داده‌های مرجع و طیف‌های به‌دست‌آمده از مدل CARS-PCA-PLS استفاده شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که مدل‌های ارائه‌شده توانست با دقت ۰/۸۵، ۰/۶۷ و ۰/۹۳ به‌ترتیب میزان نیتروژن، فسفر و پتاسیم را پیش‌بینی کند. هم‌چنین در مطالعه‌ای دیگر محققان به‌منظور تعیین میزان عناصر مغذی درخت سیب با استفاده از طیف‌سنجی فرسوخ نزدیک میزان نیتروژن و کلروفیل برگ را اندازه‌گیری کردند. محققان برای ارزیابی میزان نیتروژن از مدل PLS مبتنی بر تبدیل فوریه^{۱۰} استفاده کردند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که روش ارائه‌شده توانست به‌منظور مدیریت صحیح استفاده از نهاده‌های شیمیایی میزان نیتروژن را با دقت بالای ۰/۹۸ ارزیابی کند (Tamburini, Ferrari, 2020).

کوددهی آن است. تجزیه و تحلیل برگ درختان سیب معمولاً با هدف تشخیص کمبود و عدم تعادل عناصر غذایی و ارزیابی اثربخشی برنامه‌های مدیریت مواد مغذی فعلی انجام می‌شود (Miles, 2010). اما، روش‌های آزمایشگاهی مرسوم گران، پرهزینه، زمان‌بر و نیازمند متخصص و آزمایشگاه هستند.

امروزه استفاده از روش‌های غیرمخرب به‌منظور ارزیابی کیفیت داخلی محصولات کشاورزی نظر پژوهشگران را به خود جلب کرده و حجم زیادی از پژوهش‌ها با استفاده از این روش‌ها صورت می‌گیرد. روش‌های مبتنی بر بینایی ماشین، روش‌های اپتیکی طیف‌سنجی فرسوخ نزدیک^۱ (NIR)، طیف‌سنجی رامان، انتشار صوت و روش‌های فراصوتی از جمله روش‌های غیرمخرب هستند که امروزه به‌منظور ارزیابی کیفیت داخلی محصولات کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Butz, Hofmann, & Tauscher, 2005).

خواص بیوشیمیایی و بیوفیزیکی به‌طور چشمگیری طیف‌های بازتابی از برگ گیاهان را تحت تاثیر قرار می‌دهد. از این‌رو، استخراج اطلاعات بیوشیمیایی از یک طیف گیاهی پیوسته تولید شده با استفاده از حسگرهای طیفی امکان‌پذیر است. به‌منظور به‌حداقل رساندن چالش‌ها و مشکلات آزمایشگاهی در تعیین محتوای بیوشیمیایی برگ گیاهان می‌توان از روش‌های طیف‌سنجی استفاده کرد (Mobasheri & Rahimzadegan, 2012). طیف‌سنجی یک روش رایج برای تشخیص سریع محتویات مواد مغذی در محصولات است (Rady & Guyer, 2015).

عباسی و همکاران (Abasi, Minaei, Jamshidi, Fathi, & Khoshtaghaza, 2019) با کمک روش طیف‌سنجی NIR برخی از پارامترهای کیفی سیب را مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها در این مطالعه از تبدیل موجک و روش‌های معمول پیش‌پردازش برای توسعه مدل رگرسیونی حداقل مربعات جزئی^۲ (PLS) استفاده کردند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که استفاده از روش تبدیل موجک^۳ برای حذف اطلاعات ناخواسته از داده‌های طیفی، قابلیت ارائه یک مدل رگرسیونی خطی دقیق و صحیح را دارد. محققان در مطالعه‌ای یک روش سریع و غیرمخرب به‌منظور شناسایی خیار آلوده براساس حداکثر تجمع نیترات را با استفاده از طیف‌سنجی Vis/NIR ارائه دادند. آن‌ها در این تحقیق یک مدل PLS براساس روش‌های مختلف پیش‌پردازش و داده‌های مرجع توسعه دادند. هم‌چنین، روش‌های طبقه‌بندی مختلف خطی، درجه دوم و ماهالانویس براساس روش PCA-DA^۴ برای طبقه‌بندی نمونه‌های خیار سالم از آلوده (دارای نیترات بیش از حد مجاز) توسعه یافت. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد

5- Chemometrics Analysis

6- Support Vector Machine

7- Soft Independent Modeling of Class Analogy

8- Partial Least Square-Discriminant Analysis

9- Hierarchical Cluster Analysis

10- Fourier Transform

1- Near-infrared Spectroscopy

2- Partial Least Squares

3- Wavelet Transform

4- Principal Component Analysis-Discriminant Analysis

(Marchetti, Pedrini, & Ferro, 2015).

اندازه‌گیری مرجع

به‌منظور برآورد درصد نیتروژن نمونه‌های برگ از روش کج‌لدال استفاده شد. ابتدا نمونه‌های موردنظر توسط اسید سولفوریک هضم و نیتروژن موجود به سولفات آمونیوم تبدیل شد. ازت سولفات آمونیوم به‌صورت آمونیاک آزاد و توسط اسید بوریک به بورات آمونیوم تبدیل و با استفاده از اسید سولفوریک ۰/۱ آن را تیتر شد. با محاسبه اسید مصرفی مقدار ازت بر حسب درصد به‌دست آمد. اما به‌منظور اندازه‌گیری مقدار فسفر و پتاسیم از دستگاه طیف‌سنج نشر پلاسما-اپتیکال جفت القایی^۵ (ICPOES; OPTIMA 2000DV, Perkin-Elmer, Italy) استفاده شد. جدول ۱ داده‌های آماری (حداقل، حداکثر، میانگین و انحراف معیار) مربوط به مقادیر NPK اندازه‌گیری شده نمونه‌های برگ در آزمایشگاه را به‌صورت درصد نمایش می‌دهد.

پیش‌پردازش داده‌ها

اطلاعات و داده‌های غیرمفید تاثیر منفی روی طیف‌سنجی می‌گذارد و مدل رگرسیونی نامناسبی بین طیف‌ها و پارامترهای شیمیایی ایجاد می‌کند. این اطلاعات غیرمفید در اثر عواملی مانند متغیر بودن فاصله آشکارساز نمونه، اندازه نمونه و نویزهای حاصل از خود دستگاه و محیط ایجاد می‌شود. برای حذف این عوامل از روش‌های پیش‌پردازش تصحیح پراکنش افزایشدهنده^۶ (MSC) و توزیع نرمال استاندارد^۷ (SNV) استفاده می‌شود (Fu, Ying, Lu, Xu, & Yu, 2007). برای هموارسازی و حذف نویزهای تصادفی موجود در طیف‌ها از فیلتر میانگین‌گیر متحرک^۸ (MA) با عرض پنجره ۳ و هم‌چنین هموارسازی ساویتزکی-گولای^۹ (SG) با تعداد نقاط همسایگی و درجه چند جمله‌ای به‌ترتیب برابر با ۳ و ۲ استفاده شد. هم‌چنین به‌منظور افزایش قدرت تفکیک طیفی و آشکار کردن پیک‌های ضعیف از مشتق اول و دوم (D1 و D2) برپایه الگوریتم ساویتزکی-گولای با تعداد نقاط همسایگی و درجه چند جمله‌ای به‌ترتیب ۳ و ۲ استفاده شد. لازم به ذکر است که انتخاب صحیح پارامترهایی مانند عرض پنجره فیلتر، تعداد نقاط همسایگی و درجه چند جمله‌ای به‌منظور افزایش نسبت سیگنال به نویز از اهمیت بالایی برخوردار است (Jamshidi, Mohajerani, Jamshidi, Minaei, & Sharifi, 2016). در واقع با افزایش درجه مشتق‌گیری پیک‌های جذبی پهن‌تر می‌شوند و به‌همین دلیل است که D2 نسبت به D1 از قدرت تفکیک

مطابق با مطالعات انجام‌شده، تلفیق طیف‌سنجی و روش‌های شیمی‌سنجی می‌تواند رابطه بین طیف‌های بازتابی و محتویات عناصر مغذی را به‌صورت مستقیم بیان کند (Amiratul et al., 2017). از طرف دیگر انتخاب و استفاده به‌موقع از نهاده‌های شیمیایی همیشه در اولویت وظایف کشاورزان قرار داشته است. برای آگاهی از میزان استفاده از نهاده‌های شیمیایی، لازم است تا میزان عناصر مغذی موجود در برگ درخت در اختیار باشد. اما روش‌های ارزیابی مواد مغذی به‌صورت مخرب و شیمیایی انجام می‌گیرد و بسیار هزینه‌بر هستند. استفاده از اطلاعات طیفی بازتابی از برگ درختان می‌تواند کمک کند تا به این اطلاعات دستیابی شود. بنابراین به‌منظور اطلاع از میزان عناصر مغذی کافی برای رشد محصولات، جلوگیری از هزینه‌های اضافی و اثرات منفی استفاده بی‌رویه نهاده‌های شیمیایی روی محیط‌زیست، ضروری است تا با استفاده از یک روش سریع و غیرمخرب میزان عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم بهینه برای درخت در طول دوره رشد ارزیابی شود. پژوهش حاضر با هدف تعیین میزان عناصر NPK برگ درخت سیب با استفاده تلفیق طیف‌سنجی NIR و روش‌های شیمی‌سنجی انجام شد.

مواد و روش‌ها

جمع‌آوری نمونه‌ها و طیف‌سنجی

در این مطالعه، ۸۰ نمونه برگ درخت سیب از میان درختان سیب رد چیف^۱، فوجی^۲ و گرنی اسمیت^۳ به‌صورت تصادفی از باغات آذربایجان غربی جمع‌آوری و طیف‌سنجی شدند. از یک طیف‌سنج آذر بایجان غربی Green-Wave (Stellar Net Inc., USA) با نسبت سیگنال به نویز ۴۰۰:۱، مجهز به آشکارساز حساس (۱۰۲۴ عنصر) و کاوشگر فیبر نوری برای طیف‌سنجی در طول موج ۳۵۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر استفاده شد. طیف‌گیری از نمونه‌ها در حالت برهم‌کنش^۴ انجام شد (شکل ۱). دستگاه طیف‌سنجی هر ۲۰ دقیقه یک بار توسط یک مرجع سفید از جنس سولفات باریم استاندارد کالیبره شد. داده‌ها توسط نرم‌افزار Spectra Wiz software جمع‌آوری شدند. از هر برگ سیب، ۱۰ ناحیه به‌صورت تصادفی انتخاب و طیف‌گیری شدند. طیف میانگین به‌عنوان بازتاب (R) برای تجزیه و تحلیل استفاده شد. در نهایت، تمام داده‌ها به جذب (Log1/R) تبدیل شدند.

5- Inductive Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry

6- Multiplicative Scatter Correction

7- Standard Normal variate

8- Moving Average

9- Savitzky-Golay

1- Red Chief

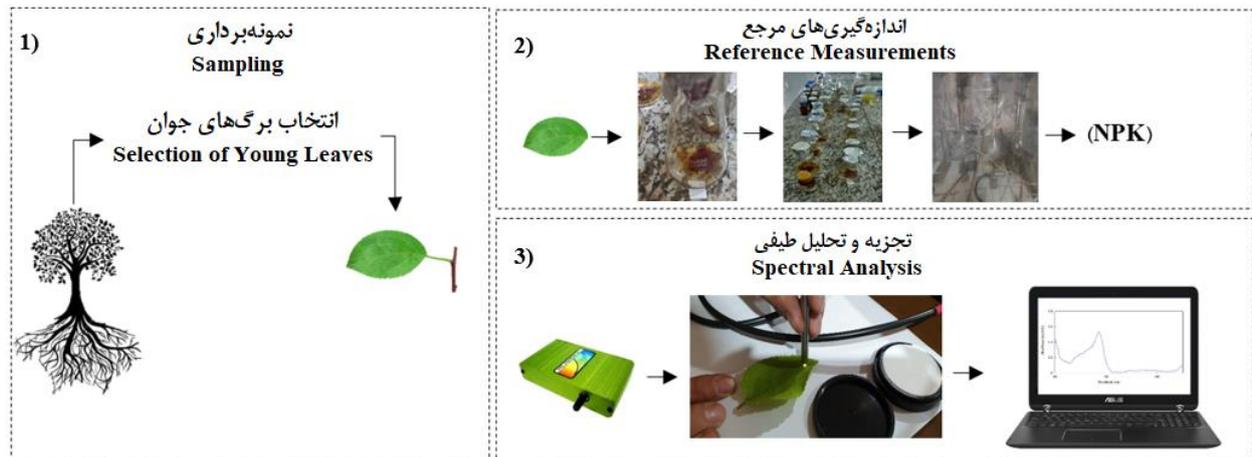
2- Fuji

3- Granny Smith

4- Interactance

پیش‌پردازش برای ارزیابی میزان نیتروژن برگ درخت سیب به صورت غیرمخرب بهره‌گیری شد. برای پیش‌پردازش و تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار Unscrambler X 14 (CAMO software, Norway) استفاده شد.

طیفی بهتری برخوردار است. اما مشتق‌گیری با درجه بالا همیشه مفید نیست چراکه با بالا رفتن درجه مشتق‌گیری نسبت سیگنال به نویز کاهش می‌یابد و اطلاعات طیفی از بین می‌روند، لذا معمولاً توصیه نمی‌شود از مشتق‌گیری با درجه ۲ به بالا استفاده شود (Jamshidi *et al.*, 2015). در این پژوهش از ترکیب روش‌های مختلف



شکل ۱- نحوه اندازه‌گیری عناصر NPK برگ‌های درخت سیب با استفاده از طیف‌سنجی مرئی/فروسرخ نزدیک
Fig.1. Workflow of measuring NPK nutrients in apple tree leaves using Vis/NIR spectroscopy

جدول ۱- داده‌های آماری مربوط به مقدار NPK نمونه‌های برگ

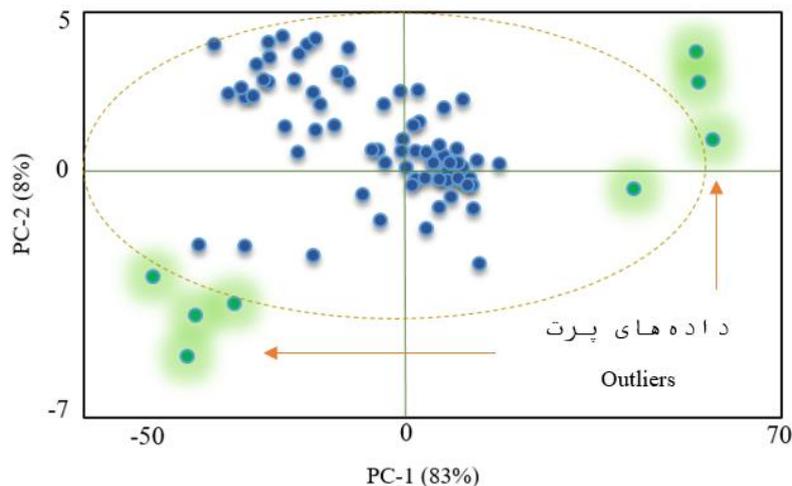
Table 1- Statistical data related to NPK value of leaf samples

	نمونه‌های اعتبارسنجی Validation samples				نمونه‌های واسنجی Calibration samples			
	انحراف معیار Standard deviation	میانگین Mean	حداکثر Max	حداقل Min	انحراف معیار Standard deviation	میانگین Mean	حداکثر Max	حداقل Min
نیتروژن Nitrogen (%)	0.254	1.03	1.43	0.66	0.212	0.89	1.5	0.54
فسفر Phosphorus (%)	0.034	0.086	0.133	0.022	0.027	0.08	0.14	0.026
پتاسیم Potassium (%)	0.147	0.45	0.73	0.22	0.12	0.53	0.79	0.203

روش‌ها سادگی، سرعت و عملکرد خوب آن است (Malegori *et al.*, 2017). از این رو، به منظور ایجاد ارتباط خطی بین داده‌های مرجع و طیف‌های اندازه‌گیری شده از روش PLS استفاده شد. طیف‌های اندازه‌گیری شده به عنوان متغیرهای مستقل (X) و داده‌های مرجع به عنوان متغیر وابسته (Y) برای ورودی مدل در نظر گرفته شدند. هم‌چنین از روش اعتبارسنجی متقابل برای ارزیابی مدل PLS استفاده شد. در این تحقیق ابتدا داده‌های پرت با استفاده از روش تجزیه مولفه‌های اصلی (PCA) مشخص و حذف شدند (شکل ۲). نمونه‌های باقی‌مانده (۷۲ نمونه) به صورت تصادفی به دو دسته واسنجی (۵۴ نمونه) و آزمون (۱۸ نمونه) به ترتیب برای توسعه مدل واسنجی و پیش‌بینی تقسیم شدند.

مدل‌سازی PLS

به منظور ایجاد ارتباط خطی بین ویژگی‌های کیفی اندازه‌گیری شده و داده‌های طیفی از روش مدل‌سازی رگرسیون چندمتغیره خطی حداقل مربعات جزئی (PLS) استفاده شد. حداقل مربعات جزئی به عنوان یک روش تحت نظارت خطی، برای ایجاد یک مدل پیش‌بینی برای اندازه‌گیری‌های کمی کاربرد دارد (Daszykowski, Kaczmarek, Vander Heyden, & Walczak, 2007; Kumar, Bansal, Sarma, & Rawal, 2014). همپوشانی، تداخل و حذف اطلاعات به طور چشمگیری با استفاده از مدل‌سازی PLS کاهش می‌یابد (Lafhal, Vanloot, Bombarda, Kister, & Dupuy, 2016). مزیت استفاده از این روش شیمی‌سنجی نسبت به سایر



شکل ۲- تشخیص داده‌های پرت با استفاده از روش تجزیه مولفه‌های اصلی

Fig.2. Detection of outlier data using PCA method

میزان عناصر NPK برحسب درصد به دست آمد. به این صورت که میزان N، P و K برحسب درصد در محدوده‌های ۱/۵-۰/۵۴، ۰/۱۴-۰/۲۶ و ۰/۷۹-۰/۲۰۳ برای دسته واسنجی و ۱/۴۳-۰/۶۶، ۰/۱۳۳-۰/۲۲ و ۰/۷۳-۰/۲۲ برای گروه آزمون بودند که بیانگر تنوع نمونه‌ها از نظر مقادیر را نشان می‌دهند.

تفسیر طیف‌ها

قبل از هرگونه تجزیه و تحلیل دو بخش از کل طیف به دست آمده، به منظور حذف نویز در محدوده ۳۴۰-۵۰۰ نانومتر و ۱۱۷۰-۱۰۰۰ نانومتر حذف شدند. طیف‌های خام اولیه نمونه‌های برگ درخت سیب در محدوده طیفی ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر در شکل ۳ نشان داده شده است. طیف‌های NIR به ترکیب‌های آلی تشکیل شده از پیوندهای مولکولی C-H، O-H و N-H که در آب، مواد جامد قابل حل و ساکاروز وجود دارد واکنش نشان می‌دهند. لذا تفسیر طیف‌ها به منظور مطالعه ساختاری براساس شناسایی اورتون‌ها و جذب‌های ترکیبی گروه‌های عاملی (C-H، O-H و N-H) انجام می‌شود.

مطابق با شکل ۳ یک پیک مربوط به کلروفیل a در محدوده ۵۹۰ نانومتر مشاهده می‌شود. همان‌طور که دیده می‌شود در اطراف طول موج ۶۸۰ نانومتر یک پیک قوی وجود دارد که مربوط به جذب کلروفیل نوع a است. در مطالعه‌ای که توسط (Rahi et al., 2020) انجام شد نشان داد که پیک‌های محدوده ۶۴۰ تا ۷۰۷ نانومتر مربوط به تغییرات جذب کلروفیل در کاهو بود. بعد از پیک ناحیه مرئی یک شیب تند کاهشی در جذب رخ می‌دهد که در مرحله بعد وارد طیف فرورسرخ نزدیک می‌شود. در ناحیه ۹۵۰ نانومتر نیز یک پیک نسبتاً ضعیفی دیده می‌شود که می‌تواند مربوط به کاهش گلوکز در این

ارزیابی مدل

مدل‌های توسعه داده شده با استفاده از ریشه میانگین مربعات خطای واسنجی^۱ (RMSEC)، ریشه میانگین مربعات خطای پیش‌بینی^۲ (RMSEP)، ضریب هم‌بستگی واسنجی^۳ (r_c) و ضریب هم‌بستگی پیش‌بینی^۴ (r_p) اعتبارسنجی شدند (Nicolai, Theron, & Lammertyn, 2007). همچنین، توانایی مدل PLS با مقادیر نسبت انحراف پیش‌بینی^۵ (RPD) سنجیده شد. مقدار RPD بر اساس نسبت انحراف معیار داده‌های آزمایشگاهی به خطای پیش‌بینی به دست می‌آید. اگر این مقدار بالای ۲/۵ به دست آید، نشان می‌دهد که مدل پیشنهاد شده عملکرد قابل قبولی دارد (Moncada, Martín, Escuredo, Fischer, & Míguez, 2013). لازم به ذکر است که ابتدا و انتهای محدوده طیفی به دلیل داشتن نویز حذف شد. از این‌رو، محدوده طیفی ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر برای مدل‌سازی در نظر گرفته شد.

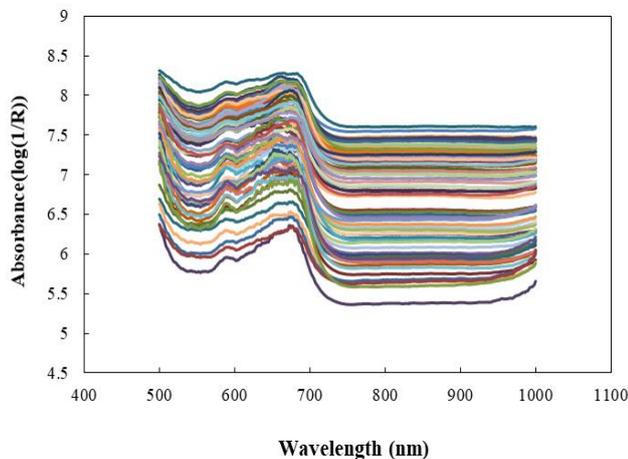
نتایج و بحث

داده‌های مرجع

جدول ۱ داده‌های آماری (حداقل، حداکثر، میانگین و انحراف معیار) مقادیر عناصر مغذی N، P و K را در دو دسته واسنجی و آزمون بعد از حذف داده‌های پرت نشان می‌دهد. مطابق با جدول ۱

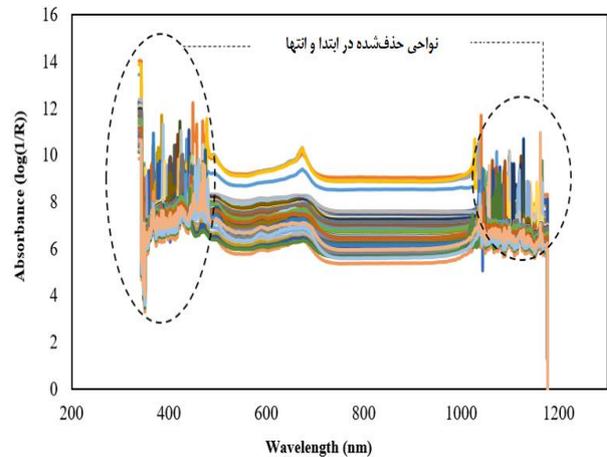
- 1- Root Mean Square Error of Calibration
- 2- Root Mean Square Error of Prediction
- 3- Correlation Coefficient of Calibration
- 4- Correlation Coefficient of Prediction
- 5- Residual Predictive Deviation

بیشتر ناشی از جذب آب و کربوهیدرات‌ها است (Chen, Zhang, Miao, & Asakura, 2010; Kawano, Watanabe, & Iwamoto, 1992) وجود این تغییرات در برگ‌های درختان سیب منجر به تغییرات در مقدار جذب نور می‌شود.



b (ب)

ناحیه باشد (Fernández-Navales, López, Sánchez, García, & Morales, 2008; Osborne, Fearn, & Hindle, 1993) در ناحیه فرسرخ نزدیک در اطراف طول موج ۹۹۰ نانومتر به بعد نیز یک افزایش تدریجی وجود دارد که این امر احتمالاً می‌تواند به دلیل وجود اورتون‌های دوم پیوند O-H و N-H باشد. در واقع این پیک



a (الف)

شکل ۳- طیف خام اولیه از نمونه‌های برگ درختان سیب، الف) قبل از حذف ابتدا و انتهای طیف‌ها و ب) بعد از حذف ابتدا و انتهای طیف‌ها
Fig.3. The initial raw spectra of apple tree leaf samples a) before and b) after removing the beginning and end of the spectra

با ترکیب روش‌های SNV و MSC با مشتق اول و دوم نتایج بهتری به دست آمد، به طوری که مدل PLS پیشنهادی توانست براساس روش پیش‌پردازش SNV+D2 با مقادیر $r_p=0.978$ و $RMSEP=0.034$ بهترین عملکرد را داشته باشد. مقادیر به دست آمده برای نسبت انحراف پیش‌بینی در این تحقیق بین $1.98 < RPD < 7.47$ بودند. همان‌طور که پیش‌بینی شد کمترین مقدار RPD برای داده‌های بدون پیش‌پردازش ($1/98$) به دست آمد. از طرف دیگر، بزرگترین RPD برای مدل PLS برپایه روش پیش‌پردازش SNV+D2 با مقدار $7/47$ به دست آمد که توانایی عالی این مدل ارائه شده برای ارزیابی میزان نیتروژن برگ درختان سیب را نشان می‌دهد.

مدل PLS برای ارزیابی مقدار فسفر

در جدول ۳ مقادیر r_p و $RMSEP$ برای داده‌های بدون پیش‌پردازش به ترتیب 0.18 درصد و 0.685 است. این مقادیر برای روش‌های پیش‌پردازش SNV به ترتیب 0.15 درصد و 0.712 و برای روش MSC به ترتیب 0.13 درصد و 0.783 به دست آمد که نسبت به داده‌های طیفی بدون پیش‌پردازش نتایج بهتری بود. مطابق با جدول ۳ مدل PLS بر پایه مشتق اول و دوم نتایج بهتری نسبت به روش‌های پیش‌پردازش SNV و MSC داشت. مدل PLS برپایه روش پیش‌پردازش D2 با $r_p=0.948$ عملکرد بهتری نسبت به D1 داشت.

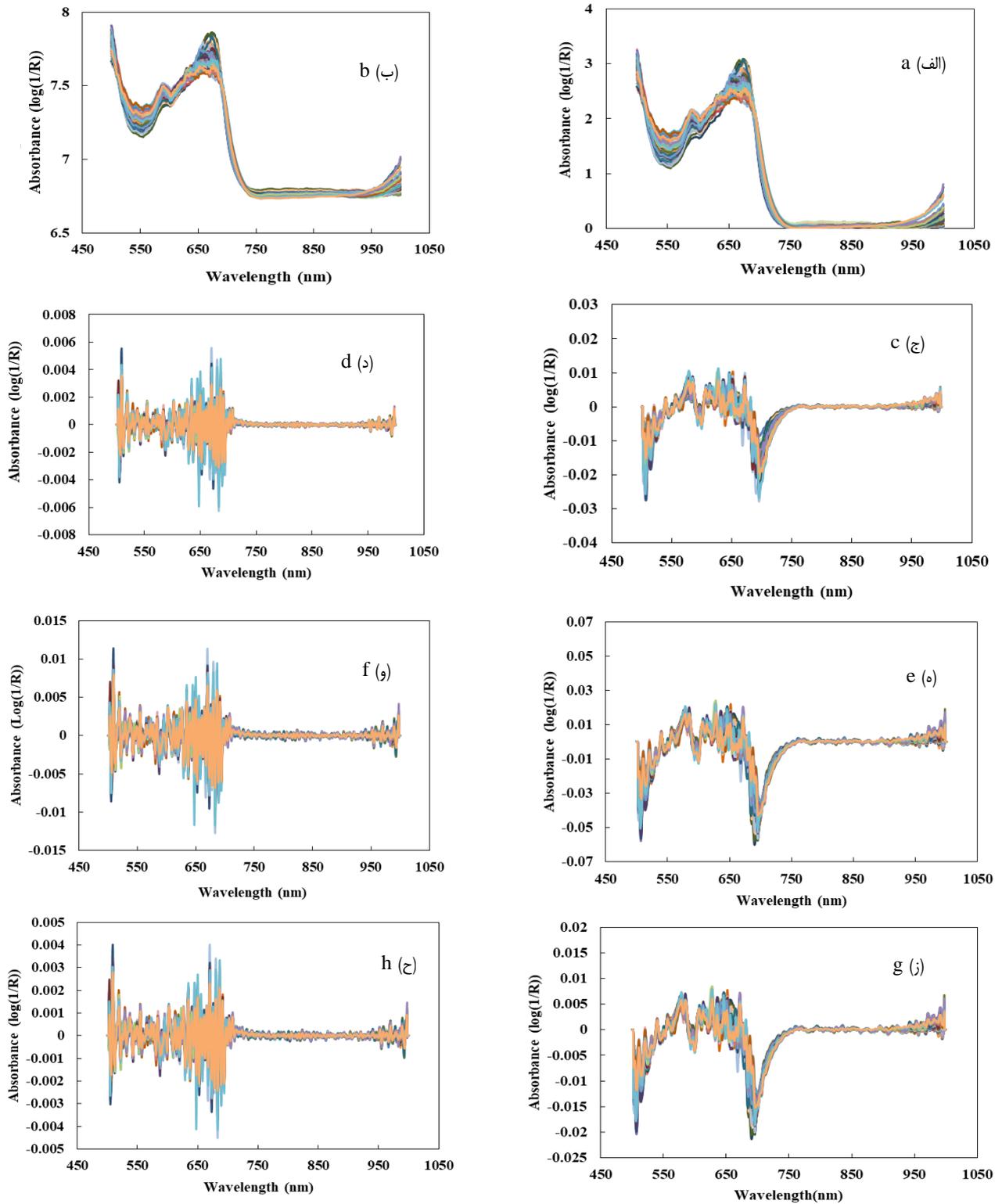
پیش‌پردازش طیف‌ها

طیف خام نمونه‌های برگ درخت سیب پس از پیش‌پردازش با ۸ روش مختلف شامل SNV، D1، D2، MSC، SNV+D1، SNV+D2، MSC+D1 و MSC+D2 در شکل ۴ نشان داده است. در ابتدا از دو روش پیش‌پردازش MSC و SNV برای حذف اثرات فیزیکی طیف‌ها استفاده شد. با استفاده از روش‌های پیش‌پردازش مشتق اول و دوم برپایه الگوریتم SG وضوح طیف‌ها تقویت شده و پیک‌های جذبی پهن و ضعیف در ناحیه طیفی $500-1000$ نانومتر نمایان شدند.

نتایج مدل‌سازی

مدل PLS برای ارزیابی مقدار نیتروژن

مطابق با جدول ۲ مقادیر r_p و $RMSEP$ برای داده‌های بدون پیش‌پردازش به ترتیب 0.128 درصد و 0.71 به دست آمد. با پیش‌پردازش داده‌های طیفی دقت مدل‌های پیش‌بینی افزایش پیدا کرد. مقادیر r_p برای روش‌های پیش‌پردازش SNV به ترتیب 0.101 و 0.795 و برای روش MSC به ترتیب 0.076 و 0.89 به دست آمد که نسبت به داده‌های طیفی بدون پیش‌پردازش افزایش چشمگیری داشت. با توجه به جدول ۲ نتایج پیش‌بینی مدل PLS بر پایه مشتق اول و دوم نشان داد که مقادیر r_p و $RMSEP$ حاصل از مشتق اول و دوم به ترتیب کمتر و بیشتر از روش‌های SNV و MSC بود. در نهایت



شکل ۴- طیف‌های جذبی NIR برگ‌های درخت سیب پردازش شده با روش‌های مختلف پیش‌پردازش (الف) SNV، (ب) MSC، (ج) D1، (د) D2، (ه) SNV+D1، (و) SNV+D2، (ز) MSC+D1، (ح) MSC+D2

Fig.4. The NIR absorption spectra of apple tree leaves using different pre-processing methods: a) SNV, b) MSC, c) D1, d) D2, e) SNV+D1, f) SNV+D2, g) MSC+D1, and h) MSC+D2

جدول ۲- نتایج واسنجی و پیش‌بینی مدل‌های PLS بر پایه ترکیب روش‌های مختلف پیش‌پردازش برای ارزیابی نیتروژن

Table 2- The results of calibration and prediction of PLS models based on the combination of different pre-processing methods for nitrogen estimation

پیش‌پردازش Pre-processing	مولفه‌های اصلی LVs	ریشه میانگین مربعات خطا واسنجی RMSEC (%)	ضریب هم‌بستگی واسنجی r _c	ریشه میانگین مربعات خطا پیش‌بینی RMSEP (%)	ضریب هم‌بستگی پیش‌بینی r _p	نسبت انحراف پیش‌بینی RPD
With no pre-processing	14	0.106	0.808	0.128	0.710	1.98
SNV	11	0.082	0.878	0.101	0.795	2.51
MSC	12	0.060	0.933	0.076	0.890	3.34
D1	10	0.045	0.962	0.064	0.926	3.91
D2	11	0.028	0.986	0.037	0.974	6.86
SNV+D1	9	0.030	0.983	0.041	0.972	6.2
SNV+D2	6	0.028	0.988	0.034	0.978	7.47
MSC+D1	10	0.032	0.983	0.044	0.970	3.4
MSC+D2	8	0.035	0.976	0.046	0.967	5.7

این تحقیق برای پیش‌بینی فسفر بین $1.87 < RPD < 5.96$ به‌دست آمد. کمترین مقدار RPD برای داده‌های بدون پیش‌پردازش (۱/۸۷) به‌دست آمد. بزرگ‌ترین مقدار RPD نیز برای مدل PLS بر پایه روش پیش‌پردازش MSC+D2 با مقدار ۵/۹۶ به‌دست آمد که توانایی عالی این مدل تدوین شده برای ارزیابی میزان فسفر برگ درختان سیب را نشان می‌دهد.

مدل‌های خطی پیشنهاد شده با ترکیب روش‌های پیش‌پردازشی SNV و MSC با مشتق اول و دوم نتایج قابل‌قبولی داشت. دو مدل PLS ارائه شده بر اساس روش‌های پیش‌پردازش MSC+D2 و SNV+D2 نسبت به سایر مدل‌ها نتایج بهتری داشتند به طوری که با مقایسه مقادیر RPD مشخص شد که روش MSC+D2 با مقدار $RPD=5/96$ بهترین عملکرد را دارد. مقادیر به‌دست آمده RPD در

جدول ۳- نتایج واسنجی و پیش‌بینی مدل‌های PLS بر پایه ترکیب روش‌های مختلف پیش‌پردازش برای ارزیابی فسفر

Table 3- The results of calibration and prediction of PLS models based on the combination of different pre-processing methods for phosphorus estimation

پیش‌پردازش Pre-processing	مولفه‌های اصلی LVs	ریشه میانگین مربعات خطا واسنجی RMSEC (%)	ضریب هم‌بستگی واسنجی r _c	ریشه میانگین مربعات خطا پیش‌بینی RMSEP (%)	ضریب هم‌بستگی پیش‌بینی r _p	نسبت انحراف پیش‌بینی RPD
With no pre-processing	15	0.013	0.774	0.018	0.685	1.87
SNV	13	0.012	0.821	0.015	0.712	2.24
MSC	11	0.010	0.862	0.013	0.783	2.83
D1	10	0.0074	0.919	0.0081	0.886	4.23
D2	12	0.0057	0.959	0.0064	0.948	5.36
SNV+D1	9	0.0055	0.962	0.0072	0.937	4.77
SNV+D2	10	0.0061	0.972	0.0069	0.961	4.93
MSC+D1	11	0.0050	0.961	0.0070	0.935	4.86
MSC+D2	9	0.0051	0.967	0.0057	0.958	5.96

روش پیش‌پردازش اشاره شده نزدیک به یکدیگر بود اما با مقایسه مقادیر RPD مشخص شد که مدل PLS بر پایه MSC عملکرد بهتری داشت. مقدار عددی RPD برای مدل PLS بر پایه D2 بالای ۶ به‌دست آمد که توانایی عالی این مدل را برای ارزیابی میزان پتاسیم نشان داد. بالعکس مدل مقدار RPD به‌دست آمده برای مدل ارائه شده خطی بر پایه D1 نشان داد که این مدل برای ارزیابی میزان پتاسیم

مدل PLS برای ارزیابی مقدار پتاسیم

مطابق با جدول ۴ مقادیر RMSEP و r_p برای مدل PLS بر پایه داده‌های بدون پیش‌پردازش به ترتیب ۰/۰۶۳ درصد و ۰/۷۴۶ به‌دست آمد. مقادیر RMSEP و r_p برای مدل PLS بر اساس دو روش پیش‌پردازش SNV و MSC به ترتیب ۰/۰۶۱ درصد و ۰/۷۶۸ و ۰/۰۵۸ درصد و ۰/۷۹۴ به‌دست آمد. با توجه به این که مقادیر r_p دو

این پژوهش بین $7.10 < RPD < 2.19$ بود. همان طور که اشاره شد کمترین مقدار RPD برای مدل PLS بر پایه مشتق اول به دست آمد. از سوی دیگر، بزرگترین RPD برای مدل PLS بر پایه روش پیش پردازش MSC+D2 با مقدار $7/10$ به دست آمد.

برگ درخت سیب مناسب نیست. مدل PLS پیشنهادی توانست براساس روش پیش پردازش MSC+D2 با مقادیر $RMSEP=0/021$ و $r_p=0/976$ بهترین عملکرد را در بین روش های پیش پردازشی برای ارزیابی میزان پتاسیم داشته باشد. مقادیر RPD به دست آمده برای ارزیابی میزان پتاسیم در

جدول ۴- نتایج واسنجی و پیش بینی مدل های PLS بر پایه ترکیب روش های مختلف پیش پردازش برای ارزیابی پتاسیم

Table 4- The results of calibration and prediction of PLS models based on the combination of different pre-processing methods for potassium estimation

پیش پردازش Pre-processing	مولفه های اصلی LVs	ریشه میانگین مربعات خطا واسنجی RMSEC (%)	ضریب هم بستگی واسنجی r_c	ریشه میانگین مربعات خطا پیش بینی RMSEP (%)	ضریب هم بستگی پیش بینی r_p	نسبت انحراف پیش بینی RPD
With no pre-processing	15	0.054	0.827	0.063	0.746	2.27
SNV	12	0.043	0.856	0.061	0.768	2.41
MSC	10	0.046	0.867	0.058	0.794	2.53
D1	12	0.053	0.837	0.067	0.751	2.19
D2	11	0.024	0.974	0.029	0.965	6.01
SNV+D1	11	0.022	0.970	0.028	0.951	5.25
SNV+D2	10	0.019	0.981	0.024	0.972	6.17
MSC+D1	10	0.022	0.972	0.027	0.954	5.44
MSC+D2	11	0.017	0.984	0.021	0.976	7.10

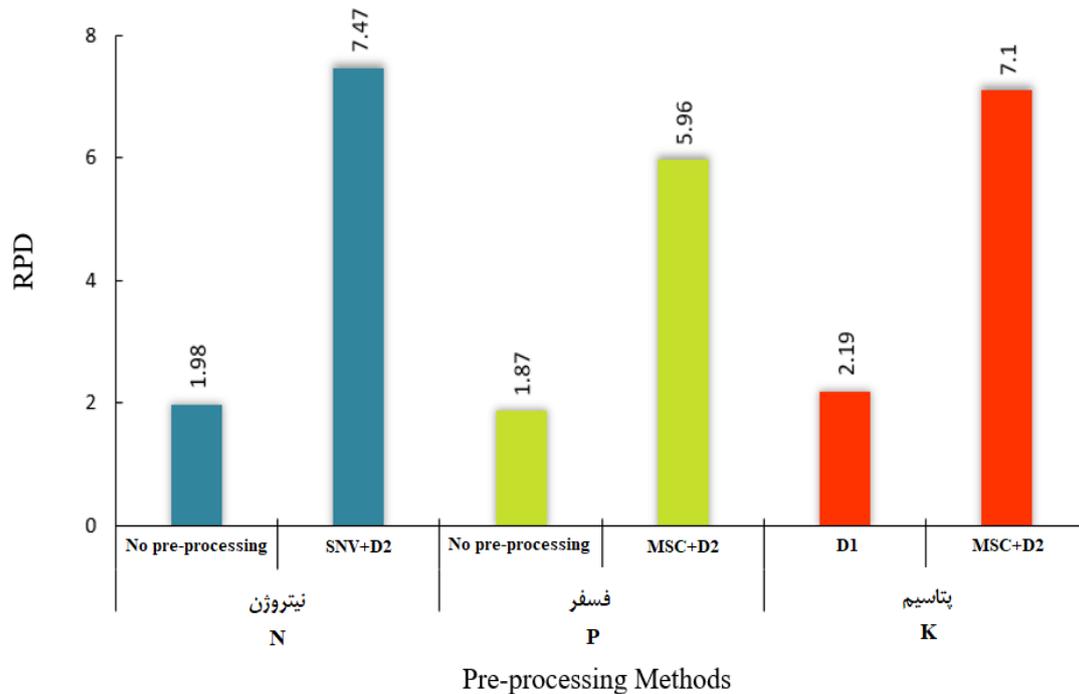
NPK برگ درختان سیب بهتر از نتایج پژوهشی است که به منظور ارزیابی میزان عناصر NPK برگ های نیشکر توسط مدل PLS انجام شد (Wang et al., 2019). در مطالعه ای دیگر، (Menesatti et al., 2010) میزان عناصر مغذی برگ درختان پرتقال را به صورت غیرمخرب با تلفیق طیف سنجی و روش های شیمی سنجی تشخیص دادند. نتایج حاصل از مدل سازی نشان داد که مدل ارائه شده توسط آن ها توانست میزان عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم را به ترتیب با $0/82$ ، $0/18$ و $0/98$ پیش بینی نماید. همچنین، محققان در تحقیقی با استفاده از طیف های بازتابی از گیاهان مرتع و داده های حاصل از تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی، میزان عناصر NPK در این گیاهان را ارزیابی کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که مدل ارائه شده توسط آن ها قادر بود میزان نیتروژن، فسفر و پتاسیم را به ترتیب با $0/85$ ، $0/43$ و $0/84$ پیش بینی نماید (Özyigit & Bilgen, 2013). با مقایسه نتایج مشخص شد که مدل PLS ارائه شده در این پژوهش نتایج بهتری نسبت به مطالعات محققین دیگر داشت و توانست میزان عناصر مغذی NPK را با دقت بیشتری پیش بینی کند. علاوه بر این، دقت پایین پیش بینی میزان عنصر فسفر در تحقیقات اشاره شده، کم بودن میزان غلظت فسفر در برگ گزارش شده است. از این رو، توجه به زمان نمونه برداری از اهمیت بالایی در بحث مدل سازی محسوب می شود. نمونه برداری در زمان مناسب طول دوره رشد و استفاده از برگ های تازه و جوان برای ارزیابی می تواند در پیش بینی میزان

شکل ۵ مقادیر مربوط به پارامتر RPD برای مدل های PLS ارائه شده را نشان می دهد. با مقایسه مقادیر RPD برای هر سه عنصر مشخص شد که مدل PLS مبتنی بر روش پیش پردازش SNV+D2 برای ارزیابی نیتروژن بهترین عملکرد را در بین سایر مدل ها داشت. همچنین مدل ارائه شده بر پایه داده های بدون پیش پردازش برای ارزیابی فسفر با کمترین مقدار RPD نشان داد که این مدل برای ارزیابی میزان فسفر برگ درختان سیب مناسب نیست. همچنین نتایج به دست آمده نشان دادند که مدل ارائه شده بر پایه روش MSC+D2 که برای ارزیابی میزان فسفر و پتاسیم برگ درختان سیب ارائه شده بود به ترتیب با داشتن مقادیر $RPD=5/96$ و $RPD=7/1$ عملکرد عالی داشتند.

با مقایسه نتایج به دست آمده مشخص شد که در بین مدل های PLS ارائه شده برای ارزیابی میزان عناصر NPK برگ درختان سیب، مدل PLS بر پایه روش های پیش پردازش SNV+D2 و MSC+D2 که به ترتیب برای ارزیابی میزان نیتروژن و پتاسیم ارائه شدند نسبت به سایر مدل ها بهترین عملکرد را داشتند. شکل ۶ نتایج پیش بینی میزان عناصر N، K و P برحسب بهترین مدل رگرسیون توسعه داده شده را نشان می دهد. نتایج پیش بینی میزان عنصر نیتروژن نسبت به دو عنصر فسفر و پتاسیم بهتر بود. این امر می تواند به دلیل غلظت بالای عنصر نیتروژن نسبت به دو عنصر دیگر در سطح برگ باشد. نتایج به دست آمده از این پژوهش در پیش بینی میزان عناصر

میزان عناصر مغذی را پیش‌بینی کند و مصرف نهاده‌های شیمیایی به‌صورت دقیق و صحیح مدیریت شود.

عناصر تاثیرگذار باشد. با مشاهده نتایج به‌دست‌آمده می‌توان به این نتیجه رسید که روش غیرمخرب ارائه‌شده می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش‌های مخرب و زمانبر شیمیایی و آزمایشگاهی باشد و در کمترین زمان



شکل ۵- مقایسه مقدار RPD مدل‌های ارائه‌شده برای ارزیابی میزان عناصر NPK برگ درختان سیب

Fig.5. Comparison of the RPD value of the presented models to estimate the amount of NPK nutrients in the leaves of apple trees

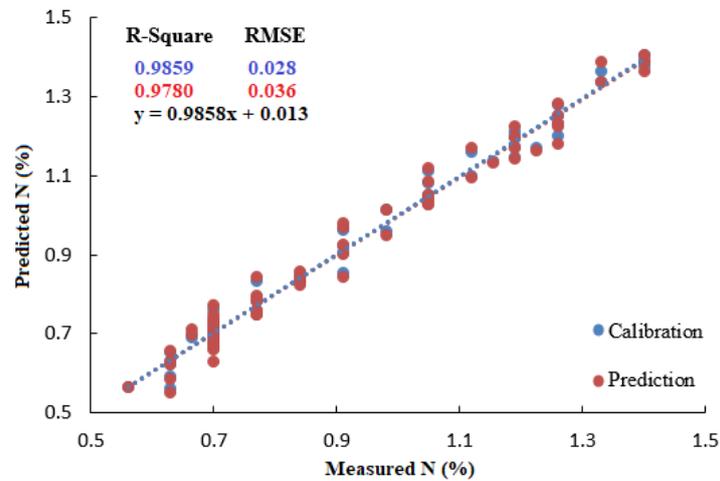
برای نیتروژن بین ۷/۴۷-۱/۹۸، برای فسفر ۵/۹۶-۱/۸۷ و برای پتاسیم ۷/۱-۲/۱۹ به‌دست آمد.

در سال‌های اخیر طیف‌سنجی میدانی به‌دلیل استفاده آسان و سریع، قابلیت حمل و ارزان بودن، نظر پژوهشگران زیادی را به خود جلب کرده است. لذا پیاده‌سازی یک سامانه قابل حمل به‌منظور ارزیابی میزان عناصر مغذی باغات می‌تواند به‌طور چشمگیری از هدر رفتن زمان و هزینه‌های بالای آزمایشگاهی جلوگیری کند و با مدیریت صحیح و کنترل به‌موقع، عملکرد باغات را افزایش دهد. بنابراین با توجه به توانایی تکنیک طیف‌سنجی Vis/NIR و مطابق با نتایج به‌دست‌آمده می‌توان از این روش برای پیاده‌سازی یک سامانه قابل حمل مزرعه‌ای مبتنی بر طیف‌سنجی Vis/NIR به‌منظور ارزیابی عناصر مغذی موردنیاز درختان سیب در باغات استفاده کرد و عملکرد باغات را افزایش داد.

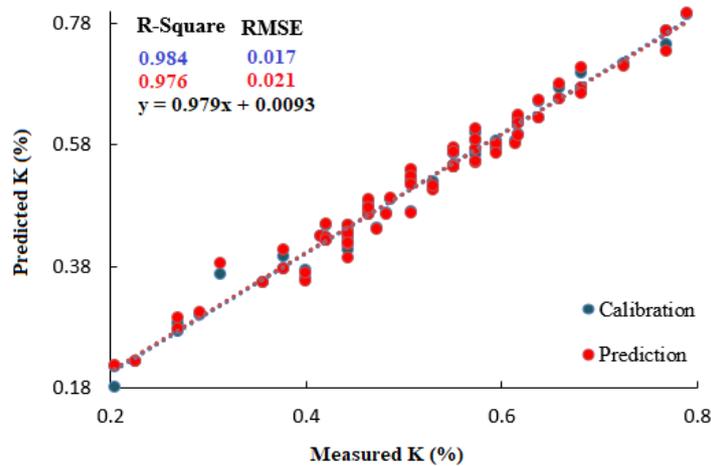
نتیجه‌گیری

طیف‌سنجی Vis/NIR به‌عنوان یک روش سریع، غیر شیمیایی و غیرمخرب به‌صورت گسترده‌ای به‌منظور کیفیت‌سنجی محصولات کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که تلفیق طیف‌سنجی و روش‌های شیمی‌سنجی می‌تواند به‌عنوان یک روش غیرمخرب و دقیق برای ارزیابی میزان عناصر NPK محصولات کشاورزی استفاده شود. اعتبارسنجی مدل‌های توسعه‌یافته بر پایه ترکیب انواع روش‌های پیش‌پردازش طیفی نمایان‌گر این بود که این روش‌ها بر نتایج پیش‌بینی اثر مستقیم دارند. نتایج تجزیه و تحلیل کمی نشان داد که در بین مدل‌های توسعه‌یافته بهترین مدل پیش‌بینی مربوط به مدل PLS ارائه‌شده بر پایه روش پیش‌پردازش طیفی SNV+D2 برای ارزیابی میزان نیتروژن بود. ($RMSEP=0.034$, $r_p=0.978$, $RMSEC=0.028$, $r_c=0.988$)

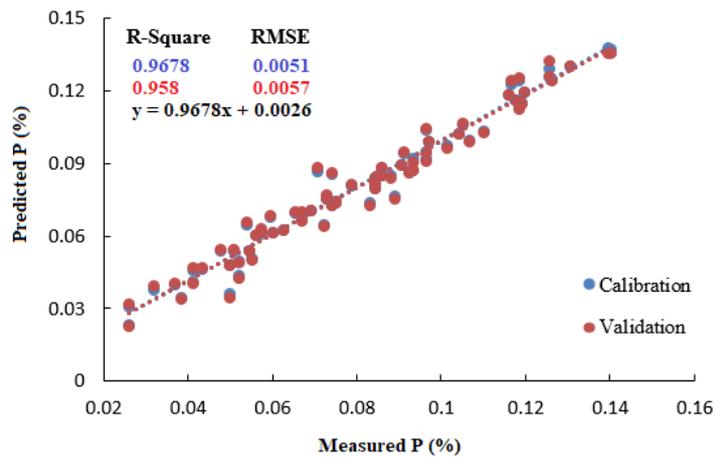
هم‌چنین مقادیر پارامتر RPD نشان‌دهنده عملکرد عالی مدل‌های ارائه‌شده برای پیش‌بینی عناصر تغذیه‌ای NPK بود. مقادیر این پارامتر



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۶- نتایج پیش‌بینی مدل PLS برای ارزیابی میزان الف) نیتروژن با روش SNV+D2، ب) پتاسیم با روش MSC+D2 و ج) فسفر با روش MSC+D2

Fig.6. Prediction results of the PLS model to estimate the amount of a) nitrogen using the SNV+D2 method, b) potassium using the MSC+D2 method, and c) phosphorous using the MSC+D2 method

References

1. Abasi, S., Minaei, S., Jamshidi, B., Fathi, D., & Khoshtaghaza, M. H. (2019). Rapid measurement of apple quality parameters using wavelet de-noising transform with Vis/NIR analysis. *Scientia Horticulturae*, 252, 7-13. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.02.085>
2. Amiratul, D. A., Farrah, M. M., Paing, T., Daljit, S., Karam, S., & Martini, M. Y. (2017). Nitrogen effects on growth and spectral characteristics of immature and mature oil palms. *Asian Journal of Plant Sciences*, 16(4), 200-210. <https://doi.org/10.3923/ajps.2017.200.210>
3. Butz, P., Hofmann, C., & Tauscher, B. (2005). Recent developments in noninvasive techniques for fresh fruit and vegetable internal quality analysis. *Journal of Food Science*, 70(9), R131-R141. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.tb08328.x>
4. Chen, J. Y., Zhang, H., Miao, Y., & Asakura, M. (2010). Nondestructive determination of sugar content in potato tubers using visible and near infrared spectroscopy. *Japan Journal of Food Engineering*, 11(1), 59-64. <https://doi.org/10.11301/jsfe.11.59>
5. Daszykowski, M., Kaczmarek, K., Vander Heyden, Y., & Walczak, B. (2007). Robust statistics in data analysis—A review: Basic concepts. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 85(2), 203-219. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2006.06.016>
6. Embleton, T. W., Jones, W. W., Labanauskas, C. K., & Reuther, W. A. L. T. E. R. (1973). Leaf analysis as a diagnostic tool and guide to fertilization. *The Citrus Industry*, 3(6), 183-210.
7. Erel, R., Dag, A., Ben-Gal, A., Schwartz, A., & Yermiyahu, U. (2008). Flowering and fruit set of olive trees in response to nitrogen, phosphorus, and potassium. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 133(5), 639-647. <https://doi.org/10.21273/JASHS.133.5.639>
8. Farhadi, R., Afkari-Sayyah, A. H., Jamshidi, B., & Gorji, A. M. (2020). Prediction of internal compositions change in potato during storage using visible/near-infrared (Vis/NIR) spectroscopy. *International Journal of Food Engineering*, 16(4). <https://doi.org/10.1515/ijfe-2019-0110>
9. Fernández-Navales, J., López, M. I., Sánchez, M. T., García, J. A., & Morales, J. (2008). A feasibility study on the use of a miniature fiber optic NIR spectrometer for the prediction of volumic mass and reducing sugars in white wine fermentations. *Journal of Food Engineering*, 89(3), 325-329. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.05.011>
10. 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(1), 29-35.
11. Jamshidi, B., & Yazdanfar, N. (2022). Development of a spectroscopic approach for non-destructive and rapid screening of cucumbers based on maximum limit of nitrate accumulation. *Journal of Food Composition and Analysis*, 110, 104513. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104513>
12. Jamshidi, B., Mohajerani, E., Jamshidi, J., Minaei, S., & Sharifi, A. (2015). Non-destructive detection of pesticide residues in cucumber using visible/near-infrared spectroscopy. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 32(6), 857-863. <https://doi.org/10.1080/19440049.2015.1031192>
13. Kawano, S., Watanabe, H., & Iwamoto, M. (1992). Determination of sugar content in intact peaches by near infrared spectroscopy with fiber optics in interreflectance mode. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 61(2), 445-451. <https://doi.org/10.2503/jjshs.61.445>
14. Kumar, N., Bansal, A., Sarma, G. S., & Rawal, R. K. (2014). Chemometrics tools used in analytical chemistry: An overview. *Talanta*, 123, 186-199. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2014.02.003>
15. Lafhal, S., Vanlout, P., Bombarda, I., Kister, J., & Dupuy, N. (2016). Chemometric analysis of French lavender and lavandin essential oils by near infrared spectroscopy. *Industrial Crops and Products*, 80, 156-164. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.11.017>
16. Malegori, C., Marques, E. J. N., de Freitas, S. T., Pimentel, M. F., Pasquini, C., & Casiraghi, E. (2017). Comparing the analytical performances of Micro-NIR and FT-NIR spectrometers in the evaluation of acerola fruit quality, using PLS and SVM regression algorithms. *Talanta*, 165, 112-116. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2016.12.035>
17. Menesatti, P., Antonucci, F., Pallottino, F., Rocuzzo, G., Allegra, M., Stagno, F., & Intrigliolo, F. (2010). Estimation of plant nutritional status by Vis-NIR spectrophotometric analysis on orange leaves [*Citrus sinensis* (L.) Osbeck cv Tarocco]. *Biosystems Engineering*, 105(4), 448-454. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.01.003>
18. Miles, N. (2010). Challenges and opportunities in leaf nutrient data interpretation. In *Proceedings of The South African Sugar Technologists' Association*, 83, 205-215.
19. Mobasheri, M. R., & Rahimzadegan, M. (2012). Introduction to protein absorption lines index for relative assessment of green leaves protein content using EO-1 Hyperion datasets.
20. Moncada, G. W., Martín, M. I. G., Escuredo, O., Fischer, S., & Míguez, M. (2013). Multivariate calibration by near infrared spectroscopy for the determination of the vitamin E and the antioxidant properties of quinoa. *Talanta*, 116, 65-70. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2013.04.079>

21. Nicolai, B. M., Theron, K. I., & Lammertyn, J. (2007). Kernel PLS regression on wavelet transformed NIR spectra for prediction of sugar content of apple. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 85(2), 243-252. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2006.07.001>
22. Osborne, B. G., Fearn, T., & Hindle, P. H. (1993). *Practical NIR spectroscopy with applications in food and beverage analysis*. Longman scientific and technical.
23. Özyiğit, Y. A. Ş. A. R., & Bilgen, M. E. H. M. E. T. (2013). Use of spectral reflectance values for determining nitrogen, phosphorus, and potassium contents of rangeland plants. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 15(7), 1537-1545.
24. Rady, A. M., & Guyer, D. E. (2015). Evaluation of sugar content in potatoes using NIR reflectance and wavelength selection techniques. *Postharvest Biology and Technology*, 103, 17-26. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.02.012>
25. Rahi, S., Mobli, H., Jamshidi, B., Azizi, A., & Sharifi, M. (2020). Different supervised and unsupervised classification approaches based on visible/near infrared spectral analysis for discrimination of microbial contaminated lettuce samples: Case study on E. coli ATCC. *Infrared Physics & Technology*, 108, 103355. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2020.103355>
26. Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015). *Plant physiology and development* (No. Ed. 6). Sinauer Associates Incorporated.
27. Tamburini, E., Ferrari, G., Marchetti, M. G., Pedrini, P., & Ferro, S. (2015). Development of FT-NIR models for the simultaneous estimation of chlorophyll and nitrogen content in fresh apple (*Malus domestica*) leaves. *Sensors*, 15(2), 2662-2679. <https://doi.org/10.3390/s150202662>
28. Wang, C., Li, X., Wang, L., Yang, C., Chen, X., Li, M., & Ma, S. (2019). Prediction of N, P, and K Contents in Sugarcane Leaves by VIS-NIR Spectroscopy and Modeling of NPK Interaction Effects. *Transactions of the ASABE*, 62(6), 1427-1433.

Research Article

Vol. 14, No. 2, 2024, p. 135-146

Performance Evaluation of the UAV Sprayer in Controlling *Brevicoryne Brassicae* L. Pest in Canola

N. Bagheri^{1*}, M. Safari², A. Sheikhi Garjan³

1- Associate Professor, Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

2- Assistant Professor, Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

3- Associate Professor, Iranian Institute of Plant Protection, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

(* - Corresponding Author Email: n.bagheri@areeo.ac.ir)

Received: 26 October 2022

Revised: 11 December 2022

Accepted: 24 December 2022

Available Online: 24 December 2022

How to cite this article:

Bagheri, N., Safari, M., & Sheikhi Garjan, A. (2024). Performance Evaluation of the UAV Sprayer in Controlling *Brevicoryne Brassicae* L. Pest in Canola. *Journal of Agricultural Machinery*, 14(2), 135-146. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2022.79329.1129>

Introduction

About 30% of the annual losses of agricultural products are caused by pests, diseases, and weeds. Spraying is currently the most common method of their control. At present, various manual and tractor-mounted sprayers are used for spraying. Manual spraying has very low work efficiency and is damaging as the spray might be applied irregularly and consumed by the labor or the product at poisonous levels. Tractor-mounted sprayers are more efficient than manual sprayers and require less labor. However, their use is associated with issues such as compacting the soil or crushing the product. In recent years, Unmanned Aerial Vehicle (UAV) sprayers have been used to spray farms and orchards. UAV spraying can increase the spraying efficiency by more than 60% and reduce the volume of spray used by 20-30%. Based on the capabilities of the UAV sprayer and the limitations of other current spraying methods, the purpose of this research is to evaluate the performance of the UAV sprayer in controlling *Brevicoryne brassicae* (L.) and compare the results with a turbo liner sprayer.

Materials and Methods

In the present research, the UAV sprayer is studied as a new method of spraying to fight *Brevicoryne brassicae* (L.). The results were technically and economically evaluated and compared with the control group and that of the turbo liner sprayer (the conventional method of spraying canola in Iran). The experiment was triplicated with a completely randomized design and three treatments of UAV sprayer, turbo liner sprayer, and control (no spraying). Field tests were conducted on the canola crop at the stemming stage where at least 20% of the plants were infected. The measured parameters included drift, spraying quality, field capacity, field efficiency, energy consumption, and spraying efficiency.

Results and Discussion

Based on the results, the spray volume consumed by UAV and turbo liner sprayers was equal to 11.1 and 187.6 liters per hectare, respectively. The particle drift in spraying with UAV sprayer and turbo liner sprayer were 53.3% and 80%, respectively. Moreover, the quality coefficient of UAV and turbo liner sprayers were 1.15 and 1.21, respectively. Therefore, the farm efficiency of the UAV sprayer and turbo liner sprayer was equal to 51.4% and 32.3%, respectively. Based on the results of the analysis of variance, immediately after spraying, there was no statistically significant difference between the average density of pests of the three treatments. However, three, seven, and 14 days after spraying, there was a significant difference between the control



©2022 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jam.2022.79329.1129>

treatment and the spraying treatments. The density of pests in the plots sprayed with UAV and turbo liner sprayers was lowered to less than 100 pests per stem, whereas in the control treatment, the density varied between 250-700 pests per stem. A comparison of the average efficiency of the UAV sprayer and turbo liner sprayer with the t-test showed that both sprayers had managed to control the population of pests and 14 days after the spraying, the efficiency of the UAV sprayer was higher than that of the turbo liner sprayer.

Conclusion

- The spray volume consumed by the turbo liner sprayer was 17 times the UAV sprayer.
- The spray drift was about 34% more in spraying with the turbo liner sprayer than the UAV sprayer.
- The field efficiency of the UAV sprayer was 59.1% more than the turbo liner sprayer.
- The energy consumption per hectare of the turbo liner sprayer was 7 times the energy consumption of the UAV sprayer.
- UAV sprayer's efficiency reached 92.7 % 14 days after spraying.
- UAV sprayer is recommended for controlling *Brevicoryne brassicae* (L.) due to its high efficiency, low drift, low spray volume and energy consumption, and superior spraying quality.
- To improve the performance of the UAV sprayer for controlling *Brevicoryne brassicae* (L.), a flight height of 1-1.5 meters from the top of the crop, a flight speed of less than 7 m s^{-1} , and a maximum spraying speed of 4 m s^{-1} are recommended. Additionally, it is possible to prevent the spread of the pest in the stemming stage by spraying the field in an earlier stage.

Keywords: Canola, Efficiency evaluation, Intelligent agriculture, Unmanned aerial sprayer

مقاله پژوهشی

جلد ۱۴، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۳، ص ۱۴۶-۱۳۵

ارزیابی عملکرد پهپادسمپاش در کنترل شته کلزا

نیکروز باقری^{۱*}، محمود صفری^۲، عزیز شیخی گرجان^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۰۳

چکیده

در پژوهش حاضر پهپادسمپاش به‌عنوان یک روش نوین سمپاشی برای کنترل جمعیت آفت شته کلزا ارزیابی و نتایج آن با سمپاش توربولاینر مقایسه شد. آزمون در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار اجرا شد. آزمون‌ها در زمان آلودگی حداقل ۲۰ درصد از بوته‌ها اجرا شد. پارامترهای اندازه‌گیری شده شامل مقدار ضریب کیفیت پاشش، ظرفیت مزرعه‌ای تئوری و مؤثر، بازده مزرعه‌ای، انرژی مصرفی و کارایی (اثربخشی) سمپاشی بودند. براساس نتایج برای پهپادسمپاش و سمپاش توربولاینر، به‌ترتیب میانگین مقدار محلول سم مصرفی برابر با ۱۱/۱ و ۱۸۷/۶ لیتر در هکتار، ضریب کیفیت پاشش ۱/۱۵ و ۱/۲۱، بازده مزرعه‌ای ۵۱/۴ و ۳۲/۳ درصد و انرژی مصرفی ۳/۴ و ۱۰۰/۵ کیلووات-ساعت به‌دست آمد. براساس نتایج تجزیه واریانس در سه، هفت و ۱۴ روز پس از سمپاشی، بین تیمار شاهد و تیمارهای پهپادسمپاش و سمپاش توربولاینر از نظر تعداد شته اختلاف معنی‌دار بود؛ به‌طوری‌که تعداد شته در کرت‌های سمپاشی شده با هر دو نوع سمپاش در سه بار نمونه‌برداری پس از سمپاشی کمتر از ۱۰۰ شته در ساقه بود. اما در تیمار شاهد تعداد شته در ساقه ۷۰۰-۲۵۰ بود. مقایسه میانگین کارایی پهپادسمپاش و سمپاش توربولاینر با آزمون t نشان داد که هر دو سمپاش نتایج قابل‌قبولی در کنترل جمعیت شته کلزا داشتند. در سه و هفت روز پس از سمپاشی، سمپاش توربولاینر کارایی بیشتری نسبت به پهپادسمپاش داشت. اما در ۱۴ روز بعد از سمپاشی، کارایی پهپادسمپاش و سمپاش توربولاینر به‌ترتیب ۹۲/۷ و ۸۵/۲ درصد بود. استفاده از پهپادسمپاش با توجه به کاهش مقدار محلول مصرفی و انرژی مصرفی و افزایش بازده مزرعه‌ای، کیفیت پاشش و کارایی سمپاشی برای کنترل جمعیت شته کلزا توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی عملکرد، پهپادسمپاش، سمپاش توربولاینر، کشاورزی هوشمند، کلزا

مقدمه

آفت‌ها، بیماری‌های گیاهی و علف‌های هرز از مشکلات عمده تولید محصولات کشاورزی هستند. طبق آمار سازمان خواروبار جهانی، حدود ۳۰ درصد از تلفات سالانه محصولات کشاورزی در جهان، توسط این عوارض ایجاد می‌شود (Lan, Chen, & Fritz, 2017; Guo et al., 2019). سمپاشی همچنان مرسوم‌ترین روش کنترل آفت‌ها، بیماری‌های گیاهی و علف‌های هرز است (Lan & Chen, 2018). حدود ۴۰ درصد از عملکرد محصولات کشاورزی تحت تأثیر

سمپاشی نامناسب قرار می‌گیرد (Peshin, Bandal, Zhang, Wilson, & Dhawan, 2009). افزایش مداوم هزینه سموم شیمیایی و وابستگی بی‌سابقه به این سموم برای افزایش تولید، منجر به تهدید اقتصادی تولید می‌شود (Cheema, Mahmood, Latif, & Nasir, 2018).

در حال حاضر، از انواع سمپاش‌های دستی و پشت‌تراکتوری برای سمپاشی استفاده می‌شود. کاربرد سمپاشی دستی با مصرف زیاد سم، آسیب به کارور در اثر تماس با سم (Wang et al., 2019)، آسیب فیزیکی به محصول به‌علت ورود به مزرعه (Bagheri & Safari, 2020) و بازده کاری بسیار کم همراه است (Gong, Fan, & Peng, 2019). سمپاش‌های پشت‌تراکتوری کارایی بیشتری نسبت به سمپاش‌های دستی داشته و نیروی کارگری کمتری نیاز دارند، اما کاربرد آن‌ها مشکلاتی مانند فشردن خاک و له‌کردن محصول را به‌دنبال دارد (Gong et al., 2019). این سمپاش‌ها برای زمین‌های کوچک و برای محصول‌های زراعی با ارتفاع زیاد، کاربرد ندارند (Bagheri & Safari, 2020).

۱- دانشیار پژوهشی، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
۲- استادیار پژوهشی، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
۳- دانشیار پژوهشی، مؤسسه تحقیقات گیاهپزشکی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران
* - نویسنده مسئول: (Email: n.bagheri@areeo.ac.ir)

در مزرعه ذرت در مرحله تاولی^۳ و ارتفاع پرواز دو متر و سرعت پرواز دو متر در ثانیه را برای سمپاشی ذرت در مرحله خمیری^۴ توصیه کردند. یانلیانگ و همکاران (Yanliang, Qi, & Wei, 2017) پهپادسمپاش را در چهار ارتفاع پروازی، در سرعت‌های باد متفاوت با حجم‌های متفاوت پاشش ارزیابی کردند. براساس نتایج، برای جلوگیری از تلفات سم در سرعت باد بیش از پنج متر در ثانیه، ارتفاع پرواز کمتر از دو متر توصیه شده است. همچنین برای سمپاشی یکنواخت در سرعت باد کمتر از دو متر در ثانیه، برای ارتفاع پرواز ۱/۵ و دو متر، حجم پاشش ۵۰ درصد و برای ارتفاع پرواز ۲/۵ متر، حجم پاشش ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد توصیه شده است. سمپاشی با پهپادسمپاش در ارتفاع سه متری توصیه نشده است. شیلین و همکاران (Shilin et al., 2017) چهار مدل پهپادسمپاش رایج در کشور چین را از نظر مقدار پوشش سم، نفوذپذیری، تراکم ذرات و بازده کاری مقایسه کردند. در شرایط پروازی یکسان و با به‌کارگیری حجم محلول سم مصرفی یکسان، قطر میانه حجمی همبستگی منفی با تراکم قطره‌ها داشت. از زمان در نظر گرفته شده برای سمپاشی با پهپاد، ۵۰ درصد صرف سمپاشی، ۱۰ درصد صرف آماده‌سازی پهپاد، ۱۰ درصد صرف برنامه‌ریزی مسیر و زمان خالص سمپاشی تنها حدود ۳۰ درصد را به خود اختصاص داد. شیخی‌گرجان (Sheikhi Gorjan, 2018) عملکرد پهپادسمپاش را برای مبارزه با پوره سن گندم ارزیابی و نتایج آن را با سمپاش میکرون پستی مقایسه کرد. مقایسه میانگین کارایی پهپادسمپاش با سمپاش میکرون پستی نشان داد که هر دو تیمار از نظر کنترل سن گندم اختلاف معنی‌داری با همدیگر نداشتند. برای پهپادسمپاش و سمپاش میکرون پستی، ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر به ترتیب ۵/۵ و ۰/۸ هکتار در ساعت، و مقدار محلول مصرفی به ترتیب ۱۴/۶ و ۳۰/۰ لیتر در هکتار به دست آمد. ونگ و همکاران (Wang et al., 2019) نشست^۵ سم، کارایی سمپاشی^۶ و بازده کاری^۷ یک پهپادسمپاش شش روتور را با یک سمپاش بوم‌دار و دو سمپاش کوله‌پستی معمولی برای سمپاشی گندم مقایسه کردند. نتایج پژوهش نشان داد بازده مزرعه‌ای با پهپادسمپاش ۲۰-۱/۷ برابر (۱/۷، ۲/۶ و ۲۰ برابر) بیشتر از سمپاش‌های بوم‌دار و دو سمپاش پستی بود. کارایی سمپاشی با پهپادسمپاش روی شته‌های گندم هفت روز بعد از سمپاشی ۷۰/۹ درصد بود که با سایر سمپاش‌ها قابل مقایسه بود. تسکه و همکاران (Teske et al., 2019)، یک مدل ریاضی داده محور^۸ را برای پیش‌بینی توزیع بهینه سم با پهپادسمپاش برای مبارزه

روش دیگر سمپاشی، استفاده از هواپیمای سرنشین‌دار است. این روش سمپاشی برای سمپاشی زمین‌های بزرگ با شکل منظم، کاربرد دارد. همچنین، برای سمپاشی با این روش به خلبان بامهارت و فرودگاه نیاز است (Huang et al., 2018; Gong et al., 2019). هزینه زیاد سمپاشی و کنترل ضعیف پارامترهای پروازی باعث شده تا این فناوری کاربرد چندانی پیدا نکند (Xinyu, Kang, Weicai, Lan, & Zhang, 2014).

در سال‌های اخیر از پهپادسمپاش^۱ برای سمپاشی مزرعه‌ها و باغ‌ها استفاده شده است (Kharim, Wayayok, Sharif, Abdullah, & Husin, 2019). پهپادسمپاش می‌تواند با کاهش ۲۰ تا ۳۰ درصدی مقدار سم، بازده سمپاشی را بیش از ۶۰ درصد افزایش دهد (Qin, Xue, Zhang, Gu, & Wang, 2018). از قابلیت‌های پهپادسمپاش می‌توان به مصرف کم آب، هزینه کم سمپاشی، افزایش بازده مزرعه‌ای، آسیب‌نرسیدن به کارور^۲ به دلیل تماس نداشتن با سم، قابلیت کار در مناطق دشوارگذر (Kharim et al., 2019)، نیاز نداشتن به فرودگاه، قابلیت کنترل از راه دور (Shilin et al., 2017)، مانورپذیری بیشتر (به دلیل شعاع چرخش کوچک‌تر) (Teske, Chen, Nansen, & Kong, 2019)، نیاز به نیروی کارگری کمتر (Wang et al., 2019)، قابلیت برنامه‌ریزی خودکار سمپاشی، مناسب بودن برای زمین‌های خرد (Huang, Hoffmann, Lan, Wu, & Fritz, 2009)، کاهش تلفات سم (به دلیل تنظیم دقیق مقدار سم لازم و کالیبراسیون دقیق سمپاش) (Shengde et al., 2017)، نفوذ بهتر سم به داخل پوشش گیاهی به دلیل جریان هوای رو به پایین تولیدشده به وسیله روتورهای پهپادسمپاش (Meng, Su, Song, Chen, & Lan, 2020) اشاره کرد.

در پژوهش‌های متعددی پهپادسمپاش برای مبارزه با آفت‌ها، بیماری‌ها و علف‌های هرز توصیه شده است. شینیو و همکاران (Xinyu et al., 2014) مقدار نشست و بادبردگی روش‌های مختلف سمپاشی را در شالیزار ارزیابی کردند. نتایج نشان داد مقدار نفوذ سم به دلیل جریان باد ایجادشده به وسیله روتورها، بیشتر از روش‌های مرسوم سمپاشی است. شین و همکاران (Qin et al., 2016) نشان دادند که در سمپاشی برنج با پهپاد، ارتفاع و سرعت پرواز روی نفوذ و یکنواختی پاشش سم مؤثر است. طبق گزارش آن‌ها، پارامترهای زیادی از جمله جریان هوای رو به پایین، طراحی پهپادسمپاش، مقدار توان و سرعت و جهت باد بر الگوی پاشش و عرض مؤثر پاشش تأثیرگذار است. یونگ‌جون و همکاران (Yongjun et al., 2017) از پهپادسمپاش برای سمپاشی مزرعه ذرت استفاده کردند. آن‌ها ارتفاع پرواز یک متر و سرعت چهار متر در ثانیه را برای توزیع مناسب سم

3- Blister Stage Corn
4- Dough Stage Corn
5- Deposition
6- Efficacy
7- Working Efficiency
8- Data Driven

1- Unmanned Aerial Vehicle (UAV)
2- Operator

کرد. براساس نتایج، بهترین شاخص کیفیت پاشش به ترتیب متعلق به سمپاش بوم‌دار و پهپادسمپاش با مقادیر ۲/۴ و ۲/۹ و بیشترین بازده مزرعه‌ای متعلق به پهپادسمپاش بود. ظریف‌نشاط (Zarif Neshat, 2021) عملکرد پهپادسمپاش را با روش‌های معمول سمپاشی برای مبارزه با علف‌های هرز مزارع گندم مقایسه کرد. نتایج نشان داد محلول سم مصرفی در پهپادسمپاش، سمپاش بوم‌دار پشت‌تراکتوری و سمپاش توربینی زراعی به ترتیب ۱/۱، ۳۵۱/۶، ۲۴۹/۱ لیتر در هکتار، مقدار بادبردگی ۱۶/۸، ۷/۷ و ۳۸/۶ درصد، و ظرفیت مزرعه‌ای ۶/۷، ۵/۹ و ۷/۰ در ساعت به دست آمد. همچنین، در ۳۰ روز پس از سمپاشی اختلاف معنی‌داری بین تیمارها از نظر کارایی عملیات مشاهده نشد.

با توجه به قابلیت‌های پهپادسمپاش براساس مرور منابع و مشکلات روش‌های فعلی سمپاشی، هدف از این پژوهش ارزیابی عملکرد پهپادسمپاش به‌عنوان یک روش نوین سمپاشی برای مبارزه با آفت شته کلزا و مقایسه نتایج آن با روش مرسوم سمپاشی با سمپاش توربولاینر است.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش عملکرد پهپادسمپاش برای مبارزه با آفت شته کلزا ارزیابی و نتایج آن با سمپاش توربولاینر به‌عنوان روش مرسوم سمپاشی در منطقه مقایسه شد. همچنین، کارایی سمپاشی هر دو روش با تیمار شاهد مقایسه شد. سمپاشی در فروردین ماه سال ۱۴۰۱ در مرحله ساقه‌رفتن کلزا و در زمان آلودگی حداقل ۲۰ درصد از بوته‌ها در مزرعه مؤسسه اصلاح و تهیه نهال و بذر واقع در محمدشهر کرج اجرا شد. آزمون در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تیمار شامل سمپاشی با پهپادسمپاش، سمپاش توربولاینر و شاهد در سه تکرار اجرا شد. اندازه کرت‌های آزمایشی ۱۰×۱۰ متر بود. برای تعیین زمان مناسب سمپاشی از مرحله رویش گیاه تا پایان مرحله رزت، هر هفته یکبار و از شروع مرحله ساقه‌رفتن هر هفته دوبار از مزرعه بازدید شد. در شکل ۱ بوته کلزای آلوده به شته نشان داده شده است.

پهپادسمپاش آزمون شده از نوع مولتی-روتور^۱ با چهار روتور مدل تاپ‌ایکس‌گان^۲ دارای چهار افشانک بادبزی تی-جت^۳ شماره XR110015 VS و حجم مخزن ۱۰ لیتر بود. سمپاش توربولاینر ساخت شرکت بادله دارای نه افشانک مخروطی سری RA بود. همچنین، تراکتور استفاده شده از نوع Massey Ferguson 399 با قدرت ۱۱۰ اسب‌بخار بود. مشخصات فنی سمپاش‌ها در جدول ۱ ارائه

با کنه توسعه دادند. مدل توزیع تابعی از سرعت باد، جهت باد، ارتفاع پهپادسمپاش و سرعت پرواز بود. میانگین خطای مدل ۱۲/۸ درصد به دست آمد. مارتین و همکاران (Martin, Woldt, & Latheef, 2019) تأثیر ارتفاع و سرعت پرواز را بر الگوی پاشش و اندازه قطره‌های محلول سم توزیع شده با پهپادسمپاش روی پنبه بررسی کردند. ضریب تغییرات در عرض کار مؤثر دستگاه، ۲۵ درصد به دست آمد. خریم و همکاران (Kharim et al., 2019) به ارزیابی اثر سرعت پرواز و دبی پاشش بر نشست قطره‌های سم روی محصول برنج پرداختند. نتایج نشان داد که یکنواختی قطره‌های سم و نشست آن‌ها در سرعت پرواز کمتر از دو متر در ثانیه در مقایسه با سرعت‌های پرواز چهار و شش متر در ثانیه بیشتر بود. همچنین، یکنواختی پاشش و نشست قطره‌ها در دبی پاشش سه لیتر در دقیقه، بیش از بقیه تیمارها بود. زو و همکاران (Zhou, Xue, Qin, Chen, & Cai, 2020) عملکرد پهپادسمپاش را در سرعت‌های پرواز سه، چهار و پنج متر در ثانیه و برای دو نوع افشانک برای سمپاشی مزرعه برنج ارزیابی کردند. بهترین عملکرد پهپادسمپاش با سرعت پرواز چهار متر در ثانیه و بیشترین بازده برای مراحل مختلف رشد، ۵۲ درصد به دست آمد. نتایج نشان داد بازده سمپاشی با پهپادسمپاش در همه مراحل رشد بیشتر از بازده سمپاشی با سمپاش‌های رایج است. چن و همکاران (Chen et al., 2020) یکنواختی توزیع سم را در سمپاشی با پهپادسمپاش بر کنترل آفت برنج ارزیابی کردند. نتایج مقایسه دو نوع افشانک و روش پاشش با پهپادسمپاش و سمپاشی مرسوم نشان داد که با استفاده از پهپادسمپاش و به‌کارگیری افشانک مناسب می‌توان کنترل بهتری روی آفت به دست آورد. ونگ و همکاران (Wang et al., 2020) بادبردگی سم یک پهپادسمپاش را در شرایط تونل باد ارزیابی کردند. تیمارهای آزمایش شامل نوع افشانک، سرعت پرواز، و پارامترهای هواشناسی بود. نوع و اندازه افشانک بر بادبردگی مؤثر بود و افشانک‌های هوا-کمک بادبردگی کمتری داشتند. در پرواز با سرعت زیاد، جهت جریان هوای رو به پایین تولیدشده به وسیله روتورها باعث کاهش فشار بر قطره‌ها و تشدید خطر بادبردگی می‌شد. صفری و شیخی‌گرجان (Safari & Sheikhi Gorjan, 2020) برای کنترل آفت زنجرف‌خوردگی در مزرعه سمپاشی با پهپادسمپاش و سمپاش لانس‌دار را مقایسه کردند. مقدار محلول مصرفی پهپادسمپاش و سمپاش لانس‌دار به ترتیب برابر با ۲۸/۹ و ۱۱۰۰ لیتر در هکتار، اتلاف محلول حشره‌کش در سمپاشی با پهپادسمپاش و سمپاش لانس‌دار به ترتیب ۱۱/۰۲ و ۴۲/۶ درصد و ظرفیت مزرعه‌ای پهپادسمپاش و سمپاش لانس‌دار به ترتیب برابر با ۲/۷ و ۰/۸ هکتار در ساعت به دست آمد. نوروزیه (Nowrouzieh, 2020) از پهپادسمپاش برای کنترل کرم غوزه پنبه استفاده و نتایج سمپاشی با پهپادسمپاش را با دو نوع سمپاش بوم‌دار پشت تراکتوری و لانس‌دار پشت تراکتوری مقایسه

1- Canola

2- Rotary Type

3- TopXGun

4- TeeJet

سمپاشی، متوسط دمای هوا ۲۱ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی هوا ۱۰ درصد (با استفاده از دستگاه دیجیتالی سنسجس دما-رطوبت) و همچنین، متوسط سرعت باد حین سمپاشی ۲ تا ۶ متر در ثانیه (با استفاده از بادسنج پره‌ای دیجیتالی برند UNI-T مدل UT363BT) ثبت شد. در شکل ۲ سمپاش‌ها هنگام سمپاشی مزرعه نشان داده شده‌است.

شده است. آفت‌کش ایمیداکلوپراید SC350 به مقدار یک لیتر در هکتار با نسبت ۱ به ۱۰ با آب مخلوط و در مخزن سمپاش‌ها ریخته شد. برای افزایش خاصیت خیس‌کنندگی آفت‌کش، از افزودنی مکمل کاورینو (مویان) با غلظت ۰/۵ میلی‌لیتر در لیتر استفاده شد. براساس پژوهش‌های پیشین، این ماده باعث بهبود نشست سم روی گیاه می‌شود (Xinyu et al., 2014; Wang et al., 2019). در زمان



شکل ۱- بوته کلزای آلوده به شته

Fig.1. *Brevicoryne brassicae* (L.) infected canola plant



شکل ۲- سمپاش‌ها هنگام سمپاشی مزرعه کلزا (a: سمپاش توربولاینر، b: پهپادسمپاش)

Fig.2. Sprayers while spraying the canola field (a: Turbo liner sprayer, b: UAV spray)

محلول از مخزن، دبی افشانک‌ها در مدت زمان یک دقیقه اندازه‌گیری شد (Safari & Bagheri, 2021). پس از اندازه‌گیری دبی تک‌تک افشانک‌ها و جمع کردن دبی تمام افشانک‌ها با هم، مقدار محلول مصرفی در هر هکتار از رابطه (۱) به دست آمد (Chen et al., 2020):

$$Q = \frac{600q}{V.W} \quad (1)$$

Q : مقدار محلول مصرفی در هکتار ($L \cdot ha^{-1}$)
 V : سرعت پیشروی ($km \cdot hr^{-1}$)، q : دبی همه افشانک‌ها
 W : عرض کار مؤثر (m)، Q : مقدار محلول مصرفی در هکتار ($L \cdot ha^{-1}$).

برای ارزیابی و مقایسه سمپاش‌ها، پارامترهایی شامل دبی افشانک‌ها و مقدار محلول مصرفی، ضریب کیفیت پاشش، ظرفیت مزرعه‌ای نظری، ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر، بازده مزرعه‌ای، انرژی مصرفی و کارایی سمپاشی به صورت زیر اندازه‌گیری شدند:

اندازه‌گیری دبی افشانک‌ها و مقدار محلول سم مصرفی

برای اندازه‌گیری دبی افشانک‌ها، ابتدا مخزن از آب پر شد. سپس زیر هریک از افشانک‌ها یک استوانه مدرج قرار داده شد. با خروج



شکل ۳- روش نصب کارت حساس به آب روی بوته

Fig.3. Installation of the water-sensitive card on the canola plant

$$E = \left(\frac{C_o}{C_t}\right) * 100 \quad (3)$$

E: بازده مزرعه‌ای (%), C_o : ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر ($ha \ hr^{-1}$), و C_t : ظرفیت مزرعه‌ای تئوری ($ha \ hr^{-1}$).

ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر (C_o) بر اساس زمان لازم برای سمپاشی یک هکتار زمین و در مزرعه اندازه‌گیری شد. ظرفیت مزرعه‌ای تئوری نیز از رابطه (۴) به دست آمد:

$$C_t = \frac{V.W}{10} \quad (4)$$

C_{ot} : ظرفیت مزرعه‌ای تئوری ($ha \ hr^{-1}$), V: سرعت پیشروی ($km \ hr^{-1}$) و W: عرض کار (m).

اندازه‌گیری انرژی مصرفی

انرژی پهبادسمپاش از نوع انرژی الکتریکی و انرژی سمپاش توربولاینر از نوع انرژی فسیلی است. انرژی مصرفی پهباد از محاسبه توان مصرفی (برحسب کیلووات) در ساعت به دست می‌آید. توان مصرفی پهبادسمپاش مجموع توان مصرفی باتری‌های پر شده و باتری‌های رادیوکنترل است که معمولاً در دفترچه راهنمای وسیله مشخص شده‌است. برای اندازه‌گیری انرژی مصرفی سمپاش توربولاینر ابتدا مقدار مصرف سوخت تراکتور در هکتار به دست آمد. این عدد در ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر سمپاش ضرب شد. سپس عدد به دست آمده در انرژی معادل تولیدشده از سوخت هر لیتر گازوئیل (برابر با ۲ کیلووات-ساعت) ضرب شد. مصرف سوخت تراکتور در شرایط آزمون ۷/۵ لیتر در هکتار به دست آمد.

اندازه‌گیری کارایی سمپاشی

برای تعیین مقدار کارایی سمپاشی با پهبادسمپاش و سمپاش توربولاینر در مبارزه با شته، نمونه برداری از جمعیت شته، چهار بار در زمان‌های یک روز پیش از سمپاشی، ۳، ۷ و ۱۴ روز پس از سمپاشی

اندازه‌گیری ضریب کیفیت پاشش (یکنواختی پاشش)

ضریب کیفیت پاشش، معیار یکنواختی پاشش است که از تقسیم قطر میانه حجمی^۱ بر قطر میانه عددی^۲ به دست می‌آید (Zhu, Salyanib, & Fox, 2011). برای اندازه‌گیری قطر میانه حجمی و عددی، ابتدا کارت‌های حساس به آب در مسیر پاشش قرار داده شدند (شکل ۳).

پس از سمپاشی، کارت‌ها جمع‌آوری و با قدرت تفکیک ۳۰۰ dpi اسکن شدند. تعداد و قطر قطره‌ها با استفاده از نرم‌افزار Image J اندازه‌گیری شدند. در این نرم‌افزار ابتدا تصویر کارت‌های حساس به صورت باینری درآورده شد و مقیاس دهی شدند. سپس با تعیین حد آستانه مناسب برای هر تصویر، قطره‌ها از تصویر زمینه جدا شد، تعداد آن‌ها شمارش و قطر آن‌ها اندازه‌گیری شد. قطرهای میانه عددی و حجمی با استفاده از رابطه (۲) به دست آمدند (Behrouzi Lar, 1999):

$$D_{pq}^{p-q} = \left(\sum_{i=1}^n Ni D_i^p \mid \sum_{i=1}^n Ni D_i^q\right)^{\frac{1}{(p-q)}} \quad (2)$$

p و q: اعداد صحیح، $p > q$. (برای محاسبه قطر میانه عددی $q=0, p=1$; برای محاسبه قطر میانه حجمی $q=0, p=3$), D_i : قطر قطره برای گروه اندازه i (μm), N_i : تعداد قطره در گروه اندازه i ; n: تعداد اندازه گروه، n: تعداد گروه اندازه‌ها.

اندازه‌گیری بازده مزرعه‌ای

بازده مزرعه‌ای از رابطه (۳) به دست می‌آید:

- 1- Volume Median Diameter (VMD)
- 2- Number Median Diameter (NMD)
- 3- Resolution

نتایج آزمون‌های مزرعه‌ای پهبادسمپاش و سمپاش توربولاینر به شرح زیر است:

ضریب کیفیت پاشش (یکنواختی پاشش)

نتایج ارزیابی یکنواختی پاشش دو نوع سمپاش در جدول ۲ نشان داده شده است. براساس نتایج، میانگین قطر میانه عددی قطره‌های محلول سم برای پهبادسمپاش و سمپاش توربولاینر به ترتیب برابر با ۵۴۱/۸ و ۶۸۰/۳ میکرومتر، و میانگین قطر میانه حجمی برای پهبادسمپاش و سمپاش توربولاینر به ترتیب برابر با ۶۱۸/۱ و ۸۱۴/۰ میکرومتر، به دست آمد. این نتایج با توجه به بزرگ‌تر بودن قطره‌های محلول در سمپاشی با توربولاینر نسبت به پهبادسمپاش، (به دلیل تفاوت نوع افشانک‌های آن‌ها) به دست آمد. براین اساس، میانگین قطرهای میانه عددی و حجمی پهبادسمپاش کمتر از سمپاش توربولاینر بود. همچنین، میانگین ضریب کیفیت پاشش پهبادسمپاش و سمپاش توربولاینر به ترتیب برابر با ۱/۱۵۳ و ۱/۲۱۳ به دست آمد. بنابراین، پهبادسمپاش در مقایسه با سمپاش توربولاینر کیفیت پاشش بهتر و میانگین قطر میانه حجمی و عددی کمتری دارد که به معنی یکنواختی پاشش بیشتر است. در پژوهش صفری و شیخی‌گرجان (Sheikhi Gorjan, 2018) نیز ضریب کیفیت پاشش پهبادسمپاش ۱/۳۵ به دست آمده که به نتیجه این پژوهش نزدیک است.

بازده مزرعه‌ای و انرژی مصرفی

در جدول ۳ ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر پهبادسمپاش و سمپاش توربینی به ترتیب برابر با ۵/۰ و ۶/۷ هکتار در ساعت به دست آمد. شیخی‌گرجان (Sheikhi Garjan, 2018) ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر پهباد را ۵/۰ هکتار در ساعت به دست آورد. همچنین، بازده مزرعه‌ای پهبادسمپاش و سمپاش توربولاینر به ترتیب برابر است با ۵۱/۴ درصد و ۳۲/۳ درصد به دست آمد. بنابراین، براساس نتایج، بازده مزرعه‌ای پهبادسمپاش ۵۹/۱ درصد بیش از بازده مزرعه‌ای سمپاش توربولاینر بود. بازده مزرعه‌ای بیشتر موجب کاهش زمان سمپاشی شده که این موضوع هنگام محدودیت زمان برای مبارزه با آفت و به‌ویژه در مواقع شیوع آفت بسیار مهم است. زو و همکاران (Zhou et al., 2020) بازده مزرعه‌ای پهبادسمپاش را ۵۲ درصد به دست آوردند که به نتیجه پژوهش حاضر بسیار نزدیک است. علت کم بودن بازده مزرعه‌ای سمپاش توربولاینر، اتلاف زمانی در اثر دور زدن‌ها در انتهای مزرعه و پر کردن مخزن و همچنین، به دلیل سرعت کم سمپاشی (به‌خاطر وجود پستی و بلندی‌ها در مزرعه) است. بیشتر بودن بازده مزرعه‌ای پهبادسمپاش نسبت به سمپاش توربولاینر به‌علت کاهش تلفات زمانی و همچنین، سرعت حرکت بیشتر آن است. تلفات زمانی پهبادسمپاش

در هر سه تیمار صورت گرفت. برای شمارش شته‌های هر بوته علامت‌گذاری شده، ۳۰ ساقه از هر کرت انتخاب و شته‌های زنده ۱۰ سانتی‌متر انتهایی ساقه شمارش شدند (Keyhanian, Sheikhi, Gorjan, Amini, & Khalaf, 2008). برای شمارش شته‌ها از مقیاس صفر تا چهار به صورت صفر: بدون آلودگی، یک: ۱-۵ شته، ۲: ۶-۲۰ شته، ۳: ۲۱-۱۰۰ شته، و چهار: بیش از ۱۰۰ شته استفاده شد. برای شمارش دقیق‌تر تعداد زیاد شته (بیش از ۱۰۰ عدد شته در ساقه) از روش شمارش تعداد شته در طول یک سانتی‌متر و محاسبه آن در طول ۱۰ سانتی‌متر استفاده شد. برای تعیین درصد آلودگی بوته‌ها نیز، از هر کرت تعداد ۱۰ بوته به صورت تصادفی انتخاب شدند و تعداد بوته‌های سالم و آلوده شمارش شدند. این کار در هر کرت ۱۰ بار تکرار شد و درصد آلودگی هر کرت به دست آمد. برای محاسبه کارایی تیمارها از فرمول هندرسون-تیلتون براساس تعداد شته‌های زنده طبق رابطه (۵) استفاده شد (Keyhanian et al., 2008):

$$E = \left(1 - \frac{(T_a * C_b)}{(T_b * C_a)}\right) * 100 \quad (5)$$

E: کارایی سمپاشی (درصد)، T_a : تعداد شته‌های زنده در کرت تیمار پس از سمپاشی، T_b : تعداد شته‌های زنده در کرت تیمار پیش از سمپاشی، C_a : تعداد شته‌های زنده در کرت شاهد پس از سمپاشی، و C_b : تعداد شته‌های زنده در کرت شاهد پیش از سمپاشی.

برای مقایسه تعداد شته‌ها در تیمارهای سمپاشی شده و شاهد از روش مدل خطی عمومی (GLM) و برای مقایسه کارایی دو تیمار پهبادسمپاش و توربولاینر، آزمون t با استفاده از نرم‌افزار SAS9.2 اجرا شد.

نتایج و بحث

در جدول ۱ مشخصات فنی پهبادسمپاش و سمپاش توربولاینر ارائه شده است. دبی افشانک، دبی کل، میانگین سرعت حرکت، ارتفاع پاشش از سطح زمین و مقدار سم مصرفی، برای این پروژه و بر اساس آزمون‌های عملی به دست آمده است. براساس جدول، حجم محلول سم مصرفی پهبادسمپاش و سمپاش توربینی به ترتیب برابر با ۱۱/۱ و ۱۸۷/۶ لیتر در هکتار به دست آمد. در واقع محلول مصرفی سمپاش توربولاینر ۱۷ برابر محلول مصرفی پهبادسمپاش است. ظرفیت‌نشای (Zarif Neshat, 2021) نیز حجم محلول سم مصرفی پهبادسمپاش و سمپاش توربینی را به ترتیب برابر با ۱۱/۱ و ۲۴۹/۱ به دست آورد.

نتایج آزمون‌های مزرعه‌ای پهبادسمپاش و سمپاش توربولاینر

۳۰ برابر انرژی مصرفی پهپادسمپاش است. با توجه به کاهش توان مصرفی در منبع توان الکتریکی نسبت به منبع توان سوخت فسیلی، این نتیجه منطقی است.

نیز به دلیل پر کردن مخزن و تعویض باتری است. براساس جدول ۳، انرژی مصرفی پهپادسمپاش و سمپاش توربولاینر به ترتیب برابر با ۳/۴ و ۱۰۰/۵ کیلووات ساعت به دست آمد. به عبارت دیگر، انرژی مصرفی سمپاش توربولاینر در هر هکتار، حدود

جدول ۱- مشخصات فنی سمپاش‌های آزمون شده

Table 1- Technical specification of the experimental sprayers

نوع سمپاش	حجم مخزن پر شده Filled Tank Capacity (L)	عرض مؤثر پاشش Effective spray width (m)	نوع افشانک Nozzle type	فشار Pressure (Mpa)	ارتفاع پاشش از سطح زمین Spray height from the ground (m)	دبی افشانک Nozzle Flow (L min ⁻¹)	تعداد افشانک‌ها Number of Nozzles	دبی کل Total Flow (L min ⁻¹)	میانگین سرعت Average Speed (km h ⁻¹)	حجم محلول مصرفی Spray volume (L ha ⁻¹)
پهپادسمپاش UAV sprayer	10	4.5	Flat fan	0.3	1.8	0.45	4	1.8	21.6	11.1
سمپاش توربولاینر Turbo Liner Sprayer	120	28	Hollow cone	0-5	2.5	7.2	9	64.8	7.4	187.6

جدول ۲- میانگین ضریب کیفیت پاشش پهپادسمپاش و سمپاش توربولاینر

Table 2- The average spraying quality coefficient of the UAV sprayer and turbo liner sprayer

نوع سمپاش	میانگین ضریب کیفیت پاشش Spraying Quality Coefficient	انحراف معیار Standard Deviation	میانگین قطر میانه عددی Number Median Diameter (μm)	انحراف معیار Standard Deviation	میانگین قطر میانه حجمی Volume Median Diameter (μm)	انحراف معیار Standard Deviation
پهپادسمپاش UAV sprayer	1.153	±0.13	541.8	±178.5	618.1	±178.8
سمپاش توربولاینر Turbo Liner Sprayer	1.213	±0.07	680.3	±280.6	814.0	±297.1

جدول ۳- بازده مزرعه‌ای پهپادسمپاش و سمپاش توربولاینر

Table 3- Field efficiency of the UAV sprayer and turbo liner sprayer

نوع سمپاش	عرض مؤثر پاشش Effective spray width (m)	متوسط سرعت حرکت Average Speed (km hr ⁻¹)	ظرفیت مزرعه‌ای تئوری Theoretical Field Capacity (ha hr ⁻¹)	ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر Effective Field Capacity (ha hr ⁻¹)	بازده مزرعه‌ای Field Efficiency (%)	انرژی مصرفی Energy consumption (kWh)
پهپادسمپاش UAV sprayer	4.5	21.6	9.7	5.0	51.4	3.4
سمپاش توربولاینر Turbo Liner Sprayer	28.0	7.4	20.7	6.7	32.3	100.5

کارایی سمپاشی

تعداد شته اختلاط معنی‌داری وجود داشت؛ به طوری که تعداد شته در تیمارهای سمپاشی شده با پهپادسمپاش و سمپاش توربولاینر در سه بار نمونه‌برداری پس از سمپاشی کمتر از ۱۰۰ شته در ساقه بود، اما در تیمار شاهد تعداد ۷۰۰-۲۵۰ شته در ساقه بود. بنابراین، هر دو روش سمپاشی منجر به کاهش جمعیت آفت شدند.

میانگین تعداد شته‌های کلزا قبل و بعد از سمپاشی در جدول ۴ ارائه شده‌است. بنابر نتایج تجزیه واریانس قبل از سمپاشی، میانگین تعداد شته در تیمارهای مختلف تقریباً یکنواخت بود و اختلاط معنی‌داری از نظر آماری بین تیمارها وجود نداشت. اما در سه، هفت و ۱۴ روز پس از سمپاشی بین تیمار شاهد و تیمارهای سمپاشی از نظر

جدول ۴- میانگین تعداد شته کلزا قبل و بعد از سمپاشی

Table 4- The average number of pests before and after spraying

تیمار Treatment	Days before and after spraying			
	1 day before	3 days after	7 days after	14 days after
پهپادسمپاش UAV sprayer	425.3	151.8	35.2	20.6
سمپاش توربولاینر Turbo Liner Sprayer	296.1	30.7	74.5	42.9
شاهد Control (Without spraying)	3013.1	463.1	776.3	256.4
درجه آزادی Degree of Freedom	2,37	2,37	2,37	2,37
F شاخص F Index	2.2	36.2	72.9	129.3
مقدار Pr Pr Value	0.7	0.0001	0.0001	0.0001
ضریب تغییرات Coefficient of Variation (%)	44.1	58.2	57.4	48.1

قابل قبولی در کنترل جمعیت شته کلزا داشتند و با گذشت ۱۴ روز از سمپاشی، پهپادسمپاش نسبت به سمپاش توربولاینر کنترل بیشتری روی جمعیت شته ایجاد کرده بود. سیستمیک بودن سم مورد استفاده و نیاز داشتن به زمان برای جذب توسط گیاه از علت‌های دستیابی به چنین نتیجه‌ای است. در پژوهش صفری و شیخی گرجان (Safari & Sheikhi Gorjan, 2018)، هفت روز پس از سمپاشی، کارایی پهپادسمپاش بیش از سمپاش لانس‌دار و به ترتیب برابر با ۴۸ و ۴۰ درصد به دست آمده است.

نتایج آزمون t و مقایسه میانگین‌های درصد کارایی سمپاشی با پهپادسمپاش و سمپاش توربولاینر در جدول ۵ ارائه شده‌است. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در سه روز پس از سمپاشی درصد کارایی سمپاش توربولاینر ۸۷/۳ و درصد کارایی پهپادسمپاش ۶۹/۱ بود. در هفت روز بعد از سمپاشی درصد کارایی سمپاش توربولاینر ۸۸/۴ و درصد کارایی پهپادسمپاش ۷۰/۹ بود. در ۱۴ روز بعد از سمپاشی درصد کارایی پهپادسمپاش ۹۲/۷ و سمپاش توربولاینر ۸۵/۱ بود. براساس نتایج به دست آمده از مقایسه میانگین‌ها، درصد کارایی سمپاش‌ها در روزهای مختلف بعد از سمپاشی، هر دو سمپاش نتایج

جدول ۵- مقایسه درصد کارایی سمپاشی با پهپادسمپاش و سمپاش توربولاینر برای کنترل جمعیت شته کلزا

Table 5- Comparison of spraying efficacy percentage for controlling the population of *Brevicoryne brassicae* (L.)

تیمار Treatment	Days after spraying (%)		
	+3	+7	+14
پهپادسمپاش UAV sprayer	69.1±4.0	70.9±3.8	92.7±1.3
سمپاش توربولاینر Turbo Liner Sprayer	87.3±2.3	88.4±1.0	85.2±3.7
درجه آزادی Degree of Freedom	29	29	29
t	2.8	2.9	2.5
Pr	0.008	0.007	0.02

نتیجه گیری

مزرعه‌ای سمپاش توربولاینر به‌دست آمد.

- انرژی مصرفی سمپاش توربولاینر در هر هکتار، ۵ برابر انرژی مصرفی پهپادسمپاش بود.

- درصد کارایی سمپاش توربولاینر در سه و هفت روز پس از سمپاشی بیشتر از درصد کارایی سمپاشی با پهپادسمپاش بود. اما، در ۱۴ روز بعد از سمپاشی درصد کارایی پهپادسمپاش بیشتر بود. بنابراین، از نظر کارایی سمپاشی هر دو سمپاش قابل توصیه هستند.

- براساس نتایج این پژوهش، برای بهبود عملکرد پهپادسمپاش برای سمپاشی و مبارزه با شته کلزا ارتفاع پرواز ۱-۱/۵ متر از سر تاج محصول، سرعت پرواز کمتر از ۷ متر در ثانیه و سمپاشی در سرعت باد کمتر از ۴ متر در ثانیه توصیه می‌شود. همچنین، با سمپاشی اصولی مزرعه در مرحله رزت (به دلیل تراکم و ارتفاع کمتر محصول و تعداد کمتر آفت) می‌توان از شیوع آفت در مرحله ساقه‌رفتن جلوگیری کرد.

این پروژه با هدف ارزیابی عملکرد پهپادسمپاش برای مبارزه با آفت شته کلزا اجرا شد. آزمون‌های مزرعه‌ای شامل اندازه‌گیری ضریب کیفیت پاشش، ظرفیت مزرعه‌ای، بازده مزرعه‌ای، انرژی مصرفی در هکتار و کارایی سمپاشی برای پهپادسمپاش اجرا و نتایج آن با سمپاش توربولاینر مقایسه شد. نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش عبارت‌است از:

- مقدار محلول سم مصرفی پهپادسمپاش و سمپاش توربولاینر به‌ترتیب برابر با ۱۱/۱ و ۱۸۷/۶ لیتر در هکتار به‌دست آمد. به عبارت دیگر، مقدار محلول مصرفی سمپاش توربولاینر ۱۷ برابر بیشتر از پهپادسمپاش است.

- میانگین ضریب کیفیت پاشش پهپادسمپاش و سمپاش توربولاینر به هم نزدیک است. اما یکنواختی پاشش پهپادسمپاش بیشتر است.

- بازده مزرعه‌ای پهپادسمپاش ۵۹/۱ درصد بیش از بازده

References

1. Bagheri, N., & Safari, M. (2020). Knowledge of UAV sprayer. Agricultural Engineering Research Institute. Technical Issue.
2. Behrouzi Lar, M. (1999). Engineering Principles of Agricultural Machines (Translated). Azad Islamic University Press. 1st Edition, 355-357.
3. Cheema, M. J. M., Mahmood, H. S., Latif, M. A., & Nasir, A. K. (2018). Precision Agriculture and ICT: Future Farming, Chap. 8. In: I.A. Khan and M.S. Khan (eds.), Developing Sustainable Agriculture in Pakistan. CRC Press, Taylor & Francis Group, Broken Sound Parkway NW USA.
4. Chen, P., Lan, Y., Huang, X., Qi, H., Wang, G., Wang, J., Wang, L., & Xiao, H. (2020). Droplet Deposition and Control of Planthoppers of Different Nozzles in Two-Stage Rice with a Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle. *Agronomy*, 10(303), 1-14. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020303>
5. Gong, J., Fan, W., & Peng, J. (2019). Application analysis of hydraulic nozzle and rotary atomization sprayer on plant protection UAV. *International Journal of Precision Agricultural Aviation*, 2(1).
6. Guo, S., Li, J., Yao, W., Zhan, Y., Li, Y., & Shi, Y. (2019). Distribution characteristics on droplet deposition of wind field vortex formed by multi-rotor uav. *PloS One*, 14(7), e0220024. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0220024>
7. Huang, Y., Hoffmann, W. C., Lan, Y., Wu, W., & Fritz, B. K. (2009). Development of a spray system for an unmanned aerial vehicle platform. *Applied Engineering in Agriculture*, 25(6), 803-809. <https://doi.org/10.13031/2013.29229>
8. Keyhanian, A. R., Sheikhi Gorjan, A., Amini Khalaf, M. A. (2008). Investigating the effectiveness of several insecticides in controlling cabbage aphid in canola fields. *Agricultural Applied Research*, 163-167.
9. Kharim, M. N. A., Wayayok, A., Sharif, A. R. M., Abdullah, A. F., & Husin, E. M. (2019). Droplet deposition density of organic liquid fertilizer at low altitude UAV aerial spraying in rice cultivation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 167, 105045. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105045>
10. Lan, Y., & Chen, S. (2018). Current status and trends of plant protection UAV and its spraying technology in China. *International Journal of Precision Agricultural Aviation*, 1(1), 1-9. <https://doi.org/10.33440/j.ijpaa.20180101.0002>
11. Lan, Y. B., Chen, S. D., & Fritz, B. K. (2017). Current status and future trends of precision agricultural aviation technologies. *International Journal of Agricultural & Biological Engineering*, 10(3), 1-17. <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20171003.3088>
12. Martin, D. E., Woldt, W. E., & Latheef, M. A. (2019). Effect of Application Height and Ground Speed on Spray Pattern and Droplet Spectra from Remotely Piloted Aerial Application Systems. *Drones*, 3(83), 1-21. <https://doi.org/10.3390/drones3040083>

13. Meng, Y., Su, J., Song, J., Chen, W. H., & Lan, Y. (2020). Experimental evaluation of UAV spraying for peach trees of different shapes: Effects of operational parameters on droplet distribution. *Computers and Electronics in Agriculture*, 170, 105282.
14. Nowrouziah, S. (2020). Evaluation the effectiveness of a sprayer UAV in controlling bollworm. *Cotton Research Institute of Iran*. The final report of the research project. No, 60875.
15. Peshin, R., Bandral, R. S., Zhang, W., Wilson, L., & Dhawan, A. K. (2009). *Integrated pest management: A global overview of history, programs and adoption*. In: R. Peshin and A.K. Dhawan (eds.), *Integrated Pest Management: Innovation-Development Process*. Springer, Dordrecht. Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8992-3_1
16. Qin, W., Xue, X., Zhang, S., Gu, W., & Wang, B. (2018). Droplet deposition and efficiency of fungicides sprayed with small UAV against wheat powdery mildew. *International Journal of Agricultural & Biological Engineering*, 11, 27-32.
17. Qin, W., Qiu, B., Xue, X., Chen, C., Xu, Z., & Zhou, Q. (2016). Droplet deposition and control effect of insecticides sprayed with an unmanned aerial vehicle against plant hoppers. *Crop Protection*, 85, 79-88. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.03.018>
18. Safari, M., & Sheikhi Gorjan, A. (2018). Comparison between unmanned aerial vehicle and tractor lance sprayer against Dubas bug *Ommatissus lybicus* (Hemiptera: Tropiduchidae). *Iranian Journal of Plant Protection Science*, 51(1), 13-26. <https://doi.org/10.22059/ijpps.2020.281898.1006894>
19. Safari, M., & Bagheri, N. (2021). Technical parameters for the evaluation of UAV sprayers. *Agricultural Engineering Research Institute*. Technical Issue.
20. Sheikhi Gorjan, A. (2018). Evaluation of UAV sprayer in chemical control of wheat Sunn pest nymphs. The final report of the research project. *Iranian Research Institute of Plant Protection*, No, 55872.
21. Shengde, Ch., Yubin, L., Bradley, K. F., Jiyu, L., Aimin, L., & Yuedong, M. (2017). The effect of wind field under the rotor of multi-rotor UAV on the deposition of aviation spray droplets. *Transactions of the CSAM*, 48(08), 105-113. (In Chinese). <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.011>
22. Shilin, W., Jianli, S., Xiongkui, H., Le, S., Xiaonan, W., Changling, W., Zhichong, W., & Yun, L. (2017). Performances evaluation of four typical unmanned aerial vehicles used for pesticide application in China. *International Journal of Agricultural & Biological Engineering*, 10(4), 22-31.
23. Teske, A. L., Chen, G., Nansen, C., & Kong, Z. (2019). Optimised dispensing of predatory mites by multirotor UAVs in wind: A distribution pattern modelling approach for precision pest management. *Biosystems Engineering*, 187, 226-238. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.09.009>
24. Wang, C., Zeng, A., He, X., Song, J., Herbst, A., & Gao, W. (2020). Spray drift characteristics test of unmanned aerial vehicle spray unit under wind tunnel conditions. *International Journal of Agricultural & Biological Engineering*, 13(3), 13-21.
25. Wang, G., Lan, Y., Yuan, H., Qi, H., Chen, P., Ouyang, F., & Han, Y. (2019). Comparison of Spray Deposition, Control Efficacy on Wheat Aphids and Working Efficiency in the Wheat Field of the Unmanned Aerial Vehicle with Boom Sprayer and Two Conventional Knapsack Sprayers. *Applied Sciences*, 9(218), 1-16. <https://doi.org/10.3390/app9020218>
26. Xinyu, X., Kang, T., Weicai, Q., Lan, Y., & Zhang, H. (2014). Drift and deposition of ultra-low altitude and low volume application in paddy field. *International Journal of Agricultural & Biological Engineering*, 7(4), 23-28.
27. Yanliang, Z., Qi, L., & Wei, Z. (2017). Design and test of a six-rotor unmanned aerial vehicle (UAV) electrostatic spraying system for crop protection. *International Journal of Agricultural & Biological Engineering*, 10, 68-76.
28. Yongjun, Z., Shenghui, Y., Chunjiang, Z., Liping, C., Lan, Y., & Yu, T. (2017). Modeling operation parameters of uav on spray effects at different growth stages of corns. *International Journal of Agricultural & Biological Engineering*, 10, 57-66.
29. Zarif Neshat, S. (2021). Technical and economic evaluation of sprayer drone for control of wheat weeds to compare with conventional methods. *Agricultural Engineering Research Institute*. The final report of the research project, No, 59903.
30. Zhou, Q., Xue, X., Qin, W., Chen, C., & Cai, C. (2020). Analysis of pesticide use efficiency of a UAV sprayer at different growth stages of rice. *International Journal of Precision Agricultural Aviation*, 3(1), 38-42. <https://doi.org/10.33440/j.jpaa.20200301.64>
31. Zhua, H., Salyanib, M., & Fox, R. (2011). A portable scanning system for evaluation of spray deposit distribution. *Computers and Electronics in Agriculture*, 76, 38-43. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.01.003>

Research Article

Vol. 14, No. 2, 2024, p. 147-161

Design, Construction, and Optimization of Performance of Electrodynamic Spraying Head of Atomizer Motorized Knapsack Sprayer

M. Rezaei¹, J. Khodaei^{1*}, B. Astinchap²

1- Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

2- Department of Physics, Faculty of Science, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

(*- Corresponding Author Email: j.khodaei@uok.ac.ir)

Received: 01 December 2022

Revised: 01 February 2023

Accepted: 27 February 2023

Available Online: 27 February 2023

How to cite this article:

Rezaei, M., Khodaei, J., & Astinchap, B. (2024). Design, Construction, and Optimization of Performance of Electrodynamic Spraying Head of Atomizer Motorized Knapsack Sprayer. *Journal of Agricultural Machinery*, 14(2), 147-161. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2023.79865.1134>

Introduction

Due to the increasing need for agricultural products, protection of products against pathogens and preventing them from being wasted is important. Studies on droplet charging systems result in the reduction of chemical usage and an increase in the deposition of droplets on the target. Conventional sprayers used in Iran have numerous disadvantages such as drift, environmental pollution, lack of complete and homogeneous coverage of the spraying surface, phytotoxicity, and crop losses. Therefore, evaluation of new spraying methods and using a variety of electrical sprayers as alternatives to conventional spraying is essential. This study aims to design, construct, and optimize the performance of the electrodynamic head of an atomizer motorized knapsack sprayer, and study the effects of the angle of the target position, spraying distance, and wind speed on the performance of the electrodynamic sprayer.

Materials and Methods

Experiments were performed in an agricultural machinery workshop at The Department of Biosystems Engineering, the University of Kurdistan, Iran, with an atomizer motorized knapsack sprayer equipped with an electrodynamic head. The effect of some factors including wind speed, spraying angle, and spraying distance on deposition, coverage percentage, and uniformity of spraying were investigated. These effects were investigated to determine the uniformity coefficient of total spraying. Design Expert 8.0.6 Trial software was used to design the experiments based on central composite design and to analyze the data. The investigated factors and levels were: the distance of nozzles from the target (at three levels of 2, 4, and 6 m), the angle of the target position (at three levels of 0, 45, and 90 degrees), and wind speed (at three levels of 2.5, 3, and 3.5 m s⁻¹). Water-sensitive paper cards were used to evaluate the quality of the spraying. The cards were scanned and magnified with an Olympus SZX12 Stereo Microscope equipped with an objective lens of X1 and a total magnification of 7X. The characteristics of droplet size were determined using Mountains Map Trial and Deposit Scan software.

Results and Discussion

The maximum value of the total spraying uniformity coefficient was equal to 1.95 for the spraying angle of 0 degrees, the distance of 6 meters, and the speed of 3.5 meters per second. Meanwhile, the lowest value of the spray uniformity coefficient of 1.18 was obtained for the test conditions of 90 degrees, distance of 2 m, and speed of 2.5 m s⁻¹, respectively. Based on analysis of variance for the two-factor interactions model (P-value less than 0.0001, explanation coefficient 0.9383, absolute explanation coefficient 0.910, standard deviation 0.0590, and coefficient of variation 3.790%). It can be stated that this model is highly accurate in predicting the uniformity of the total spraying, and the linear components of spraying angle and spraying distance, as well as the interaction of spraying angle × spraying distance and spraying distance × wind speed, significantly affect the uniformity of the total spraying (p<0.05). Nevertheless, the linear component of wind speed and the interaction



©2023 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jam.2023.79865.1134>

between wind speed and spraying angle had no significant effect on the changes in the uniformity coefficient of the total spray. According to the variance analysis table (F-values), spraying distance has a far greater effect on the spraying uniformity coefficient than the spraying angle.

It has been observed that the spraying uniformity coefficient will increase by increasing the spraying distance and decreasing the spraying angle. It can also be stated that the linear components of spraying angle and spraying distance, the interaction component of spraying angle \times spraying distance, and the square power of the components of spraying distance and wind speed have a significant effect on surface coverage. The values of R^2 , Adj- R^2 , CV, and PRESS for the model adapted to the test data of leaf surface coverage percentage were obtained as 0.9929, 0.9865, 4.87%, and 188.61, respectively.

Among the three input variables, the spraying distance has the greatest effect on the coverage of water-sensitive papers. At larger spraying angles, especially 90 degrees, the coverage decreased with the increasing distance. At spray angle of 90 degrees, by increasing the distance from 2 to 4 m, the spray uniformity coefficient increased from 1.18 at a wind speed of 2.5 m s^{-1} to 1.84 at a wind speed of 3.5 m s^{-1} . However, at smaller spraying angles (for example zero-degree angle), at first, the spraying coverage increases with the increase of the spraying distance from 2 to 3 m and then sharply decreases afterward. According to the contours of spray coverage, in the spray distance range of 4 to 6 m and regardless of wind speed, the spray coverage does not vary with the increase of the spraying angle ($p < 0.05$). Meanwhile, in the spray distance range of 2 to 4 m, with the increase of the spraying angle, the spraying coverage increases significantly ($p < 0.05$). Overall, increasing the distance between the sprayer and the target decreased the surface coverage on the target, and in electrodynamic spraying, the uniformity of particle deposition on the underside of the target was relatively the same as on the upper side.

Conclusion

To improve the performance of the atomizer motorized knapsack sprayer, an electrodynamic spraying head was designed and built, and its performance was optimized using the response surface method (RSM) with a central composite design. During the research process, the influence of the independent parameters such as the distance between the nozzle and the target, the angle of the target position, and the wind speed on the variables including spraying uniformity, the percentage of the spraying coverage, and the percentage of changes in the total spraying coefficient were discussed and investigated. The results of the research led to the determination of the 3.5 m s^{-1} wind speed, 2.5 m sprayer distance, and 90 degrees spraying angle with 0.792 desirability, which were considered as the optimal performance conditions of the electrodynamic spraying head. The results of laboratory validation for optimal conditions show that the uniformity of total spraying indicated by the total relative span factor (RSFT) and the percentage of spraying coverage (Cov) are equal to 1.65 and 28.27%, respectively.

Keywords: Electrodynamic head, Response surface method, Spraying angle, Sprayer, Uniformity coefficient, Wind speed

مقاله پژوهشی

جلد ۱۴، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۳، ص ۱۶۱-۱۴۷

طراحی، ساخت و بهینه‌سازی عملکرد کلاهِک پاشش الکترو دینامیکی سم‌پاش پشتی موتوری ذره‌ای پاش

مریم رضائی^۱، جلال خدائی^{۲*}، بندر آستین‌چپ^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۸

چکیده

افت زیاد مواد شیمیایی، بادیردگی و نشست خارج از هدف سم‌پاش‌های متداول در ایران، مطالعه روی سم‌پاش‌های باردارکننده سم را ضروری می‌سازد. به همین منظور یک کلاهِک الکترو دینامیکی طراحی و ساخته شد. در این تحقیق از روش سطح پاسخ برای بهینه‌سازی عملکرد کلاهِک پاشش الکترو دینامیکی در سم‌پاش پشتی موتوری ذره‌ای پاش استفاده شده است. پارامترهای فاصله افشانک تا هدف (شامل سه سطح ۲، ۴ و ۶ متری)، زاویه قرارگیری هدف (شامل سه سطح صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه) و سرعت باد (شامل سه سطح ۲/۵، ۳ و ۳/۵ متر بر ثانیه) به عنوان پارامترهای مستقل و یکنواختی پاشش و درصد سطح پاشش به عنوان متغیرهای وابسته مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که مولفه‌های خطی زاویه پاشش و فاصله پاشش و هم‌چنین برهم‌کنش زاویه پاشش×فاصله پاشش و فاصله پاشش×سرعت باد، دارای تاثیر معنی‌داری بر تغییرات ضریب پاشش کل می‌باشند ($p < 0.05$). بیش‌ترین ضریب یکنواختی پاشش کل برابر با ۱/۹۵ برای زاویه قرارگیری هدف صفر درجه، فاصله ۶ متری و سرعت ۳/۵ متر بر ثانیه و کم‌ترین مقدار این ضریب برابر با ۱/۱۸ برای زاویه قرارگیری هدف ۹۰ درجه، فاصله پاشش ۲ متر و سرعت باد ۲/۵ متر بر ثانیه به‌دست آمده است. مدل ریاضی ارائه‌شده برای پیش‌بینی تغییرات ضریب یکنواختی پاشش و درصد سطح پاشش از دقت بسیار بالایی برخوردار می‌باشد. ضریب یکنواختی پاشش با افزایش سرعت باد و فاصله پاشش افزایش یافته است ($p < 0.01$). در محدوده فاصله پاشش ۲، ۴ و ۲ الی ۴ متری، با افزایش زاویه پاشش مقدار سطح پاشش به‌طور معنی‌داری افزایش یافته است ($p < 0.05$). شرایط بهینه برای عملکرد کلاهِک الکترو دینامیکی ساخته‌شده در سرعت هوای ۳/۵ متر بر ثانیه، فاصله پاشش ۲/۵۸ متر و زاویه پاشش ۹۰ درجه با مطلوبیت ۰/۷۹۲ به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: زاویه قرارگیری، سرعت باد، سطح پاسخ، سم‌پاش، ضریب یکنواختی، کلاهِک الکترو دینامیکی

مقدمه

جایگزین سم‌پاش‌های مرسوم امری ضروری است. نتیجه تحقیقات در سال‌های گذشته نشان داده است که اندازه و چگالی قطرات محلول سم و نحوه پخش آن‌ها روی اهداف بیولوژیک از نقطه نظر تاثیر آفت‌کش تا چه حد حائز اهمیت بوده و نقش به‌سزایی در تعیین کمیت و کیفیت عملیات مبارزه دارد (Cunha, Carvalho, & Marcal, 2012; Mishra, Singh, Sharma, Sharma, & Singh, 2014; Kumar Narang, Mishra, Kumar, Singh Thakur, & Singh, 2015).

در چند دهه اخیر پیشرفت‌هایی در زمینه طراحی، ساخت، کاربرد، بهینه‌سازی و روش ارزیابی سم‌پاش‌ها آغاز شده است. فن‌آوری‌های رباتیک و پاشش خودکار مانند سم‌پاش‌های نرخ متغیر، سم‌پاشی به کمک پهپاد، سم‌پاش‌های الکترواستاتیکی، سم‌پاشی به کمک فراگیری ماشین و ارزیابی سم‌پاش‌ها به کمک پردازش تصویر در حال رشد هستند تا میزان بهره‌وری از آفت‌کش‌ها، کاهش بقایای آفت‌کش‌ها بر روی گیاه، زمان واقعی، صرفه‌جویی در هزینه و قابلیت سازگاری بالا با حفاظت از گیاه را، افزایش دهند. این فن‌آوری‌ها در زیر چتر کشاورزی دقیق قرار می‌گیرند و نه تنها هزینه نیروی کارگری

با توجه به نیاز روزافزون به محصولات کشاورزی، محافظت از محصولات در مقابل عوامل بیماری‌زا و جلوگیری از اتلاف آن‌ها، دارای اهمیت به‌سزایی است. سم‌پاش‌های مرسوم در ایران دارای معایب زیادی نظیر بادیردگی و آلودگی محیط‌زیست، عدم پوشش کامل و یکنواخت سطح مورد سم‌پاشی، گیاه‌سوزی، ضایعات زیاد محصول و تلفات زیاد محلول سم هستند. بنابراین ارزیابی روش‌های نوین سم‌پاشی و به‌کارگیری انواع سم‌پاش‌های الکترو دینامیکی به‌عنوان

۱- دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

۳- دانشیار، گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
(Email: j.khodaei@uok.ac.ir)

*- نویسنده مسئول: <https://doi.org/10.22067/jam.2023.79865.1134>

به دلیل خطرات زیست‌محیطی مصرف بالای آفت‌کش‌ها و کاهش هزینه‌های مصرفی، از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. روش‌های متعددی برای بهینه‌نمودن و تحلیل و مدل‌سازی یک فرآیند ارائه شده است که می‌توان در این میان به روش‌هایی همچون الگوریتم ژنتیک، تاگوچی، شبکه‌های عصبی مصنوعی، ضرایب لاگرانژ، نیوتن، سطح پاسخ و غیره اشاره نمود. روش سطح پاسخ مجموعه‌ای از روش‌های آماری و ریاضی است که برای مدل‌کردن و تجزیه و تحلیل مسائلی که در آن متغیر پاسخ تحت تأثیر چندین متغیر مستقل می‌باشد، بسیار مفید است. هدف از این تحلیل بهینه‌کردن متغیرهای پاسخ می‌باشد. روش سطح پاسخ کاربرد قابل‌توجهی در طرح‌ریزی، توسعه، فرموله کردن فرآیندها و همچنین ارتقای طراحی سیستم‌های موجود دارد. مدل ریاضی ارائه‌شده در این روش به توضیح فرآیند و تأثیر هر کدام از پارامترها و همچنین اثرات متقابل آن‌ها می‌پردازد (Witek, Krowiak, Chojnacka, Podstawczyk, Dawiec, & Pokomeda, 2014).

در تحقیقی نمونه اولیه‌ای از سم‌پاش باغی مبتنی بر فن‌آوری ماشین‌بینایی و ساخته‌شده براساس ساختار تاج درخت و میزان سبزینه مورد ارزیابی قرار گرفت و عملکرد سم‌پاش در باغ زیتون در دو حالت مختلف سم‌پاشی به صورت سراسری و سم‌پاشی منقطع هدف‌دار و همچنین در سه سرعت پیش‌روی ۲ و ۳/۵ و ۵ کیلومتر بر ساعت مقایسه گردید. نتایج نشان داد در کاربرد سم‌پاش طراحی‌شده جدید برای باغ زیتون، مصرف سم تقریباً ۵۴ درصد کاهش یافت و بهره‌وری بهبود یافت (Asaei, Jafari, & Loghavi, 2016).

در پژوهش دیگری محققان به مقایسه و ارزیابی فنی سم‌پاش‌های الکتروستاتیکی، میکرونر و پشت تراکتوری لانس‌دار در کنترل آفت کرم سیب پرداختند و نتایج نشان داد که یکنواختی قطرات در روی برگ‌ها در سم‌پاش‌های الکتروستاتیکی و میکرونر با ۳۰ قطره در سانتی‌متر مربع بهتر از نوع سم‌پاش لانس‌دار و در پشت برگ‌ها، سم‌پاش الکتروستاتیکی با تعداد ۱۶ قطره در سانتی‌متر مربع دارای پوشش مناسب‌تری بود. از نظر درصد کنترل آفت کرم سیب، بررسی تعداد نمونه‌های سیب سالم و آفت‌زده نشان داد که سم‌پاش لانس‌دار با میانگین ۱۸/۸ درصد در مقایسه با دو روش دیگر دارای کم‌ترین اثربخشی در کنترل آفت کرم سیب بود (Amirshaghghi & Safari, 2016).

هدف از این مطالعه طراحی و ساخت یک کلاهک الکتروستاتیکی و بهینه‌سازی اثرات پارامترهای زاویه قرارگیری هدف، فاصله پاشش و سرعت وزش باد بر عملکرد کلاهک الکتروستاتیکی در سم‌پاش پستی موتوری ذره‌ای پاش به روش سطح پاسخ^۱ (RSM) می‌باشد.

را کاهش می‌دهند بلکه در حفاظت از محیط‌زیست نیز بسیار موثر هستند (Ahmad, Khaliq, Qiu, & Sultan, 2021; Patel, 2016; Zhang, Lian, & Zhang, 2017; Indu Baghel, Bhardwaj, & Ibrahim, 2022; Mousavi & Baradaran Motie, 2021; Behzadi Pour, Ghasemi Nejad Raeni, Asoodar, Marzban, & Abdanan Mehdizadeh, 2017; McNearney & Hons, 2020).

سم‌پاشی موفق، به پوشش کامل هدف، که به‌طور یکنواخت توزیع شده باشد، بستگی دارد (Cunha et al., 2012). پاشش قطرات باردار سم از جمله روش‌های موثری است که با بهره‌گیری از ویژگی‌های پتانسیل صفرگیا، موجب شکل‌گیری میدان جاذبه الکتریکی میان ابرافشانه و سطح گیاه شده و منجر به افزایش جذب و نشست سم بر روی هدف می‌شود (Farooq, Walker, Heintschel, & English, 2010; Yang et al., 2015; Moltó et al., 2017; Haji Agha Alizadeh, Pourvosoughi Gregari, & Bakhtiari, 2018). درافشانه‌های باردارکننده هرچند میزان بار قطرات سم کوچک می‌باشد، ولی نیروی الکتریکی که ذرات را به طرف گیاه می‌کشد، خیلی بزرگ‌تر از نیروی ثقل است، بدین معنی که هنگام رسیدن قطرات سم به اطراف گیاه، جهت حرکت آن‌ها برعکس شده و بر ضد نیروی ثقل به طرف بالا حرکت کرده و تشکیل کمربند الکتریکی^۱ می‌دهند (Mostafaei Minagh, Ghabadian, & Jahannama, 2008). بنابراین، پاشش‌های باردارشده الکتریکی قابلیت انتقال قطرات بیشتر به سطح رویی و زیرین محصول را افزایش، میزان سم مصرفی را کاهش و در نهایت سبب بهبود عملکرد سم‌پاشی در مقایسه با سم‌پاش‌های رایج می‌گردد. علاوه بر این یک کلاهک سم‌پاش الکتروستاتیکی نرخ جریان را تا ۳۱ درصد نسبت به نرخ متداول کاهش می‌دهد. قطرات ایجادشده به‌وسیله کلاهک الکتروستاتیکی تمایل بیشتری دارند که از بین شاخ و برگ اهداف به‌وسیله جریان هوای کمکی عبور کنند. ولی جذب قطرات روی هدف در سم‌پاشی الکتروستاتیکی کم دوام و میزان پاشش روی هدف کم است. در این سیستم بار الکتریکی کافی به قطرات سم القا نشده و همین امر سبب پایین آمدن نشست قطرات سم بر روی هدف می‌گردد (Farooq et al., 2010; Matthews, Bateman, & Miller, 2014).

بررسی تأثیر ترکیبی عواملی مانند نرخ جریان، اندازه قطره و جریان هوا نشان داده است که برای طیف‌های مختلفی از اندازه قطرات، کاهش نرخ جریان موجب چگالی کمتر ابر پاشش می‌شود. قطرات کوچک‌تر در یک ابرپاشش باغلظت کم تمایل بیشتری به بادبردگی دارند، در نتیجه نشست روی هدف کاهش می‌یابد (Farooq et al., 2010).

بالابردن قابلیت اجرایی و بازده سیستم‌ها در فرآیند سم‌پاشی

مواد و روش‌ها

تجهیزات و شرایط آزمایش‌ها

سم پاش: برای انجام آزمایش‌ها از سم‌پاش پشتی موتوری ذره‌ای پاش SH.CO (مدل 423، شرکت مهندسی صنعتی شاخص، ایران) منضم به کلاهک الکتروستاتیکی (ساخت شرکت احسان تحقیق وابسته به مرکز تحقیقات مهندسی جهاد کشاورزی آذربایجان شرقی) با حجم مخزن ۱۲ لیتر، حجم هوا برای افشانک ۶۸۰ متر مکعب در ساعت و سرعت خروج هوا ۱۰۰ متر بر ثانیه استفاده گردید. آزمایش‌ها در بهار و تابستان سال ۱۳۹۵ در کارگاه ماشین‌های کشاورزی گروه مهندسی بیوسیستم دانشکده کشاورزی دانشگاه کردستان انجام شد.

کلاهک الکتروپنایمیکی: مدار الکتریکی با استفاده از نرم‌افزار طراحی مدارهای الکتریکی Proteus Professional 7.9 sp1 طراحی شد و کمترین مقاومت مورد نیاز برای کاهش جریان الکتریکی و خطر برق‌گرفتگی ۱/۱ مگا اهم (با استفاده از سری کردن ۵ عدد مقاومت ۲۲۰ کیلو اهمی) محاسبه شد (Halliday, Resnick, & Walker, 2010). همچنین یک خازن ۳ کیلوولت در سر راه ورودی الکتروود و یک خازن ۶ کیلوولت هر کدام به ظرفیت ۱۰ نانوفاراد در سر راه خروجی الکتروود در کلاهک الکتروستاتیکی قرار گرفت. از خازن‌ها در مدار برای صاف کردن سطح تغییرات ولتاژ مستقیم و در کلاهک الکتروپنایمیکی به‌عنوان فیلتر هم استفاده می‌شود. زیرا خازن‌ها به‌راحتی سیگنال‌های غیرمستقیم AC را عبور می‌دهند ولی مانع عبور سیگنال‌های مستقیم DC می‌شوند. در حالت جریان متناوب خازن‌ها برای کاهش جریان نیز به کار می‌روند. در واقع وقتی ولتاژ خازن‌ها حداکثر است جریان عبوری از آن‌ها صفر خواهد بود. در جریان متناوب خازن مدام شارژ و دشارژ می‌شود و با کاهش ولتاژ روی خازن جریان به حداکثر می‌رسد. این مدار الکتریکی جایگزین مدار الکتروستاتیکی گردید.

تصویر کلاهک الکتروپنایمیکی ساخته شده در این تحقیق در شکل (a-1) و مدار الکتریکی مربوطه در شکل (b-1) نشان داده شده است. در این حالت برای باردار کردن قطرات خروجی، از روش القایی با ولتاژ ۱۲ کیلوولت و جریان الکتریکی ۳۰ میلی‌آمپر استفاده شده است. خروجی مدار ولتاژ بالا به یک حلقه فلزی متصل شد. این حلقه در داخل شیلد واقع در بدنه پلاستیکی محاط بر افشانک و نزدیک به نوک آن قرار گرفته است. الکتروود حلقوی عامل القای بار بر روی مایع می‌باشد (الفاگر)، لذا باید در مجاورت مایع قرار گیرد. الکتروود باید قبل از لحظه خرد شدن مایع به قطرات، اثر خود را روی مایع گذاشته و بار الکتریکی را بر روی آن القا نماید. با توجه به این که مایع خود در پتانسیل زمین می‌باشد، بنابراین با قرار دادن الکتروود حلقوی در مقابل نقطه خروج قطرات از افشانک، می‌توان بار الکتریکی را بر روی مایع،

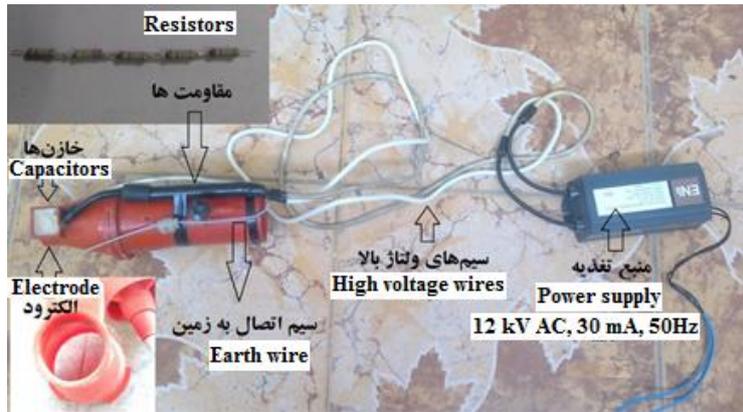
درست قبل از خرد شدن، القا نمود. در این حالت قطرات قبل از خرد شدن، توسط الکتروود باردار می‌شوند و سپس به ذرات باردار ریزی تبدیل می‌شوند. برای جلوگیری از خیس شدن حلقه از یک لایه بسیار نازک برای پوشاندن الکتروود استفاده شد.

انجام آزمایش‌ها: برای ایجاد سطوح مختلف هوا از یک دمنده پره‌ای (پنکه) با قابلیت کنترل سرعت دمنده استفاده شد. پنکه در فاصله یک متر در پشت افشانک و در جهت سم‌پاشی قرار داده شد. سرعت هوا طی آزمایش‌ها توسط بادسنج پره‌ای (LutronAM-4206M, Taiwan) در فاصله یک متری جلو پنکه اندازه‌گیری شد. آزمایش‌ها با توجه به محدودیت زمانی در دو روز مختلف و در دمای هوای ۱۶ درجه سلسیوس برای آزمایش حالت الکتروستاتیکی و ۲۴ درجه سلسیوس برای آزمایش حالت الکتروپنایمیکی و رطوبت نسبی ۴۲/۲۰ درصد برای آزمایش الکتروستاتیکی و ۳۴ درصد برای آزمایش الکتروپنایمیکی انجام گرفت. اندازه‌گیری دما و رطوبت محیط با استفاده از دستگاه رطوبت‌سنج مدل HT-3009 صورت گرفت. از یک صفحه آلومینیومی با ابعاد ۳×۷ سانتی‌متر به‌عنوان هدف استفاده شد. صفحه مذکور در ارتفاع دو متری از سطح زمین بر روی یک پایه فلزی متصل به پتانسیل صفر زمین نصب شد. برای جلوگیری از تاثیر نیروهای الکتریکی بین قطرات و پایه فلزی، پایه توسط پلاستیک عایق کاملاً پوشانیده شد. محل اتصال صفحه آلومینیومی به پایه فلزی لولا بوده تا به‌راحتی بتوان زاویه قرارگیری هدف با سم‌پاش را تغییر داد (شکل ۲).

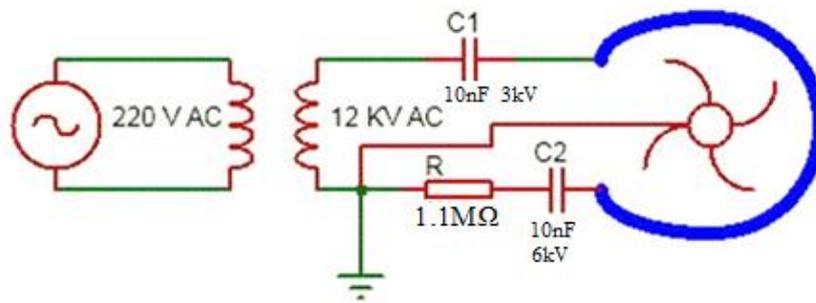
برای بررسی چگونگی نشست قطرات روی سطح جلویی و پشت هدف، کاغذهای حساس به آب (ساخت شرکت کشت‌پوش تهران، ایران) روی سطوح جلویی و پشتی صفحه آلومینیومی قرار داده شد. صفحه مذکور قابل چرخش بوده و در قسمت متحرک آن مقاله‌ای برای تنظیم زاویه کارت‌ها نصب شده است و به‌راحتی می‌توان زاویه قرارگیری کارت حساس به آب را نسبت به راستای جریان افشانک تغییر داد. تصویر دیجیتال کارت‌ها با استفاده از استریومیکروسکوپ مدل OlympusSZX12 با لنز شی‌ای X1 با بزرگ‌نمایی ۷ برابر تهیه شد (شکل ۳).

در مجموع ۸۰ تصویر از کارت‌های حساس به آب تهیه شد: ۲۰ تصویر مربوط به آزمایش الکتروستاتیکی روی هدف، ۲۰ تصویر مربوط به آزمایش الکتروپنایمیکی روی هدف و ۲۰ تصویر مربوط به آزمایش الکتروپنایمیکی پشت هدف، که در این‌جا تصاویر آزمایش الکتروپنایمیکی آورده شده است (شکل ۴).

مساحت پاشش، اندازه و تعداد قطرات به‌عنوان متغیرهای وابسته برای یک سانتی‌متر مربع از هر کدام از تصاویر بزرگ‌نمایی شده به کمک نرم افزارهای پردازش تصویر MountainsMap Trial (شرکت Digital Surf) و DepositScan اندازه‌گیری شد.



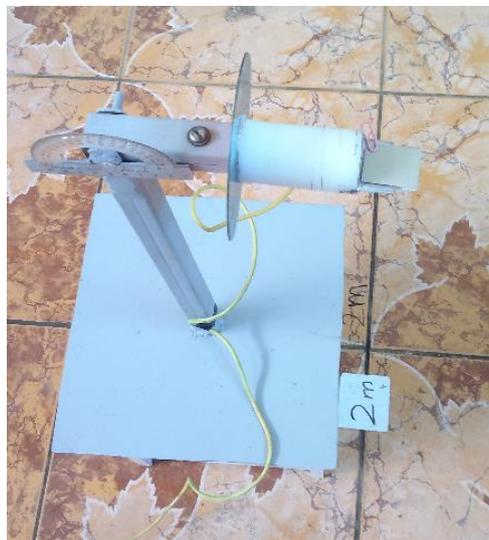
a



b

شکل ۱- a- سامانه هدالکتروودینامیکی، b- مدارالکتریکی سامانه

Fig.1. Electrodynamic spraying head system a) image and b) schematic circuit diagram

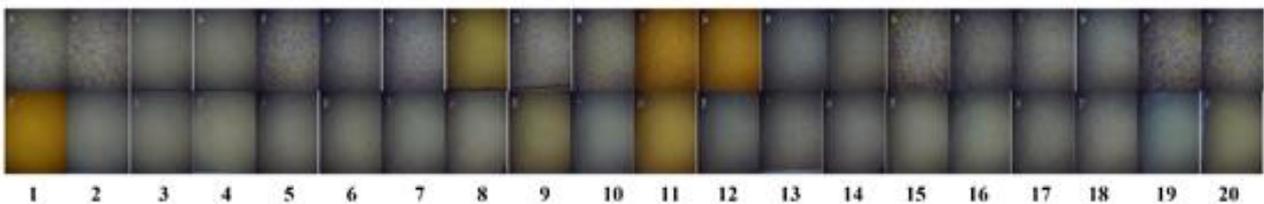


شکل ۲- پایه فلزی متصل به زمین

Fig.2. Metal stand with ground connection



شکل ۳- استریو میکروسکوپ مدل Olympus SZX12 با لنز شی‌ای X1 و بزرگ‌نمایی ۷ برابر
Fig.3. Olympus SZX12 stereo microscope with X1 objective lens and 7x magnification



شکل ۴- نتایج حاصل از آزمایش سم‌پاش الکترودینامیکی روی هدف (ردیف بالا) و پشت هدف (ردیف پایین)
Fig.4. Results of electrodynamic sprayer testing on the upper side of the target (top row) and underside of the target (bottom row)

برخودار هستند، ضریب یکنواختی پاشش کل ($RSFT^2$) از رابطه (۲) محاسبه شد:

$$RSFT = \frac{RSF_u + RSF_d}{2} \quad (2)$$

که در آن، RSF_u و RSF_d به ترتیب بیانگر ضریب یکنواختی پاشش سطح رویی و زیرین هدف می‌باشند.

طرح آزمایش‌ها

به‌منظور ارزیابی اثرات پارامترهای مستقل بر یکنواختی پاشش از روش سطح پاسخ و طرح مرکب مرکزی استفاده شد. فاصله افشانک تا هدف (شامل سه سطح ۰.۲، ۰.۴ و ۰.۶ متری)، زاویه قرارگیری هدف (شامل سه سطح صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه) و سرعت باد (شامل سه سطح ۳، ۲/۵ و ۳/۵ متر بر ثانیه) (Mahmoudi, Heidarbeigi, & Azizpanah, 2019) به‌عنوان پارامترهای تاثیرگذار مستقل در جدول ۱ به‌فرم گذشته و گذشته نشان داده شده‌اند. در روش سطح پاسخ دامنه انتخاب‌شده برای هر فاکتور اهمیت زیادی دارد. دامنه هر فاکتور باید کدبندی شده و در محدوده ۱- تا ۱ قرار گیرد، تا تحلیل رگرسیون

یکنواختی پاشش

متداول‌ترین واژه‌ای که برای تشریح طیف اندازه قطره پاشیده‌شده در کشاورزی به‌کار می‌رود قطر میانه حجمی است ($D_{v0.5}$) که واحد آن میکرون است. دو پارامتر اختیاری دیگر که برای تشریح بیشتر توزیع از میانه استفاده می‌شوند، $D_{v0.1}$ و $D_{v0.9}$ هستند. این پارامترها نسبت حجم پاشش (به ترتیب ۱۰ و ۹۰ درصد) قطراتی با اندازه مورد نظر یا کوچک‌تر را شامل می‌شوند. $D_{v0.1}$ اغلب برای تخمین بخشی از پاشش که قابلیت بادبردگی را دارد به‌کار می‌رود. محدوده مورد نظر یک اندازه‌گیری عرض طیف قطره اطراف $D_{v0.5}$ است و ضریب یکنواختی (محدوده پاشش) RSF^1 با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود (Bayvel & Orzechowski, 1993; Hoffmann & Hewitt, 2005; Cunha *et al.*, 2012; Sayinci, Bastaban & Sánchez-Hermosilla; 2012; Ferguson *et al.*, 2015)

$$RSF = \frac{D_{v0.9} - D_{v0.1}}{D_{v0.5}} \quad (1)$$

از آنجایی که پاشش‌ها در هر دو سمت هدف از اهمیت یکسانی

ترکیب پاسخ‌ها در قالب یک مسئله تک‌پاسخی و بهینه نمودن تابع به‌دست آمده است (Derringer & Suich, 2018). در این روش مطلوبیت آماری بین صفر و یک تعریف شده که مقدار پایین آن بیان‌گر عدم نیل به هدف تعیین‌شده و سطح بالای آن بیان‌کننده نیل به هدف به‌طور کامل می‌باشد. وقتی هدف بهینه کردن چندین پاسخ به‌طور هم‌زمان است، مطلوبیت هر یک از پاسخ‌ها به‌صورت جداگانه مشخص شده و سپس از میانگین هندسی‌شان به‌عنوان معیار برآورده‌کننده هدف‌ها به‌صورت هم‌زمان استفاده می‌شود. به‌منظور بهینه‌سازی پاسخ در این تحقیق از تابع مطلوبیت استفاده شد. در این حالت هر دو پاسخ سیستم (یکنواختی پاشش کل و درصد سطح پاشش) بایستی حداکثر و متغیرهای ورودی در محدوده آزمایش در نظر گرفته شوند.

به‌خوبی انجام پذیرد. در حالت مرکز وجهی حدود بیشینه و کمینه با کد سطح‌های (+1) و (-1) مشخص می‌شوند که تنها اطلاعاتی هستند که با توجه به مطالعات و ایده پژوهش، برای سطوح هر متغیر باید در اختیار نرم‌افزار آماری قرار گیرند. به این ترتیب سطوح دوم یا همان سطوح وسط، با توجه به سه سطح بودن آزمایش‌ها، به‌عنوان سطح صفر یا مرکزی (0)، مقداری بین کمینه و بیشینه است. در آزمایش‌های طراحی شده گاهی لازم است به‌طور هم‌زمان چند پاسخ را بهینه‌سازی کرد. رویکرد معمول برای این کار بهره‌گیری از تابع مطلوبیت برای یافتن مقادیری از عوامل کنترلی است که بیش‌ترین مطلوبیت را ایجاد می‌کنند. این روش که اولین بار توسط هارینگتون (Harrington, 1965) ارائه گردید، برای بهینه‌سازی مستقل چندپاسخی، پرکاربردترین روش است. ایده این روش، بر

جدول ۱- مقادیر متغیرهای مستقل و سطوح اختصاص‌داده‌شده به آن‌ها

Table 1- Values of independent variables and their levels

محدوده و سطوح (کدشده) Bound and Levels (Coded)			نماد Symbol		پارامترهای مستقل Independent parameters
-1	0	1	کدشده Coded	کدنشده Uncoded	
2	4	6	x ₁	D	فاصله افشانک (متر) Nozzle distance (m)
0	45	90	x ₂	β	زاویه قرارگیری (درجه) Angle of placement (deg)
2.5	3	3.5	x ₃	u	سرعت باد (متر برثانیه) Wind speed (m s ⁻¹)

مقدار ضریب یکنواختی پاشش برابر با ۱/۱۸ به‌ترتیب در شرایط آزمایش زاویه قرارگیری هدف ۹۰ درجه، فاصله پاشش ۲ متر و سرعت باد ۲/۵ متر برثانیه به‌دست‌آمده است. نتایج حاصل از تجزیه واریانس برآزش رابطه (۳) بر داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌های آزمایشگاهی برای یکنواختی پاشش کل در جدول ۳ نشان داده شده است.

براساس آنالیز واریانس برای مدل برهم‌کنش دو فاکتور (مقدار P کمتر از ۰/۰۰۰۱، ضریب تبیین ۰/۹۳۸۳، ضریب تبیین مطلق ۰/۹۱۰، انحراف استاندارد ۰/۰۵۹۰ و ضریب تغییرات ۳/۷۹۰٪)، می‌توان بیان داشت که این مدل از دقت بالایی در پیش‌بینی مقادیر یکنواختی پاشش کل برخوردار می‌باشد. مطابق با این نتایج می‌توان بیان داشت که مولفه‌های خطی زاویه پاشش و فاصله پاشش و هم‌چنین برهم‌کنش زاویه پاشش×فاصله پاشش و فاصله پاشش×سرعت هوا دارای تاثیر معنی‌داری بر روی میزان یکنواختی پاشش کل بوده است (p<0.05). با این وجود، مولفه خطی سرعت هوا و برهم‌کنش سرعت هوا×زاویه پاشش فاقد اثر معنی‌داری بر روی تغییرات ضریب یکنواختی پاشش کل بوده است.

به‌منظور بررسی ارتباط بین متغیرهای مستقل با متغیرهای پاسخ از رابطه (۳) استفاده شد (Kathleen, Carley, Kamneva, & Reminga, 2004)

$$Y_i = \alpha_0 + \sum_{i=1}^3 \alpha_i x_i + \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^3 \alpha_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^3 \alpha_j x_i^2 \quad (3)$$

که در آن، y_i پاسخ‌های پیش‌بینی‌شده، x_i متغیرهای کدشده متغیرهای طبیعی (مستقل)، i تعداد متغیرها، α_0 ثابت مدل، α_i ضرایب متغیرهای خطی و α_{ij} ضرایب اثرات متقابل دوگانه متغیرها می‌باشند. جدول ۲ نشان‌دهنده ماتریس طرح مرکب مرکزی با ۲۰ واحد آزمایشی (با ۶ نقطه مرکزی) می‌باشد. برای کاهش مقدار خطا، هر کدام از آزمایش‌ها در سه تکرار انجام و مقدار میانگین به‌عنوان نتیجه بیان شد.

نتایج و بحث

مطابق با جدول ۲، حداکثر مقدار ضریب یکنواختی پاشش کل برابر با ۱/۹۵ برای زاویه پاشش صفر درجه، فاصله ۶ متری و سرعت ۳/۵ متر بر ثانیه به‌دست‌آمده است. این در حالی است که کم‌ترین

جدول ۲- طرح مرکب مرکزی استفاده شده در آزمایش‌ها و مقادیر اندازه‌گیری شده پاسخ‌ها

Table 2- Central composite design used in the experiments and the resulting response

Run no.	β (degree)	D (m)	u (m s ⁻¹)	Response (Y)				
				RSFT	Cov (%)	Dv _{0.1} (μm)	Dv _{0.5} (μm)	Dv _{0.9} (μm)
1	0	2	2.50	1.52	21.88	162.62	408.43	782.10
2	90	2	2.50	1.18	27.98	225.34	466.85	777.74
3	0	6	2.50	1.70	7.08	116.24	269.97	574.86
4	90	6	2.50	1.83	7.18	98.00	268.73	588.50
5	0	2	3.50	1.33	19.58	223.14	411.54	769.36
6	90	2	3.50	1.25	30.68	185.90	493.39	804.00
7	0	6	3.50	1.95	6.78	91.80	250.50	580.08
8	90	6	3.50	1.81	6.88	80.56	246.41	525.76
9	0	4	3.00	1.62	22.73	148.45	325.42	676.60
10	90	4	3.00	1.52	26.33	147.45	347.10	674.00
11	45	2	3.00	1.32	25.93	199.25	442.46	783.30
12	45	6	3.00	1.82	7.13	96.65	258.60	567.30
13	45	4	2.50	1.56	21.93	150.55	340.78	680.80
14	45	4	3.50	1.58	21.13	145.35	331.09	669.80
15	45	4	3.00	1.55	24.19	147.95	342.64	680.10
16	45	4	3.00	1.61	23.72	147.95	337.31	674.80
17	45	4	3.00	1.57	23.01	147.95	334.39	672.20
18	45	4	3.00	1.50	23.78	147.95	352.10	676.10
19	45	4	3.00	1.59	24.01	147.95	344.52	675.30
20	45	4	3.00	1.51	23.19	147.95	341.40	673.01

نتایج حاصل از برازش مدل ریاضی درجه دوم بر داده‌های آزمایش در جدول ۴ نشان داده شده است. مقادیر R^2 ، $Adj-R^2$ ، CV و Press برای مدل انطباق داده شده بر داده‌های آزمایش، درصد پوشش سطح کاغذ حساس به آب به ترتیب برابر با ۰/۹۹۵۷، ۰/۹۹۱۹، ۳/۶۱٪ و ۸۰/۶۰ به دست آمده است. همچنین مقدار عدم برازش برای مدل ریاضی ذکر شده معنی‌دار نشده است ($p < 0.05$). این امر بیان‌گر دقت مناسب مدل در پیش‌بینی مقدار سطح پوشش کاغذ حساس به آب می‌باشد. مطابق این نتایج می‌توان بیان داشت که مولفه‌های خطی زاویه پاشش و فاصله پاشش، مولفه برهم‌کنش زاویه \times فاصله پاشش و توان دوم مولفه‌های فاصله پاشش و سرعت هوا بر روی مقدار پوشش سطح سم‌پاشی دارای تاثیر معنی‌داری می‌باشند. همچنین مولفه خطی سرعت باد، اثر متقابل سرعت باد \times زاویه قرارگیری هدف، اثر متقابل سرعت باد \times فاصله افشانک و مولفه توان دوم زاویه قرارگیری هدف فاقد تاثیر معنی‌داری بر درصد پوشش می‌باشند ($p > 0.05$). از میان سه متغیر ورودی، فاصله پاشش دارای بیش‌ترین تاثیر بر روی مقدار سطح پوشش کاغذ حساس به آب می‌باشد. در سطوح بالای زاویه پاشش به‌خصوص در زاویه پاشش ۹۰ درجه، با افزایش فاصله از ۲ تا ۴ متر، ضریب یکنواختی پاشش از ۱/۱۸ در سرعت باد ۲/۵ متر بر ثانیه به ۱/۸۴ در سرعت باد ۳/۵ متر بر ثانیه افزایش یافته است (شکل ۵).

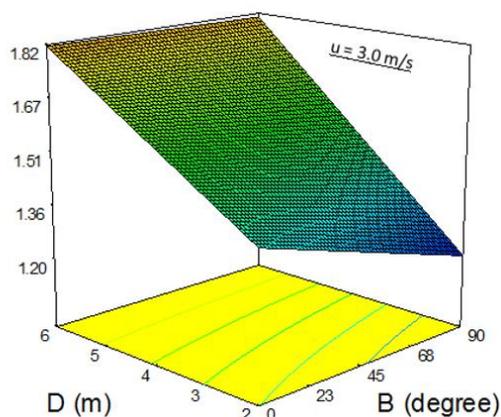
با توجه به جدول تجزیه واریانس (مقادیر F-value) تاثیر فاصله پاشش بر ضریب یکنواختی پاشش به مراتب بیش‌تر از اثر زاویه پاشش می‌باشد. نمودار سطح پاسخ برای ضریب یکنواختی پاشش بر حسب متغیرهای ورودی در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، می‌توان بیان داشت که ضریب یکنواختی پاشش با افزایش فاصله پاشش و کاهش زاویه پاشش، افزایش یافته است. دلیل آن می‌تواند این باشد که در فواصل کمتر، نشست قطرات پاشیده شده در سطح رویی و زیرین هدف بیش‌تر است و از تلاقی و به هم پیوستگی این قطرات، ذراتی با قطر میانه حجمی بالاتر تشکیل می‌شود. این نتیجه با یافته‌های پژوهش‌گرانی که بر روی سم‌پاش‌های الکتروستاتیکی تحقیق کرده‌اند مطابقت دارد (Sasaki *et al.*, 2012; Haji Agha Alizadeh *et al.*, 2018; Jahannama & Zhao, Castle, & Adamiak, 2008). الگوی جذب و نشست قطرات محلول سم دارای بارالکتریکی را مطالعه نموده و دریافتند که دگرگونی در مقدار فاصله بین افشانک و هدف، در عملکرد افشانک بی‌تاثیر است. اما به هر حال کاهش این فاصله علاوه بر تقویت نسبی توان باردار کردن قطرات توسط افشانک، باعث افزایش میزان القای بار الکتریکی خواهد شد. تغییرات ضریب یکنواختی پاشش کل را می‌توان این‌گونه بیان داشت (رابطه ۴):

$$RSFT = 1.659 - 0.00328\beta + 0.0313D + 5.69 \times 10^{-4}\beta \times D + 0.044D \times u \quad (4)$$

جدول ۳- نتایج حاصل از برازش مدل ریاضی بر داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها برای ضریب یکنواختی پاشش کل

Table 3- The results of mathematical model fitting on derived data from experiments for uniformity coefficient of total spraying

منبع تغییرات Source of Variations	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات Mean squares (MS)	مقدار F- F-Value	مقدار احتمال P-Value
مدل Model	6	0.120	32.97	< 0.0001
زاویه قرارگیری هدف β	1	0.028	7.98	0.0143
فاصله افشانک تا هدف D	1	0.630	179.01	< 0.0001
سرعت باد u	1	0.0017	0.48	0.5005
$\beta \times D$ متقابل (Interaction)	1	0.019	5.97	0.0296
$\beta \times u$ متقابل (Interaction)	1	0.00001	0.004	0.9534
$D \times u$ متقابل (Interaction)	1	0.015	4.35	0.0573
باقیمانده Residual	13	0.003		
عدم برازش Lack of Fit	8	0.005	2.37	0.1785
خطای خالص Pure Error	5	0.002		
Cor Total	19			
ضریب تعیین R^2	0.9383			
ضریب تعیین تعدیل‌شده Adj R^2	0.9100			
انحراف معیار Std. Dev.	0.0590			
ضریب تغییرات % C.V. %	3.790			
مجموع مربعات خطای پیش‌بینی PRESS	0.480			



شکل ۵- نمودار سطح پاسخ برای تغییرات ضریب یکنواختی پاشش کل بر حسب پارامترهای مستقل در سرعت هوای ۳ متر بر ثانیه

Fig.5. Response surface graph for uniformity coefficient variations of total spraying based on independent parameters at 3 m s^{-1} wind speed

جدول ۴- نتایج حاصل از برازش مدل ریاضی درجه دوم بر داده‌های درصد پوشش کاغذ حساس به آب

Table 4- The results of quadratic mathematical model fitting on derived data from water sensitive paper coverage percentage

منبع تغییرات Source of Variations	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات Mean squares (MS)	مقدار F- F-Value	مقدار احتمال P-Value
مدل Model	9	131.96	259.04	< 0.0001
زاویه قرارگیری هدف B	1	44.10	86.69	0.0001
فاصله افشانک تا هدف D	1	828.10	1627.79	< 0.0001
سرعت باد U	1	0.10	0.20	0.6669
$\beta \times D$ اثر متقابل (Interaction)	1	36.13	71.01	< 0.0001
$\beta \times u$ اثر متقابل (Interaction)	1	3.13	6.14	0.0326
$D \times u$ اثر متقابل (Interaction)	1	0.13	0.25	0.6308
β^2	1	3.57	7.03	0.0243
D^2	1	129.41	254.39	< 0.0001
u^2	1	9.51	18.70	0.0015
باقیمانده Residual	10	0.51		
عدم برازش Lack of Fit	5	0.80	3.78	0.0854
خطای خالص Pure Error	5	0.21		
Cor Total	19			
ضریب تعیین R^2	0.9957			
ضریب تعیین تعدیل شده Adj R^2	0.9919			
انحراف معیار Std. Dev.	0.710			
ضریب تغییرات % C.V. %	3.61			
مجموع مربعات خطای پیش‌بینی PRESS	80.60			

یافته‌های (Sasaki *et al.*, 2012; Zhao *et al.*, 2008) می‌باشد. مطابق با کانتورهای تغییرات سطح پاشش (شکل‌های ۶ و ۷) می‌توان بیان داشت برای تمام سطوح سرعت هوا، در محدوده فاصله پاشش ۴ تا ۶ متر با افزایش زاویه پاشش، تغییری در مقدار سطح پاشش مشاهده نشده است ($p > 0.05$). این در حالی است که در محدوده فاصله پاشش ۲ الی ۴ متر، با افزایش زاویه پاشش مقدار سطح پاشش به‌طور معنی‌داری افزایش یافته است ($p < 0.05$). خلاصه‌ای از نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق حاضر و مقایسه آن‌ها با نتایج به‌دست‌آمده توسط سایر پژوهشگران در جدول ۵ نشان داده شده است.

به‌طور کلی افزایش فاصله افشانک تا هدف منجر به کاهش میزان پوشش سطحی روی هدف خواهد شد. علت این امر، افت شدت میدان الکترودینامیکی و تضعیف القای الکترودینامیکی و افت بیش‌تر بار در اثر افزایش فاصله افشانک و هدف است (Sasaki *et al.*, 2012; Haji Agha Alizadeh *et al.*, 2018; Zhao *et al.*, 2008). این در حالی است که در سطوح پایین زاویه پاشش (برای مثال زاویه صفر درجه)، در ابتدا با افزایش فاصله پاشش از ۲ تا ۳ متر، مقدار پاشش افزایش یافته و بعد از آن با شیب تندی کاهش می‌یابد. در سمپاشی الکترودینامیکی یکنواختی نشست ذرات در سطح زیرین هدف، نسبتاً مشابه بوده که دلیل آن را می‌توان به تاثیر کمربند الکتریکی تشکیل‌شده در پیرامون هدف ربط داد که هم‌سو با

نتیجه‌گیری

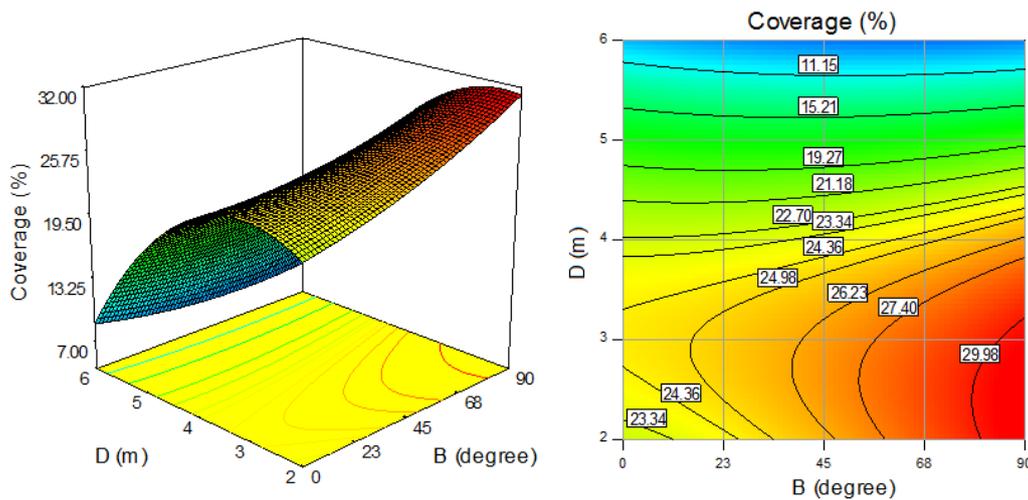
به‌منظور بهبود عملکرد سم‌پاش پشتی موتوری ذره‌ای‌پاش، کلاهک پاشش الکترودینامیکی طراحی و ساخته شد و با استفاده از طرح مرکب مرکزی روش سطح پاسخ عملکرد آن بهینه‌سازی شد. طی فرآیند تحقیق، تاثیر پارامترهای مستقل فاصله افشانک تا هدف، زاویه استقرار هدف و سرعت باد بر روی متغیرهای یکنواختی پاشش، درصد سطح پاشش و نیز درصد تغییرات ضریب پاشش کل مورد بحث و بررسی قرار گرفت. نتایج پژوهش نشان داد که ضریب یکنواختی پاشش با افزایش فاصله پاشش و کاهش زاویه پاشش، افزایش یافته است. به‌طور کلی به علت به هم پیوستگی کم‌تر قطرات ریز، قطر میانه حجمی قطرات نشست کرده روی سطح زیرین هدف، نسبت به سطح رویی هدف دارای مقادیر بسیار کم‌تر بوده که اثرات مثبتی از جمله کم شدن میزان محلول مصرفی خواهد داشت. به دلیل احتمال برخورد قطرات کوچک با یکدیگر در سطح رویی و تشکیل قطرات بزرگ‌تر و همچنین نابسامانی در نشست قطرات، میزان یکنواختی نشست کمتر است.

براساس نتایج به‌دست‌آمده پارامترهای زاویه پاشش و فاصله پاشش و همچنین برهم‌کنش زاویه پاشش×فاصله پاشش و فاصله پاشش×سرعت هوا دارای تاثیر معنی‌داری بر روی میزان یکنواختی پاشش کل بوده است ($p < 0.05$)؛ ولی سرعت هوا و برهم‌کنش سرعت هوا×زاویه پاشش فاقد اثر معنی‌داری بر روی تغییرات ضریب یکنواختی پاشش کل بودند.

براساس نتایج به‌دست‌آمده شاخص یکنواختی پاشش هرچه به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد پاشش یکنواخت‌تر خواهد بود و اگر این نسبت بیش‌تر از ۴/۲ باشد، کیفیت پایین سم‌پاشی را نشان می‌دهد. همچنین مقدار میانگین نشست قطرات در سانتی‌متر مربع روی هدف، با استفاده از سم‌پاش الکترودینامیکی بیش‌تر از الکتروستاتیکی است. با توجه به این‌که بادبردگی سم‌پاش الکترودینامیکی کم‌تر از الکتروستاتیکی محاسبه شد؛ لذا، نشست قطره روی هدف نیز برای این سم‌پاش بیش‌تر خواهد بود، در نتیجه از تلفات مواد شیمیایی و آلودگی محیط‌زیست کاسته می‌شود. اضافه می‌نماید که برای سم‌پاش الکترودینامیکی توزیع اندازه قطره بهتری گزارش شد، به این معنا که تفاوت اندازه قطرات در این سم‌پاش کم‌تر است، در نتیجه بادبردگی کم‌تر و پوشش بهتری خواهد داشت.

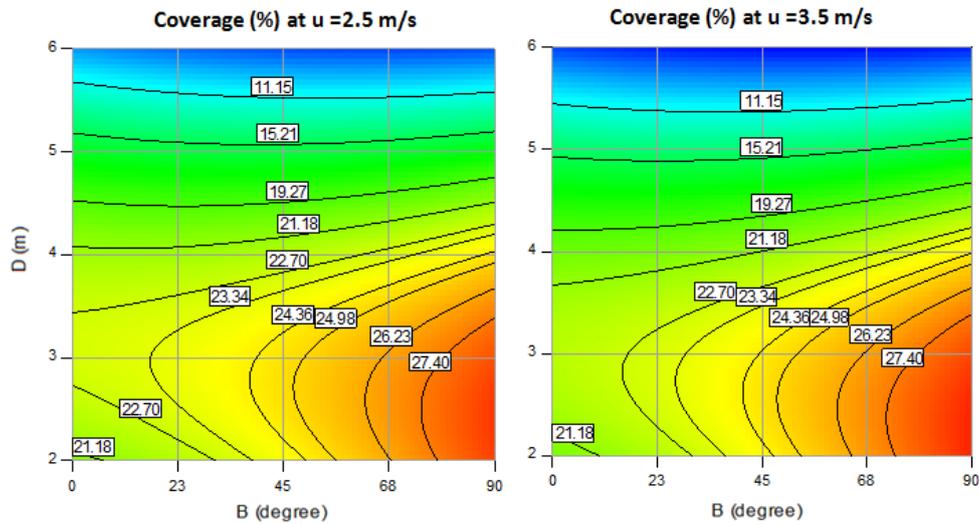
بهینه‌سازی و اعتبارسنجی

نتایج به‌دست‌آمده از فرآیند بهینه‌سازی و اعتبارسنجی در جدول ۶ نشان داده شده است. مطابق با نتایج به‌دست‌آمده، شرایط حالت بهینه برای کلاهک الکترودینامیکی ساخته‌شده برابر خواهد بود با زاویه پاشش ۹۰ درجه، فاصله پاشش ۲/۵ متر و سرعت هوا ۳/۵ متر بر ثانیه با مطلوبیت ۰/۷۹۲. مقدار یکنواختی پاشش کل و درصد سطح پاشش در حالت عملکرد بهینه به ترتیب برابر با ۱/۶۸ و ۲۹/۵۳٪ می‌باشند. نتایج حاصل از اعتبارسنجی آزمایشگاهی برای شرایط بهینه نشان داد که مقدار یکنواختی پاشش کل و درصد سطح پاشش به ترتیب برابر با ۱/۶۵ و ۲۸/۲۷٪ می‌باشد.



شکل ۶- نمودار سطح پاسخ و کانتورهای تغییرات درصد سطح پاشش کل بر حسب پارامترهای مستقل در سرعت هوای ۳ متر بر ثانیه

Fig.6. Response surface graph and contour of total spraying coverage percentage based on the independent parameters at 3ms^{-1} wind speed



شکل ۷- کانتورهای سطح پاسخ تغییرات درصد پاشش کل بر حسب پارامترهای مستقل در سطوح سرعت هوای ۲/۵ و ۳/۵ متر بر ثانیه
Fig.7. Response surface contour of total spraying percentage based on the independent parameters at 2.5 and 3.5 ms⁻¹ wind speeds

جدول ۵- خلاصه‌ای از نتایج تحقیق حاضر و مقایسه آن‌ها با نتایج به‌دست‌آمده توسط سایر پژوهشگران

Table 5- Summary of the results of the current research in comparison with the results obtained by other researchers

نتایج تحقیق دیگران در سم پاش‌های الکتروستاتیکی The results of other researchers on electrostatic sprayers	سم پاش پشتی موتوریزه ذره‌ای پاش الکتروستاتیکی مدل SH.CO (تحقیق حاضر) Electrostatic atomizer motorized knapsack sprayer SH-CO (Current research)	سم پاش الکتروستاتیکی (تحقیق حاضر) Electrodynamic sprayer (Current research)	محل اندازه‌گیری Location of measurement	پارامتر Parameter
87.5 (Mozafari, 2010)	83.45	99.55	روی هدف on target	مقدار میانگین قطر میانه عددی (NMD) The average value of the numerical median diameter (NMD) (μm)
78.5 (Mozafari, 2010)	78	77.6	پشت هدف underside of the target	
3.58 (Kumar Narang et al., 2015)	3.61	3.31	روی هدف on target	مقدار میانگین ضریب یکنواختی پاشش * VMD/NMD
3.73 (Kumar Narang et al., 2015)	3.93	3.95	پشت هدف underside of the target	The average value of the uniformity coefficient of spraying VMD/NMD
173-364 (Kumar Narang et al., 2015)	291	332	روی هدف on target	مقدار میانگین نشست قطرات در هر سانتی‌متر مربع (برحسب تعداد قطرات)
38-65 (Mostafaei Minagh et al., 2008)	64	55	پشت هدف underside of the target	The average droplet deposition per square centimeter (in terms of the number of droplets)
1.6 (Mishra et al., 2014)	1.72	1.57	روی هدف on target	مقدار میانگین فاکتور توزیع اندازه قطره The average value of the relative diameter span factor (RSF)

* یکنواختی پاشش برای سم پاش الکتروستاتیکی اندکی بیشتر از سم پاش الکتروستاتیکی بود.

* The spray uniformity of the electrodynamic sprayer was slightly higher than the electrostatic sprayer.

جدول ۶- نتایج حاصل از بهینه‌سازی و اعتبارسنجی

Table 6- The results of optimization and validation

نتایج به‌دست‌آمده از اعتبارسنجی		مطلوبیت تابع	نتایج به‌دست‌آمده از نرم‌افزار		نقطه بهینه به‌دست‌آمده		
Validation results		Desirability function	The results obtained from the software		The obtained optimal point		
Cov (%)	RSFT	0.792	Cov (%)	RSFT	u (m s ⁻¹)	β (deg)	D (m)
28.27	1.65		29.53	1.68	3.5	90	2.5

متر با افزایش زاویه پاشش، تغییری در مقدار سطح پاشش مشاهده نشد و این در حالی است که در محدوده فاصله پاشش ۲ الی ۴ متر، با افزایش زاویه پاشش مقدار سطح پاشش به‌طور معنی‌داری افزایش یافته است ($p < 0.05$).

نتایج تحقیق منجر به تعیین سرعت ۳/۵ متربرثانیه باد، فاصله ۲/۵ متر افشانک و زاویه پاشش ۹۰ درجه با مطلوبیت ۰/۷۹۲ به‌عنوان شرایط بهینه عملکرد کلاهدک الکتروپاشی سم‌پاش مورد نظر گردید.

تأثیر فاصله پاشش بر ضریب یکنواختی پاشش به مراتب بیش‌تر از اثر زاویه پاشش بود. در زاویه پاشش ۹۰ درجه، با افزایش فاصله از ۲ تا ۴ متر، ضریب یکنواختی پاشش از ۱/۱۸ در سرعت باد ۲/۵ متر بر ثانیه به ۱/۸۴ در سرعت باد ۳/۵ متر بر ثانیه افزایش یافته است. افزایش فاصله افشانک تا هدف، میزان پوشش سطحی روی هدف را کاهش داد. یکنواختی نشست ذرات در سطح زیرین هدف، در سمپاشی الکتروپاشی نسبتاً یکسان بود. برای تمام سطوح سرعت هوا، در محدوده فاصله پاشش ۴ تا ۶

References

- Ahmad, F., Khaliq, A., Qiu, B., & Sultan, M. (2021). *Advancements of spraying technology in agriculture*. In book: *Technology in Agriculture* (pp.19). Publisher: IntechOpen Limited, London, UK. <https://doi.org/10.5772/intechopen.98500>
- Amirshaghghi, F., & Safari, M. (2016). Comparison and technical evaluation of electrostatic, micronair and tractor mounted lance sprayers in order to control (*Carpocosa pomonella* L.) in apple orchards. *Journal of Agricultural Machinery*, 6(2), 376-383. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.v6i2.36084>
- Asaei, H., Jafari, A., & Loghavi, M. (2016). Development and evaluation of a targeted orchard sprayer using machine vision technology. *Journal of Agricultural Machinery*, 6(2), 362-375. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.v6i2.37220>
- Bayvel, L. P., & Orzechowski, Z. (1993). *Liquid atomization*. Taylor & Francis, Washington, DC.462P.
- Behzadi Pour, F., Ghasemi Nejad Raeeni, M., Asoodar, M. A., Marzban, A., & Abdanan Mehdizadeh, S. (2017). Study of the operational parameters of crops turbine sprayer (turbo liner) on spray quality and diameter of droplets, using image processing. *Journal of Agricultural Machinery*, 7(1), 61-72. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.v7i1.48194>
- Cunha, M., Carvalho, C., & Marcal, A. R. S. (2012). Assessing the ability of image processing software to analysis spray quality on water-sensitive papers used as artificial targets. *Biosystems Engineering*, 3(1), 11-23. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.10.002>
- Derringer, G., & Suich, R. (1980) (Published online: 22 Feb 2018). Simultaneous optimization of several response variables. *Journal of Quality Technology*, 12(4), 214-219. <https://doi.org/10.1080/00224065.1980.11980968> (accessed 30-01, 2023).
- Farooq, M., Walker, T. W., Heintschel, B. P., & English, T. (2010). Impact of electrostatic and conventional sprayers characteristics on dispersion of barrier spray. *Journal of the American Mosquito Control Association*, 26(4), 422-429. <https://doi.org/10.2987/09-5891.1>
- Ferguson, J. C., O'Donnell, Ch. C., Chauhan, B. S., Adkins, S. W., Kruger, G. R., Wang, R., Ferreira, P. H. U., & Hewitt, A. J. (2015). Determining the uniformity and consistency of droplet size across spray drift reducing nozzles in a wind tunnel. *Crop Protection*, 76, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.06.008>
- Haji Agha Alizadeh, H., Pourvosoughi Gregari, H., & Bakhtiari, A. A. (2018). Evaluation of the functional factors of electrostatic spraying on the top and back surfaces of leaves, using image processing. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 47(1), 39-49. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2016.58476>
- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2010). *Fundamentals of Physics*, 9th Edition, Wiley. 1136P.
- Hoffmann, W. C., & Hewitt, A. J. (2005). Comparison of three imaging systems for water sensitive papers. *American Society of Agricultural Engineers*, 21(6), 961-964. <https://doi.org/10.13031/2013.20026>
- Harrington, E. C. (1965). The Desirability Function. *Industrial Quality Control*, 21, 494-498.
- Indu Baghel, A. S., Bhardwaj, A., & Ibrahim, W. (2022). Optimization of pesticides spray on crops in agriculture

- using machine learning. *Computational Intelligence and Neuroscience*, Article ID 9408535, 10 pages. <https://doi.org/10.1155/2022/9408535>
15. Jahannama, M. R., & Salehi, H. (2011). Patterns of spray attraction and deposition due to electrical charging. *Sharif Mechanical Engineering Journal*, 3-27(1), 3-14. (in Persian with English abstract).
 16. Kathleen, M., Carley, N., Kamneva, Y., & Reminga, J. (2004). *Response surface methodology*. CASOS. Technical Report. CMU-ISRI-04, 136P.
 17. Kumar Narang, M., Mishra, A., Kumar, V., Singh Thakur, S., & Singh, M. (2015). Comparative evaluation of spraying technology in cotton belt of Punjab (India). *Journal of Agricultural Engineering*, 1, 61-71.
 18. Matthews, G., Bateman, A., & Miller, P. (2014). *Pesticide Application Methods*, 4th Edition. John Wiley and Sons, Ltd. 536 P.
 19. Mahmoudi, F., Heidarbeigi, K., & Azizpanah, A. (2019). Evaluation of the effect of pressure and wind speed on the amount of drift through the image processing method. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 50, 213-221. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijbse.2018.262469.665076>
 20. Mozafari, M. (2010). *Technical and economic investigation and comparison of the performance of sprayers with different mechanisms and their effect on onion thrips control*. Agricultural Engineering Research Institute, Karaj, Iran. 46P. (In Persian).
 21. McNearney, E. J., & Hons, B. E. (2020). *Analysis of droplet-target interactions in electrostatically charged spraying systems*. A Thesis of Master of Engineering, in Electrical and Electronic Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand. 94 P.
 22. Mishra, P. K., Singh, M., Sharma, A., Sharma, K., & Singh, B. (2014). Studies on effect of electrostatic spraying in orchards. *Agricultural Engineering International, CIGR Journal*, 16(3), 60-69.
 23. Mostafaei Minagh, B., Ghoobadian, B., & Jahannama, M. R. (2008). Design and development of a greenhouse electrostatic sprayer and evaluation. *Journal of Agricultural Science*, 18(1), 229-242. (in Persian with English abstract).
 24. Mousavi, A. M., & Baradaran Motie, J. (2021). *Design of an electrostatic attachment set for use in drone sprayers*. 13th National Congress on Biosystems Engineering and Agricultural Mechanization, Tehran, Iran.
 25. Patel, M. K. (2016). Technological improvements in electrostatic spraying and its impact to agriculture during the last decade and future research perspectives– A review. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 9(1), 92-100. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2015.09.006>
 26. Moltó, E., Chueca, P., Garcerá, C., Balsari, P., Gil, E., & van de Zande, J. C. (2017). Engineering approaches for reducing spray drift. *Biosystems Engineering*, 154, 1-2. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.01.002>
 27. Sasaki, S. R., Teixeira, M. M., Fernandes, H. C., Monterio, P. M. B., Rodrigues, D. E., & Alvarenga, C. B. (2012). *Effect of space on droplets electrical charge during electrostatic spraying*. International Conference of Agricultural Engineering- CIGR-AgEng: agriculture and engineering for a healthier life, Valencia, Spain, 8-12 July 2012.
 28. Sayinci, B., Bastaban, S., & Sánchez-Hermosilla, J. (2012). Determination of optimal spot roundness variation interval for droplet size analysis on water sensitive paper. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 14, 285-298. <https://doi.org/10.1001.1.16807073.2012.14.2.11.3>
 29. Witek-Krowiak, A., Chojnacka, K., Podstawczyk, D., Dawiec, A., & Pokomeda, K. (2014). Application of response surface methodology and artificial neural network methods in modeling and optimization of biosorption process. *Bioresource Technology*, 160, 150-160. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.021>
 30. Yang, Z., Niu, M., Li, J., Xu, X., Xu, J., & Chen, Z. (2015). Design and experiment of an electrostatic sprayer with online mixing system for orchard. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 31, 60-67. <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2015.21.008>
 31. Zhang, Y. L., Lian, Q., & Zhang, W. (2017). Design and test of a six-rotor unmanned aerial vehicle (UAV) electrostatic spraying system for crop protection. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 10, 68-76. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20171006.3460>
 32. Zhao, S., Castle, G. S. P., & Adamiak, K. (2008). Factors affecting deposition in electrostatic pesticide spraying. *Journal of Electrostatics*, 66(11-12), 594-601. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2008.06.009>

Research Article

Vol. 14, No. 2, 2024, p. 163-176

Simulation of Natural Frequencies of Orange Fruit Using Finite Element Method

V. Kahrizi¹, E. Ahmadi^{1*}, A. R. Shoshtari²

1- Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

(*- Corresponding Author Email: eahmadi@basu.ac.ir)

Received: 13 December 2022

Revised: 16 April 2023

Accepted: 24 April 2023

Available Online: 24 April 2023

How to cite this article:

Kahrizi, V., Ahmadi, E., & Shoshtari, A. R. (2024). Simulation of Natural Frequencies of Orange Fruit Using Finite Element Method. *Journal of Agricultural Machinery*, 14(2), 163-176. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2023.80039.1137>

Introduction

The growing consumer demand for high-quality products has led to the development of new technologies for assessing the quality of agricultural products. Iran is the 9th largest orange producer in the world. Every year, large quantities of agricultural products lose their optimal quality due to mechanical and physical damage during various operations such as harvesting, packaging, transportation, sorting, processing, and storage. This study is performed to identify the natural frequencies and vibration modes of the Thomson orange fruit using finite element modal analysis by ANSYS software. In addition, physical properties including mass, volume, density, and principal dimensions were measured, and mechanical properties were determined using Instron Texture Profile Analysis. The dynamic behavior of the orange fruit was simulated using the pendulum impact test. Afterward, the obtained impact was applied to the orange fruit by force gauge and three-axis accelerometer sensors in both polar and equatorial directions. The three-dimensional geometric model of the orange fruit was drawn in the ANSYS software. After meshing and applying the boundary conditions, the first 20 modes and corresponding natural frequencies were obtained. Since the objective of this study was to identify the natural frequencies of the orange fruit, it was considered to have free movement and rotation in space. The results showed that the natural frequencies of orange fruit are in the range of 0 to 248.41 Hz. Knowledge of the texture characteristics and dynamic behavior of horticultural products is essential for the design and development of agricultural machinery. Furthermore, the design and development of agricultural machinery are directly related to the biological properties of agricultural products.

Materials and Methods

The Thomson orange variety was used in the present study. The oranges used for the experiments were harvested from the Citrus and Subtropical Fruits Research Institute in Ramsar, Iran, located at coordinates 50° 40' E and 36° 52' N. The oranges were subsequently divided into two groups: large (average diameter 82 mm) and small (average diameter 66 mm). Conducting the finite element analysis requires knowledge of the physical and mechanical properties of the flesh and skin of the orange fruit. The physical and mechanical properties of the tested samples include geometric dimensions, modulus of elasticity, Poisson's ratio, and density. In the present study, the dynamic behavior of the orange fruit under dynamic loads was investigated by performing an impact test using a pendulum. The orange fruit was hung from the ceiling using a thin thread to perform experimental tests and extract the modal parameters. The orange samples were subjected to impact at three angles: 7° (below the yield point), 10° (at the dynamic yield point), and 20° (above the dynamic yield point).

Results and Discussion

The comparison of the experimental (laboratory) natural frequencies and simulation validates the simulation results. The experimental natural frequencies of the first, second, and third modes in the large-group oranges are



©2023 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jam.2023.80039.1137>

125.4, 146.9, and 180.4 Hz, respectively. Additionally, the simulation (modal) frequencies are 133.80, 146.16, and 196.66 Hz for the first three modes, respectively. The lowest and the highest differences were observed in the second (0.5%) and third (9.01%) modes, respectively. In the small-group oranges, the first, second, and third modes have experimental natural frequencies of 152.2, 188.8, and 242.2 Hz, respectively, and simulation frequencies are 167.79, 187.50, and 248.30 Hz. The second and first modes exhibited the smallest and largest disparities between experimental and simulated natural frequencies, respectively, at 0.68% and 10.24%.

Conclusion

While there are certain limitations, it is undeniable that Computer Aided Engineering (CAE) applications are advantageous for predicting the natural frequencies and vibration modes of spherical fruits such as oranges. Utilizing the obtained frequencies, especially the resonance frequency and the vibrational mode shape, enables us to avoid the resonance frequency in the actual transportation of oranges. This is possible through the implementation of suitable packaging and transportation methods, thereby mitigating the deterioration of fruit quality and ensuring an accurate prediction of its shelf life.

Keywords: Dynamic Behavior Modeling, Modal Analysis, Vibration modes

مقاله پژوهشی

جلد ۱۴، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۳، ص ۱۷۶-۱۶۳

شبیه‌سازی فرکانس‌های طبیعی میوه پرتقال با استفاده از روش اجزای محدود

وحید کهریزی^۱، ابراهیم احمدی^{۲*}، علی‌رضا شوشتری^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۰۴

چکیده

سالانه مقادیر زیادی از محصولات کشاورزی در اثر بارهای دینامیکی و سایر آسیب‌های مکانیکی که از طرف اجزای متحرک ماشین‌ها هنگام برداشت، حمل و نقل، انبار کردن و بسته‌بندی به آن‌ها وارد می‌شود از بین می‌روند یا دچار افت کیفیت می‌شوند. این در حالی است که تاکنون بیشتر تحقیق‌های انجام‌شده برای تجزیه و تحلیل عملیات‌های مذکور با آزمون‌های عملی همراه بوده است و نتایج آن فقط در شرایط خاص می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. هدف از این مطالعه شناسایی فرکانس‌های طبیعی و مودهای ارتعاشی در میوه پرتقال رقم تامسون با استفاده از روش آنالیز مودال اجزای محدود می‌باشد. به منظور شبیه‌سازی رفتار دینامیکی میوه پرتقال از آزمون پاندول به‌وسیله حسگرهای نیروسنج و شتاب‌سنج سه‌محوره در دو راستای قطبی و استوایی به میوه پرتقال ضربه وارد شد. مدل هندسی سه‌بعدی میوه پرتقال در نرم‌افزار انسیس ترسیم شد و با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی مشخص، خواص فیزیکی و مکانیکی پوست و گوشت میوه پرتقال تعیین گردید. پس از مرحله شبکه‌بندی و اعمال شرایط مرزی، ۲۰ مود اول و فرکانس‌های طبیعی متناظر با آن به‌دست‌آمد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که فرکانس‌های طبیعی میوه پرتقال در محدوده ۰ تا ۲۴۸/۴۱ هرتز می‌باشد. از نتایج این تحقیق می‌توان در طراحی ماشین‌های برداشت و بهینه‌سازی مکانیزم‌های پس از برداشت و حمل و نقل به‌منظور کاهش ضایعات استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: آنالیز مودال، مدل‌سازی رفتار دینامیکی، مودهای ارتعاشی

مقدمه

به‌وسیله کامپیوتر، کمک شایانی در شناخت خواص فیزیکی و مکانیکی محصولات کشاورزی کرده‌اند. افزایش توانمندی ساخت‌افزایی و نرم‌افزاری به مهندسان اجازه می‌دهد مسائل پیچیده را با فناوری طراحی به کمک کامپیوتر و روش‌های عددی به‌صورت مجازی بدون ساخت فیزیکی و انجام آزمایش حل کنند. از آن‌جا که برداشت، بسته‌بندی، درجه‌بندی و فرآوری مرکبات در بیشتر کشورهای پیشرفته به‌صورت مکانیزه می‌باشد، اهمیت و توسعه آن در ایران با توجه به تولید و سطح زیر کشت، حائز اهمیت می‌باشد. تلاش‌های بسیاری در چند دهه گذشته برای به‌کار گرفتن شیوه‌های نوین برای کنترل کیفی غیرمخرب محصولات کشاورزی انجام شده است. این روش‌ها مبتنی بر یافتن ویژگی‌های مکانیکی و رفتار دینامیکی مرتبط با شاخص‌های رسیدگی محصولات می‌باشد. روش‌های مورد استفاده برای به‌دست‌آوردن کیفیت میوه، توسط آزمون‌های غیرمخرب امروزه جایگاه ویژه‌ای در فرآوری محصولات کشاورزی پیدا کرده‌اند (Mizrach, 2007). تاکنون چندین گزارش علمی در مورد روش آنالیز مودال اجزای محدود در مورد میوه‌هایی مثل هندوانه، طالبی، گلابی، سیب، گوجه‌فرنگی و قهوه ارائه شده است (Abbaszadeh et al., 2014; Seyedabadi,

امروزه افزایش تقاضای مصرف‌کنندگان برای محصول با کیفیت بالا، منجر به توسعه فن‌آوری‌های جدید برای ارزیابی کیفی محصولات کشاورزی شده است. مرکبات از جمله محصولات باغی می‌باشد که از جایگاه ویژه‌ای در زمینه اشتغال و ارزآوری برخوردار هستند و علاوه بر مصارف تازه‌خوری در صنعت فرآوری و تولید آب میوه نیز استفاده می‌شود. سالانه مقدار زیادی از محصولات کشاورزی در اثر عدم شناخت کافی از ویژگی فیزیکی و مکانیکی محصولات در عملیات مختلف از جمله برداشت، حمل و نقل و بسته‌بندی از بین می‌روند (Chen & Opara, 2013). امروزه روش‌های تحلیلی

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۲- استاد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۳- استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

* نویسنده مسئول: (Email: eahmadi@basu.ac.ir)

doi <https://doi.org/10.22067/jam.2023.80039.1137>

گیرد و فرکانس ارتعاش اجباری خارجی با فرکانس طبیعی آن برابر باشد، رزونانس اتفاق می‌افتد. پس از آن دامنه ارتعاش سیستم به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. پدیده رزونانس می‌تواند به سیستم آسیب جدی رسانده و عمر آن را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد. بنابراین ضروری است که پارامترهای دینامیکی میوه پرتقال را به‌منظور طراحی ماشین‌های برداشت، حمل و نقل، درجه‌بندی و بسته‌بندی به‌دست آورد و شبیه‌سازی نمود.

مواد و روش‌ها

مبانی آنالیز مودال تجربی

به‌طور کلی رفتار دینامیکی یک سیستم جرم- فنر و میراکننده به‌وسیله معادله حرکت دیفرانسیل خطی مرتبه دوم به‌صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود.

$$M\ddot{X}(t) + C\dot{X}(t) + KX(t) = F(t) \quad (1)$$

در رابطه (۱)، $X(t)$ بردار جابه‌جایی به‌عنوان تابعی از زمان، M ماتریس جرم یا ماتریس اینرسی، C ماتریس میرایی، K ماتریس سفتی سیستم و $F(t)$ بردار نیروی اعمال‌شده به‌عنوان تابعی از زمان می‌باشد. از این معادله فرکانس‌های طبیعی سیستم در حوزه خطی الاستیک به‌دست می‌آید. مدل مودال به‌وسیله ماتریسی از توابع پاسخ فرکانسی $H(\omega)$ که به‌وسیله نسبت سیگنال پاسخ $\dot{X}(\omega)$ به سیگنال ورودی $F(\omega)$ در حوزه فرکانسی محاسبه می‌شوند.

$$H(\omega) = \frac{\dot{X}(\omega)}{F(\omega)} \quad (2)$$

در مرحله دوم، پارامترهای مودال با استفاده از روش‌های برآورد پارامتر غیرخطی استخراج می‌شوند. برآورد قطب‌ها (فرکانس‌ها و میرایی) در حوزه فرکانس به روش نمایشی حداقل مربعات به‌دست می‌آیند. اگر $H(\omega)$ ماتریسی با n_i درجه آزادی ورودی و n_o درجه آزادی خروجی باشد، برای هر المان h_{ij} می‌توان نوشت.

$$h_{ij}(\omega) = \sum_{k=1}^N \left[\frac{r_{ijk}}{(j\omega - \lambda_k)} + \frac{r_{ijk}^*}{(j\omega - \lambda_k^*)} \right] \quad (3)$$

رابطه مربوط به حوزه زمان به‌صورت رابطه (۴) می‌باشد.

$$h_{ij}(t) = \sum_{k=1}^N (r_{ijk} \cdot e^{\lambda_k t} + r_{ijk}^* \cdot e^{\lambda_k^* t}) \quad (4)$$

در معادلات فوق، $h_{ij}(\omega)$ تابع پاسخ فرکانسی^۳ بین پاسخ (یا خروجی) و مرجع (ورودی یا تحریک‌شده) و $h_{ij}(t)$ پاسخ پالسی^۴ بین ورودی و خروجی می‌باشد. N تعداد مودهای ارتعاشی به‌منظور ساختار پاسخ دینامیکی است که در داخل محدوده فرکانسی شرکت می‌کنند. r_{ijk} مقدار باقی‌مانده برای مود K, r_{ijk}^* مزدوج مختلط^۵ از مقدار باقی‌مانده از مود k, λ_k مقدار قطب برای مود k, λ_k^* مزدوج مختلط از

Khojastehpour, & Sadrnia, 2015; Celik, 2017; Celik, Rennie, & Akinci, 2011; Kabas, Celik, Ozmerzi, & Akinci, 2008; Salarikia, Miraei Ashtiani, Golzarian, & Mohammadinezhad, 2017; Yousefi, Farsi, & Kheiralipour, 2016; Tinoco, Ocampo, Pena, & Sanz-Urbe, 2014).

به‌طور کلی، محققان با استفاده از مدل‌سازی ریاضی و شبیه‌سازی مکانیکی، با استفاده از روش اجزای محدود، تحقیقاتی را برای تعیین ویژگی‌های مودال سیستم‌های بیولوژیکی انجام داده‌اند (Villibor, Santos, Queiroz, Khoury Junior, & Pinto, 2019; Tinoco & Peñna, 2018; Coelho, Santos, Queiroz, & Pinto, 2016; Santos, Queiroz, Valente, & Coelho, 2015; Tinoco et al., 2014; Gao, Song, & Rao, 2018) با همهی ویژگی‌های شبیه‌سازی، طراحان زیادی از گذشته تا به حال تمام عزم خود را جزم نموده‌اند که شبیه‌سازی خود را به واقعیت نزدیک‌تر، دقت طراحی بالاتر، بازده بالاتر و عملکرد بهینه‌تری را طراحی کنند. همواره تحقیقات متعددی با روش تحلیل المان محدود بر روی محصولات مختلف کشاورزی موجود می‌باشد، اما اغلب تحقیقاتی که در زمینه تحلیل خواص مکانیکی محصولات کشاورزی به‌وسیله روش المان محدود انجام گرفته‌شده بر روی میوه‌هایی چون سیب و گلابی بوده است (Gyeong-Won, Gab-Soo, & Yasuyuki, 2008; Lu, Srivastava, & Ababneh, 2006).

بدون پایگاه داده از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی محصولات کشاورزی، مهندسان و طراحان باید با استفاده از روش‌های تجربی به طراحی ماشین‌های کشاورزی و تجهیزات پردازند که این امر از لحاظ زمان و هزینه ناکارآمد است. ضربه مکانیکی، به‌عنوان یک عامل مهم باعث خسارت محصولات کشاورزی در هنگام برداشت و پس از برداشت شناخته شده است. با توجه به گسترش دانش کامپیوتری و در دسترس بودن این فناوری می‌توان برای حل مسائل پیچیده با استفاده از طراحی به کمک کامپیوتر^۱ بدون نیاز به واقعیت فیزیکی، آن را شبیه‌سازی کرد (Celik et al., 2011). با این حال شبیه‌سازی رفتار میوه پرتقال با استفاده از آنالیز مودال اجزای محدود تحت بار دینامیکی ضربه گزارش نشده است. به کمک نتایج به‌دست‌آمده از آزمون مودال می‌توان صحت طراحی و ساخت تجهیزات را بررسی و در صورت نیاز جهت بهینه‌سازی و بهبود آن‌ها اقدام نمود. همچنین می‌توان نحوه عملکرد سیستم به‌ازای نیروهای مختلف که ممکن است در شرایط کاری پیش‌بینی و از وقوع پدیده‌های مخرب همچون تشدید پیشگیری نمود. رزونانس^۲ یا تشدید زمانی اتفاق می‌افتد که فرکانس تحریک خارجی با فرکانس طبیعی سیستم یکسان شود. اگر یک سیستم در معرض ارتعاش اجباری خارجی قرار

3- Frequency response function

4- Pulse response

5- Complex conjugate

1- Computer aided design

2- Resonance

۰/۰۰۱ گرم و برای اندازه‌گیری ابعاد پرتقال از کولیس دیجیتال با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر استفاده شد. چگالی از نسبت جرم نمونه در آب به اختلاف جرم نمونه در هوا و جرم نمونه در آب تعیین شد (Mohsenin, 1986).

در این تحقیق پرتقال‌های تامسون به دو گروه کوچک و بزرگ تقسیم شدند. از هر دسته، ۶۰ پرتقال برای اندازه‌گیری خواص فیزیکی انتخاب شد. قطر متوسط نمونه‌های کوچک ۶۶ میلی‌متر، قطر متوسط نمونه‌های بزرگ ۸۲ میلی‌متر، ضخامت پوست میوه پرتقال ۳ میلی‌متر و جرم حجمی میوه پرتقال و پوست آن به ترتیب ۸۹۰ و ۹۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب اندازه‌گیری شدند.

تعیین خواص مکانیکی

آزمایش‌های مکانیکی بر روی گوشت و پوست میوه پرتقال با استفاده از دستگاه آنالیز بافت^۴ اینسترون (Zowick/roell) مدل (Bbt1-Fro.5th.D14) مجهز به نیروسنج (مدل X Force Hp با ظرفیت ۵۰۰ نیوتن با مشخصه ۲ میلی‌ولت بر ولت) ساخت کشور آلمان موجود در آزمایشگاه گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه بوعلی سینا صورت گرفت. به منظور استخراج پارامترهایی از قبیل مدول یانگ، تنش تسلیم و نیروی شکست برای پوست و گوشت میوه پرتقال به‌عنوان برخی ورودی‌های مدل‌سازی المان محدود (به‌صورت الاستیک خطی) در نرم‌افزار انسیس استفاده شد. نمونه‌های مورد آزمایش به‌صورت کاملاً تصادفی انتخاب شدند. آزمایش پانچری^۵ (نفوذی) به‌صورت جداگانه در ۱۰ تکرار با استفاده از پروب‌های استوانه‌ای ۱۱/۳۵ و ۴/۵ میلی‌متری و سرعت بارگذاری ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه به ترتیب برای گوشت و پوست میوه پرتقال انجام شد. آزمایش پانچری بر روی گوشت میوه پرتقال در راستای عرضی (قطر استوایی) انجام شد. منظور از بارگذاری عرضی در این آزمایش‌ها، هم‌راستا بودن بردار نیرو در جهت عمود بر محور طوقه و دم نمونه است.

آزمایش‌های پاندولی

در این پژوهش به‌منظور بررسی رفتار دینامیکی میوه پرتقال تحت بارهای دینامیکی از آزمون ضربه با استفاده از پاندول انجام شد. پاندول شامل بازویی به طول ۰/۵۵۷ متر با یک محفظه آلومینیومی شکاف‌دار برای قرارگیری حسگر نیروسنج و یک ضربه‌زن محدب شکل از جنس تفلون (با شعاع انحنا ۲۵ میلی‌متر) می‌باشد. این دستگاه مجهز به حسگرهای نیروسنج (PCB 208c02, PCB Pizotronics, USA, sensitivity: 10.97 mV/N) و شتاب‌سنج سه‌محوری پیزوالکتریک (PCB 356A26, PCB Pizotronics, USA, sensitivity: 50.1 mV/g (X), 50.6 mV/g (Y), 49.08 mV/g (Z)) می‌باشد که تحت زوایای مختلف با استفاده از ضربه‌زن

مقدار قطب برای مود k می‌باشد.

قطب مود k می‌تواند به‌صورت رابطه (۵) بیان شود (Couck, Ketelaere, & Baerdemaeker, 2003).

$$\lambda_k = C_K + j \cdot \omega_{dk} \quad (5)$$

در رابطه (۵) قسمت حقیقی از قطب، C_K ، مقدار میرایی از مود K می‌باشد. سیستم‌های فیزیکی همیشه مقدار میرایی منفی دارند زیرا بزرگی آن با زمان کاهش می‌یابد. قسمت موهومی از رابطه (۵)، ω_{dk} ، بیانگر فرکانس طبیعی مستهلک‌شونده^۱ از مود K می‌باشد. نسبت میرایی^۲، Z ، نسبت میرایی به مقدار میرایی بحرانی است که با رابطه (۶) بیان می‌شود.

$$z = \frac{c}{c_{crit}} \times 100 \quad (6)$$

فرکانس طبیعی میرا به‌صورت رابطه (۷) بیان می‌شود.

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - Z^2} \quad (7)$$

که ω_n فرکانس طبیعی نامیرا^۳ و ω_d فرکانس طبیعی میرا بر حسب رادیان بر ثانیه (rad s^{-1}) می‌باشند.

هنگامی که فرکانس‌های طبیعی و مقادیر میرایی به‌دست آیند، ضرایب شکل مود یا باقیمانده می‌توانند با استفاده از روش دامنه فرکانس حداقل مربعات مشخص شوند. قطب‌ها، فرکانس‌های طبیعی، فاکتورهای میرایی، شکل‌های مود و باقیمانده معمولاً به‌عنوان پارامترهای مودال اشاره می‌شود و می‌توانند از آزمایش‌های دینامیکی حاصل شوند (Coucke et al., 2003).

تهیه نمونه‌ها و انجام آزمایش‌های تجربی

پرتقال مورد استفاده در آزمایش‌ها وارسته تامسون می‌باشد. برای انجام آزمایش‌ها تعداد معینی پرتقال از پژوهشکده مرکبات و میوه‌های نیمه‌گرمسیری واقع در شهرستان رامسر (در شمال کشور ایران) از توابع استان مازندران برداشت شد. برای جلوگیری از وارد آمدن هرگونه صدمه به میوه، برداشت به‌صورت دستی انجام شد و پرتقال‌ها به دقت در جعبه‌های پلاستیکی به‌صورت یک ردیفه جهت حمل به آزمایشگاه خواص مکانیکی و رئولوژی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا قرار داده شدند. سپس میوه‌ها در یخچال در دمای ۴ درجه سلسیوس نگهداری شدند. پرتقال‌ها در دو دسته با اندازه‌های کوچک و بزرگ جداسازی شدند و قبل از انجام آزمایش‌ها پرتقال‌ها در دمای محیط آزمایشگاه قرار داده می‌شدند تا با دمای محیط هم‌دم شوند.

تعیین خواص فیزیکی

مشخصات هندسی و خصوصیات فیزیکی شامل جرم، ابعاد (قطر بزرگ، قطر متوسط و قطر کوچک) و چگالی در محیط آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری جرم از ترازو دیجیتال با دقت

4- Texture Profile Analysis
5- Puncture

1- Damped natural frequency
2- Damping ratio
3- Undamped natural frequency

نیروسنج و شتاب‌سنج کالیبره شدند. نرخ نمونه‌برداری ۷۵۰ نمونه در ثانیه و ۲۰۴۸ داده در محدوده فرکانس صفر تا ۳۷۵ هرتز با فواصل فرکانسی ۰/۱۸۳ انجام شد. نوع پنجره^۴ در دستگاه چهارکاناله پردازش سیگنال برای انجام آزمون‌های ضربه‌ای، هانینگ^۵ انتخاب شد. همچنین انتقال داده‌ها از حوزه زمان به حوزه فرکانس، با استفاده از نرم‌افزار متلب^۶ و همچنین کدنویسی در این نرم‌افزار و استفاده از تبدیل فوری سریع^۷ (FFT) می‌توان تمام مراحل شناسایی سیستم از وارد کردن داده‌ها، فیلتر کردن آن‌ها، شناسایی سیستم و در نهایت نشان دادن پارامترهای مودال به دست آمده را در یک محیط گرافیکی برای پرتقال‌های گروه بزرگ و کوچک انجام داد. در این پژوهش هر آزمایش در ۵ تکرار انجام شد و در راستای قطبی (۲ سطح ضربه)، راستای استوایی (۲ سطح ضربه)، تحت زوایای ۷، ۱۰ و ۲۰ درجه (۳ سطح ضربه) نیرو به میوه پرتقال وارد گردید. تعداد کل آزمایش‌ها برای هر کدام از نمونه‌های کوچک و بزرگ میوه پرتقال که به صورت کاملاً تصادفی انتخاب می‌شدند در جدول ۱ ارائه شده است.

شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار انسیس

به طور کلی، شبیه‌سازی اجزای محدود شامل سه مرحله می‌باشد که عبارتند از: پیش‌پردازش (ایجاد مدل هندسی سه‌بعدی، اختصاص خواص مواد به مدل سه‌بعدی، انتخاب نوع تحلیل، شبکه‌بندی مدل و تعیین شرایط مرزی مناسب)، پردازش (حل) و در نهایت پس از پردازش (تجسم نتایج محاسبه‌شده) (Entwistle, 2001). در مطالعه‌ای سلیک (Celik, 2017) و همچنین سالاری‌کیا و همکاران (Salarikia et al., 2017) یک مدل هندسی از کل میوه به منظور محدود کردن عدم قطعیت‌های ناشی از خواص هندسی نامنظم از سلول‌ها برای بافت پوست و گوشت پیشنهاد کردند. خطاهای رایج در المان محدود می‌تواند ناشی از عدم قطعیت‌های انتخاب نوع المان، شکل هندسی، خواص ماده و شرایط مرزی باشد (Celik, 2017; Fadji, Coetzee, Berry, & Opara, 2019). ابتدا در ماژول مودال نرم‌افزار انسیس پس از ایجاد مدل هندسی سه‌بعدی، خواص میوه پرتقال برای پوست و گوشت تعریف شد. در این پژوهش مطابق مقاله جیاسی و همکاران (Gyasi, Fridley, & Chen, 1981) نسبت پواسون برای گوشت و پوست میوه پرتقال به ترتیب ۰/۴۴۹ و ۰/۳۴۰ در نظر گرفته شد. سپس در محیط طراحی نرم‌افزار انسیس، مدل هندسی سه‌بعدی طراحی شد (قطر گوشت میوه پرتقال در گروه بزرگ و کوچک به ترتیب ۷۶ میلی‌متر و ۶۰ میلی‌متر و همچنین ضخامت پوست میوه پرتقال ۳ میلی‌متر اندازه‌گیری شد).

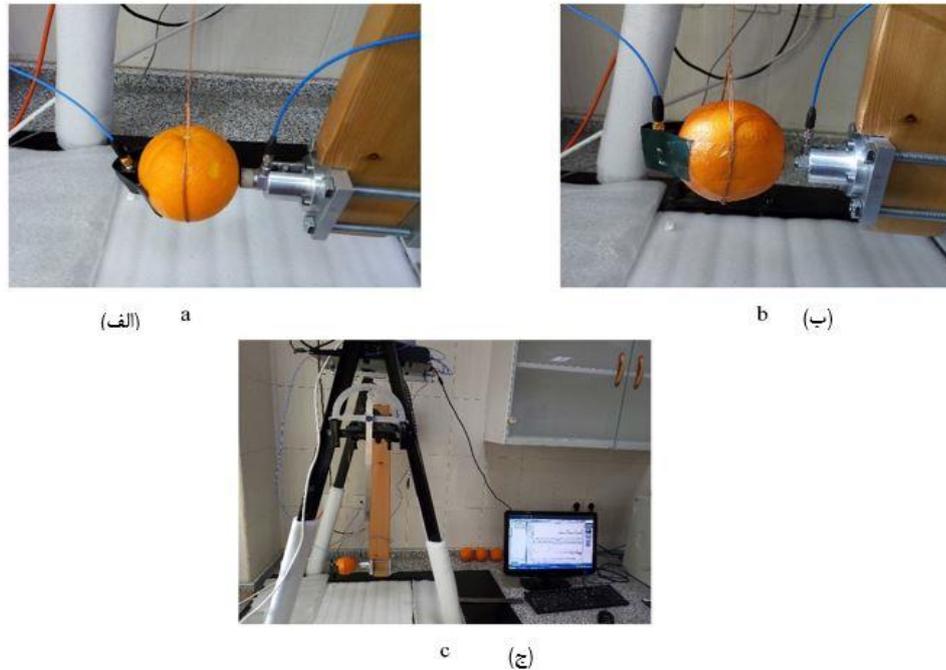
به پرتقال نیرو وارد شد و داده‌های نیروی برخورد و شتاب در راستای سه محور در مدت زمان اعمال ضربه با استفاده از دستگاه چهار کاناله پردازش سیگنال (ECON, AVANT Lite, model: MI-6004) استخراج گردید (Ahmadi & Barikloo, 2016 a, b). قبل از انجام آزمایش‌های پاندولی نقطه تسلیم دینامیکی برای نمونه‌های پرتقال تعیین گردید. بر اساس روش ضربه چندگانه با ارتفاع ثابت (CHMI) برای تعیین نقطه تسلیم دینامیکی از منحنی نیرو- زمان استفاده شد. به این صورت که عدم تغییر در منحنی نیرو- زمان در یک انرژی ثابت با تکرارهای ضربه متوالی در یک نقطه روی محصول، نشان‌دهنده شروع نشدن تغییر شکل پلاستیک می‌باشد (Ahmadi & Barikloo, 2016 a, b). بنابراین با افزایش انرژی ضربه تحت یک زاویه مشخص و بر اساس روش سعی و خطا، نقطه تسلیم دینامیکی تحت زاویه ۱۰ درجه برای میوه پرتقال رقم تامسون تعیین گردید. به منظور انجام آزمایش‌های تجربی و استخراج پارامترهای مودال، میوه پرتقال مطابق شکل ۱ با استفاده از یک نخ از سقف آویزان شد. ضربه وارد بر نمونه‌های پرتقال تحت سه زاویه ۷، ۱۰ و ۲۰ درجه به ترتیب زیر نقطه تسلیم، نقطه تسلیم دینامیکی و بالای نقطه تسلیم دینامیکی وارد گردید. برای هر کدام از زوایای فوق در راستای قطبی و استوایی به نمونه‌های پرتقال نیرو (ورودی) وارد شد به طوری که دقیقاً در طرف مقابل نیروسنج، پاسخ دینامیکی توسط حسگر شتاب‌سنج سه‌محوره (خروجی) به دستگاه پردازش سیگنال ارسال و سپس در کامپیوتر ذخیره شدند. همواره تبدیل یک سیگنال از حوزه‌ای به حوزه‌ای دیگر ممکن است. استفاده از تبدیل فوری و تبدیل معکوس آن، این امکان را می‌دهد که سیگنالی را از حوزه‌ی زمان به حوزه‌ی فرکانس و بالعکس، منتقل کرد. اما ملاحظاتی که در مورد میزان محاسبات، سهولت تفسیر داده و روش‌های کاهش نویز وجود دارد؛ انتخاب نهایی در مورد تبدیل سیگنال‌ها از یک حوزه به حوزه‌ی دیگر را روشن می‌کند. استفاده از توابع طیفی و به اصطلاح، کار در حوزه فرکانس بسیار ساده‌تر از کار در حوزه‌ی زمان است. دلیل این موضوع می‌تواند تجزیه سیگنال‌های پیچیده به قسمت‌های ساده‌تر جهت تسهیل در تحلیل آن‌ها و همچنین تبدیل عملگرهای کانولوشن^۲ و معادلات دیفرانسیل در حوزه‌ی زمان به عملگرهای جبری در حوزه فرکانس باشد. از روش‌هایی که شناسایی را در حوزه فرکانس و با استفاده از توابع طیفی انجام می‌دهد می‌توان روش برگزینش قله^۳ را به منظور تعیین فرکانس‌های طبیعی نام برد. به منظور استخراج پارامترهای مودال با استفاده از دستگاه چهارکاناله پردازش سیگنال (ECON, AVANT Lite, model: MI-6004)، ابتدا حسگرهای

4- Window Type
5- Hanning
6- Matlab
7- Fast Fourier Transform

1- Constant-Height Multiple-Impact technique
2- Convolution
3- Peak picking

تغییر چندانی نداشت (استقلال از شبکه برای نتایج خروجی). بنابراین بهترین حالت ممکن به لحاظ کمترین زمان حل و بهترین جواب برای گوشت و پوست میوه پرتقال به صورت جداگانه، شبکه‌بندی از نوع تتراهدرال (المان هرمی چهار وجهی) به ترتیب با اندازه‌های ۵ و ۴/۵ میلی‌متری در نظر گرفته شد (شکل ۲).

پس از تعریف ماده و ایجاد مدل هندسی سه‌بعدی، مرحله شبکه‌بندی می‌باشد. با توجه به این‌که ویژگی‌های المان‌ها در تحلیل المان محدود تاثیر زیادی دارد، باید شبکه‌بندی با اندازه و انواع مختلف المان انجام شود. به منظور انجام آنالیز مودال، در مرحله شبکه‌بندی آنالیز حساسیت انجام شد. با افزایش یا کاهش اندازه شبکه، نتایج خروجی آنالیز مودال اجزای محدود که همان فرکانس‌های طبیعی می‌باشند



شکل ۱- آزمایش پاندولی برای نمونه‌های پرتقال: (الف) راستای قطبی، (ب) راستای استوایی و (ج) دستگاه آزمون پاندولی و حسگرهای نیرو و شتاب‌سنج سه‌محوره

Fig.1. Pendulum test of orange samples: (a) Polar direction, (b) Equatorial direction, and (c) Pendulum impact test setup, force sensor, and three-axis accelerometer sensor

(گوشت و پوست) می‌باشد که برای هر جسم به صورت جداگانه شش درجه آزادی به اشتباه در نظر گرفته شده است. بنابراین بین گوشت و پوست میوه پرتقال به اندازه $0/01$ میلی‌متر تماس ایجاد شد که پوست میوه پرتقال به عنوان جسم هدف^۲ و گوشت میوه پرتقال به عنوان جسم تماس^۳ در نظر گرفته شد (جدول ۲).

به منظور بررسی استقلال از شبکه، نمودار فرکانس مود اول برحسب تعداد المان‌ها در سه حالت با اندازه المان‌های (گوشت ۵ mm و پوست ۴/۵ mm)، (گوشت ۴ mm و پوست ۳/۵ mm)، (گوشت ۳ mm و پوست ۲/۵ mm) به ترتیب با تعداد المان‌های ۲۲۵۷۴، ۴۲۹۳۷ و ۱۱۱۵۸۸ برای یک گروه از پرتقال‌ها (گروه بزرگ) در شکل ۳ مقایسه شد. همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است، بهترین حالت

تعداد گره‌ها و المان‌ها در میوه پرتقال در گروه بزرگ برای گوشت به ترتیب ۲۲۸۴۲ و ۱۵۸۸۹ و تعداد گره‌ها و المان‌ها برای پوست میوه پرتقال به ترتیب ۱۳۱۵۷ و ۶۶۸۵ به دست آمد (جدول ۲). همچنین تعداد گره‌ها و المان‌ها در میوه پرتقال در گروه کوچک برای گوشت به ترتیب ۱۱۶۷۸ و ۷۹۴۲ و تعداد گره‌ها و المان‌ها برای پوست میوه پرتقال به ترتیب ۸۵۲۸ و ۴۳۵۵ به دست آمد (جدول ۳). در نرم‌افزار انسیس جهت ایجاد تماس بین گوشت و پوست میوه پرتقال برای یکپارچه شدن آن‌ها به منظور به دست آوردن فرکانس‌های مودال، از تماس نوع به هم چسبیده^۱ به صورت متقارن استفاده شد که نتایج رضایت‌بخشی مشاهده شد. در صورت عدم تعریف تماس بین گوشت و پوست میوه پرتقال در هنگام شبیه‌سازی در نرم‌افزار انسیس، دوازده مود اول صفر می‌شوند که این ناشی از حرکت آزاد هر کدام از دو جسم

2- Target Bodies
3- Contact Bodies

1- Bonded

ممکن به لحاظ کمترین زمان حل و بهترین جواب تعداد المان‌های انتخاب شد. ۲۲۵۷۴ با اندازه المان ۵ mm برای گوشت و ۴/۵ mm برای پوست

جدول ۱- مقادیر مربوط به تعداد آزمایش‌ها

Table 1- Number of the conducted tests

تعداد کل آزمایش‌ها Total number of tests	تعداد تکرار Replicates	نیرو Force	راستای استوایی Equatorial direction	راستای قطبی Polar direction	نمونه مورد آزمایش Sample
60	5	3	2	2	بزرگ (Large)
60	5	3	2	2	کوچک (Small)

جدول ۲- پارامترهای مشخص‌کننده خصوصیات مش FEM از هندسه اعمال شده در مدل برای پرتقال‌های گروه بزرگ

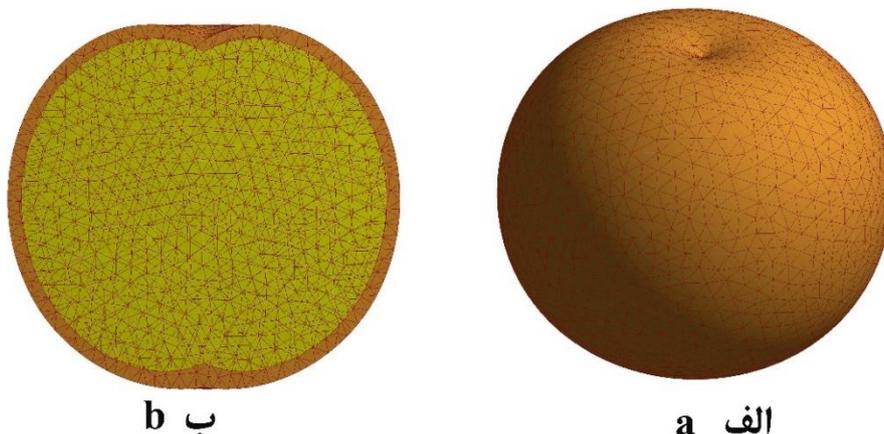
Table 2- Parameters characterizing the properties of the FEM mesh of each geometry applied in the model for large group oranges (group A)

Part	نوع المان Element type	اندازه المان Element size (mm)	تعداد گره‌ها Number of nodes	تعداد المان Number of elements	نوع تماس Contact type	تماس بخش‌ها Contact between the parts (mm)
گوشت Flesh	3D Tetrahedrons	5	22842	15889	Bonded (به هم چسبیده)	0.01
پوست Skin	3D Tetrahedrons	4.5	13157	6685	Bonded (به هم چسبیده)	

جدول ۳- پارامترهای مشخص‌کننده خصوصیات مش FEM از هندسه اعمال شده در مدل برای پرتقال‌های گروه کوچک

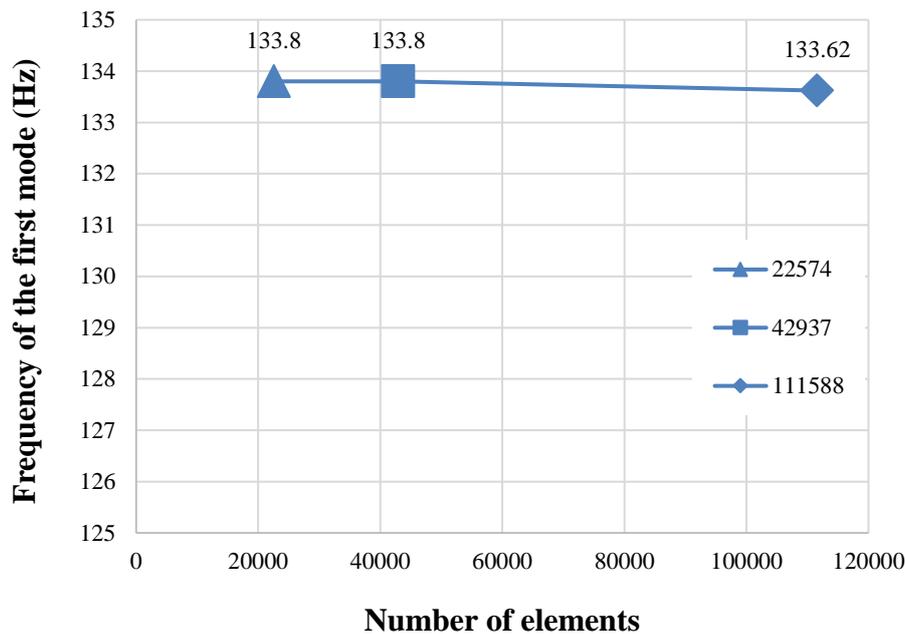
Table 3- Parameters characterizing the properties of the FEM mesh of each geometry applied in the model for small group oranges (group B)

Part	نوع المان Element type	اندازه المان Element size (mm)	تعداد گره‌ها Number of nodes	تعداد المان Number of elements	نوع تماس Contact type	تماس بخش‌ها Contact between the parts (mm)
گوشت Flesh	3D Tetrahedrons	5	11678	7942	Bonded (به هم چسبیده)	0.01
پوست Skin	3D Tetrahedrons	4.5	8528	4355	Bonded (به هم چسبیده)	



شکل ۲- شبکه سه‌بعدی تتراهدرال؛ (الف) میوه پرتقال کامل، (ب) نیم‌رخ میوه پرتقال

Fig.2. 3D tetrahedral mesh; (a) Whole orange fruit, (b) Orange fruit section cut showing the flesh and the skin



شکل ۳- نمودار فرکانس مود اول برحسب تعداد المان‌ها جهت تعیین استقلال از شبکه

Fig.3. Frequency diagram of the first mode with different number of elements to determine independence from the mesh size

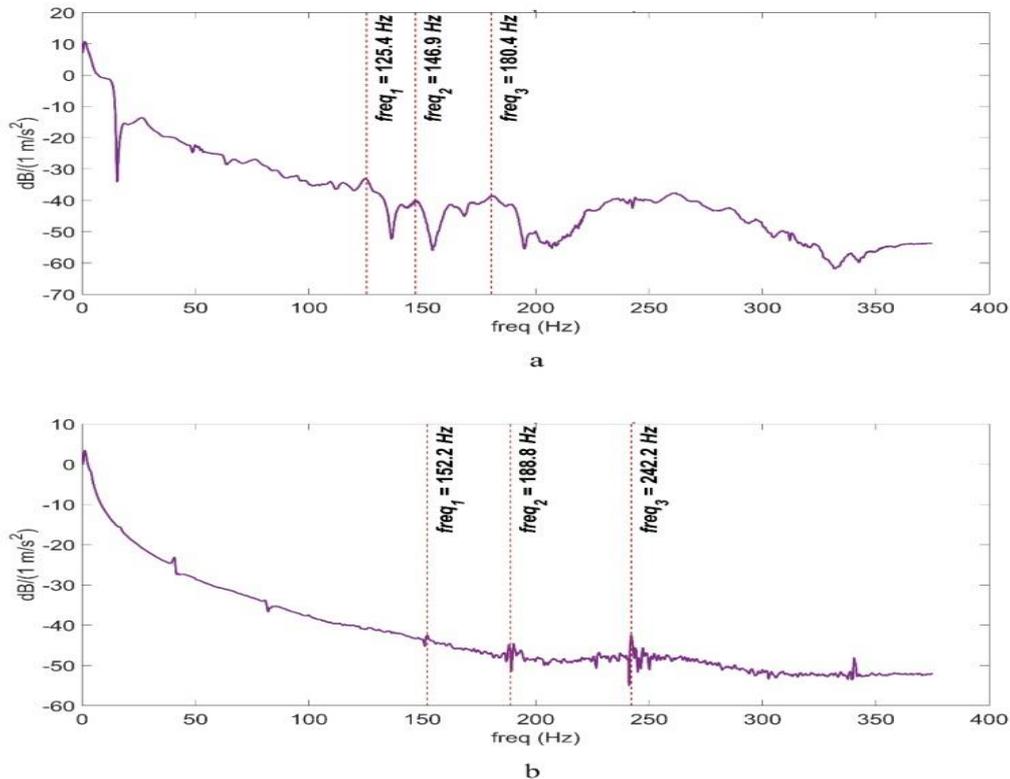
می‌باشند. در پرتقال‌های گروه بزرگ (شکل ۴-الف) اولین مود ارتعاشی توسط دستگاه چهارکاناله پردازش سیگنال در فرکانس طبیعی ۱۲۵/۴ Hz حس شده و مود دوم نسبت به مود اول با ۱۷٪ و همچنین مود سوم نسبت به مود دوم با ۲۲٪ افزایش تغییرات به‌ترتیب دارای فرکانس‌های طبیعی ۱۴۶/۹ و ۱۸۰/۴ Hz می‌باشند. همچنین در پرتقال‌های گروه کوچک (شکل ۴-ب) اولین مود ارتعاشی در فرکانس طبیعی ۱۵۲/۲ Hz حس شده و مود دوم نسبت به مود اول با ۲۴٪ و مود سوم نسبت به مود دوم با ۲۸٪ افزایش تغییرات به‌ترتیب دارای فرکانس‌های طبیعی ۱۸۸/۸ و ۲۴۲/۲ Hz می‌باشند.

در هر دو گروه پرتقال‌های کوچک و بزرگ روند تغییرات در فرکانس‌های طبیعی آن‌ها به‌صورت صعودی می‌باشد. فرکانس طبیعی در یک سیستم یک درجه آزادی به‌صورت تئوری از رابطه $\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{m}}$ به‌دست می‌آید. باتوجه به این‌که در پرتقال‌های گروه بزرگ و کوچک، سفتی نمونه‌ها K ، دارای مقدار یکسانی می‌باشند و فرکانس طبیعی با متوسط جرم نمونه‌ها نسبت عکس دارد، بنابراین فرکانس طبیعی پرتقال‌های گروه کوچک از فرکانس طبیعی پرتقال‌های گروه بزرگ بیشتر است. به‌منظور به‌دست آوردن فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای متناظر با هر یک از فرکانس‌های طبیعی با استفاده از مازول مودال نرم‌افزار انسیس، ۲۰ مود اول به‌دست آمدند.

نتایج و بحث

حداکثر و حداقل نیروی ضربه در میوه پرتقال گروه بزرگ در موقعیت قطبی و بالای نقطه تسلیم دینامیکی ($F_{max} = 26.17 \text{ N}$, $F_{min} = 2.180 \text{ N}$) و همچنین برای پرتقال‌های گروه کوچک در موقعیت قطبی و نقطه تسلیم دینامیکی می‌باشد. ($F_{max} = 7.235 \text{ N}$, $F_{min} = 0.930 \text{ N}$)

در ابتدای لحظه برخورد پاندول ($t = 0.0053 \text{ ms}$)، بیشترین نیرو به میوه پرتقال وارد شده است. این نتایج با نتایج نامداری قراقانی و همکاران مطابقت دارد (Namdari Gharaghani, Maghsoudi, & Mohammadi, 2020). برای تعیین فرکانس‌های طبیعی میوه پرتقال به‌وسیله آزمون تجربی، داده‌های خروجی از نمونه‌های تحریک‌شده توسط دستگاه چهارکاناله پردازش سیگنال (ECON, AVANT Lite, model: MI-6004) ثبت شد و سپس با استفاده از تبدیل فوریه سریع در نرم‌افزار متلب، نتایج از حوزه زمان به حوزه فرکانس انتقال داده شد. فرکانس‌های طبیعی آزمون تجربی نمونه‌ها مطابق شکل ۴ برای پرتقال‌های گروه بزرگ و کوچک استخراج گردید. براساس مطالعه لانگ (Láng, 2006)، پارامترهای مودال اساس تحلیل‌های مهندسی به‌منظور طراحی ماشین‌های برداشت و به‌ویژه ماشین‌های ارتعاشی هستند. همان‌طور که در شکل ۳ پیداست نقاط قله در این نمودارها به‌ترتیب بیانگر مودهای اول، دوم و سوم



شکل ۴- سیگنال حس شده توسط دستگاه چهارکاناله پردازش سیگنال و انتقال آن به نرم‌افزار متلب و استفاده از تبدیل فوریه سریع؛ الف- پرتقال گروه بزرگ، ب- پرتقال گروه کوچک

Fig.4. The experimental values of the first three modes converted from time to frequency domain for the two groups of oranges; (a) Large and (b) Small

مودهای هفدهم تا نوزدهم $248/30$ Hz به عنوان مود سوم در نظر گرفته شد (جدول ۴). نتایج این تحقیق با نتایج به دست آمده از مطالعه وانگ و همکاران (Wang, Ma, Wei, Zhang, & Zhang, 2017) و ژانگ و همکاران (Zhang, Wu, Zhao, & Wang, 2018) مطابقت دارد. همان‌طور که از شکل مودها پیداست در هر دو گروه میوه پرتقال، مود اول به صورت مود طولی، مود دوم به صورت مود پیچشی و مود سوم به صورت مود خمشی می‌باشد.

جدول ۴- فرکانس‌های طبیعی به دست آمده از شبیه‌سازی پرتقال‌های گروه بزرگ (Group A) و گروه کوچک (Group B) با استفاده از نرم‌افزار انسیس

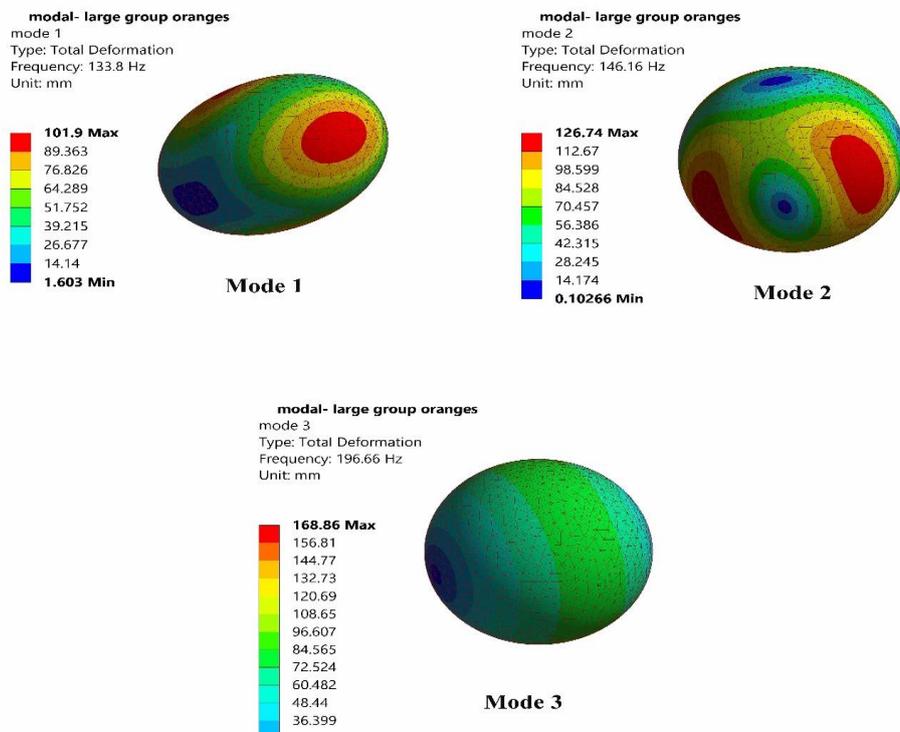
Table 4- Natural frequencies (Hz) obtained from simulation of large (Group A) and small (Group B) oranges using ANSYS software

Stage	Group A (Hz)	Group B (Hz)
Mode1	133.80	167.79
Mode2	146.16	187.5
Mode3	196.66	248.30

در هر دو گروه کوچک و بزرگ، فرکانس طبیعی ۶ مود اول تقریباً صفر می‌باشند (سه فرکانس اول مربوط به حرکت در راستای محورهای مختصات و سه فرکانس دوم مربوط به حرکت چرخشی حول محورهای مختصات می‌باشد) که این نشان‌دهنده این است که طراحی به درستی صورت گرفته است چراکه میوه پرتقال به صورت کاملاً آزاد در نرم‌افزار انسیس شبیه‌سازی شده است. با توجه به این که در مرحله شبکه‌زنی در نوع و اندازه شبکه دقت و حساسیت خوبی صورت گرفته است (استقلال از شبکه برای نتایج خروجی)، فرکانس‌های طبیعی مودهای هفتم تا یازدهم در پرتقال‌های گروه بزرگ $133/80$ Hz (به عنوان مود اول)، مود دوازدهم تا شانزدهم $146/16$ Hz (به عنوان مود دوم) و فرکانس‌های طبیعی مودهای هفدهم تا نوزدهم $196/66$ Hz به عنوان مود سوم در نظر گرفته شد. همچنین در پرتقال‌های گروه کوچک فرکانس‌های طبیعی مودهای هفتم تا یازدهم $167/79$ Hz (به عنوان مود اول)، مود دوازدهم تا شانزدهم $187/50$ Hz (به عنوان مود دوم) و فرکانس‌های طبیعی

فرکانس‌های طبیعی تجربی ۱۲۵/۴، ۱۴۶/۹ و ۱۸۰/۴ Hz و همچنین فرکانس‌های شبیه‌سازی ۱۳۳/۸۰، ۱۴۶/۱۶ و ۱۹۶/۶۶ Hz می‌باشند که کمترین اختلاف در مود دوم (۰/۵٪) و بیشترین اختلاف در مود سوم (۹/۰۱٪) مشاهده گردید. همچنین در پرتقال‌های گروه کوچک مودهای اول، دوم و سوم به ترتیب دارای فرکانس‌های طبیعی تجربی ۱۵۲/۲، ۱۸۸/۸ و ۲۴۲/۲ Hz و فرکانس‌های شبیه‌سازی ۱۶۷/۷۹، ۱۸۷/۵۰ و ۲۴۸/۳۰ Hz می‌باشند که کمترین و بیشترین اختلاف بین فرکانس‌های طبیعی تجربی و شبیه‌سازی در مودهای دوم و اول به ترتیب ۰/۶۸٪ و ۱۰/۲۴٪ مشاهده شد. در شکل‌های ۵ و ۶ سه مود اول به ترتیب برای پرتقال‌های تامسون گروه بزرگ و کوچک نمایش داده شده است.

در مطالعه‌ای، میرزایی و همکاران (Mirzaei, Minaei, 2013) گزارش کردند که چگالی، مدول الاستیسیته و نسبت پواسون فاکتورهای تاثیرگذاری بر روی مقادیر فرکانس‌های طبیعی هستند. اگرچه مطالعات زیادی بر روی فرکانس‌های طبیعی محصولات کشاورزی انجام نشده است، اما مقایسه نتایج با برخی از کارهای تحقیقاتی روی میوه سیب (Mirzaei et al., 2013) و میوه گلابی (Song, Wang, & Li., 2006; Zhang et al., 2018) به منظور اعتبارسنجی فرکانس‌های طبیعی تجربی (آزمایشگاهی) و شبیه‌سازی (آنالیز مودال)، مقایسه بین این فرکانس‌ها نشان داد که در پرتقال‌های گروه بزرگ مودهای اول، دوم و سوم به ترتیب دارای

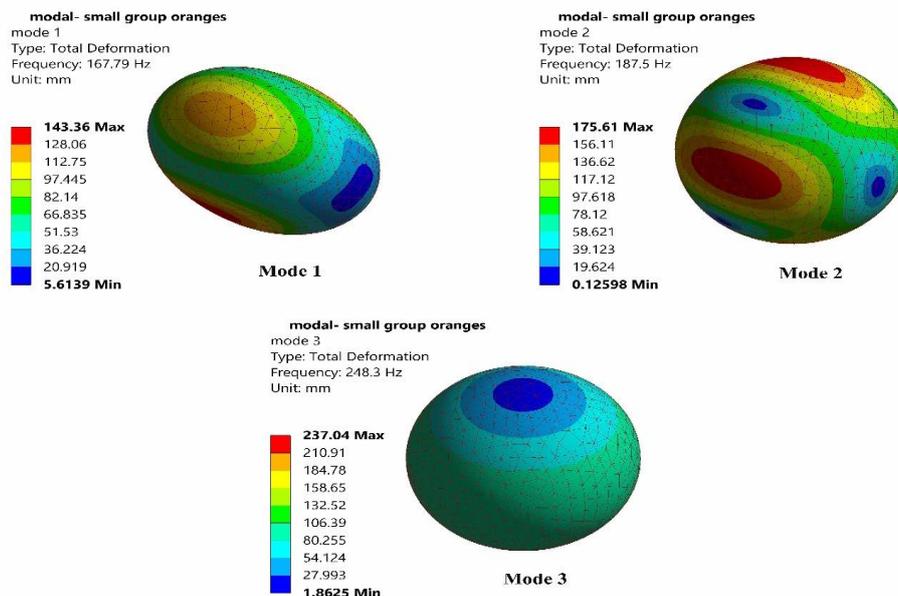


شکل ۵- سه مود اول در پرتقال تامسون گروه بزرگ با استفاده آنالیز مودال اجزای محدود در نرم‌افزار انسیس

Fig.5. The first three modes in large Thomson oranges (Group A) using finite element modal analysis in Ansys software

در صنعت قبل از ساخت قطعات مهندسی، برای تعیین جنس، آزمون‌های مودال به این منظور استفاده می‌شود که در بخش‌هایی که مقدار جابه‌جایی بیشتر می‌شود، جنس سازگارتری انتخاب کنند تا قطعات، عمر و کارکرد بیشتری داشته باشند (He & Fu, 2001). باتوجه به این نوع کاربرد آنالیز مودال، می‌توان در محصولات کشاورزی از این نکته استفاده کرد تا با اصلاح ژنتیکی محصولات کشاورزی به خصوص میوه‌ها، بافت آن‌ها را به گونه‌ای تغییر داد تا عمر مفید محصولات کشاورزی و میوه‌ها افزایش یابد.

طبق رابطه تنش خمشی حول یک محور $\sigma = \frac{MC}{I}$ ، بدیهی است که هرچه قدر فاصله از محور خمش (تار خنثی) بیشتر شود، تنش و در نتیجه کرنش و مقدار جابه‌جایی نیز بیشتر می‌گردند. چنین می‌توان نتیجه گرفت که بخش‌هایی که بیشترین فاصله را از تار خنثی داشته باشد بیشترین جابه‌جایی را دارد. مقادیر جابه‌جایی منفی برای تنش فشاری (ناحیه قرمز رنگ) و مقادیر جابه‌جایی مثبت مربوط به تنش کششی (ناحیه آبی رنگ) هستند (شکل‌های ۵ و ۶).



شکل ۶- سه مود اول در پرتقال تامسون گروه کوچک با استفاده از آنالیز مودال اجزای محدود در نرم‌افزار انسیس
Fig.6. The first three modes in small Thomson oranges (Group B) using finite element modal analysis in Ansys software

نتیجه‌گیری

دارد، اما می‌توان پذیرفت که طراحی به کمک کامپیوتر در پیش‌بینی فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای ارتعاشی میوه‌های گرد، مانند پرتقال بسیار مفید هستند. با استفاده از فرکانس‌های به‌دست‌آمده و شکل مودهای ارتعاشی، در حمل و نقل واقعی میوه پرتقال می‌توان با استفاده از روش‌های بسته‌بندی مناسب در حمل و نقل از به‌وجود آمدن فرکانس‌های تشدید جلوگیری کرد تا از افت کیفیت میوه کاسته شود.

در این تحقیق ۲۰ فرکانس طبیعی اول و همچنین شکل مودهای متناظر آن با استفاده از آنالیز مودال اجزای محدود بر اساس پاسخ تحریک دینامیکی به‌وسیله آزمون پاندول (ضربه‌ای) برای میوه پرتقال رقم تامسون در دو گروه بزرگ و کوچک تعیین شدند. فرکانس طبیعی برای میوه پرتقال رقم تامسون توسط نرم‌افزار انسیس بر اساس پارامترهای ورودی (چگالی، مدول الاستیسیته و نسبت پواسون) در محدوده ۰ تا ۲۴۸/۴۱ Hz به‌دست آمد. اگرچه محدودیت‌هایی وجود

References

1. Abbaszadeh, R., Rajabipour, A., Sadrnia, H., Mahjoob, M. J., Delshad, M., & Ahmadi, H. (2014). Application of modal analysis to the watermelon through finite element modeling for use in ripeness assessment. *Journal of Food Engineering*, 127, 80-84. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.11.020>
2. Ahmadi, E., & Barikloo, H. (2016a). Viscoelastic finite element analysis of the dynamic behavior of apple under impact loading with regard to its different layers. *Computers and Electronics in Agriculture*, 121, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.11.017>
3. Ahmadi, E., & Barikloo, H. (2016b). Mechanical property evaluation of apricot fruits under quasi-static and dynamic loading. *Journal of Agricultural Machinery*, 6(1), 139-152. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.v6i1.29489>
4. Celik, H. K. (2017). Determination of bruise susceptibility of pears (Ankara variety) to impact load by means of FEM-based explicit dynamics simulation. *Postharvest Biology and Technology*, 128, 83-97. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.01.015>
5. Celik, H. K., Rennie, A. E. W., & Akinci, I. (2011). Deformation behaviour simulation of an apple under drop case by finite element method. *Journal of Food Engineering*, 104, 293-298. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.12.020>
6. Chen, L., & Opara, U. L. (2013). Texture measurement approaches in fresh and processed foods - A review. *Food*

- Research International*, 51, 823-835. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.01.046>
7. Coelho, A. L. F., Santos, F. L., Queiroz, D. M., & Pinto, F. A. C. (2016). Dynamic behavior of the fruit-stem-branch system using stochastic finite element method. *Coffee Science*, 11(1), 1-10. <http://www.sbicafe.ufv.br:80/handle/123456789/8167>
 8. Couck, P., Ketelaere, B. De., & Baerdemaeker, J. De. (2003). Experimental analysis of the dynamic, mechanical behavior of a chicken egg. *Journal of Sound and Vibration*, 266, 711-721. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(03\)00596-0](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00596-0)
 9. Entwistle, K. (2001). *Basic Principles of the Finite Element Method*. IOM Communications.
 10. Fadji, T., Coetzee, C. J., Berry, T. M., & Opara, U. L. (2019). Investigating the role of geometrical configurations of ventilated fresh produce packaging to improve the mechanical strength— experimental and numerical approaches. *Food Packaging and Shelf*, 20, 100312. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100312>
 11. Gao, Y., Song, C., & Rao, X. (2018). Image processing-aided fea for monitoring dynamic response of potato tubers to impact loading. *Computers and Electronics in Agriculture*, 151, 21-30. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.05.027>
 12. Gyasi, S., Fridley, R. B., & Chen, P. (1981). Elastic and viscoelastic Poisson's ratio determination for selected citrus fruits. *Transactions of the ASAE*, 24(3), 747-0750. <https://doi.org/10.13031/2013.34332>
 13. Gyeong-Won, K., Gab-Soo, Y., & Yasuyuki, S. (2008). Analysis of Mechanical Properties of Whole Apple Using Finite Element Method Based on Three-Dimensional Real Geometry. *Food Science and Technology Research*, 14(4), 329-336. <https://doi.org/10.3136/fstr.14.329>
 14. He, J., & Fu, Z. F. (2001). *Modal Analysis: Butterworth-Heinemann*. Hoffman, J. D., & Frankel, S. (2001). Numerical methods for engineers and scientists: CRC press.
 15. Kabas, O., Celik, H. K., Ozmerzi, A., & Akinçi, İ. (2008). Drop test simulation of a sample tomato with finite element method. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 88, 1537-1541. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3246>
 16. Láng, Z. (2006). Dynamic modelling structure of a fruit tree for inertial shaker system design. *Biosystems Engineering*, 93(1), 35-44. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.09.003>
 17. Lu, R., Srivastava, A. K., & Ababneh, H. A. A. (2006). Finite element analysis and experimental evaluation of bio yield probes for measuring apple fruit firmness. *Transactions of the ASAE*, 49, 123-131. <https://doi.org/10.13031/2013.20220>
 18. Mirzaei, R., Minaei, S., Khoshtaghaza, M., & Borghei, M. (2013). Evaluation of natural frequencies apple using finite element modal analysis. *Journal of Agricultural Machinery*, 3, 48-57. (in Persian).
 19. Mizrach, A. (2007). Nondestructive ultrasonic monitoring of tomato quality during shelf-life storage. *Postharvest Biology and Technology*, 46, 271-274. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.05.012>
 20. Mohsenin, N. N. (1986). *Physical properties of Plant and Animal Materials*. Gordon and Breach Sci. publ, New York, 1986. <https://doi.org/10.1002/food.19870310724>
 21. Namdari Gharaghani, B., Maghsoudi, H., & Mohammadi, M. (2020). Ripeness detection of orange fruit using experimental and finite element modal analysis. *Scientia Horticulturae*, 261, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108958>
 22. Salarikia, A., Miraei Ashtiani, S. H., Golzarian, M. R., & Mohammadinezhad, H. (2017). Finite element analysis of the dynamic behavior of pear under impact loading. *Information Processing in Agriculture*, 4, 64-77. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2016.12.003>
 23. Santos, F. L., Queiroz, D. M., Valente, D. S. M., & Coelho, A. L. F. (2015). Simulation of the dynamic behavior of the coffee fruit-stem system using finite element method. *Acta Scientiarum Technol*, 37, 11-17. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v37i1.19814>
 24. Seyedabadi, E., Khojastehpour, M., & Sadrnia, H. (2015). Predicting Cantaloupe Bruising Using Non-Linear Finite Element Method. *International Journal of Food Properties*, 18(9), 1-28. <https://doi.org/10.1080/10942912.2014.951892>
 25. Song, H. Z., Wang, J., & Li, Y. H. (2006). Studies on vibration characteristics of a pear using finite element method. *Journal of Zhejiang University Science*, 7, 491-496. <https://doi.org/10.1631/jzus.2006.b0491>
 26. Tinoco, H. A., Ocampo, D. A., Pena, F. M., & Sanz-Urbe, J. R. (2014). Finite element modal analysis of the fruit-peduncle of Coffee arabica L. var. Colombia estimating its geometrical and mechanical properties. *Computers and Electronics in Agriculture*, 108, 17-27. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.06.011>
 27. Tinoco, H. A., & Peña, F. M. (2018). Harmonic stress analysis on *Coffea arabica* L. Var. Colombia fruits in order to simulate the selective detachment. *A Finite Element Analysis*, 94(2), 163-174. <https://doi.org/10.1177/0037549717738068>
 28. Villibor, G. P., Santos, F. L., Queiroz, D. M., Khoury Junior, J. K., & Pinto, F. A. C. (2019). Dynamic behavior of coffee fruit-stem system using modelling of flexible bodies. *Computers and Electronics in Agriculture*, 166, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105009>
 29. Wang, F., Ma, S., Wei, W., Zhang, Y., & Zhang, Z. (2017). Frequency sweep test and modal analysis of

-
- watermelon during transportation. *International Journal of Food Engineering*, 13(5). <https://doi.org/10.1515/ijfe-2016-0362>
30. Yousefi, S., Farsi, H., & Kheiralipour, K. (2016). Drop test of pear fruit: Experimental measurement and finite element modelling. *Biosystems Engineering*, 147, 17-25. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.03.004>
31. Zhang, H., Wu, J., Zhao, Z., & Wang, Z. (2018). Nondestructive firmness measurement of differently shaped pears with a dual-frequency index based on acoustic vibration. *Postharvest Biology and Technology*, 138, 11-18. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.12.002>

Research Article

Vol. 14, No. 2, 2024, p. 177-195

Evaluation of the Energy Efficiency of a Solar Parabolic Collector Equipped with Phase Change Materials inside the Receiver Tube of a Desalination System

J. Seifi Laleh¹, H. Samimi Akhijahani^{2*}, P. Salami²

1- Graduate Student of Renewable Energies, Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

2- Assistant Professor, Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

(*- Corresponding Author Email: h.samimi@uok.ac.ir)

Received: 17 December 2022

Revised: 28 January 2023

Accepted: 20 February 2023

Available Online: 25 February 2023

How to cite this article:Seifi Laleh, J., Samimi Akhijahani, H., & Salami, P. (2024). Evaluation of the Energy Efficiency of a Solar Parabolic Collector Equipped with Phase Change Materials inside the Receiver Tube of a Desalination System. *Journal of Agricultural Machinery*, 14(2), 177-195. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2023.80081.1138>

Introduction

With increasing the world's population, the demand for supply water resources is also increasing. Nevertheless, climate change has severely impacted the accessibility of fresh water resources. Consequently, researchers have been focusing on producing drinkable water from seas and oceans. Iran, with its significant levels of solar radiation and access to open water from the north and south, is an ideal country for fresh water production. Using solar water desalination systems is a reliable and cost-effective solution for producing drinking water from salt water sources. The purpose of this research is to enhance the performance of the solar water desalination system by using the latent heat storage system and a solar tracking system. In this experimental setup for fresh water production, water was used as the working fluid, while a parabolic collector functioned as the source of thermal energy.

Materials and Methods

The solar water desalination system was designed and built on a laboratory scale at the University of Kurdistan, and then the necessary experiments were carried out. The flowing fluid (water) inside the spiral tube in the tank is pumped into the absorber tube of the parabolic collector. Inside the receiver tube, there is a spiral copper tube with a 7 cm pitch, which contains paraffin. The parabolic mirror reflects the sunlight onto the receiver tube, causing the working fluid, water, to heat up. The cooling process is achieved using a specific source located in the upper section of the distillation tank. In this case, the steam droplets in the tank hit the bottom surface of this cooling tank, which has the shape of an inverted funnel, leading to condensation. The study was conducted over four consecutive days, from 10:00 to 14:00, under identical conditions from August 24th to August 27th, 2022. It took place at the Renewable Energy Laboratory, University of Kurdistan in Sanandaj, Iran, and was conducted for three different volume flow rates of fluid: 1.9, 3.1, and 4.2 l.min⁻¹ with phase change materials (PCM) and 4.2 l.min⁻¹ without phase change materials (WOPCM); the pump's maximum flow rate was 4.2 l.min⁻¹. Variations of outlet temperature, thermal efficiency, desalination efficiency, and produced water were investigated under different conditions.

Results and Discussion

The results reveal that by decreasing the pitch of the spiral tube, there is an increase in the amount of heat captured, due to the increase in the Nusselt number. At the beginning of data collection, a significant amount of the energy that enters the receiver tube is absorbed by both the phase change material and the spiral tube inside the receiver and as a result, the initial air temperature is lowered. The highest temperature of salt water occurs

©2023 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).<https://doi.org/10.22067/jam.2023.80081.1138>

when the fluid is flowing at a rate of 4.2 l.min⁻¹, while the lowest temperature is observed at a flow rate of 1.9 l.min⁻¹. With a flow rate of 4.2 l.min⁻¹, the absorbent tube rapidly transfers the absorbed heat to the salt water chamber through the fluid. The input energy to the tank has increased from 1.53 to 2.83, 1.14 to 2.18, and 0.73 to 1.48 MJ for fluid flow rates of 4.2, 3.1, and 1.9 l.min⁻¹, respectively. At a flow rate of 4.2 l.min⁻¹, the thermal efficiency of the system without phase change materials (3.51%) is lower compared to the case with phase change materials (5.02%). Moreover, using a solar tracking mechanism increased the thermal efficiency of the collector by 9.86% compared to the system using a photocell sensor. Based on the water quality values, it can be stated that the level of dissolved solids in the water sample has been significantly decreased. This indicates that the water can be used for drinking.

Conclusion

In this research, the process of thermal changes in a solar water desalination system using PCM was investigated. The obtained results demonstrate that the use of PCM improved the thermal efficiency of the collector and the water obtained from the current system is safe for consumption. Furthermore, by implementing a solar panel tracking system, the efficiency of the solar collector is improved.

Keywords: Drinking water, Solar collector, Solar tracker, Thermal efficiency, Water quality

Symbols and abbreviations

A_c	سطح کلکتور Collector area	m ²	\dot{Q}_{cove}	نرخ انرژی انتقال یافته در اثر همرفت Convected heat flux	J.s ⁻¹
c_p	ظرفیت گرمای ویژه Specific heat capacity	kJ.kg ⁻¹ .°C ⁻¹	\dot{Q}_u	نرخ انرژی حرارتی دریافتی Received useful energy	J.s ⁻¹
D	قطر لوله Tube diameter	m	Pr	عدد پرانتل Prandtl number	-
E_{elc}	انرژی الکتریکی Electrical energy	J	Re	عدد رینولدز Reynolds number	-
F_R	پارامتر اتلاف حرارت Heat loss coefficient	-	T_i	دمای ورودی Intlet temperature	°C
h_c	ضریب انتقال حرارت همرفت Convective heat transfer coefficient	W.m ⁻² .°C ⁻¹	T_o	دمای خروجی Outlet temperature	°C
h_{fg}	گرمای نهان تبخیر آب Latent heat of water evaporation	kJ.kg ⁻¹	t_c	ضخامت دیواره Wall thickness	m
I_o	شدت تابش خورشیدی Solar radiation	W.m ⁻²	U_L	ضریب اتلاف حرارت کلی Total heat loss coefficient	W.m ⁻² .°C ⁻¹
k_w	ضریب انتقال حرارت Conductive heat transfer coefficient	kg.s ⁻¹	V	حجم سیال Fluid volume	m ³
$m_{w,ev}$	جرم آب تبخیری Evaporated water mass	kg	α	ضریب جذب Absorption factor	-
\dot{m}	جرم سیال کاری Working fluid mass	-	η	بازده گرمایی جمع کننده Collector thermal efficiency	-
Nu	عدد ناسلت Nusselt number	J	η_{des}	بازده تبخیر آب Evaporation efficiency	-
Q_w	انرژی مورد نیاز برای تبخیر Required thermal energy for evaporation	J	μ	ویسکوزیته سیال Fluid viscosity	m ² .s ⁻¹
Q_m	مجموع انرژی مورد نیاز برای تبخیر آب Total required energy for evaporation	J.s ⁻¹	ρ	دانسیته جرمی Mass density	kg.m ³
\dot{Q}_f	گرمای انتقالی از جمع کننده به سیال Transferred heat to working fluid	J.s ⁻¹	τ	ضریب انتشار Emission factor	-
\dot{Q}_{conda}	نرخ انرژی انتقال یافته هدایتی Conducted energy flux	J.s ⁻¹			

مقاله پژوهشی

جلد ۱۴، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۳، ص ۱۹۵-۱۷۷

ارزیابی بازده انرژی جمع‌کننده سهموی مجهز به مواد تغییرفازدهنده درون لوله دریافت‌کننده در یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی

ژینا سیفی لاله^۱، هادی صمیمی اخیحجانی^{۲*}، پیمان سلامی^{۲b}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۱

چکیده

استفاده از سامانه‌های آب‌شیرین‌کن خورشیدی یک راهکار مناسب، با صرفه اقتصادی برای تولید آب شرب از منابع آب شور است. هدف از انجام این تحقیق افزایش عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی با استفاده از سامانه ذخیره‌ساز گرمای نهان انرژی خورشیدی و سامانه ردیاب پنبلی است. با توجه به این که به دلیل نوسانات شدت تابش خورشیدی هدررفت حرارتی از جمع‌کننده خورشیدی افزایش می‌یابد، استفاده از مواد تغییرفازدهنده راه‌حل مناسبی برای ذخیره‌سازی انرژی در ساعات اوج و آزاد نمودن در زمان کاهش و یا نبود شدت تابش خورشیدی است. به این منظور ماده تغییرفازدهنده به صورت لوله‌ای ماریپیچ ۶ میلی‌متری با گام ۷ سانتی‌متر درون لوله کانونی قرار گرفت. جهت ارزیابی عملکرد حرارتی سه دبی جریان برای سیال کاری ۱/۹، ۳/۱ و ۴/۲ لیتر بر دقیقه (با مواد تغییرفازدهنده) و حالت بدون مواد تغییرفازدهنده در چهار روز متوالی از ساعت ۱۰:۰۰ تا ۱۴:۰۰ در نظر گرفته شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی مجهز به مواد تغییرفازدهنده بیشترین راندمان حرارتی را در دبی ۴/۲ لیتر بر دقیقه و کمترین آن با دبی ۱/۹ لیتر بر دقیقه بوده است. نتایج نشان داد استفاده از مواد تغییرفازدهنده باعث بهبود راندمان حرارتی به میزان ۳/۰۵ درصد می‌گردد. آب‌شیرین‌تولیدی در مدت زمان ۴ ساعت، ۰/۷۲۲ لیتر بر مترمربع در چهار ساعت بود و به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای باعث کاهش سختی موجود در آب شرب شده بود.

واژه‌های کلیدی: آب شرب، بهره‌وری حرارتی، جمع‌کننده خورشیدی، ردیاب خورشیدی، کیفیت آب

مقدمه

گرفته است، اما همین مقدار اندک نیز بایستی پیش از استفاده تصفیه شود. از طرف دیگر دریاها و اقیانوس‌ها حاوی آب شور بوده و از این جهت آب آنان قابل استفاده برای مصارف خانگی و به دلیل خورنده‌بودن قابل استفاده برای مصارف صنعتی نیست. افزایش گرمایش جهانی و شوری منابع آب طبیعی قابل آشامیدن، جامعه را به سمت کشف روش‌های هوشمندانه برای استفاده مناسب از منابع آب سوق می‌دهد. انرژی خورشیدی یکی از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر است که استفاده از آن با توجه به کمبود سوخت‌های فسیلی و تقاضای جهانی برای کاستن آلودگی‌های زیست‌محیطی افزایش یافته است.

یکی از موضوعات مهمی که در دهه‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است، بحث انرژی و نحوه‌ی تأمین آن برای مصارف مختلف در صنعت و کشاورزی است. با توجه به تداوم افزایش نرخ جمعیت، افزایش مصرف آب، اتمام سوخت‌های فسیلی و همچنین افزایش مشکلات زیست‌محیطی ناشی از مصرف این نوع سوخت‌ها (افزایش آلودگی به میزان ۸ ppm در سال و به‌وجود آمدن پدیده گرمایش

یکی از نوشیدنی‌های که مصرف روزانه آن، برای ادامه حیات و سلامتی انسان و همچنین تمام موجودات زنده از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد، آب است. افزایش جمعیت و صنعتی شدن و همچنین تقاضا برای کاربردهای مختلفی نظیر کشاورزی و خانگی، منجر به تولید آب‌شیرین زیاد شده است. مصرف آب یکی از معیارهای اصلی ارزیابی تمدن انسان‌ها است (Panchal, Patel, Elkelawy, Bastawissi, 2019). برای تولید آب شیرین در کره زمین، می‌توان به‌طور مستقیم از دریاچه‌ها، رودخانه و یخچال‌های طبیعی بهره گرفت. اگرچه آب زیرزمینی به مقدار اندک در دسترس قرار

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد انرژی‌های تجدیدپذیر، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

(Email: h.samimi@uok.ac.ir)

*- نویسنده مسئول:

<https://doi.org/10.22067/jam.2023.80081.1138>

PCM به صورت لایه‌ای، ورقه‌ای، استوانه‌ای با کروی استفاده می‌گردد، که در هر کدام گرمای نهان باعث می‌شود مجموع انرژی‌گیری بهبود یابد. یک کار شبیه‌سازی رایانه‌ای با استفاده از نرم‌افزار فلونت در کشور تونس بر روی جمع‌کننده سهموی انجام شد که طی آن جهت افزایش بهره‌وری در هنگام شب برای ذخیره‌سازی حرارتی، PCM در جمع‌کننده قرار داده شد. در این سامانه مخزن آب با استفاده از لایه‌ای از PCM پوشش داده شد (Chaabane, Mhiri, & Bournot, 2014). در کشور چین پژوهشی انجام شد، که در آن به مطالعه مخازن ذخیره حرارتی خورشیدی مجهز به جمع‌کننده سهموی که مجهز به کره‌های حاوی PCM پرداخته شده بود. در این مطالعه از سه نوع PCM مختلف استفاده شد. ظروف کروی از پلی‌کربنات ساخته شده و مواد PCM استفاده‌شده در درون کره‌ها دارای سه نقطه ذوب متفاوت بودند. با استفاده از این تجهیزات، بهره‌وری سامانه به طور قابل توجهی افزایش یافت (Yang, Zhang, & Xu, 2014). در پژوهشی که بر روی آب‌شیرین‌کن مجهز به جمع‌کننده خورشیدی و PCM انجام شد، نتایج نشان داد به دلیل مقدار زیاد PCM موجود در سامانه، درجه حرارت آب شور برای مدت زمان طولانی افزایش می‌یابد. این عامل بر روی بهره‌وری سامانه اثرگذار بوده و آب گرم درون سامانه در هنگام نبود خورشید (بعد از غروب خورشید) می‌تواند برای اهداف گرمایشی به خصوص در محل‌های سرد مورد استفاده قرار گیرد. همچنین ضریب انتقال حرارت به صورت کلی از $10/4 \text{ W.m}^{-1} \text{K}^{-1}$ افت پیدا کرده و عملکرد سامانه بهبود پیدا کرد (Abu-Arabi, 2018).

همان گونه که اشاره شد، یکی دیگر از کاربردهای جمع‌کننده‌های سهموی در آب‌شیرین‌کن‌ها می‌باشد. در این سامانه‌ها نیز از PCM استفاده گردیده است تا بتوان راندمان حرارتی و به تبع آن آب تولیدی را افزایش داد. به عبارت دیگر به دلیل تعادل بین گرماگیری و گرمادهی سامانه کارایی بهبود یافت. علاوه بر آن سطح اشغال‌شده و مصرف انرژی زیاد (Duong, Cooper, Nelemans, Cath, & Nghiem, 2015) و بالا بودن دوره بازگشت سرمایه از نظر اقتصادی از ایرادات آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی است (Reif & Alhalabi, 2015). نتایج پژوهشی که در آب‌شیرین‌کن از PCM استفاده شده بود، نشان داد که این مواد سبب افزایش بهره‌وری تجمعی و افزایش ساعات کار سامانه می‌گردد. میزان بهره‌وری تجمعی در انتهای روز $6/3$ لیتر و بیشترین مقدار بهره‌وری در ساعت $12:00$ تا $14:00$ مشاهده گردید (Rehman, Shakir, Razaq, Saqib, & Tahir, 2018). علاوه بر آن در برخی موارد به مواد تغییرفازدهنده نانو ذراتی اضافه می‌گردد که باعث می‌گردد فرآیند ذخیره‌سازی بهبود یابد. در مطالعه‌ای دیگر، تغییرات بازده حرارتی در یک جمع‌کننده سهموی همراه با لوله تخلیه‌شده حاوی نانو PCM و باله‌ها، مورد بررسی قرار

جهانی) که برای تولید آب شیرین صرف می‌شود، تحقیقات اخیر را به سمت استفاده از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر سوق داده است. در دهه‌های اخیر انرژی‌های تجدیدپذیر یکی از موضوعات جذاب در بین محققان حوزه انرژی برای استفاده در زمینه‌های مختلف محسوب می‌شود. از نظر در دسترس بودن و فراوانی پایدار، انرژی خورشیدی با ارزش‌ترین منبع انرژی تجدیدپذیر است (Abu-Arabi, Al-harashseh, Mousa, & Alzghoul, 2018).

با توجه به استانداردهای بین‌المللی برای مناطقی که میانگین انرژی تابشی خورشید، در روز بالاتر از $3/5$ کیلووات ساعت می‌باشد، استفاده از سامانه‌های مختلف برای مهار انرژی خورشیدی از جمله جمع‌کننده خورشیدی برای مصارفی نظیر آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی صرفه اقتصادی خواهد داشت (Kalogirou et al., 2005). ایران با میانگین انرژی تابشی $4/5$ کیلووات ساعت در روز و 3200 ساعت بر سال (Edalati, Ameri, & Iranmanesh, 2015) یکی از مستعدترین مناطق برای بهره‌وری از تابش خورشیدی مانند آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی است. با توجه به این که میزان شدت تابش خورشید در طول ساعات روز متغیر بوده و لازم است از انرژی خورشیدی که به جمع‌کننده می‌رسد، استفاده حداکثری نمود، استفاده از سامانه‌هایی نظیر ذخیره‌سازهای انرژی حرارتی و مواد تغییرفازدهنده می‌تواند منجر به افزایش بازده حرارتی سامانه گردد. با استفاده از مواد تغییرفازدهنده در ساعات اوج تابش، عمل ذخیره‌سازی به صورت گرمای نهان انجام شده و در مواقعی که تابش خورشیدی افت پیدا می‌کند و یا وجود ندارد، انرژی ذخیره‌شده در سیال و مواد تغییرفازدهنده آزاد شده و مورد استفاده قرار گیرد. در ذخیره‌سازی انرژی به صورت گرمای نهان، جذب یا آزادسازی حرارت در دمای تغییر فاز مواد صورت می‌پذیرد. ذخیره‌ی گرمای نهان عبارت است از یک فاز به فاز دیگر در دمای تقریباً ثابت تغییر حالت می‌دهد. در ذخیره‌سازی به صورت گرمای نهان، از مواد تغییرفازدهنده استفاده می‌شود. با بررسی‌های انجام‌گرفته، ذخیره انرژی به صورت گرمای نهان، کارآمدترین روش ذخیره‌ی انرژی گرمایی است (Pielichowska & Pielichowski, 2014). در پژوهشی تأثیر مقدار ذوب شدن و ضخامت مواد تغییرفازدهنده^۱ (PCM) بر روی پراکندگی دمایی در مواد تغییرفازدهنده بررسی شد. نتایج نشان داد زمان ذوب شدن به صورت خطی با مقدار PCM تغییر کرده و با کاهش ضخامت PCM عملکرد سامانه افزایش می‌یابد (Rostamizadeh, Khanlarkhani, & Sadrameli, 2012). از مواد تغییرفازدهنده در جمع‌کننده‌های خورشیدی نیز استفاده شده و از طریق آن برای خشک کردن محصول و یا آب‌شیرین‌کن استفاده می‌شود. در جمع‌کننده‌ها

مختلف بر عملکرد جمع‌کننده خورشیدی سهموی صورت گرفته است. نتایج نشان داد که انرژی حرارتی ورودی به سامانه برای نانوسیال، روغن، گلیسرین و آب به‌عنوان سیال کاری در سامانه به‌ترتیب حدود MJ ۱۷/۳۶، MJ ۱۸/۴۶، MJ ۱۷/۷۶ و MJ ۱۶/۸۰ بود. همچنین مقایسه نتایج شبیه‌سازی به روش CFD نشان داد که روش CFD می‌تواند عملکرد سامانه را با سیالات کاری مختلف با دقت خوبی پیش‌بینی کند (Alimohammadi, Samimi Akhijahani, & Salami, 2020). استفاده از سیستم ذخیره‌سازی حرارتی (مخزن، سیال و مواد تغییرفازدهنده) با افزایش تابش خورشیدی در روزهای آزمایش، اثر دیگری است که می‌تواند میزان ذخیره انرژی افزایش دهد. برخی از مواد (مایع یا سیال + جامد) مانند روغن هیدرولیک، Al_2O_3 / آب، نانو سیال روغن مصنوعی، Cu، Al_2O_3 / روغن، TiO_2 - Fe_3O_4 - آب به‌عنوان سیال‌های کاری می‌باشند که در جمع‌کننده‌های خورشیدی استفاده می‌شوند و از بین موارد ذکر شده سیالی که افزایش عملکرد جمع‌کننده می‌شود، آب است. در یک آزمایش که جهت مقایسه عملکرد سامانه با استفاده از سیال کاری بررسی شد، نتایج به‌دست‌آمده از آنالیز راندمان با استفاده از روش CFD نشان‌دهنده آن بود که به‌کارگیری آب به‌عنوان سیال کاری، تلفات کمتری در ماه‌های بالای دارد (Kumar, Vijayan, & Baskar, 2016).

همان‌طور که در مطالعات پیشین اشاره شد، سامانه‌های آب‌شیرین‌کن مشکلاتی از قبیل اقتصادی نبودن سامانه، پیچیدگی‌های بیش از حد، عدم دسترسی به منابع انرژی، بازده کم، بزرگ بودن سامانه و اشغال فضای زیاد می‌باشند. این موارد باعث می‌گردد، تمایل به استفاده از سامانه‌های خورشیدی کاهش یابد. در تحقیق حاضر برای افزایش کارایی سامانه از یک لوله ماریچ حاوی مواد تغییرفازدهنده درون لوله دریافت‌کننده استفاده شد. به عبارت دیگر حالت ماریچ و مواد تغییرفازدهنده به‌طور هم‌زمان باعث متعادل نمودن گرماگیری و گرمادهی در لوله شده و راندمان را تا حد قابل قبول بهبود دهد. به دلیل حذف ناهمگنی‌های جذب و آزادسازی و حفظ تعادل حرارتی سامانه عملکرد سامانه بهبود پیدا می‌کند. علاوه بر آن برای دنبال کردن تشعشعات خورشیدی به‌طور دقیق از یک سامانه تعقیب‌کننده خورشیدی که شامل سلول‌های خورشیدی کوچک هستند استفاده می‌گردد. در این حالت نیز به دلیل استفاده بهینه از تشعشع خورشیدی بازده حرارتی سامانه بهبود خواهد یافت. با توجه به تحقیقات پیشین چنین مطالعه‌ای با لحاظ نمودن سامانه آب‌شیرین‌کن قبلاً انجام نگرفته است.

مواد و روش‌ها

شرح دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی و متعلقات آن

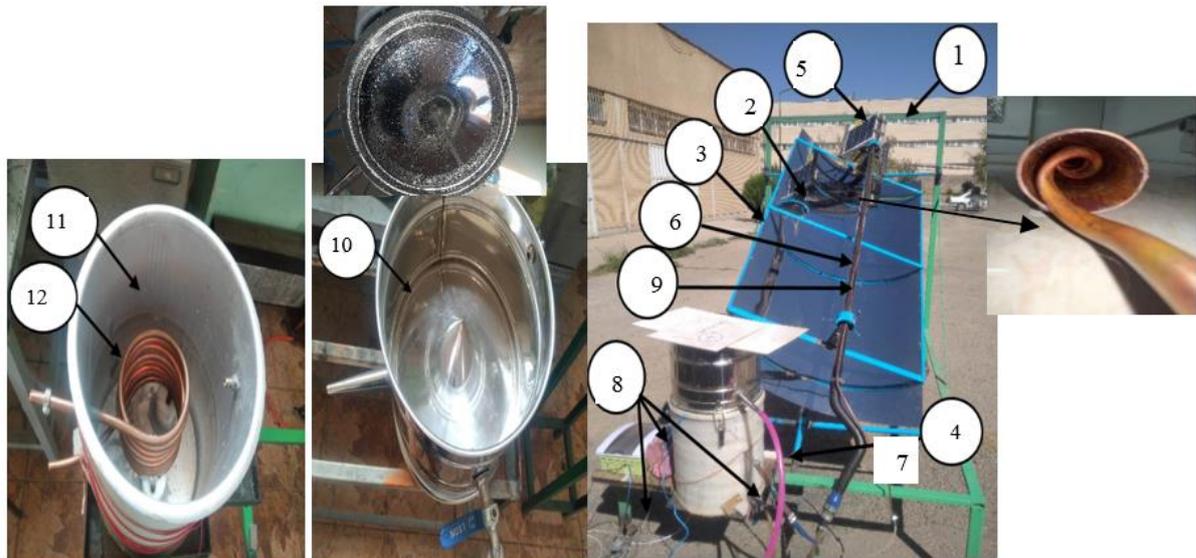
گرفت. همچنین اثر افزودن نانوذرات مس به موم پارافین بر عملکرد سامانه مورد بررسی قرار گرفت. انتقال حرارت در طی فرآیند ذخیره‌سازی انرژی با استفاده از نرم‌افزار Ansys-Fluent شبیه‌سازی شده و داده‌های خروجی به‌صورت کانتورهای حرارتی ترسیم شدند. ویژگی‌های تغییر فاز جامد-مایع پارافین در سامانه و بهینه‌سازی پارامترهای باله (ضخامت باله و فاصله باله‌ها) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزودن باله‌ها تأثیر زیادی بر انتقال حرارت و تغییر فاز پارافین در سامانه داشت. همچنین اشاره شد که PCM با نازک‌تر شدن ضخامت باله‌ها سریع‌تر ذوب می‌شود. افزودن ۱ درصد مس به PCM، غلظت جرمی بهینه‌ای است که در آن دمای خروجی سیال کاری به میزان ۲ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد (Elarem et al., 2021).

همان‌طور که اشاره شد در آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی برای گرفتن انرژی حرارتی از خورشید از جمع‌کننده‌های مختلفی استفاده می‌گردد. یکی از رایج‌ترین جمع‌کننده‌ها، نوع سهموی می‌باشد. این جمع‌کننده‌ها به دلیل طراحی آسان، بازده نسبتاً مناسب، قیمت مناسب و سطح اشغال کمتر، بیشتر مورد توجه بوده و محققان سعی در بهبود کارایی این نوع جمع‌کننده‌ها دارند (Motevali, 2013). تاکنون فناوری‌های زیادی برای بهبود کارایی این نوع جمع‌کننده‌ها مورد استفاده قرار گرفته است که از جمله آن‌ها می‌توان به استفاده از انواع نانوسیال‌ها، تعقیب‌کننده‌های خورشیدی دقیق، لوله تحت خلا به‌عنوان دریافت‌کننده و منعکس‌کننده ثانویه اشاره نمود. یکی از منابع اتلاف انرژی در جمع‌کننده‌های سهموی شکل مربوط به لوله دریافت‌کننده است. مقداری از انرژی خورشیدی که به خط کانونی جمع‌کننده منعکس می‌شود، به علت خصوصیات ناسازگار سیال کاری، از لوله گیرنده تلف شده و از دسترس خارج می‌شود. استفاده از سیال مناسب با ماده تغییرفازدهنده مناسب یک روش کارآمد برای رفع مشکل ذکر شده است. یکی دیگر از عواملی که می‌تواند باعث بهبود کارایی سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی گردد، استفاده از سامانه تعقیب‌کننده دقیق و منطبق بر حداکثر تابش خورشیدی است. در پژوهشی تأثیر سامانه تعقیب‌کننده بر روی جمع‌کننده سهموی به‌صورت تجربی بررسی شد. نتایج نشان داد میزان انرژی دریافت‌شده از خورشید به میزان ۴۶/۴۶٪ با استفاده از سامانه ردیاب خورشیدی دو محوره افزایش می‌یابد (Bakos, 2006). در مطالعه‌ای اثر شکل جمع‌کننده بر بازده حرارتی آن به‌ویژه برای آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی بررسی شد. پژوهشگران به این نتیجه رسیدند، که جمع‌کننده‌های سهموی به دلیل قالب نه‌چندان پیچیده، بالا بودن بازده و همچنین مقرون به‌صرفه بودن نسبت به جمع‌کننده‌های دیگر بسیار موثر و مفید هستند (Abdessemed, Bougriou, & Guerraiche, & Abachi, 2018).

علاوه بر آن پژوهش‌هایی نیز در زمینه تأثیر استفاده از سیال کاری

می‌باشد. منعکس‌کننده سهموی خطی دارای یک ورقه استیل با دهانه سهموی می‌باشد که در طول جمع‌کننده امتداد یافته است و از یک محافظ آهنی به‌عنوان قابی برای منعکس‌کننده در نظر گرفته شد. سامانه مورد نظر از یک جمع‌کننده سهموی با پایه‌های فلزی و موتور محرک و سامانه ردیاب خورشیدی ساخته شده است. اجزای اصلی سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی در شکل ۱ نشان داده شده است.

سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی در مقیاس آزمایشگاهی در دانشگاه کردستان طراحی و ساخته شده و آزمایش‌های مورد نظر بر روی آن انجام گرفت. اجزای دستگاه عبارتند از: ۱- پایه دستگاه، ۲- منعکس‌کننده سهموی خطی، ۳- قاب آهنی، ۴- پمپ DC جهت ایجاد جریان آب در لوله گیرنده، ۵- تعقیب‌کننده خورشیدی، ۶- لوله جاذب، ۷- مجاری انتقال سیال، ۸- حسگرها، ۹- لوله حاوی PCM، ۱۰- واحد سردساز، ۱۱- مخزن سیال، ۱۲- لوله ماریپیچ درون مخزن



شکل ۱- اجزای اصلی سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی مورد استفاده در پژوهش شامل: ۱- پایه دستگاه، ۲- منعکس‌کننده سهموی خطی، ۳- قاب آهنی، ۴- پمپ DC، ۵- ردیاب خورشیدی، ۶- لوله جاذب، ۷- مجاری انتقال سیال، ۸- حسگرها، ۹- لوله حاوی PCM، ۱۰- واحد سردکننده، ۱۱- مخزن سیال و ۱۲- لوله ماریپیچ درون مخزن

Fig.1. The main components of the solar water desalination system are: 1- Chassis, 2- Linear parabolic reflector, 3- Steel frame, 4- DC pump, 5- Solar tracker, 6- Absorber tube, 7- Fluid transfer tubes, 8- Sensors, 9- Copper tube containing PCM, 10- Cooling unit, 11- Fluid tank, and 12- Spiral pipe inside the tank

سعی بر آن است که دمای درون مخزن ذخیره‌کننده بین ۸۰ تا ۱۰۰ درجه سلسیوس باشد. در نتیجه از آب به‌عنوان سیال ذخیره‌کننده و انتقال‌دهنده انرژی در سامانه استفاده شد. لوله جاذب جمع‌کننده سهموی برای جذب حداکثری و انتشار حداقل انرژی خورشیدی به رنگ سیاه مات پوشش داده شد. در درون لوله جاذب، لوله مسی با گام ۷ سانتی‌متر حاوی PCM قرار داده شد. ظرفیت مخزن آب شور که برای عمل تقطیر استفاده شد، ۷ لیتر بود. برای توزیع مناسب گرما درون مخزن تقطیر و امکان تقطیر حداکثری از سنگریزه‌ها استفاده گردید. در این حالت با توجه به ظرفیت گرمایی ویژه آب ($J \cdot g^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$) (۴/۱۹۲) که مقدار آن از ظرفیت گرمایی ویژه سنگریزه ($J \cdot g^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$) (۰/۷۸۲) بیشتر است، امکان گرمایش سامانه در مدت زمان کم به دلیل افزایش مساحت درگیر با سیال افزایش پیدا می‌کند (Nasri, Benatallah, Kalloum, & Benatallah, 2019).

دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی و متعلقات آن

اجزای مختلف سامانه آب‌شیرین‌کن همراه با متعلقات و جزئیات آن شامل نوع، جنس، اندازه و ویژگی هر جزء در جدول ۱ لیست شده است. ابتدا اجزای اصلی تشکیل‌دهنده سامانه آب‌شیرین‌کن و سپس زیر مجموعه هر عنصر با جزئیات توضیح داده می‌شود. کار اصلی جمع‌کننده، جذب تابش خورشیدی و تبدیل آن به انرژی گرمایی و انتقال آن به سیال عامل است که مهم‌ترین بخش هر آب‌شیرین‌کن خورشیدی است. از ورق استیل براق ضدزنگ صیقل، به‌عنوان بازتاباننده (آینه) جمع‌کننده سهموی استفاده شد. قابل ذکر است که جمع‌کننده سهموی یک آینه سهموی شکل است که در کانون آن یک لوله جاذب قرار دارد. نور خورشید با استفاده از آینه بر روی لوله دریافت‌کننده متمرکز شده و به سیال عامل انتقال می‌یابد. در این مطالعه هدف ذخیره کردن انرژی بوده و در عین حال

جدول ۱- جزئیات جمع‌کننده سهموی و سامانه آب‌شیرین‌کن

Table 1- Components details of the solar collector and desalination system

سیستم اصلی Primary system	اجزا Parts	جزئیات اجزا Part details
Solar collector	Parabolic trough collector	Reflector: Stainless steel (Area: 1500×900 mm ² , thickness: 1 mm) with the reflection coefficient of 0.91, absorption coefficient of 0.1, and concentration factor of 25. The inclination angle was 45° north-south.
	Receiving element	A 30 mm copper tube, 1mm thickness
Desalination system	Tank	An Aluminum tank, with diameter of 300 mm and height of 500 mm, covered by glass wool with thickness of 40 mm (for insulation)
	Spiral PCM tube	A copper tube with 1 mm thickness, 6 turns, and 10 mm pitch, placed in the middle of the tank and 100mm from the bottom.
	Working fluid	Nanofluid (Water + Al ₂ O ₃ , 3.75%)
	Fluid pump	DC 12-volt, Max. 10 Ampere, 5.9 l/min, Model (NM, 32-60-180)
	Distillation system	0.5 mm thick steel, with a conical water collector, and capacity of 10 liters.
Tracking mechanism	Electromotor	A DC electromotor, 12 V, 40 rpm, Model: JSX69-370, China.
	Gearbox	A 1:80 Gearbox, Model: 2363-75-China
	Detectors	Two 10 Watt PV, Monocrystal, RT010-M, Restar solar Co, China
	Controlling circuit	An Arduino, UNO R3 (connected to a laptop)
	PV Panel	10W, YL 10C-18b, Module efficiency: 17.4%, Current at P _{max} : 0.56A

با تابش نور خورشید، آینه سهموی (۳) تابش خورشید را روی لوله دریافت‌کننده منعکس کرده و باعث گرم شدن آب درون لوله جاذب می‌گردد. بخشی از این انرژی حرارتی توسط لوله PCM که در درون لوله جاذب قرار گرفته، جذب شده و بخش دیگر باعث گرم شدن سیال کاری جریان یافته از لوله جاذب می‌گردد. آب گرم شده به وسیله پمپ (۴) از طریق مجاری جریان سیال (۲) به درون لوله ماریپچ داخل مخزن (۷) می‌رود و سبب گرم شدن آب شور درون مخزن می‌شود و سپس آب از طریق خروجی لوله ماریپچ به درون لوله جاذب جریان پیدا می‌کند. در واقع مسیر جریان سیال کاری (آب) یک فرآیند بسته است که سبب گرم شدن آب شور درون مخزن می‌شود.

فرآیند سردسازی با استفاده از یک منبع (۹) که در قسمت فوقانی مخزن تقطیر (۷) قرار گرفته انجام می‌شود. در این حالت قطرات بخار درون مخزن به سطح زیرین مخزن سردساز (که به صورت یک کیف معکوس است) برخورد کرده و عمل میعان صورت می‌گیرد. قطرات ایجادشده در واحد سردساز با توجه به هندسه شیبدار، به سمت نوک کیف (۱۱) حرکت نموده و از لوله خروجی به شیشه آب (۸) انتقال داده می‌شود. آب گرم خارج‌شده (۱۰) از قسمت سردساز می‌تواند به عنوان ورودی مخزن که پیش‌گرمایش در آن انجام شده مورد استفاده در سامانه قرار گیرد. فرآیند شیرین‌سازی آب شور در سامانه آن قدر ادامه می‌یابد تا بتوان به میزان آب شیرین تولیدی قابل توجه درون سامانه دست پیدا کرد. قابل ذکر است به دلیل استفاده از PCM در سامانه

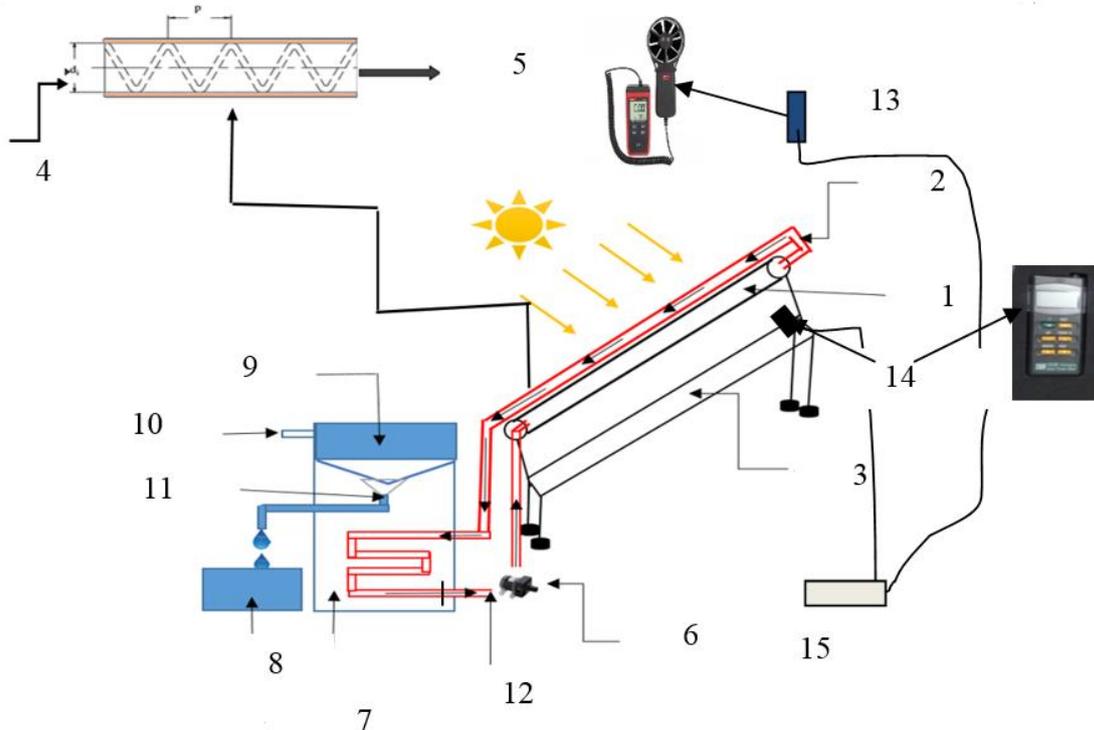
در مرکز مخزن یک لوله فنری تعبیه شده است و برای ورود و خروج این لوله فنری ماریپچی، دو دریچه بر روی بدنه مخزن قرار گرفته است. برای جلوگیری از تلفات حرارتی، اطراف مخزن با عایق به ضخامت ۱۰ میلی‌متر از جنس فوم پوشش داده شد. در ورودی جمع‌کننده یک پمپ سیال ۱۲ ولت دی سی قرار گرفته است. برای تهیه آب شور، با توجه به این که درصد نمک آب شور دریا ۱۵ گرم در هزار است، به میزان ۱۵ گرم نمک بلورین (نمک دریا) در یک لیتر آب شرب معمولی حل گردیده و به مقدار مورد نیاز در سامانه قرار داده شد.

توضیح روند کارکرد سامانه

مهم‌ترین قسمت یک سامانه حرارتی خورشیدی، جمع‌کننده آن می‌باشد و در جمع‌کننده سهموی لوله دریافت‌کننده (۱) نقش مهمی در بازده حرارتی جمع‌کننده دارد. استفاده از بخش ذخیره‌کننده انرژی باعث می‌گردد که انرژی حرارتی در ساعات اوج تابش در آن ذخیره شده و در هنگام کاهش تابش خورشیدی آزاد گردد. هندسه سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی در شکل ۲ نشان داده شده است. سیال جریان یافته (۴) در درون لوله ماریپچ داخل مخزن به وسیله پمپ به داخل لوله‌ی جاذب جمع‌کننده سهموی وارد می‌شود. همان‌طور که اشاره شد درون لوله جاذب یا لوله دریافت‌کننده، یک لوله مسی ماریپچ با گام ۷ سانتی‌متر قرار دارد، که حاوی پارافین است.

اشاره شده به همراه بادسنج (۱۳) و پیرانومتر (۱۴) و ثبت کننده داده (۱۵) در شکل ۲ نمایش داده شده است.

خورشیدی در هنگام نبود تابش خورشید نیز می توان از سامانه استفاده کرد و همین امر سبب افزایش بازده سامانه می گردد. شماتیک اجزای



شکل ۲- شماتیک سامانه آب شیرین کن خورشیدی همراه با جزئیات شامل: ۱- لوله جاذب، ۲- خروجی سیال، ۳- منعکس کننده، ۴- ورودی سیال کاری، ۵- خروجی سیال کاری، ۶- پمپ، ۷- مخزن آب شور، ۸- آب شیرین، ۹- واحد سردساز، ۱۰- ورودی آب سرد، ۱۱- جریان بخار، ۱۲- ورودی سیال کاری به پمپ، ۱۳- بادسنج، ۱۴- پیرانومتر و ۱۵- دیتالاگر

Fig.2. Schematic of solar desalination: 1- Absorber tube, 2- Fluid outlet, 3- Reflector, 4- Working fluid inlet, 5- Working fluid outlet, 6- Pump, 7- Salt water tank, 8- Outlet drinkable water, 9- Chiller unit, 10- Cold water inlet, 11- Steam flow, 12- Working fluid inlet to the pump, 13- Anemometer, 14- pyranometer, and 15- Datalogger

سامانه تعقیب کننده تابش خورشیدی پنلی

استفاده از سامانه تعقیب کننده خورشیدی مناسب، یکی از روش های مهم در افزایش راندمان دستگاه های آب شیرین کن خورشیدی است. این سامانه دارای دو عدد پنل خورشیدی مدل RT010M است که با زاویه ۴۵ درجه در قسمت بالای لوله جاذب جمع کننده سهموی قرار گرفته است. با تغییر زاویه تابش خورشید در طول ساعات روز، سامانه تعقیب کننده خورشید جمع کننده را ملزم به تغییر زاویه به موازات خورشید می کند. در طول روز، زاویه تابش خورشید باید بر سطح جمع کننده عمود قرار گیرد تا بیشترین راندمان سامانه به دست آید. در سامانه تعقیب کننده، جریان عبوری از پنل خورشیدی به برد آردوینو-36Lenovo Z500 انتقال و سپس به موتور محرک جمع کننده فرمان داده و به ازای هر بار که پنل ها تابش خورشید را حس می کند و اختلاف بین دو خروجی پنل به وجود می آید،

ماده تغییر فاز دهنده و نحوه قرارگیری آن درون لوله

مارپیچ

تغییر فاز دهنده به کار گرفته در این آزمایش پارافین وکس ساخت شرکت ایران پارافین به مقدار ۱۷۱ گرم می باشد. مواد تغییر فاز دهنده، که تغییر فاز آن ها حالت جامد به مایع است، بیشترین استفاده را در مقایسه با دیگر PCM ها دارند. زیرا در یک بازه کوتاه زمانی، مقدار انرژی حرارتی زیادی ذخیره می کند. در این تحقیق نیز به دلیل خواص منحصر به فرد نظیر عدم فساد، نقطه ذوب پایین، ضریب انتقال حرارت، ظرفیت گرمای ویژه بالا و در دسترس بودن از پارافین استفاده گردید. پارافین RT50 درون لوله مسی با قطر ۶ میلی متر و با ضخامت ۰/۶ میلی متر با گام ۷۰ میلی متر در طول ۲۰۰۰ میلی متر ریخته شده و سپس داخل دریافت کننده مرکزی قرار گرفت. خواص ترموفیزیکی پارافین در جدول ۲ ارائه شده است.

استفاده از یک الکتروموتور جریان مستقیم ۱۲ ولت گیربکس دار محور شده و جمع‌کننده را در جهت تابش خورشید تغییر مکان می‌دهد. با جمع‌کننده به کار می‌افتد.

الکتروموتور قرار داده شده بر روی محور جمع‌کننده سهموی فعال شده و جمع‌کننده را در جهت تابش خورشید تغییر مکان می‌دهد. با

جدول ۲- خواص پارافین واکس مورد استفاده به عنوان PCM داخل جمع‌کننده
Table 2- Properties of paraffin wax used as PCM inside the collector

ویژگی Property	دمای حالت مایع Liquid temperature (K)	چگالی Density (kg.m ⁻³)	ضریب انبساط حجمی Volumetric expansion coefficient (1.K ⁻¹)	گرمای نهان Latent heat (kJ.kg ⁻¹)	هدایت حرارتی Thermal conductivity (W.m ⁻¹ K ⁻¹)	گرمای ویژه Specific heat (kJ.kg ⁻¹ K ⁻¹)	دمای حالت جامد Solid temperature (K)
مقدار Value	325	783	0.000561	166	0.2	2.1	317.3

تابش خورشیدی افزایش می‌یابد و این نشان می‌دهد که مقداری از انرژی حرارتی دریافتی در جو زمین به گرما تبدیل می‌شود. این امر توسط پدیده‌های محیطی از جمله ذرات خاک و مولکول‌های هوا رخ می‌دهد و باعث افزایش دمای هوا می‌شود. با افزایش میزان گرد و خاک و آلاینده‌های محیطی این افزایش دما بیشتر خواهد بود (Rehman & Mohandes, 2008). اما با افزایش شدت تابش خورشیدی، در اثر تبخیر مولکول‌های آب (بین مولکول‌های هوا) رطوبت نسبی (RH) به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد (Rehman & Mohandes, 2008). همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، دمای هوای محیطی از ۲۳/۳ به ۳۲/۳ درجه سلسیوس و RH از ۲۰/۲ درصد تا ۱۳ درصد تغییر می‌کند. علاوه بر آن میزان تغییرات سرعت باد محیط بین ۰/۱ تا ۱/۲ متر بر ثانیه متغیر است و این تغییرات در طول روزهای آزمایش محسوس نبوده است.

محاسبات نظری: عملکرد حرارتی جمع‌کننده با سامانه ذخیره‌ساز انرژی

بخش عمده انرژی خورشیدی دریافتی از جمع‌کننده، تلف شده و انرژی باقی‌مانده به صورت انرژی گرمایی مفید می‌تواند با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شود:

$$\dot{Q}_u = A_c F_R ([I_o (\tau\alpha)] - U_L (T_i - T_o)) \quad (1)$$

($\tau\alpha$) فاکتور جذب انرژی خورشیدی است.

بازده گرمایی جمع‌کننده مطابق با ASHRAE standard 2003 (Eltawil, Mostafa, Azam, & Alghannam, 2018):

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{A_c I_o} = \frac{\dot{m}_p (T_{oi} - T)}{A_c I_o} \quad (2)$$

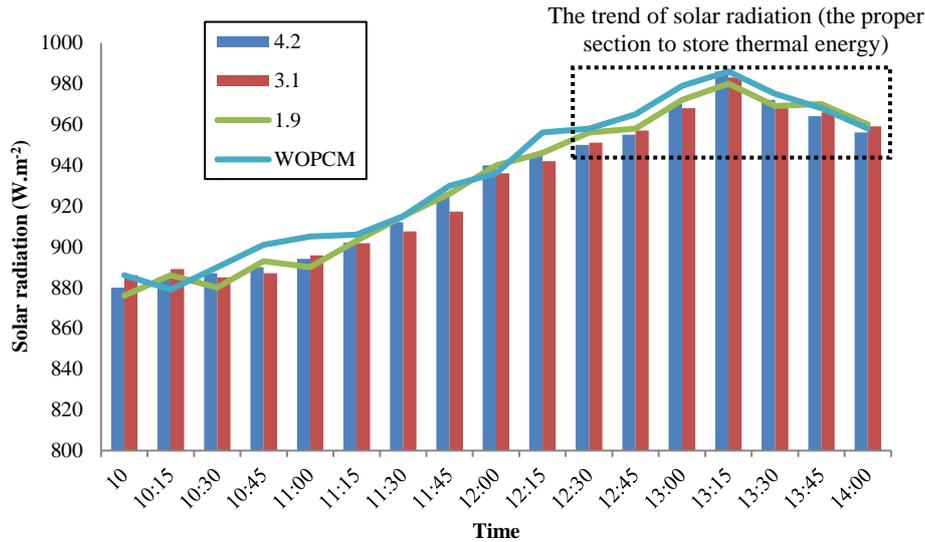
حس‌گرها و ابزارهای اندازه‌گیری

به منظور ثبت دما در نقاط مختلف سامانه از ترموکوپل‌های نوع K استفاده شد. یکی از ترموکوپل‌ها در داخل مخزن آب شور و دیگری بر روی مبدل ماریچ قرار داده شد. هم‌چنین دو حس‌گر دما در خروجی و ورودی جمع‌کننده و یک حس‌گر برای ثبت دمای محیط، در نظر گرفته شد. برای اندازه‌گیری سرعت جریان هوای محیط از بادسنج (UNI-T-363, China) با دقت 0.1 m.s^{-1} استفاده شد. برای سنجش رطوبت محیط از رطوبت‌سنج (HT, 3600, Lutron, Taiwan) با دقت ۱٪ استفاده شد. هم‌چنین برای اندازه‌گیری شدت تابش خورشیدی از پیرانومتر دیجیتالی (TES 1333R, CMP6, Taiwan) با دقت 1 W.m^{-2} استفاده شد. در طی چهار روز آزمایش، آب خروجی از آزمایش در صبح روز بعد به وسیله ترازوی دیجیتالی AND مدل FX-3000GD به ظرفیت ۱۵۰۰ گرم با دقت ۰/۰۱ گرم، وزن می‌شد.

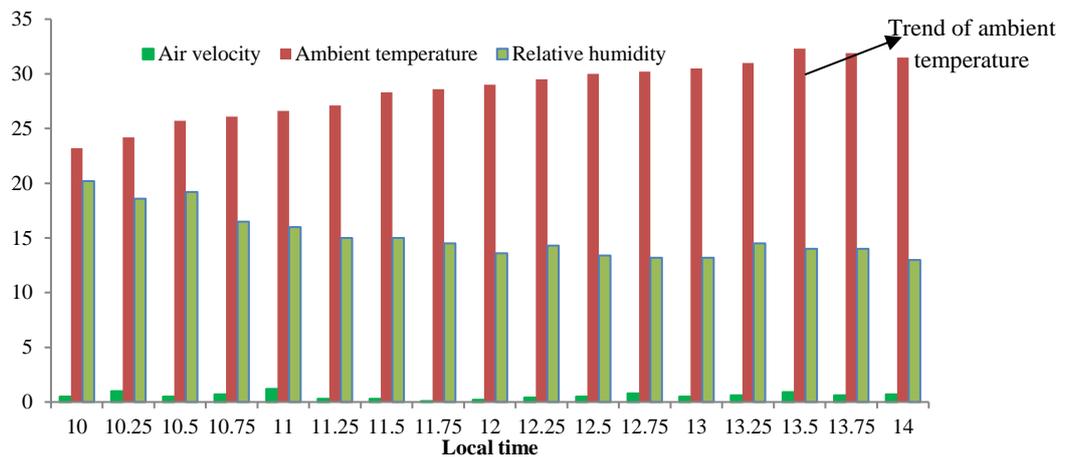
داده‌های محیطی

تغییرات شدت تابش خورشید به سطح جمع‌کننده در روزهای آزمایش در شکل ۳ نشان داده شده است. متوسط تابش خورشیدی در روزهای آزمایش از ساعت ۱۰:۰۰ افزایش یافته و در حدود ساعت ۱۳:۰۰ تا ۱۳:۳۰ به حداکثر میزان خود (۹۸۰ وات بر مترمربع) می‌رسد. پس از آن روند کاهشی به خود می‌گیرد. با توجه به تغییرات نمودار شدت تابش خورشیدی مشخص می‌شود که زمان مناسب برای ذخیره انرژی حرارتی باید زمانی در نظر گرفته شود که شدت تابش خورشید بیشینه است. این حالت می‌تواند از ساعت ۱۲:۰۰ تا ۱۴:۰۰ در نظر گرفته شود. لازم به ذکر است که در روزهای آزمایش شرایط محیطی مناسب و آسمان صاف بود.

میانگین تغییرات دمای محیط و رطوبت نسبی در طول روزهای آزمایش در شکل ۴ نشان داده شده است. دمای هوا با افزایش شدت



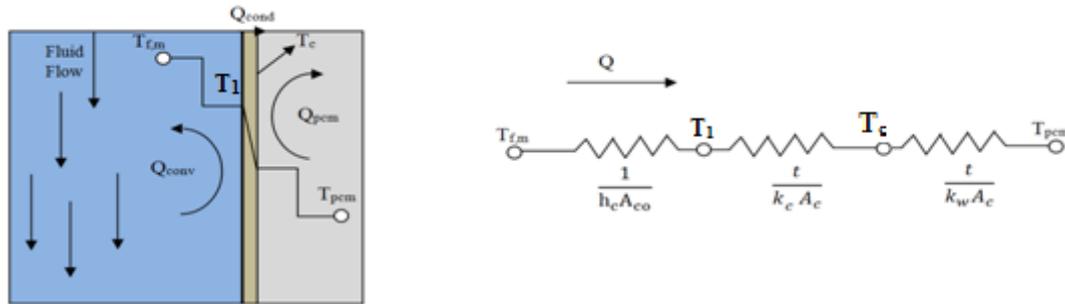
شکل ۳- تغییرات شدت تابش خورشیدی در طول زمان آزمایش
Fig.3. Changes in solar radiation intensity during the test time



شکل ۴- روند تغییرات دما، رطوبت و سرعت هوای محیط در طول ساعات داده‌گیری
Fig.4. Changes in temperature, humidity, and ambient air velocity during the hours of data collection

توسط واحد PCM، مشتمل بر دو بخش اصلی است: پارافین و لوله‌های مسی به‌عنوان پوشش. مدار گرمایی جمع‌کننده سهموی، شامل سیال، دیواره و PCM که به‌عنوان سیستم ذخیره‌سازی به‌کار گرفته شده است و عملکرد گرمایی جمع‌کننده می‌باشد. شکل ۳ انرژی گرمایی جذب‌شده، که از سیال به دیواره مسی، از طریق همرفت منتقل شده و سپس از دیواره به پارافین هدایت شده است، را نشان می‌دهد (Esakkimuthu *et al.*, 2013). در این حالت دمای پارافین (PCM) افزایش یافته و در نتیجه فاز PCM در نقطه ذوب تغییر می‌کند (شکل ۵).

سیستم ذخیره‌سازی شامل لوله مسی است که داخل لوله دریافت‌کننده قرار گرفته و با موم پارافین پر شده است. در جریان ذخیره‌سازی انرژی (شارژ)، زمانی که شدت تابش در سطح بالایی قرار دارد، سیال گرم شده و پارافین به حالت جامد در داخل لوله ماریچ از طریق جذب گرما از سیال، به حالت مایع تغییر می‌یابد. هنگامی که شدت تابش خورشیدی در سطح پایینی است، دمای سیال داخل جمع‌کننده کمتر از دمای محیط است. بنابراین تغییر فاز بالعکس شده و پارافین انرژی گرمایی را به سیال جریان یافته در در داخل لوله جمع‌کننده و محفظه تقطیرکننده منتقل می‌نماید. انرژی جذب‌شده



شکل ۵- مدار انتقال حرارت برای سیال، لوله مسی و پارافین به‌عنوان ماده PCM
 Fig.5. Heat transfer circuit for fluid, copper tube, and paraffin as PCM material

انرژی مصرف‌شده سامانه آب‌شیرین‌کن در طول مسیر فرآیند شیرین‌سازی را نسبت انرژی مصرفی می‌گویند. انرژی مصرفی برای تبخیر آب از رابطه (۱۰) قابل‌محاسبه است (Morad, El- Maghawry, & Wasfy, 2017).

$$Q_w = h_{fg} \cdot m_{w,ev} \quad , \quad h_{fg} = 2 \cdot 503 \times 10^6 - 2 \cdot 386 \times 10^3 (T - 273 \cdot 16) \quad (10)$$

که در آن $m_{w,ev}$ آب تبخیری (kg) و h_{fg} گرمای نهان تبخیر در هنگام تصفیه شدن آب دمای نمک‌زدایی بر حسب کلون می‌باشد.

بر این اساس بازده انرژی جمع‌کننده طبق استاندارد ASHRAE 2003 از رابطه (۱۱) قابل‌محاسبه خواهد بود:

$$\eta' = \frac{Q_w}{A_c I_o} \quad (11)$$

مقدار انرژی لازم برای گرم کردن و تبخیر آب و انرژی کل (الکتریکی و گرمایی) ورودی به گرمکن، برای تعیین بازدهی تبخیر آب، رابطه (۱۲) لحاظ می‌گردد (Mousa & Abu Arabi, 2012).

$$\eta_{des} = \frac{Q_w}{Q_f + E_{elc}} \quad (12)$$

عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی با پارامتر مصرف انرژی ویژه (SEC) محاسبه می‌گردد. SEC به‌صورت انرژی لازم برای تبخیر کردن یک کیلوگرم از آب تعریف می‌شود که به‌صورت رابطه (۱۳) مشخص می‌شود.

$$SEC = \frac{Q_m}{W_o} \quad (13)$$

تاریخ و محل انجام آزمایش

این پژوهش طی چهار آزمایش مجزا در ۴ روز متوالی ۲، ۳، ۴ و ۵ شهریور ماه، سال ۱۴۰۱ برای سه دبی حجمی سیال ۱/۹، ۳/۱ و ۴/۲ لیتر بر دقیقه و حالت بدون مواد تغییرفازدهنده در آزمایشگاه انرژی‌های تجدیدپذیر دانشگاه کردستان در شهر سنندج انجام شد. آزمایشات در شرایط مشابه و از ساعت ۱۰:۰۰ آغاز و در ساعت ۱۴:۰۰

میزان انرژی گرمایی منتقل‌شده از جمع‌کننده به سیال، می‌تواند با در نظر گرفتن دمای ورودی ($T_{f,in}$) و خروجی ($T_{f,out}$) با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شود (Serale, Goia, & Perino, 2016):

$$\dot{Q}_f = \dot{m} c_p (T_{f,in} - T_{f,out}) \quad (3)$$

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

$$\dot{Q}_{conv} = h_c A_{co} (T_{f,m} - T_{c,m}) \quad (4)$$

که در آن h_c به کمک رابطه زیر تعیین می‌گردد.

$$h_c = \frac{k}{d} Nu \quad (5)$$

اعداد ناسلت، رینولدز، پرانتل جهت محاسبه ضریب انتقال گرما در جمع‌کننده لازم و ضروری هستند. Nu عدد ناسلت می‌باشد که مقدار آن برای این تحقیق با استفاده از رابطه (۶) قابل‌محاسبه است.

$$Nu = 0.023 (Re)^{0.8} (Pr)^{0.4} \quad (6)$$

در رابطه (۶)، Re و Pr به ترتیب عدد رینولدز و عدد پرانتل هستند. این اعداد با استفاده از رابطه (۷) و (۸) بیان می‌شوند:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (7)$$

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad (8)$$

انتقال گرمایی که به پارافین داخل لوله مسی منتقل شده است، از رابطه (۹) قابل‌محاسبه است (Koca, Oztop, Koyunc, & Varol, 2008):

$$\dot{Q}_{cond} = k_w A_{co} \frac{(T_{c,m} - T_{pcm})}{t_c} \quad (9)$$

با توجه به تغییر فاز در PCM، فرآیند ذخیره‌سازی و تخلیه رخ می‌دهد، انرژی مبادله‌پذیر کل با روابط ارائه‌شده در منبع (Goyal, Tiwari, & Garg, 1998) تعریف می‌شود.

بازده انرژی

نسبت انرژی مصرف‌شده برای تقطیر آب درون مخزن به کل

محفظه آب شور انتقال می‌یابد. بنابراین از افت حرارت در سامانه جلوگیری نموده و دمای آب شور افزایش می‌یابد. این در حالی است که با دبی ۱/۹ لیتر بر دقیقه به دلیل سرعت کم، سیال کاری به کندی در سامانه جریان یافته و گرمای ورودی به میزان محدودی به آب شور انتقال داده می‌شود. به عبارت دیگر با افزایش دبی جریان سیال گرمای بیشتری از جمع‌کننده خارج می‌شود (Goudarzi, Shojaeizadeh, & Nejati, 2014).

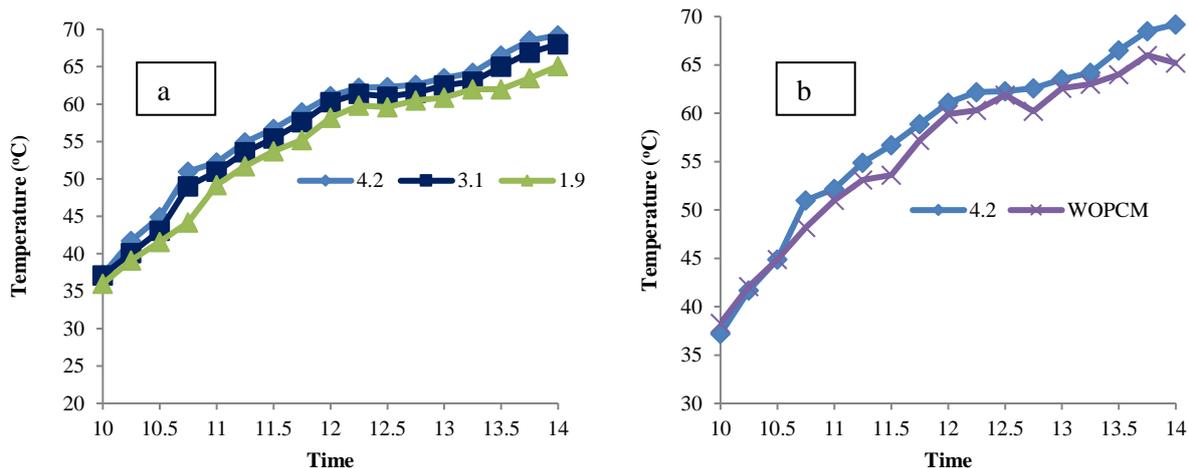
علاوه بر آن در شکل ۶-ب تغییرات دمای آب شور برای حالت با و بدون مواد تغییرفازدهنده در سامانه با دبی ۴/۲ لیتر بر دقیقه نمایش داده شده است. با توجه نمودارها، مشخص است که در حالت بدون مواد تغییرفازدهنده، دمای آب شور دارای نوسانات زیادی نسبت به حالت با مواد تغییرفازدهنده است. در این حالت نوسانات حرارتی به‌وجودآمده از تابش خورشیدی به‌وسیله لوله ماریپیچ حاوی مواد تغییرفازدهنده جذب و یا آزاد شده بنابراین حرارت تولیدی متعادل می‌شود. علاوه بر آن دمای آب شور برای حالت بدون مواد تغییرفازدهنده کمتر از حالت با مواد تغییرفازدهنده است. در این حالت به دلیل احتمال تماس بیشتر سیال کاری با سطح درونی لوله دریافت‌کننده عدد ناسلت افزایش یافته و به تبع آن جذب حرارت بهبود می‌یابد. تحقیقات در مورد ویژگی‌های حرارتی جمع‌کننده‌های سهموی نتایج مشابه را گزارش کرده‌اند (Zhao, Liu, & Zhang, 2009; Li, Pei, Munir, & Ji, 2016; Muñoz, Rovira, Sánchez, & Montes, 2017; Jean, Brown, Jaffe, Buonassisi, & Bulovic, 2015).

پایان یافته‌اند. لازم به ذکر است که در حالت بدون مواد تغییرفازدهنده دبی حجمی سیال ۴/۲ لیتر بر دقیقه در نظر گرفته شد. در این حالت پمپ در حداکثر دبی خود انتقال سیال را انجام می‌داد.

نتایج و بحث

تغییرات حرارت در سامانه

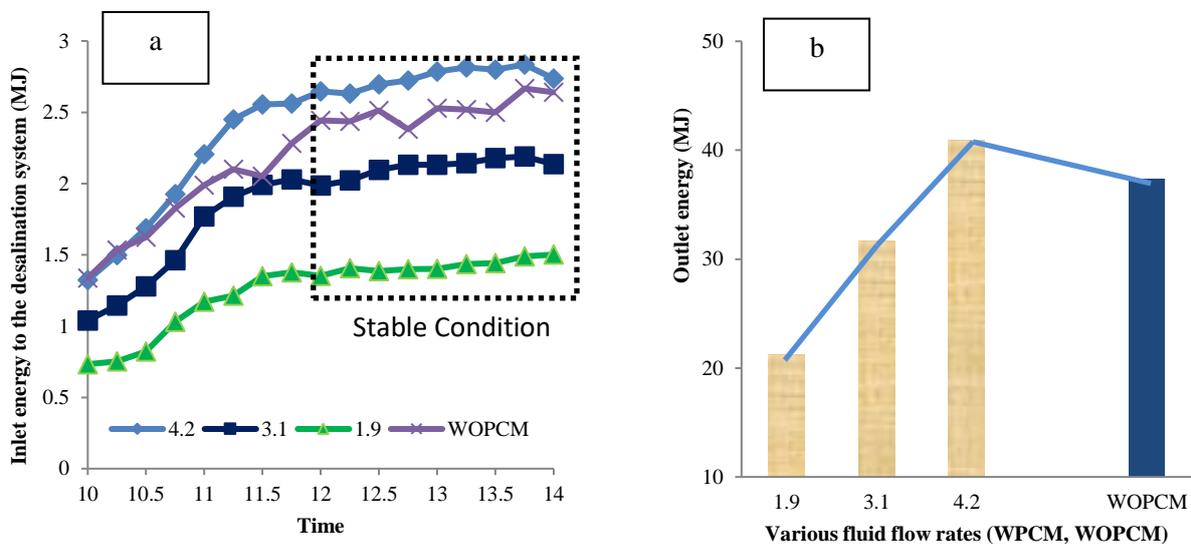
در شکل ۶-الف دمای سیال در مخزن تقطیر با سه حالت از جریان سیال در داخل سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی نشان داده شده است. برای همه شرایط، مواد تغییرفاز در درون لوله جاذب حرارت قرار دارد. با توجه به شکل مشخص است که برای انواع جریان سیال، دمای سیال با تغییر شدت تابش تغییر می‌کند و نرخ گرمایش با افزایش و کاهش تابش به‌ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. با توجه به متغیر بودن سرعت جریان سیال در سامانه، میزان افزایش و کاهش دمای سیال متفاوت بوده است. در این تحقیق همان‌طور که اشاره شد از آب به‌عنوان سیال کاری (به دلیل ظرفیت گرمایی بیشتر) استفاده گردید. لازم به ذکر است، سامانه حداقل به مدت یک ساعت قبل از شروع آزمایش و داده‌گیری در مقابل شرایط محیطی قرار داده می‌شد. در ساعات شروع داده‌برداری قسمتی از انرژی واردشده به لوله دریافت‌کننده صرف گرم کردن مواد تغییرفازدهنده و لوله ماریپیچ درون دریافت‌کننده شده و دمای ابتدایی سامانه را کاهش می‌دهد. بیشترین دمای آب شور برای سرعت جریان سیال با دبی ۴/۲ لیتر بر دقیقه و کمترین آن برای دبی ۱/۹ لیتر بر دقیقه اتفاق می‌افتد. با دبی ۴/۲ لیتر بر دقیقه، گرمای جذب‌شده توسط لوله جاذب سریعاً به‌وسیله سیال به



شکل ۶- تغییرات دمای آب داخل محفظه تقطیر: الف) برای شرایط مختلف از جریان سیال و ب) برای دو حالت با تغییرفازدهنده و بدون تغییرفازدهنده با جریان سیال ۴/۲ لیتر بر دقیقه

Fig.6. Changes of water temperature inside the distillation chamber: a) for different fluid flows and b) for two conditions with (4.2) and without (WOPCM) phase changer and fluid flow of 4.2 l min⁻¹

دبی‌های ۴/۲، ۳/۱ و ۱/۹ لیتر بر دقیقه از ۱/۵۳ تا ۲/۸۳، ۱/۱۴ تا ۲/۱۸ و ۰/۷۳ تا ۱/۴۸ مگاژول تغییر می‌کند. علاوه بر آن در شکل ۷-الف تغییرات انرژی حرارتی ورودی به محفظه آب‌شیرین‌کن خورشیدی در حالتی که لوله دریافت‌کننده بدون مواد تغییرفازدهنده است، نشان داده شده است. در این نمودار نیز مشخص است که در ساعات ابتدایی بخشی از انرژی حرارتی تولیدی صرف افزایش دمای مواد تغییرفازدهنده می‌شود (تقریباً ۰/۳۸ مگاژول) اما پس از آن روند افزایشی به خود می‌گیرد. همچنین با توجه به نمودار، نوسانات انرژی حرارتی برای حالتی که سامانه بدون مواد تغییرفازدهنده کار می‌کند به دلیل عدم انرژی‌گیری و آزادسازی مداوم سامانه، بیشتر است (Alimohammadi et al., 2020, Muñoz et al., 2017, Jean et al., 2015). همچنین در شکل ۷-ب مجموع انرژی حرارتی خروجی از جمع‌کننده در شرایط مختلف از سامانه نشان داده شده است. میزان گرمای جذب‌شده توسط سامانه با افزایش دبی جریان سیال از ۱/۹ تا ۴/۲ لیتر بر دقیقه از ۲۱/۲۶ تا ۴۰/۸۷ مگاژول افزایش می‌یابد. انرژی حرارتی برای سامانه با مواد تغییرفازدهنده بیشتر از حالت بدون مواد تغییرفازدهنده با دبی ۴/۲ لیتر بر دقیقه است. انرژی حرارتی ورودی در این حالت ۳۷/۳۶ مگاژول (۳/۵۱ مگاژول) است.



شکل ۷-الف) تغییرات انرژی حرارتی ورودی و ب) انرژی کل ورودی به محفظه آب‌شیرین‌کن خورشیدی برای دبی‌های مختلف از سیال کاری و حالت بدون مواد تغییرفازدهنده نسبت به زمان

Fig.7. a) Variations of input thermal energy and b) total input energy to the solar water softener chamber for different flow rates of the working fluid and the state without phase-changing materials in relation to time

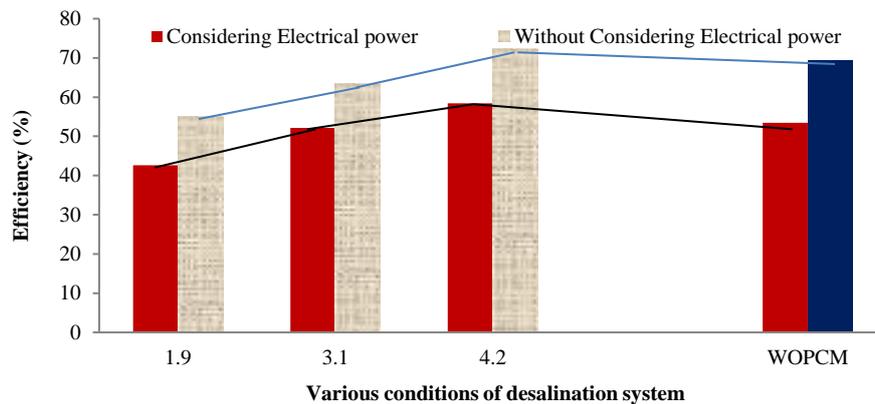
و بدون در نظر گرفتن انرژی الکتریکی که برای به جریان درآوردن سیال استفاده می‌گردد، در شکل ۸ نشان داده شده است. بازده حرارتی در هر دو حالت با افزایش جریان سیال از ۱/۹ تا ۴/۲ لیتر بر دقیقه

در شکل ۷-الف انرژی گرمایی واردشده به مخزن از طریق جمع‌کننده سهموی برای سه نوع جریان سیال و برای حالت بدون مواد تغییرفازدهنده نشان داده شده است. برای هر سه دبی ۴/۲، ۳/۱ و ۱/۹ لیتر بر دقیقه لوله ماریپیچ حاوی پارافین، درون لوله دریافت‌کننده انرژی خورشیدی قرار دارد. با توجه به شکل می‌توان دریافت که روند تغییرات میزان انرژی حرارتی ورودی مانند دمای آب شور در سامانه متغیر بوده و با افزایش شدت تابش خورشیدی افزایش می‌یابد. میزان انرژی حرارتی از ساعات ابتدایی داده‌برداری افزایش یافته و پس از آن با کاهش شدت تابش خورشیدی از ساعت ۱۳:۳۰ روند کاهشی به خود می‌گیرد. میزان دریافت انرژی حرارتی در حالی که دبی سیال از ۱/۹ تا ۴/۲ لیتر بر دقیقه افزایش می‌یابد، به صورت افزایشی می‌باشد. به این دلیل که با افزایش سرعت جریان سیال، انرژی حرارتی دریافت‌شده به وسیله لوله، از چرخه خارج شده و مستقیماً وارد محفظه می‌گردد. در دبی ۱/۹ لیتر بر دقیقه، دمای سطح بیرونی لوله جاذب بیشتر از حالت‌هایی است که دبی سیال بیشتر است. در دبی‌های بالاتر دمای سطح بیرونی لوله با جریان بیشتر سیال کاری در درون لوله جاذب، کاهش یافته و حتی الامکان به آب شور درون محفظه انتقال می‌یابد. انرژی ورودی به مخزن برای

یکی از عوامل مهمی که عملکرد مناسب یک سامانه خورشیدی را تعیین می‌کند، بازده حرارتی جمع‌کننده خورشیدی است. تغییرات بازده و بهره‌وری انرژی گرمایی جمع‌کننده خورشیدی لوله سهموی، با

انرژی حرارتی تولیدی در مقایسه با انرژی الکتریکی مصرفی کمتر باشد، بازده سامانه به شدت کاهش می‌یابد. به این دلیل بازده سامانه در همه حالت‌ها کمتر از شرایطی است که انرژی الکتریکی در نظر گرفته نشده است. در تحقیقات مشابه استفاده از نانو سیال باعث بهبود کارایی جمع‌کننده سهموی گردید (Khosravi, Malekan, & Assad, 2019; Alimohammadi et al., 2020). سایر محققان که از سامانه‌های خورشیدی برای تأمین انرژی گرمایی در آب‌شیرین‌کن‌ها استفاده نموده‌اند، نتایج مشابهی را گزارش کرده‌اند (Lim et al., 2016, Cheng & Zhan, 2016).

افزایش یافته و از ۴۲/۶۳ درصد به ۵۸/۴۲ درصد رسید. این مقادیر برای هر دبی سیال با در نظر گرفتن انرژی الکتریکی مصرفی در سامانه کمتر است. در حالتی که دبی جریان سیال بیشینه است، توان الکتریکی بیشتری مورد مصرف قرار می‌گیرد، بنابراین بازده حرارتی نیز افت پیدا می‌کند. برای سامانه‌ای که از مواد تغییرفازدهنده استفاده نشده است با دبی ۴/۲ لیتر بر دقیقه و شرایط یکسان، بازده حرارتی در هر دو حالت با و بدون در نظر گرفتن انرژی الکتریکی کمتر است (۵/۰۲ و ۳/۵۱ درصد). با توجه به این‌که در این تحقیق انرژی الکتریکی برای پمپ و الکتروموتور مصرف می‌گردد، در صورتی که



شکل ۸- تغییرات بازده جمع‌کننده خورشیدی با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن انرژی الکتریکی
Fig.8. Collector efficiency variations with and without considering electrical energy

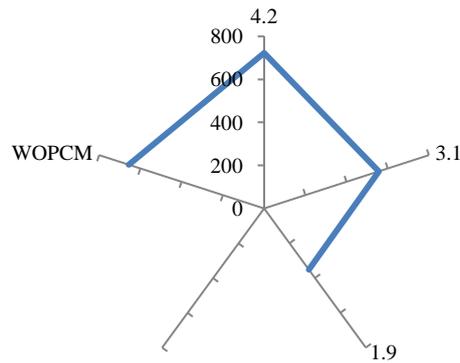
لیتر بر مترمربع است که با توجه به عدم وجود لوله ماریچ با پارافین درون لوله جاذب گرما و کاهش عدد ناسلت، کمتر از حالت با مواد تغییرفازدهنده است. این حالت باعث می‌شود که ضریب انتقال حرارت همرفت درون لوله دریافت‌کننده تابش خورشیدی کاهش یافته و انرژی از اطراف لوله تلف شود. بنابراین دمای سیال کاهش یافته و سرعت تبخیر کمتر شود.

بازده آب‌شیرین‌کن و مصرف انرژی ویژه (SEC)

برای ارزیابی عملکرد سامانه خشک‌کن خورشیدی مجهز به مواد تغییرفازدهنده و سامانه جریان بازگشتی از معیارهای مختلفی استفاده می‌شود که مصرف انرژی ویژه SEC و راندمان کلی دو پارامتر معروف برای این منظور هستند. با توجه به شکل ۱۰-الف، واضح است که SEC برای سیستم بدون PCM بیشتر از سایر موارد است و در حالت با ماده تغییرفازدهنده مقدار آن کاهش می‌یابد. به این معنی که با وجود PCM، انرژی حرارتی و الکتریکی مورد نیاز برای تبخیر ۱ کیلوگرم آب، کاهش محسوسی می‌یابد. علاوه بر آن با افزایش سرعت جریان سیال از ۱/۹ به ۴/۲ لیتر بر دقیقه در سامانه، SEC کاهش می‌یابد.

میزان آب شیرین تولیدی

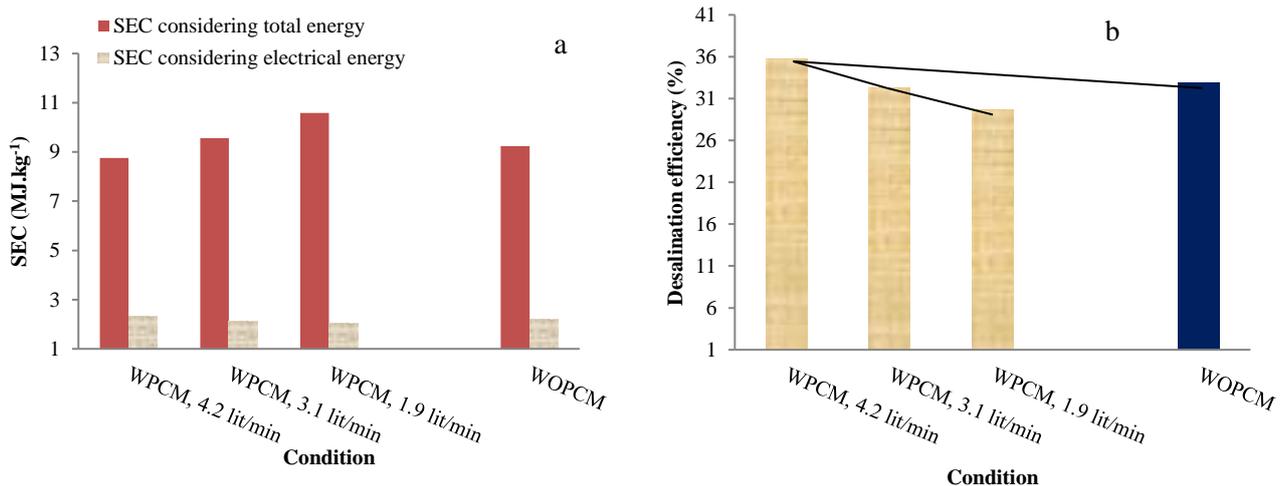
در شکل ۹ میزان آب تولیدی برای هر آزمایش نشان داده شده است. لازم به ذکر است جمع‌آوری آب از زمان شروع آزمایش و تا صبح روز بعد (قبل از شروع آزمایش بعدی) صورت می‌پذیرفت. با توجه به این‌که راندمان حرارتی برای دبی جریان سیال ۴/۲ لیتر بر دقیقه بیشتر از دبی‌های دیگر بوده است، بنابراین میزان دریافت آب شیرین در این حالت نیز بیشترین میزان خواهد بود. آب تولیدی برای دبی‌های ۱/۹، ۳/۱ و ۴/۲ لیتر بر دقیقه به ترتیب ۳۵۱، ۵۵۷ و ۷۲۲ لیتر بر مترمربع در چهار ساعت می‌باشد. مقدار آب تولیدی سامانه از ساعات ۱۰:۰۰ تا ۱۴:۰۰ و به مدت ۴ ساعت می‌باشد. در صورتی که بتوان سامانه را از ساعت ۷:۰۰ (طلوع آفتاب) تا ساعت ۲۰:۰۰ (غروب آفتاب) به کار انداخت (حداقل به مدت ۱۰ ساعت)، میزان آب شیرین خروجی از سامانه نیز افزایش خواهد داشت. لازم به یادآوری است که برای حفظ مواد معدنی مفید، سعی گردید آب در دماهای کمتر از ۸۰ درجه سلسیوس بخار شود. همچنین در شکل ۹ میزان آب خروجی از سامانه هنگامی که لوله بدون مواد تغییرفازدهنده و دبی جریان سیال کاری ۴/۲ لیتر بر دقیقه است، نشان داده شده است. آب خروجی ۶۵۶



شکل ۹- میزان آب تولیدی سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی
Fig.9. The amount of fresh water produced by solar desalination

به دلیل کاهش زمان و انرژی مصرفی افزایش می‌یابد. در این حالت مصرف انرژی الکتریکی به‌وسیله پمپ (برای جریان سیال در سامانه تبخیرکننده و جمع‌کننده خورشیدی) و انرژی حرارتی ورودی کاهش می‌یابد. بیشترین بازده به میزان ۳۵/۷۲٪ و کمترین آن ۲۹/۷۰٪ به ترتیب برای دبی ۱/۹ و ۴/۲ لیتر بر دقیقه به‌دست آمد. بازده تبخیر نمودن آب شور توسط سامانه با استفاده از ماده تغییرفازدهنده به دلیل بیشتر بودن مجموع انرژی حرارتی ورودی به سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی حداقل به میزان ۸/۱ درصد بهبود پیدا کرد. وجود ماده تغییرفازدهنده باعث می‌شد، انرژی خروجی از جمع‌کننده خورشیدی به میزان ۹/۴۱ درصد افزایش یابد.

اما در این حین میزان مصرف انرژی الکتریکی افزایش می‌یابد. همچنین شکل ۱۰-الف تغییرات SEC را برای سامانه بدون در نظر گرفتن انرژی حرارتی جمع‌آوری‌شده توسط جمع‌کننده (به‌عنوان انرژی رایگان) برای بررسی تأثیر سایر منابع انرژی بر تبخیر شدن آب را نشان می‌دهد. در این حالت، برای شرایط مختلف تولید آب شیرین، مقادیر آن از ۲/۰۴ تا ۲/۳۵ مگاژول بر کیلوگرم تغییر می‌یابد. این مقدار برای حالت بدون مواد تغییرفازدهنده ۲/۲۰ مگاژول بر کیلوگرم حاصل شد. علاوه بر این، راندمان کلی سامانه تبخیرکننده با و بدون PCM در شکل ۱۰-ب نشان داده شده است. مطابق شکل، مشخص است که با افزایش سرعت جریان سیال، بازده تبخیر نمودن آب شور



شکل ۱۰- الف) مقادیر SEC (با در نظر گرفتن انرژی الکتریکی و انرژی کل)، ب) راندمان کلی آب شیرین‌کن خورشیدی در شرایط مختلف جریان هوا و فواصل مواد تغییرفازدهنده

Fig.10. a) SEC (considering electrical energy and total energy) and b) overall solar efficiency at different air flow conditions and phase change material distances

ارزیابی کیفی آب مقطر به دست آمده

خارج شده از سامانه برای عدم اثرگذاری مواد بر روی کیفیت آب در درون ظرف شیشه‌ای تمیز در یخچال در دمای ۴ درجه سلسیوس نگهداری شدند (شکل ۱۱).

برای ارزیابی کیفی آب مقطر حاصل از سامانه آب شیرین کن خورشیدی سه‌موی، نمونه به آزمایشگاه تخصصی آب و پساب آزمایشگاه مرکزی دانشگاه کردستان انتقال داده شد. نمونه‌های



شکل ۱۱- نمونه آب خروجی از سامانه آب شیرین کن خورشیدی برای کیفیت‌سنجی

Fig.11. Sample of the water output from the solar water desalination system for quality measurement

کمتری نسبت به حد استاندارد دارد. مقادیر کلسیم با در نظر گرفتن سختی کل نیز بایستی کمتر ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر باشد (Alwan, Shcheklein, & Ali, 2021). برای پتاسیم و سدیم مقادیر مجاز به ترتیب بین ۵ تا ۱۰ و ۱ تا ۳ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد (Yang et al., 2003; Khan et al., 2023). علاوه بر آن آب مقطر حاصل شده باعث حذف عنصر آهن به عنوان یک عنصر مضر در آب شده است. با توجه به مقادیر ذکر شده در جدول ۳ می‌توان دریافت که آب نمونه با کاهش مواد جامد محلول و سختی می‌تواند برای مصرف به صورت شرب مورد استفاده قرار گیرد.

در جدول ۳ پارامترهای فیزیکی و شیمیایی حاصل از ارزیابی نمونه در آزمایشگاه، نمایش داده شده است. با توجه به مقادیر مربوط به پارامترها می‌توان دریافت که میزان سختی و کل مواد جامد محلول در آب نمونه نسبت به آب شرب شهری به میزان قابل توجهی کاهش یافته‌اند. علاوه بر آن میزان اسیدیته که یکی از مشخصات آب شرب می‌باشد از ۸/۸ به ۶/۹ رسیده است. از طرف دیگر استفاده از سامانه باعث کاهش عناصر مفید نیز گردیده است. این عناصر شامل کلسیم، پتاسیم، منیزیم و سدیم هستند. میزان منیزیم مجاز برای آب شرب استاندارد بین ۱۰ تا ۲۵ میلی‌گرم بر لیتر است. آب تقطیر شده منیزیم

جدول ۳- مقادیر مربوط به عناصر تشکیل دهنده برای آب حاصل از سامانه و آب شرب

Table 3- Values of constituent elements for sample water and drinking water

Element	مقدار کیفی یا کمی		عنصر
	Quality or Quantity (mg l ⁻¹)		
	آب شرب خام	آب نمونه	
	Tap water	Sample water	
Calcium	17	6	کلسیم
Nitrates	1.65	0.3	نیترات
Iron	1.2	0	آهن
Total Hardness	556	10.17	سختی کل
Potassium	1.36	1.1	پتاسیم
Magnesium	12	2.5	منیزیم
Sodium	4.2	0.1	سدیم
PH	8.8	6.9	اسیدیته
Salt	0.15	0	نمک
Total dissolved solids	426	76	کل مواد جامد محلول

کارایی استفاده از سامانه تعقیب‌کننده پنلی

همان‌طور که اشاره شد یکی از نوآوری‌های قابل‌توجهی که در این سامانه قرار داده شد، استفاده از سامانه تعقیب‌کننده پنلی بود. در این سامانه از دو پنل خورشیدی ۱۰ وات و یک مدار آردوینو استفاده گردید. در سامانه پیشین از حس‌گرهای فتوسل برای برآورده نمودن تعقیب خورشیدی استفاده شده بود. سامانه مذکور به دلیل عدم حساسیت قابل‌توجه و عدم واکنش‌پذیری در مقابل تغییرات اندک تابش خورشیدی در روزهای ابری راندمان حرارتی پایینی داشت. در شرایط مشابه متوسط راندمان حرارتی از ساعت ۱۰:۰۰ تا ساعت ۱۴:۰۰ در سرعت جریان سیال، برای سامانه اولیه (با فتوسل) ۴۸/۵۶ درصد به‌دست‌آمده بود، این در حالی است که برای سامانه حاضر این راندمان ۵۸/۴۲ درصد حاصل شد. کوچک‌ترین انحراف از خط کانونی جمع‌کننده سهموی باعث افت حرارتی سامانه می‌گردد. بنابراین می‌توان دریافت استفاده از پنل‌های خورشیدی باعث بهبود کارایی حرارتی سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی شده است.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی روند تغییرات حرارتی درون سامانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی با استفاده از PCM در سه دبی سیال ۱/۹، ۳/۱ و ۴/۲ لیتر بر دقیقه با لوله ماریپیچ به گام ۷ سانتی‌متر پرداخته شده است. برای بهبود کارایی سیستم از سامانه تعقیب‌کننده

خورشیدی پنلی استفاده شد. نتایج زیر از این پژوهش به‌دست آمد: قرارگیری ماده تغییرفازدهنده در داخل لوله، باعث شد بازده حرارتی و کارایی سامانه نسبت به حالت بدون مواد تغییرفازدهنده بهبود یابد.

دمای آب شور داخل لوله در حالتی که از ماده تغییرفازدهنده استفاده می‌شود، نسبت به حالتی که از ماده تغییرفازدهنده استفاده نمی‌شود، بیشتر بود. بیشترین دمای آب شور در حالت استفاده از ماده تغییرفازدهنده برای سرعت جریان سیال با دبی ۴/۲ لیتر بر دقیقه و کمترین آن برای دبی ۱/۹ لیتر بر دقیقه می‌باشد.

بیشترین انرژی حرارتی ورودی برای سرعت جریان سیال با دبی ۴/۲ لیتر بر دقیقه با مقدار ۳۷/۳۶ مگاژول (۳/۵۱ مگاژول) است.

بازده حرارتی سامانه با دبی ۴/۲ لیتر بر دقیقه و شرایط یکسان، در حالت با و بدون مواد تغییرفازدهنده به‌ترتیب ۵/۰۲ و ۳/۵۱ درصد به‌دست آمد.

مقدار تولیدی آب شیرین با دبی‌های ۱/۹، ۳/۱ و ۴/۲ لیتر بر دقیقه به‌ترتیب ۳۵۱، ۵۵۷ و ۷۲۲ لیتر بر مترمربع در چهار ساعت به‌دست آمد.

آب استحصال‌شده از سامانه دارای سختی کمتری نسبت به آب شرب معمولی بود. هرچند مواد آلی موجود در آن کاهش یافته بود. استفاده از سامانه تعقیب‌کننده پنلی باعث شد بازده حرارتی سامانه به میزان ۹/۸۶ درصد بهبود یابد.

References

- Abdessemed, A., Bougriou, Ch., Guerraiche, D., & Abachi, R. (2018). Effects of tray shape of a multi-stage solar still coupled to a parabolic concentrating solar collector in Algeria. *Renewable Energy*, 132, 1134-1140. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.074>
- Abu-Arabi, M., Al-harashsheh, M., Mousa, H., & Alzghoul, Z. (2018). Theoretical investigation of solar desalination with solar still having phase change material and connected to a solar collector. *Desalination*, 448, 60-68. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.09.020>
- Alimohammadi, Z., Samimi Akhijahani, H., & Salami, P. (2020). Thermal analysis of a solar dryer equipped with PTSC and PCM using experimental and numerical methods. *Solar Energy*, 201, 157-177. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.079>
- Alwan, N. T., Shcheklein, S. E., & Ali, O. M. (2021). Evaluation of distilled water quality and production costs from a modified solar still integrated with an outdoor solar water heater. *Case Studies in Thermal Engineering*, 27, 101216. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101216>
- Bakos, G. C. (2006). Design and construction of a two-axis Sun tracking system for parabolic trough collector (PTC) efficiency improvement. *Renewable Energy*, 31, 2411-2421. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.11.008>
- Chaabane, M., Mhiri, H., & Bournot, P. (2014). Thermal performance of an integrated collector storage solar water heater (ICSSWH) with phase change materials (PCM). *Energy Conversion and Management*, 78, 897-903. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.07.089>
- Cheng, P., & Zhan, X. (2016). Stability of organic solar cells: challenges and strategies. *Chemical Society Reviews*, 45, 2544-2582. <https://doi.org/10.1039/C5CS00593>
- Duong, H. C., Cooper, P., Nelemans, B., Cath, T. Y., & Nghiem, L. D. (2015). Optimising thermal efficiency of direct contact membrane distillation by brine recycling for small-scale seawater desalination, *Desalination*, 374, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.07.009>
- Edalati, S., Ameri, M., & Iranmanesh, M. (2015). Comparative performance investigation of mono-and poly-

- crystalline silicon photovoltaic modules for use in grid-connected photovoltaic systems in dry climates. *Applied Energy*, 160, 255-265. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.064>
10. Elarem, R., Alqahtani, T., Mellouli, S., Aich, W., Ben Khedher, N., Kolsi, L., & Jemni, A. (2021). Numerical study of an evacuated tube solar collector incorporating a nano-pcm as a latent heat storage system. *Case Studies in Thermal Engineering*, 24, 1000859. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.100859>
 11. Eltawil, M., Mostafa, A., Azam, M., & Alghannam, A. O. (2018). Solar PV powered mixed-mode tunnel dryer for drying potato chips. *Renewable Energy*, 116, 594-605. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.007>
 12. Esakkimuthu, S., Hassabou, A. H., Palaniappan, C., Spinnler, M., Blumenberg, J., & Velraj, R. (2013). Experimental investigation on phase change material based thermal storage system for solar air heating applications. *Solar Energy*, 88, 144-153. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.11.006>
 13. Goudarzi, K., Shojaezadeh, E., & Nejati, F. (2014). An experimental investigation on the simultaneous effect of CuO-H₂O nanofluid and receiver helical pipe on the thermal efficiency of a cylindrical solar collector. *Applied Thermal Engineering*, 73, 1236-1243. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.07.067>
 14. Goyal, R. K., Tiwari, G. N., & Garg, H. P. (1998). Effect of thermal storage on the performance of an air collector: a periodic analysis. *Energy Conversion Management*, 39, 193-202. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(96\)00226-9](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(96)00226-9)
 15. Jean, J., Brown, P. R., Jaffe, R. L., Buonassisi, T., & Bulovic, V. (2015). Pathways for solar photovoltaics. *Energy and Environmental Science*, 8, 1200-1219. <https://doi.org/10.1039/C4EE04073B>
 16. Kalogirou, S. A. (2005). Use of artificial intelligence for the optimal design of solar systems. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 22, 90-103. <https://doi.org/10.1504/IJCAT.2005.006940>
 17. Khosravi, A., Malekan, M., & Assad, M. E. H. (2019). Numerical analysis of magnetic field effects on the heat transfer enhancement in ferrofluids for a parabolic trough solar collector. *Renewable Energy*, 134, 54-63. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.11.015>
 18. Khan, Z. U., Moronshing, M., Shestakova, M., Al-Othman, A., Sillanpaa, M., Zhan, Z., Song, B., & Lei, Y. (2023). Electro-deionization (EDI) technology for enhanced water treatment and desalination: A review. *Desalination*, 548, 116254. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.116254>
 19. Koca, A., Oztop, H. F., Koyunc, T., & Varol, Y. (2008). Energy and exergy analysis of a latent heat storage system with phase change material for a solar collector. *Renewable Energy*, 33, 567-574. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.03.012>
 20. Kumar, B. S., Vijayan, V., & Baskar, N. (2016). Burr dimension analysis on varic material for conventionally and CNC drilled holes. *Mechanical Engineering*, 20, 347-354.
 21. Li, P., Li, J., Pei, G., Munir, A., & Ji, J. (2016). A cascade organic Rankine cycle power generation system using hybrid solar energy and liquefied natural gas. *Solar Energy*, 127, 136-146. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.01.029>
 22. Lim, E. L., Yap, C. C., Teridi, M. A. M., Teh, C. H., Mohd Yusoff, A. R., & Jumali, M. H. H. (2016). A review of recent plasmonic nanoparticles incorporated P3HT: PCBM organic thin film solar cells. *Organic Electronics*, 36, 12-28. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2016.05.029>
 23. Morad, M., El-Maghawry, H. A., & Wasfy, K. I. (2017). A developed solar-powered desalination system for enhancing fresh water productivity. *Solar Energy*, 146, 20-29. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.02.002>
 24. Motevali, A. (2013). Design and Evaluation of a Parabolic Sun Tracking Collector for Drying of Mint [Ph.D. Thesis.], TarbiatModares University, Tehran, Iran.
 25. Mousa, H., & Abu Arabi, M. (2012). Desalination and hot water Production using solar still enhanced dy external solar collector. *Desalination Water Treat*, 51, 1296-1301. <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.699237>
 26. Muñoz, M., Rovira, A., Sánchez, C., & Montes, M. J. (2017). Off-design analysis of a hybrid Rankine-brayton cycle used as the power block of a solar thermal power plant. *Energy*, 134, 369-381. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.014>
 27. Nasri, B., Benatiallah, A., Kalloum, S., & Benatiallah, D. (2019). Improvement of glass solar still performance using locally available materials in the southern region of Algeria. *Groundwater for Sustainable Development*, 9, 100213. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100213>
 28. Panchal, H., Patel, K., Elkelawy, M., & Bastawissi, H. A. E. (2019). A use of various phase change materials on the performance of solar still: a review. *International Journal of Ambient Energy*, 125, 1-6. <https://doi.org/10.1080/01430750.2019.1594376>
 29. Pielichowska, K., & Pielichowski, K. (2014). Phase change materials for thermal energy storage. *Progress in Material Science*, 65, 67-123. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2014.03.005>
 30. Rehman, H. M., Shakir, S., Razaq, A., Saqib, H., & Tahir, S. (2018). *Decentralized and cost-effective solar water purification system for remote communities*. in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 154. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/154/1/012004>
 31. Rehman, S. H., & Mohandes, M. (2008). Artificial neural network estimation of global solar radiation using air temperature and relative humidity. *Energy Policy*, 36, 571-576. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.09.033>

32. Reif, J. H., & Alhalabi, W. (2015). Solar-thermal powered desalination: Its significant challenges and potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 152-165. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.07.009>
33. Rostamizadeh, M., Khanlarkhani, M., & Sadrameli, S. M. (2012). Sadrameli, Simulation of energy storage system with phase change material (PCM). *Energy and Buildings*, 49, 419-422. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.037>
34. Serale, G., Goia, F., & Perino, M. (2016). Numerical model and simulation of a solar thermal collector with slurry Phase Change Material (PCM) as the heat transfer fluid. *Solar Energy*, 134, 429-444. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.04.030>
35. Yang, L., Zhang, X., & Xu, G. (2014). Thermal performance of a solar storage packed bed using spherical capsules filled with PCM having different melting points. *Renewable Energy*, 64, 26-33. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.09.045>
36. Zhao, M., Liu, Z., & Zhang, Q. (2009). *Feasibility analysis of constructing parabolic trough solar thermal power plant in inner Mongolia of China*. In: Proc. Asia- Pacific power and energy engineering conference, 1-4. <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2009.4918378>

Research Article

Vol. 14, No. 2, 2024, p. 197-214

Simulation of Heat and Mass Transfer in a Refractance Window Dryer for Aloe vera gel

A. Shahraki¹, M. Khojastehpour^{1*}, M. R. Golzarian², E. Azarpazhooh³

1- Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- Centre for Artificial Intelligence and Machine Learning, Edith Cowan University, WA 6027, Australia

3- Agricultural Engineering Research Department, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Mashhad, Iran

(*- Corresponding Author Email: mkhpour@um.ac.ir)

Received: 02 January 2023

Revised: 19 February 2023

Accepted: 22 February 2023

Available Online: 22 February 2023

How to cite this article:

Shahraki, A., Khojastehpour, M., Golzarian, M. R., & Azarpazhooh, E. (2024). Simulation of Heat and Mass Transfer in a Refractance Window Dryer for Aloe vera gel. *Journal of Agricultural Machinery*, 14(2), 197-214. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2023.80368.1141>

Introduction

Drying is one of the oldest methods of food preservation. To increase the efficiency of heat and mass transfer while maintaining product quality, the study of the drying process is crucial scientifically and meticulously. It is possible to conduct experimental tests, trial and error, in the drying process. However, this approach consumes time and cost, with a significant amount of energy resources. By harnessing available software and leveraging technological advancement to develop a general model for drying food under varying initial conditions, the drying process can be significantly optimized.

Materials and Methods

This study was conducted with the aim of simulating heat and mass transfer during Refractance window drying for aloe vera gel. Comsol Multiphysics version 5.6 is a three-dimensional model used to solve heat and mass transfer equations. For this purpose, the differential equations of heat and mass transfer were solved simultaneously and interdependently. The above model considered various initial conditions: water temperature of 60, 70, 80, and 90°C, and aloe vera gel thickness of 5 and 10 mm. The initial humidity and temperature of the aloe vera is uniform. The initial temperature is 4°C and the initial humidity of the fresh aloe vera sample is 110 $\text{g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}}$. Heat is supplied only by hot water from the bottom surface of the product.

Results and Discussion

The drying time was needed to reduce the moisture content of aloe vera gel from 110 to 0.1 $\text{g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{dry matter}}$ during Refractance window drying. Aloe vera gel with a thickness of 5 mm dried in 120, 100, 70, and 50 minutes at water temperatures of 60, 70, 80, and 90°C, respectively. For a 10 mm thick layer of aloe vera gel, the drying time was 240, 190, 150, and 120 minutes, for water temperatures of 60 to 90°C, respectively. These results demonstrate the importance of both the water temperature and thickness on the drying time. Furthermore, the drying rate of aloe vera gel increased as the water temperature increased from 60 to 90°C, the drying rates were 0.915, 1.099, 1.57, and 2.198 $\text{g}_{\text{water}}/\text{min}$ for 5 mm thickness and 0.457, 0.578, 0.732, and 0.915 $\text{g}_{\text{water}}/\text{min}$ for 10 mm thick layer of aloe vera gel, respectively.

Conclusion

Based on the simulation results, the optimal model is with a water temperature of 90°C and an aloe vera gel thickness of 5 mm. Overall, the modeling results are consistent with the results of experimental data.

Keywords: Aloe vera gel, Heat transfer, Mass transfer, Refractance window dryer, Simulation



©2023 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jam.2023.80368.1141>

مقاله پژوهشی

جلد ۱۴، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۳، ص ۲۱۴-۱۹۷

شبیه‌سازی انتقال حرارت و جرم در خشک‌کن رفرکتانس ویندو برای ژل آلوتئورا

آتنا شهرکی^۱، مهدی خجسته‌پور^{۲*}، محمودرضا گلزاریان^۳، الهام آذرپژوه^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۳

چکیده

این مطالعه با هدف شبیه‌سازی انتقال حرارت و جرم در طول خشک کردن رفرکتانس ویندو برای ژل آلوتئورا انجام شده است. با کمک نرم‌افزار کامسول مولتی فیزیکس (COMSOL Multiphysics) یک مدل سه‌بعدی برای حل معادلات انتقال حرارت و جرم ایجاد شد. بدین منظور معادلات دیفرانسیل انتقال حرارت و جرم به صورت هم‌زمان و وابسته به هم حل شدند. مدل فوق با شرایط اولیه، دمای آب ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سلسیوس و ضخامت ژل آلوتئورا ۵ و ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد زمان خشک کردن مورد نیاز برای کاهش رطوبت ژل آلوتئورا از ۱۱۰ به ۰/۱ گرم آب بر گرم ماده خشک در طول خشک کردن رفرکتانس ویندو در دمای آب ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سلسیوس برای ژل آلوتئورا با ضخامت ۵ میلی‌متر به ترتیب ۱۲۰، ۱۰۰، ۷۰ و ۵۰ دقیقه و برای ژل آلوتئورا با ضخامت ۱۰ میلی‌متر به ترتیب ۲۴۰، ۱۹۰، ۱۵۰ و ۱۲۰ دقیقه بود. همچنین سرعت خشک شدن برای ژل آلوتئورا با ضخامت ۵ میلی‌متر به ترتیب ۰/۹۱۵، ۱/۰۹۹، ۱/۵۷ و ۲/۱۹۸ گرم آب بر دقیقه و برای ژل آلوتئورا با ضخامت ۱۰ میلی‌متر به ترتیب ۰/۴۵۷، ۰/۵۷۸، ۰/۷۳۲ و ۰/۹۱۵ گرم آب بر دقیقه بود. بنابراین نتایج حاصل از شبیه‌سازی، مطابق داده‌های تجربی مقالات مشابه است و هرچه دمای آب بالاتر و ضخامت محصول کمتر باشد، محصول سریع‌تر خشک می‌شود.

واژه‌های کلیدی: انتقال حرارت، انتقال جرم، رفرکتانس ویندو، ژل آلوتئورا، شبیه‌سازی

مقدمه

خشک کردن یک عملیات واحد است و یکی از قدیمی‌ترین روش‌های حفظ و نگه‌داری مواد غذایی است. در حالت کلی خشک کردن مواد غذایی از نظر اقتصادی دارای اهمیت است. تولید محصولات خشک با کیفیت می‌تواند نقش مهمی در افزایش صادرات کشور داشته باشد. همچنین باعث می‌شود حجم و وزن ماده غذایی کم شود و حمل و نقل، نگه‌داری و ذخیره‌سازی محصول خشک‌شده

آسان‌تر و ارزان‌تر شود. تبدیل محصولات کشاورزی به پودر از طریق خشک کردن، موثرترین روش برای ایجاد محصولی است که نه تنها از نظر عملکردی مناسب است، بلکه می‌تواند برای مدت طولانی بدون خراب شدن نگه‌داری شود. هدف نهایی از فرآیند خشک کردن کاهش مقدار ضایعات و افزایش مدت ماندگاری محصول است (Franco *et al.*, 2019). عیب اصلی مربوط به فرآیندهای خشک کردن این است که فرآیندی با مصرف انرژی بالا است. امروزه صرفه‌جویی در مصرف انرژی و افزایش بهره‌وری، مهم‌ترین مسئله در تولید محصولات و رقابت‌پذیری آن‌ها در بازار است (Dev & Raghavan, 2012).

خشک کردن به روش رفرکتانس ویندو^۵ یکی از روش‌های نوین است که در سال‌های اخیر، به دلیل مزیت‌های متعدد، توجه زیادی به خود جلب کرده است. خشک کردن به روش رفرکتانس ویندو یک روش غیرحرارتی جدید برای خشک کردن محصولات از جمله پوره‌های حساس به حرارت، مایعات و خلال‌های میوه‌ها و سبزیجات است (Nindo, Feng, Shen, Tang, & Kang, 2003). تاکنون

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
 - ۲- استاد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
 - ۳- مدرس و پژوهشگر ارشد، مرکز هوش مصنوعی و یادگیری ماشینی، دانشکده علوم، دانشگاه ادیت کوآن، استرالیا غربی، استرالیا
 - ۴- دانشیار، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خراسان رضوی، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران
- *- نویسنده مسئول:
(Email: mkhpour@um.ac.ir)

 <https://doi.org/10.22067/jam.2023.80368.1141>

در این مطالعه به بررسی نحوه شبیه‌سازی انتقال حرارت و جرم در خشک‌کن فرکتنس ویندو برای ژل آلوئه‌ورا پرداخته شده است. آلوئه‌ورا^۱ یک گیاه پرخاصیت و بومی آفریقا است، اگرچه در سراسر جهان در اکثر مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری به دلیل توانایی آن برای سازگاری با آب و هوای مختلف کشت می‌شود (Kumar, Singh, Gupta, Bishayee, & Pandey, 2019). معمولاً ژل آلوئه‌ورا را به دلیل داشتن آب زیاد پس از برداشت، بیش‌تر از چند روز نمی‌توان نگهداری کرد (Añibarro-Ortega et al., 2019). آلوئه‌ورا خشک‌شده محصولی است که کاربرد متنوعی در صنعت دارد. از دلایل اصلی خشک‌کردن آلوئه‌ورا، تولید محصولی با قابلیت ماندگاری بیش‌تر و استفاده راحت از پودر آلوئه‌ورا و کاهش هزینه‌های مربوط به بسته‌بندی و حمل‌ونقل پودر آلوئه‌ورا می‌باشد (Antury, Rojas, & Bermeo, 2021). پودر آلوئه‌ورا اغلب برای پوست و هم‌چنین به‌عنوان مواد تشکیل‌دهنده در فرآورده‌های غذایی مختلف مانند نوشیدنی‌ها، بستنی و غیره استفاده می‌شود (Ayala-Aponte, Cárdenas-Nieto, & Tirado, 2021).

شبیه‌سازی و مدل‌سازی^۲، ابزاری بسیار قدرتمند برای پیش‌بینی الگوهای جریان هوا و تغییرات درجه حرارت و اثر پارامترهای موثر مختلف در محیط‌های کنترل‌شده مانند خشک‌کن‌ها است. با این روش می‌توان گستره وسیعی از شرایط خشک‌کردن را در یک محیط مجازی شبیه‌سازی کرد. مدل‌سازی انتقال حرارت و جرم در شرایط مختلف خشک‌کردن یکی از روش‌های کم‌هزینه برای بهینه‌کردن خشک‌کن‌های صنعتی در جهت افزایش بازده انرژی و بهبود کیفیت محصول نهایی است و جامعه علمی امروز نیازمند نظریه‌های دقیق در مبحث خشک‌شدن محصولات کشاورزی هست طوری که بتوانند فرایند خشک‌شدن را به‌طور دقیق پیش‌بینی کند (Zou, Opara, & McKibbin, 2006). به‌طور کلی، مدل‌سازی برای خشک‌کن‌ها به دو روش تجربی و حل عددی (تحلیلی) انجام شده است. یکی از روش‌های حل عددی که می‌توان از آن برای حل مسئله‌های مهندسی استفاده کرد، روش المان محدود^۳ است که با پیشرفت فناوری و رایانه، نرم‌افزارهای تحلیل مهندسی که با روش المان محدود کار می‌کنند رو به پیشرفت هستند (Milczarek & Alleyne, 2017).

نرم‌افزار کامسول یکی از پیشرفته‌ترین نرم‌افزارهای مهندسی است و توانایی تحلیل هم‌زمان چندین پدیده فیزیکی را دارد. این نرم‌افزار برای حل معادلات المان محدود است و به کمک آن به راحتی می‌توان معادلات دیفرانسیل جزئی^۴ مربوط به پدیده‌های مختلف را

مطالعات زیادی به‌منظور بررسی آزمایشگاهی خشک‌کن فرکتنس ویندو انجام شده است.

در تحقیقی به ارزیابی زمان خشک‌شدن کیوی با خشک‌کن فرکتنس ویندو پرداخته‌اند. تأثیر ضخامت محصول (۰/۸، ۰/۶ و ۲/۴ میلی‌متر) و دمای آب (۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ درجه سلسیوس) بر مدت زمان خشک‌کردن بررسی شده است. زمان لازم برای رسیدن به رطوبت نهایی در روش فرکتنس ویندو در مقایسه با خشک‌کردن آون (ضخامت برش ۲/۴ میلی‌متر و دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس) ۱۴۰ دقیقه کم‌تر بود (Jafari, Azizi, Mirzaei, & Dehnad, 2016). در تحقیقی دیگر به خشک‌کردن انبه در خشک‌کن فرکتنس ویندو پرداخته‌اند. ضخامت پوره انبه (۲، ۳ و ۴ میلی‌متر) و درجه حرارت آب (۸۵، ۹۰ و ۹۵ درجه سلسیوس) متغیرهای مستقل این تحقیق بود. نتایج نشان می‌داد که خشک‌کردن انبه با ضخامت دو میلی‌متر کوتاه‌ترین زمان خشک‌شدن را دارد. نمونه بهینه انبه خشک‌شده با سیستم فرکتنس ویندو، در دمای ۹۵ درجه سلسیوس با ضخامت ۲/۴۹ میلی‌متر تعیین شد (Shende & Datta, 2020).

نتایج حاصل از خشک‌کردن دو گونه پوره‌ی سیب‌زمینی با استفاده از خشک‌کن فرکتنس ویندو با دمای آب گرم ۷۰ تا ۹۰ درجه سلسیوس نشان داد که شرایط بهینه مدت زمان خشک‌کردن برای یک گونه سیب‌زمینی ۲۰/۵ دقیقه و برای گونه‌ی دیگر ۱۲/۱ دقیقه و دمای آب ۹۴ درجه سلسیوس بود (Duarte-Correa, Vargas-Carmona, Vásquez-Restrepo, Ruiz Rosas, & Perez Martinez, 2021). هم‌چنین نتایج تحقیقی مشابه از خشک‌کن فرکتنس ویندو برای پوره‌ی انبه با ضخامت ۶ میلی‌متر در دمای آب گرم ۷۵، ۸۰، ۸۵ و ۹۰ درجه سلسیوس و سرعت هوا ۰/۷ متر بر ثانیه نشان داد که دمای محصول در ابتدا افزایش سریعی داشت و در طول فرآیند خشک‌شدن ثابت ماند. هم‌چنین زمان خشک‌کردن مورد نیاز برای کاهش رطوبت پوره‌ی انبه از ۵/۳۳ تا ۰/۲۵ گرم آب بر گرم ماده خشک در طول خشک‌کردن فرکتنس ویندو بین ۵/۷ و ۸/۵ ساعت بود (Kumar, Madhumita, Srivastava, & Prabhakar, 2022).

محققین در پژوهشی، به مقایسه‌ی پارامترهای خشک‌کردن در خشک‌کن هوای گرم و خشک‌کن فرکتنس ویندو در دماهای مختلف (۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سلسیوس) بر روی برش‌های سیب پرداختند. نتایج نشان داد که مدت زمان خشک‌کردن محصول در خشک‌کن فرکتنس ویندو ۲۵ تا ۳۷/۵ درصد کم‌تر از خشک‌کن هوای گرم در شرایط مشابه خشک‌کردن است. هم‌چنین این مطالعه نشان داد که خشک‌کردن فرکتنس ویندو می‌تواند به‌طور موثر برای خشک‌کردن لایه‌های نازک میوه‌های حساس به حرارت مانند سیب در زمان کوتاه‌تری با کیفیت محصول بهتر در مقایسه با خشک‌کردن هوای گرم استفاده شود (Rajoriya, Shewale, & Hebbar, 2019).

پورهی آلوئه‌ورا مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

خشک‌کن رفرکتنس ویندو

به‌طور کلی خشک‌کن رفرکتنس ویندو از یک حمام حرارتی استاتیکی تشکیل می‌شود که با آب پر می‌شود. در این خشک‌کن سطح آب با ورق پلاستیکی شفاف مادون قرمز (فیلم پلی‌استر مایلار^۴) با ضخامت ۰/۲۵ میلی‌متر پوشیده شده است. محصول اغلب به‌صورت خمیری یا پوره روی سطح بالایی مایلار پخش می‌شود. در مسیر خشک‌کردن چند فن قرار می‌گیرد تا بخار آبی که در اثر خشک شدن محصول ایجاد می‌شود را از بین ببرد و بخار آب از محفظه خشک‌کن خارج شود و مجدد به محصول بازنگردد (Kudra & Mujumdar, 2009). در شکل ۱ خشک‌کن رفرکتنس ویندو و شماتیک آن نشان داده شده‌است.

در این خشک‌کن فیلم مایلار سبب می‌شود تا انتقال حرارت به روش تشعشع به داخل آب بازتاب شود وقتی محصول مرطوب روی فیلم مایلار قرار می‌گیرد رطوبت موجود در آن جاذب مادون قرمز است و مانند یک پنجره عمل می‌کند که از طریق آن انتقال حرارت تشعشعی اتفاق می‌افتد. حدوداً نیمی از کل تشعشع حرارتی به محصول پخش شده بر روی فیلم مایلار می‌رسد. گرما مستقیماً به مولکول‌های آب در محصول منتقل می‌شود، همان‌طوری که محصول رطوبت خود را از دست می‌دهد، پنجره‌ی خشک‌شدن بسته می‌شود و انرژی تشعشعی به سمت منبع آب گرم شکست پیدا می‌کند و مجدد به آب بازتاب می‌شود. در این حالت تنها روش انتقال حرارت به‌صورت رسانش می‌باشد و از آن‌جا که فیلم پلیمری ضریب رسانایی پایینی دارد، از وارد شدن حرارت اضافی و بروز صدمه حرارتی به محصول خشک‌شده، جلوگیری می‌شود (Shende, Shrivastav, & Datta, 2019). در پایان فرآیند خشک‌کردن، محصول خشک‌شده روی یک مخزن آب خنک حرکت می‌کند و محصول خنک می‌شود تا از چسبندگی محصول به فیلم مایلار جلوگیری شود و خراشیدن آن آسان شود (Shende & Datta, 2019).

هندسه و فرضیات مسئله

در این مطالعه، به‌منظور شبیه‌سازی انتقال حرارت و جرم در خشک‌کن رفرکتنس ویندو، ابتدا محفظه خشک‌کن که شامل چهار لایه است، در مقیاس آزمایشگاهی در فضای Geometry نرم‌افزار کامسول مولتی فیزیکس نسخه ۵/۶ طراحی شده‌است، اندازه و ابعاد قسمت‌های مختلف این مدل هندسی در جدول ۱ ذکر شده‌است. هم‌چنین مدل هندسی خشک‌کن رفرکتنس ویندو در این نرم‌افزار

به‌صورت هم‌زمان تعریف و تحلیل کرد (Mahapatra & Tripathy, 2018). این نرم‌افزار در فرآیند خشک‌کردن قابلیت تحلیل هم‌زمان انتقال حرارت و انتقال جرم را دارد. در این مطالعه، به بررسی شبیه‌سازی انتقال حرارت و انتقال جرم در خشک‌کن رفرکتنس ویندو در مقیاس آزمایشگاهی با استفاده از نرم‌افزار کامسول مولتی فیزیکس و به روش المان محدود برای ژل آلوئه‌ورا پرداخته شده‌است.

در تحقیقی مدل‌سازی بر پایه‌ی معادلات تجربی بر روی فیجو^۱ با دو ضخامت ۳ و ۵ میلی‌متر در خشک‌کن رفرکتنس ویندو با دمای آب گرم ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه‌سلسیوس و خشک‌کن هم‌رفتی با دمای ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه‌سلسیوس انجام شد. در این تحقیق، دوازده مدل تجربی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدت زمان خشک‌کردن محصول در خشک‌کن رفرکتنس ویندو بسیار کم‌تر است و هرچه ضخامت محصول کم‌تر باشد محصول سریع‌تر خشک می‌شود. هم‌چنین مناسب‌ترین مدل تجربی برای هر دو خشک‌کن مدل لگاریتمی^۲ و میدیلی^۳ است (Sánchez, Lancheros, Carvajal, & Moreno, 2020).

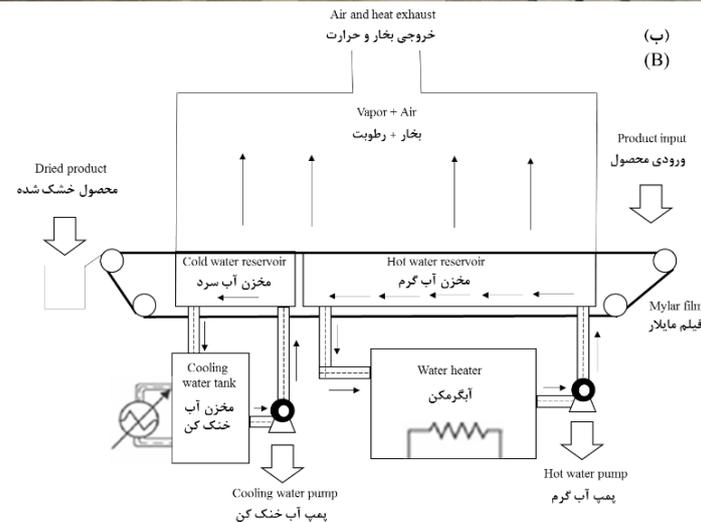
محقق، یک مدل ریاضی دوبعدی برای انتقال حرارت و جرم به‌صورت هم‌زمان در طول خشک‌کردن رفرکتنس ویندو برای شیر و ماست بدون چربی اجرا کرد و دریافت مدل‌های ریاضی امکان مطالعه فرآیندهای مختلف در صنعت را فراهم می‌کند و مشکلاتی مانند مصرف بیش از حد انرژی و فرسودگی تجهیزات را به حداقل می‌رساند؛ هم‌چنین نتایج نشان داد خشک‌کن رفرکتنس ویندو نسبت به سایر روش‌های خشک‌کردن، زمان خشک‌کردن کوتاه‌تر و انرژی مصرفی کم‌تری دارد (Herrera Ardila, 2022).

در تحقیقی، یک مدل با بررسی انتقال حرارت بین فیلم مایلار و پورهی کدوتنبل در خشک‌کن رفرکتنس ویندو شبیه‌سازی شد. در این تحقیق، دو لایه‌ی فیلم مایلار و محصول به‌صورت دوبعدی در نرم‌افزار کامسول طراحی شد و برای تعیین شرایط مرزی دمای فیلم مایلار و دمای آب گرم به‌صورت برابر فرض شد. شبیه‌سازی در سه دمای ۵۵، ۷۵ و ۹۵ درجه‌سلسیوس انجام شد. مطابق نتایج مدت زمان خشک شدن پورهی کدوتنبل در فیلم مایلار با دمای ۵۵، ۷۵ و ۹۵ درجه‌سلسیوس به‌ترتیب ۵۰۰، ۳۰۰ و ۱۵۰ ثانیه بود (Ortiz, Jerez, Gulati, Datta, & Ochoa-Martínez, 2015).

به‌طور کلی، تحقیقات کمی در حوزه مدل‌سازی خشک‌کن رفرکتنس ویندو انجام شده‌است. در این مطالعه، مدل سه‌بعدی برای هر چهار لایه‌ی خشک‌کن رفرکتنس ویندو در مقیاس آزمایشگاهی در نرم‌افزار کامسول ایجاد شد و نحوه انتقال حرارت و جرم در آن برای

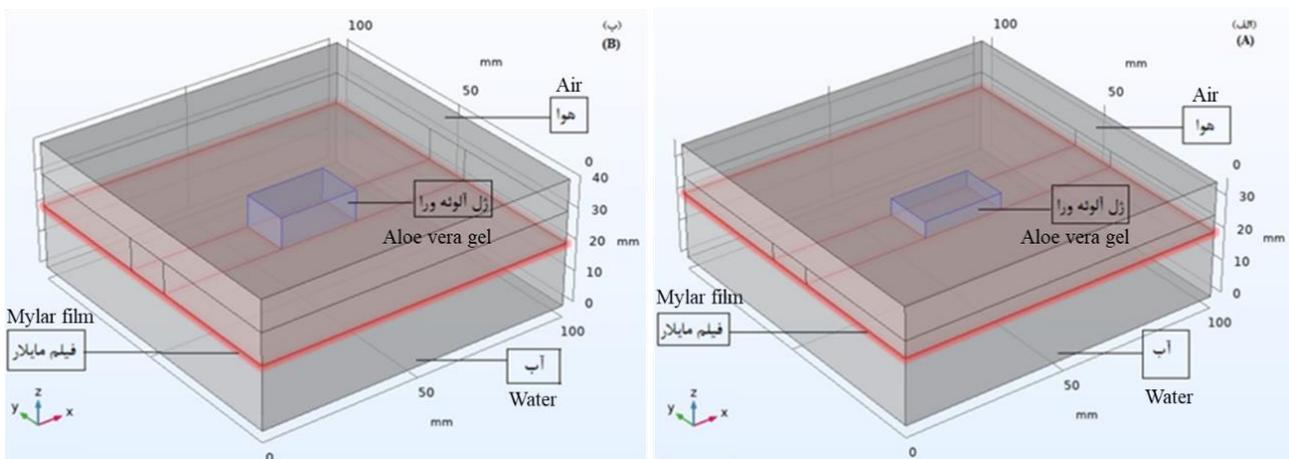
1- Feijoa
2- Logistic
3- Midilli

4- The polyester plastic film (Mylar)



شکل ۱- الف) شکل واقعی خشک‌کن رفراکتانس ویندو (۱- حمام حرارتی، ۲- مخزن آب، ۳- پمپ آب، ۴- خروجی بخار و حرارت، ۵- فیلم مایلار، ۶- ورودی محصول، ۷- محصول خشک‌شده و ۸- فن) (واقع در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی)، ب) شماتیک خشک‌کن رفراکتانس ویندو و قسمت‌های مختلف آن

Fig.1. A) The Refractance Window dryer (1- Controlled water bath, 2- Water flume, 3- Water pump, 4- Vapor extractors, 5- Mylar film, 6- Product entry point, 7-Dried product exit point, and 8- Fan) Located in the Khorasan Razavi Agriculture and Natural Resources Research Center, B) Schematic of Refractance Window dryer and its different parts



شکل ۲- مدل هندسی ترسیم‌شده در نرم‌افزار کامسول با دو ضخامت ژل آلوئه‌ورا: الف) ۵ میلی‌متر و ب) ۱۰ میلی‌متر

Fig.2. Geometrical model drawn in Comsol software with two thicknesses of aloe vera gel: A) 5 mm and B) 10 mm

جدول ۱- اندازه و ابعاد قسمت‌های مختلف خشک‌کن رفرکتانس ویندو

Table 1- The dimensions of the different parts of the Refractance window dryer

ابعاد هندسی محفظه خشک‌کن طراحی شده در قسمت work plane نرم‌افزار کامسول The geometrical dimensions of the dryer chamber designed in the work plane section of Comsol software	میلی‌متر mm	منابع References
طول مخزن آب گرم Length of hot water tank	100	-
عرض مخزن آب گرم Width of hot water tank	100	-
ضخامت مخزن آب گرم Thickness of hot water tank	20	-
طول فیلم مایلار Length of Mylar film	100	-
عرض فیلم مایلار Width of Mylar film	100	-
ضخامت فیلم مایلار Thickness of Mylar film	0.25	(Ayala-Aponte et al., 2021)
طول ژل آلوئه‌ورا Length of Aloe vera gel	25	(Ayala-Aponte et al., 2021)
عرض ژل آلوئه‌ورا Width of Aloe vera gel	15	(Ayala-Aponte et al., 2021)
ضخامت ژل آلوئه‌ورا Thickness of Aloe vera gel	5-10	(Ayala-Aponte et al., 2021)

(Tang, 2007; Ortiz-Jerez et al., 2015) که در این پژوهش موارد زیر در نرم‌افزار کامسول شبیه‌سازی شده‌است و در شکل ۳ شماتیک پدیده‌های انتقال نشان داده شده است:

- انتقال حرارت رسانی بین تمام لایه‌های محفظه‌ی خشک‌کن و محصول
- انتقال حرارت تشعشی بین تمام لایه‌های محفظه‌ی خشک‌کن و محصول
- انتقال حرارت هم‌رفتی بین سطح مشترک محصول و هوا
- انتقال جرم از درون محصول به سطوح خارجی محصول (نفوذ)
- تبخیر رطوبت در سطوح مشترک محصول و هوا (تبخیر سطحی)

معادلات انتقال حرارت در خشک‌کن رفرکتانس ویندو

همان‌طور که بیان شد انتقال حرارت به سه روش رسانی، همرفت و تشعشع در خشک‌کن رفرکتانس ویندو رخ می‌دهد. به‌طور کلی فرآیند خشک کردن محصول در این خشک‌کن توسط انتقال حرارت از آب داغ به محصول انجام می‌پذیرد (Ortiz-Jerez, 2015)، شرایط مرزی انتقال حرارت در خشک‌کن رفرکتانس ویندو به شرح زیر است:

در این شبیه‌سازی بعد از رسم مدل هندسی، مواد لایه‌های مختلف خشک‌کن رفرکتانس ویندو برای نرم‌افزار از قسمت Materials تعریف شد. در این نرم‌افزار پارامترهای مورد نیاز برای حل مسئله در دو لایه‌ی آب و هوا به‌صورت پیش‌فرض در قسمت کتابخانه مواد به‌صورت روابطی بر حسب دما تعریف شده‌است. همچنین با توجه به مقدار دمای آب در این مطالعه، دمای هوای خشک‌کن حدود ۵۰ تا ۶۰ درجه سلسیوس است (Ayala-Aponte et al., 2021). اما خصوصیات ترموفیزیکی شامل چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب هدایت حرارتی فیلم مایلار، ژل آلوئه‌ورا در دو فاز مایع و جامد و تخلخل ژل آلوئه‌ورا در قسمت کتابخانه مواد تعریف نشده‌است و مقادیر آن مطابق جدول ۲ وارد نرم‌افزار شد. همچنین در این شبیه‌سازی، فشار محفظه خشک‌کن ثابت نگه‌داشته شده‌است و تغییر فشار در محفظه در نظر گرفته نشده‌است و در طول فرآیند خشک کردن ابعاد ژل آلوئه‌ورا ثابت فرض شده‌است. هوا در سطح بالای محصول در یک جهت با سرعت ۰/۷ متر بر ثانیه در حال حرکت است.

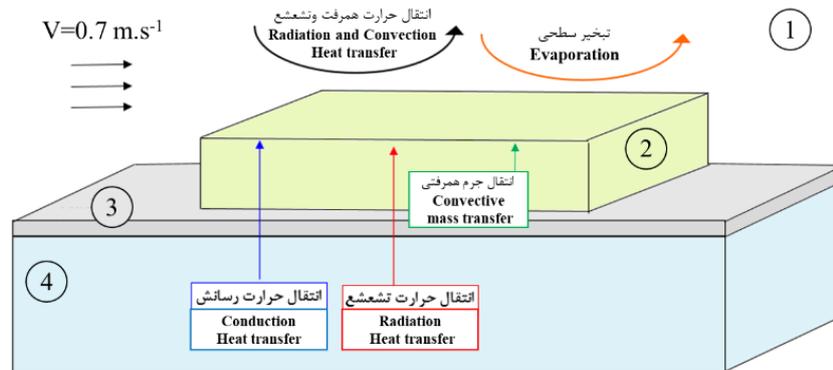
پدیده‌های انتقال در محفظه‌ی خشک‌کن رفرکتانس ویندو

در فرآیند خشک کردن محصول در محفظه‌ی خشک‌کن رفرکتانس ویندو پدیده‌های انتقال مختلفی رخ می‌دهد (Nindo, &

جدول ۲- مقادیر اولیه و خصوصیات ترموفیزیکی (Ayala-Aponte et al., 2021)

Table 2- Initial values and Thermophysical properties

پارامتر Parameter	مقدار Value	واحد Unit
چگالی فیلم مایلار Density of Mylar film	1430	kg.m ⁻³
ظرفیت گرمایی ویژه فیلم مایلار Special heat capacity of Mylar film	1600	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
ضریب هدایت حرارتی فیلم مایلار Thermal conductivity coefficient of Mylar film	0.19	W.m ⁻¹ .K ⁻¹
تخلخل ژل آلوئه‌ورا (φ) Porosity of Aloe vera gel	0.99	-
دمای اولیه ژل آلوئه‌ورا Initial temperature of Aloe vera gel	4	°C
رطوبت اولیه ژل آلوئه‌ورا Initial moisture of Aloe vera gel	110	g _{water} .g ⁻¹ solid
رطوبت نهایی ژل آلوئه‌ورا Final moisture of Aloe vera gel	0.1	g _{water} .g ⁻¹ solid
چگالی ژل آلوئه‌ورا Density of Aloe vera gel	ρ _{Water} = 1001.4 - 0.1276 T - 0.0029 T ² ρ _{solid} = 720	kg.m ⁻³
ظرفیت گرمایی ویژه ژل آلوئه‌ورا Special heat capacity of Aloe vera gel	C _{p,Water} = 4176.2 - 0.0909 T + 5.4731 × 10 ⁻³ T ² C _{p,solid} = 2946	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
ضریب هدایت حرارتی ژل آلوئه‌ورا Thermal conductivity coefficient of Aloe vera gel	K _{Water} = 0.57109 + 1.762 × 10 ⁻³ T - 6.7036 × 10 ⁻⁶ T ² K _{solid} = 0.34	W.m ⁻¹ .K ⁻¹



شکل ۳- شماتیک پدیده‌های انتقال در محفظه‌ی خشک‌کن رفراکتانس ویندو (۱- هوا، ۲- ژل آلوئه‌ورا، ۳- فیلم مایلار و ۴- آب)

Fig.3. Schematic diagram of transfer phenomena in Refractance window dryer (1- Air, 2- Aloe vera gel, 3- Mylar film, and 4-Water)

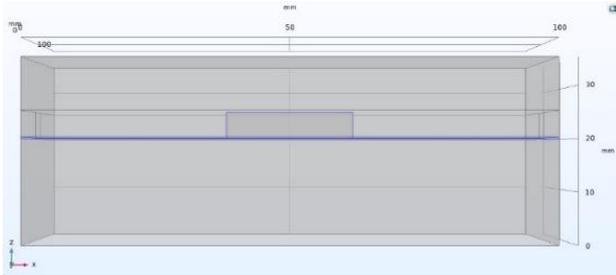
$$q = -K\nabla T = K\left(\frac{\partial T}{\partial x}i + \frac{\partial T}{\partial y}j + \frac{\partial T}{\partial z}k\right) \quad (1)$$

که در رابطه (۱)، ∇T گرادیان دما (°K)، q شار حرارتی (W.m⁻²) و K ضریب هدایت حرارتی (W.m.⁻¹.K⁻¹) هستند. در این پژوهش،

تبادل حرارت به روش رسانش در تمام لایه‌های محفظه‌ی خشک‌کن

معادله حاکم برای انتقال حرارت رسانشی بین لایه‌ها طبق قانون فوریه مطابق رابطه‌ی (۱) تعریف می‌شود (Kumar et al., 2022):

شده‌است.



شکل ۵- شرایط مرزی انتقال حرارت تشعشی

Fig.5. Boundary conditions for radiation heat transfer

تبادل حرارت به روش همرفت در مرزهای مشترک محصول و هوا

میزان انتقال حرارت همرفتی بین دو سطح جامد و سیال به میزان اختلاف دمای دو سطح و مساحت سطح تماس آن بستگی دارد. معادله حاکم برای انتقال حرارت همرفتی طبق قانون سرمایش نیوتن مطابق رابطه‌ی (۳) تعریف می‌شود (Durigon, Parisotto, Carciofi, & Laurindo, 2017):

$$-q = h_t(T_{amb} - T) \quad (3)$$

که در رابطه‌ی (۳)، q شار حرارتی ($W.m^{-2}$)، h_t ضریب انتقال حرارت همرفتی ($W.m^{-2}.K^{-1}$)، T دمای هوای اطراف و دما ($^{\circ}K$) است. ضریب انتقال حرارت همرفتی برای جریان آرام و آشفته در این خشک‌کن به ترتیب از رابطه‌ی (۴) و (۵) محاسبه می‌شود (Ayala-Aponte et al., 2021):

$$h_t = 2 \frac{K_{air}}{L} \frac{0.3387 Pr^{1/3} Re^{1/2}}{\left(\frac{0.0468}{Pr}\right)^2} \quad \text{If } Re \leq 5 \times 10^5 \quad (4)$$

$$\left(1 + \frac{Pr}{3}\right)^{1/4}$$

$$h_t = 2 \frac{K_{air}}{L} Pr^{1/3} (0.037 Re^{4/5} - 871) \quad \text{If } Re > 5 \times 10^5 \quad (5)$$

که در رابطه‌ی (۴) و (۵)، K_{air} ضریب هدایت حرارتی هوا ($W.m^{-1}.K^{-1}$)، Re عدد رینولدز^۵، Pr عدد پراوندتل^۶ و L ضخامت محصول (m) است.

مقادیر عدد رینولدز و پراوندتل از روابط (۶) و (۷) محاسبه می‌شود (Ayala-Aponte et al., 2021):

$$Pr = \frac{C_{p,air} \mu_{air}}{K_{air}} \quad (6)$$

$$Re = \frac{\rho_{air} VL}{\mu_{air}} \quad (7)$$

5- Reynolds number (Re)

6- Prandtl number (Pr)

به‌منظور شبیه‌سازی انتقال حرارت رسانشی در محفظه‌ی خشک‌کن از ماژول "Heat Transfer in Solids and Fluids" استفاده شده‌است، این ماژول شامل دو قسمت جامد^۱ و سیال^۲ است. در این ماژول برای دامنه‌ی^۳ قسمت جامد لایه‌ی فیلم مایلار و برای دامنه‌ی قسمت سیال لایه‌های آب و هوا انتخاب شده‌است، و لایه‌ی محصول (آلوئه‌ورا) به‌عنوان یک قسمت محیط متخلخل تعریف شد، که در شکل ۴ قسمت‌های آبی رنگ، مرزهایی است که انتقال حرارت رسانشی در آن تعریف شده‌است. با تعریف این ماژول انتقال حرارت رسانشی بین تمام لایه‌های انتخاب شده برقرار خواهد شد.



شکل ۴- شرایط مرزی انتقال حرارت رسانشی

Fig.4. Boundary conditions for conductive heat transfer

تبادل حرارت به روش تشعشع در مرزهای مشترک بین آب، فیلم مایلار، محصول و هوا

به‌طور کلی از همه‌ی مواد (جامد، مایع و گاز) در دمای بالاتر از صفر مطلق از طریق امواج الکترومغناطیسی انرژی ساطع می‌شود. در خشک‌کن رفرکتانس ویندو آب با دمای نزدیک به نقطه جوش را می‌توان جسم سیاه در نظر گرفت و میزان انرژی تشعشی ساطع شده از یک جسم سیاه، طبق قانون استفان-بولتزمن^۴ مطابق رابطه‌ی (۲) تعریف می‌شود (Kumar et al., 2022):

$$-q = \varepsilon \sigma (T_{amb}^4 - T^4) \quad (2)$$

که در رابطه‌ی (۲)، q شار حرارتی ($W.m^{-2}$)، ε ضریب صدور سطح جسم ($\varepsilon=1$)، σ ثابت استفان بولتزمن ($5.67 \times 10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$)، T و T_{amb} به ترتیب، دمای هوای اطراف ($298^{\circ}K$) و دما ($^{\circ}K$) است. در این پژوهش، به‌منظور شبیه‌سازی انتقال حرارت تشعشی از قسمت "Heat Sources"، ماژول "Surface-to-Ambient Radiation" انتخاب شد و مرزهایی که انتقال حرارت تشعشی در آن‌ها رخ می‌دهد، در این بخش انتخاب شد، که در شکل ۵ قسمت‌های آبی رنگ، مرزهایی است که انتقال حرارت تشعشی در آن تعریف

1- Solid

2- Fluid

3- Domain

4- Stefan-Boltzman

سرعت سیال (0.7 m.s^{-1}) است (Ayala-Aponte *et al.*, 2021). با توجه به مقادیر عدد رینولدز طبق جدول ۳، ضریب انتقال حرارت همرفتی در محدوده جریان آرام است.

که در روابط (۶) و (۷)، μ_{air} ویسکوزیته دینامیکی هوا (Pa.s)، ρ_{air} چگالی هوا (kg.m^{-3})، ضریب هدایت حرارتی هوا k_{air} ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)، ظرفیت گرمایی ویژه هوا ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$) و V

جدول ۳- ضریب انتقال حرارت همرفتی در دماهای مختلف و پارامترهای تعیین‌کننده آن

دمای آب	60	70	80	90
Water temperature ($^{\circ}\text{C}$)				
ρ_{air} (kg.m^{-3})	1.092	1.082	1.072	1.062
$C_{p,\text{air}}$ ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	1006.04	1006.57	1007.10	1007.62
K_{air} ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	0.027	0.028	0.028	0.028
$\mu_{\text{air}} \times 10^{-5}$ (Pa.s)	1.96	1.97	1.99	2
Re	972.04	957.45	943.20	929.28
Pr	0.71	0.71	0.70	0.70
h_t ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)	5mm	101	100.93	100.87
	10mm	50.53	50.50	50.46

انتقال جرم رسانشی (نفوذ) و انتقال جرم همرفتی صورت می‌گیرد. **۱. انتقال جرم نفوذ که در محصول رخ می‌دهد:** به این منظور از معادله فیک برای بررسی انتقال جرم در محصول استفاده شد. بر اساس قانون دوم انتشار فیک، میزان شار جرمی در محصول متناسب با گرادیان غلظت است و طبق رابطه‌ی (۹) تعریف می‌شود:

$$J = -D_{\text{eff}} \nabla C \quad (9)$$

که در رابطه‌ی (۹)، ∇C گرادیان غلظت رطوبت محصول (mol.m^{-3})، D_{eff} ضریب موثر نفوذ رطوبت ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)، J شار جرمی ($\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) هستند. مقدار ضریب موثر نفوذ رطوبت معمولاً با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و از رابطه‌ی (۱۰) محاسبه می‌شود (Ayala-Aponte *et al.*, 2021):

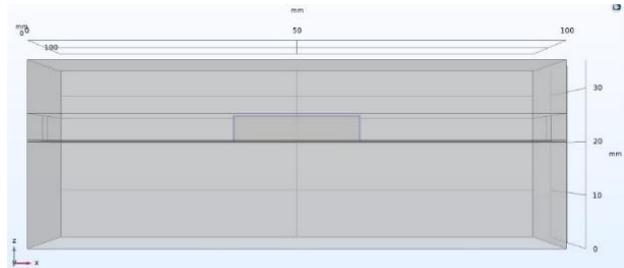
$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left[\frac{-\pi^2 D_{\text{eff}} t}{D^2}\right] \quad (10)$$

که در رابطه‌ی (۱۰)، MR نسبت رطوبت، D_{eff} ضریب موثر نفوذ رطوبت ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)، t زمان (s) و D ضخامت محصول (m) است و مقدار ضریب موثر نفوذ رطوبت از شیب نمودار لگاریتم نسبت رطوبت^۱ بر زمان تعیین می‌شود. علاوه بر این، دمای هوای خشک‌کن یکی از مهم‌ترین عوامل موثر در مقدار ضریب موثر نفوذ رطوبت است، معادله آرنیوس (رابطه ۱۱) ارتباط بین این دو پارامتر را بیان می‌کند (Compaoré *et al.*, 2019):

$$D_{\text{eff}} = D_0 e^{\frac{-Ea}{RT}} \quad (11)$$

که در رابطه‌ی (۱۱)، D_0 ثابت انتشار ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)، 2.6989×10^{-6}

در این مطالعه، برای شبیه‌سازی انتقال حرارت همرفتی، از ماژول "Heat Flux" استفاده شده و مرزی که انتقال حرارت همرفتی در آن رخ می‌دهد، در این بخش انتخاب می‌شوند، در شکل ۶ قسمت‌های آبی رنگ، مرزهایی است که انتقال حرارت همرفتی در آن تعریف شده‌است.



شکل ۶- شرایط مرزی انتقال حرارت همرفتی

Fig.6. Boundary conditions for convective heat transfer

قانون کلی برای تمام فرآیندهای انتقال حرارت بر اساس قانون اول ترمودینامیک ارائه می‌شود، که معادله‌ی آن در نرم‌افزار کامسول به صورت رابطه‌ی (۸) تعریف می‌شود (Kumar *et al.*, 2022):

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q \quad (8)$$

که در رابطه‌ی (۸)، ∂T تغییرات دما ($^{\circ}\text{K}$)، ∂t تغییرات زمان (s)، C_p ظرفیت گرمایی ویژه ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)، ρ چگالی (kg.m^{-3})، Q منبع حرارتی داخلی (W.m^{-3})، q شار حرارتی (W.m^{-2}) و u سرعت جریان (m.s^{-1}) هستند.

معادلات انتقال جرم در خشک‌کن فرکتانس ویندو

انتقال جرم در پدیده خشک‌کردن فرکتانس ویندو به دو صورت

نفوذ رطوبت در این مطالعه و طبق روابط (۱۰) و (۱۱) مطابق جدول ۴ است (Ayala-Aponte *et al.*, 2021).

Ea انرژی فعال‌سازی (j.mol⁻¹)، T دمای هوای خشک کن (K) و R ثابت جهانی گازها (8.314472 j.K⁻¹mol⁻¹) است. مقدار ضریب موثر

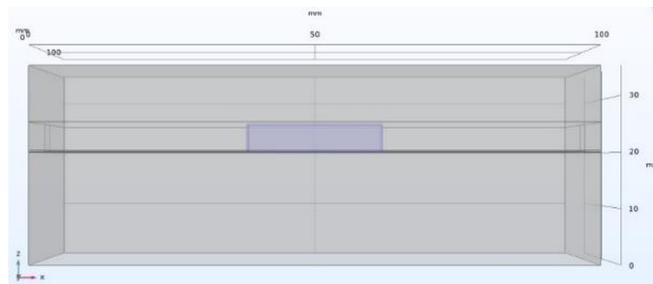
جدول ۴- مقدار ضریب موثر نفوذ رطوبت

Table 4- The value of the Diffusivity coefficient

ضخامت نمونه Sample thickness (mm)	D _{eff} × 10 ⁻¹⁰ (m ² .s ⁻¹)			
	60°C	70°C	80°C	90°C
5	0.7	0.9	1.3	1.9
10	1.3	1.7	2.4	2.7

محصول رخ می‌دهد، که در شکل ۷ قسمت آبی رنگ، لایه‌ای است که انتقال جرم رسانشی در آن تعریف شده‌است.

برای شبیه‌سازی انتقال جرم نفوذ از ماژول "Transport of Diluted Species" استفاده شد. برای تعیین شرایط مرزی در این بخش برای دامنه، لایه‌ی محصول را انتخاب کرده زیرا انتقال جرم در



شکل ۷- شرایط مرزی انتقال جرم رسانشی

Fig.7. Boundary conditions for conductive mass transfer

$$h_m = \frac{0.0296 \text{ Re}^{4/5} \text{ Sc}^{1/3} D_{eff}}{L} \quad \text{If Re} > 15000 \quad (14)$$

که در روابط (۱۳) و (۱۴)، D_{eff} ضریب موثر نفوذ رطوبت (m².s⁻¹)، عدد رینولدز و Sc عدد اشمیت است، که عدد اشمیت مطابق رابطه‌ی (۱۵) محاسبه می‌شود (Ayala-Aponte *et al.*, 2021).

$$\text{Sc} = \frac{\mu_{air}}{\rho_{air} D_{eff}} \quad (15)$$

برای شبیه‌سازی انتقال جرم همرفتی در خشک‌کن رفرکتانس ویندو از ماژول "Flux" استفاده شد. سطح مشترک محصول و هوا به‌عنوان شرایط مرزی تعیین شد. قسمت‌های آبی رنگ در شکل ۸، مرزهایی است که انتقال جرم همرفتی در آن تعریف شده‌است.

۲. انتقال جرم همرفتی: انتقال جرمی که بین سطح ژل آلونه‌ورا و سیال متحرک (هوا) رخ می‌دهد و حرکت هوا نقش زیادی در خشک کردن محصول و انتقال جرم دارد و رطوبت به‌صورت بخار از سطح محصول خارج می‌شود (تبخیر سطحی) و مقدار آن از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود (Kumar *et al.*, 2022):

$$-J = h_m (C_b - C) \quad (12)$$

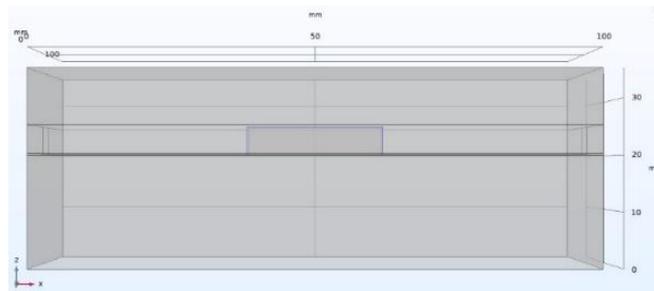
که در رابطه‌ی (۱۲)، J شار جرم، h_m ضریب انتقال جرم (m².s⁻¹)، C_b غلظت رطوبت اطراف (mol.m⁻³) است. ضریب انتقال جرم همرفتی برای جریان آرام و آشفته در این خشک‌کن نیز طبق رابطه‌ی (۱۳) و (۱۴) محاسبه می‌شود. با توجه به مقدار عدد رینولدز در این مطالعه، جریان آرام است و مقادیر ضریب انتقال جرم همرفتی مطابق جدول ۵ است (Ayala-Aponte *et al.*, 2021).

$$h_m = \frac{0.332 \text{ Re}^{1/2} \text{ Sc}^{1/3} D_{eff}}{L} \quad \text{If Re} \leq 15000 \quad (13)$$

جدول ۵- ضریب انتقال جرم همرفتی در دماهای مختلف و پارامترهای تعیین‌کننده آن

Table 5- Convective mass transfer coefficient at different temperatures and its determining parameters

دمای آب Water temperature (°C)	ضخامت نمونه Sample thickness (mm)	Sc	$h_m \times 10^{-4} (m^2.s^{-1})$
60	5	2571.93	1.9
	10	1384.88	1.4
70	5	2030.87	2.3
	10	1075.16	1.7
80	5	1427.23	2.9
	10	773.08	2.2
90	5	991.16	3.8
	10	697.48	2.4



شکل ۸- شرایط مرزی انتقال جرم همرفتی

Fig.8. Boundary conditions of convective mass transfer

استفاده شد، در هر حالت برای اطمینان از درستی مش ایجادشده، کیفیت المان‌های مش از قسمت "Adaptive Mesh Refinement" ارزیابی شده‌است و در نهایت المان‌های مثلثی شکل با اندازه عنصر "Extremely fine" به‌عنوان بهترین حالت برای مش‌بندی انتخاب شد. با توجه به این‌که در ابتدای حل مسئله، مقدار گرمای قابل توجهی توسط آب گرم در داخل میوه ایجاد می‌شود و تخییر رخ می‌دهد، تغییرات پارامترها بسیار زیاد است و مش‌بندی با کمتر از ۸۰۰۰۰۰ سلول موجب واگراشدن حل می‌شود. جهت همگرایی مسئله مش‌بندی به اندازه کافی کوچک شد. در آخر تعداد المان و رئوس مش مطابق جدول ۶ است و مش‌بندی نمونه مدل‌سازی شده در شکل ۹ نشان داده شده است.

معادله کلی انتقال جرم در نرم‌افزار کامسول را می‌توان مطابق رابطه‌ی (۱۶) تعریف کرد (Kumar et al., 2022):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot J + h_m \cdot \nabla C = R \quad (16)$$

که در رابطه‌ی (۱۶)، ∂C تغییرات غلظت محصول ($mol.m^{-3}$)، ∂t تغییرات زمان (s)، R مصرف یا تولید رطوبت و h_m ضریب انتقال جرم همرفتی ($m.s^{-1}$) هستند.

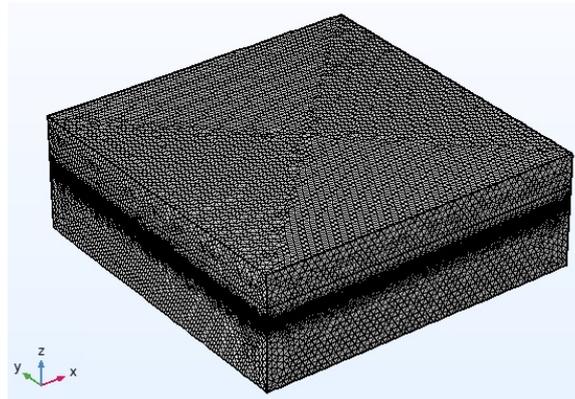
مش‌بندی (شبکه‌بندی)

در این مرحله مدل هندسی ایجادشده به قسمت یا المان‌های کوچک‌تر تقسیم‌بندی می‌شود. بدین منظور از المان‌های مثلثی و مربعی شکل با دو اندازه عنصر "Normal" و "Extremely fine"

جدول ۶- تعداد المان و رئوس مش در شبیه‌سازی انتقال حرارت و جرم خشک‌کن رفراکتانس ویندو

Table 6- The number of mesh elements and vertices in the simulation of heat and mass transfer of Refractance window

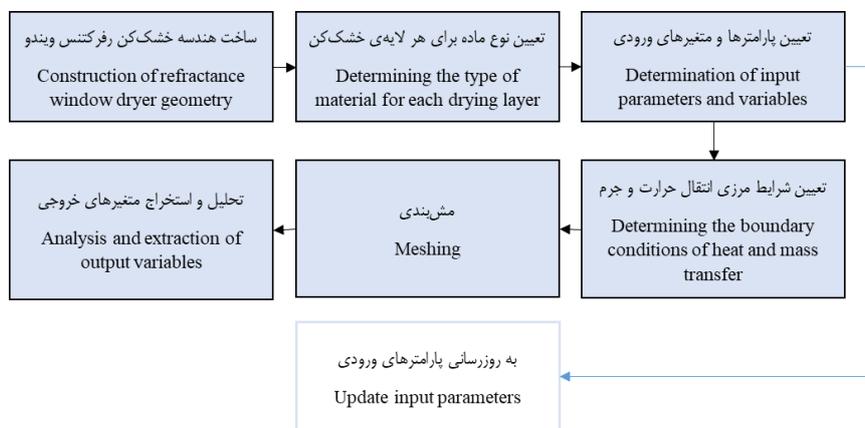
ضخامت نمونه Thickness of sample (mm)	المان Elements	رئوس مش Mesh vertices
5	814090	1740295
10	816212	1759206



شکل ۹- مش‌بندی نمونه مدل‌سازی شده در نرم‌افزار کامسول
 Fig.9. Modeled sample meshing in Comsol software

دقیقه توسط نرم‌افزار کامسول اندازه‌گیری و ثبت شد. در هر گام نتایج گام قبل به‌عنوان شرایط اولیه در نظر گرفته می‌شوند و مجدد مسئله حل می‌شود. این کار به همین صورت ادامه می‌یابد تا با گذشت زمان مسئله به جواب قابل قبول برسد. در آخر متغیرهای خروجی در گام‌های زمانی مشخص از قسمت نتایج استخراج شده‌است. روش شبیه‌سازی و راهکار استفاده‌شده در این پژوهش در شکل ۱۰ نشان داده شده‌است.

سپس بعد از مرحله‌ی مش‌بندی، با توجه به شرایط مرزی تعیین شده که پیش‌تر بیان شد، معادلات برای یک گام زمانی حل می‌شوند، برای این کار از پنجره‌ی "Select Study" نوع آنالیز با توجه به فیزیک مسئله، "Time Dependent" انتخاب شده‌است. در این مطالعه، شبیه‌سازی انتقال حرارت و انتقال جرم خشک‌کن رفراکتس ویندو یک مسئله‌ی وابسته به زمان است. به این ترتیب، دما و محتوی رطوبت آن در یک بازه زمانی ۳۰۰ دقیقه در هر ۵



شکل ۱۰- الگوریتم شبیه‌سازی انتقال حرارت و جرم خشک‌کن رفراکتس ویندو در نرم‌افزار کامسول

Fig.10. Algorithm for simulation of heat and mass transfer of Refractance window dryer in Comsol software

اثر دمای آب گرم و ضخامت محصول بر فرآیند خشک کردن

آلوئه‌ورا

نتایج حاصل از شبیه‌سازی فرآیند خشک‌شدن نشان داد که، زمان لازم برای رسیدن به رطوبت ۰/۱ گرم آب بر گرم ماده خشک آلوئه‌ورا در دمای آب ۶۰، ۷۰، ۸۰، و ۹۰ درجه سلسیوس به‌ترتیب برای ضخامت ۵ میلی‌متر ۱۲۰، ۱۰۰، ۷۰ و ۵۰ دقیقه و برای ضخامت ۱۰ میلی‌متر ۲۴۰، ۱۹۰، ۱۵۰ و ۱۲۰ دقیقه بود. همان‌طور که در شکل ۱۱

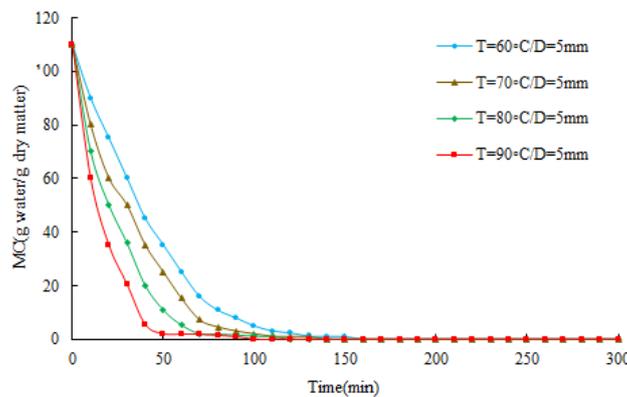
نتایج و بحث

در این بخش نتایج مربوط به سینتیک خشک شدن، عوامل مؤثر بر آن، شبیه‌سازی المان محدود خشک شدن آلوئه‌ورا و ارزیابی مدل از طریق مقایسه با نتایج مقالات دیگر ارائه خواهد شد.

کاهش زمان خشک‌شدن محصول به دلیل تأثیر دمای آب ممکن است با اختلاف دمایی بالاتر بین منبع گرما (آب) و صفحات ژل آلوئه‌ورا توضیح داده‌شود، که به حذف سریع آب از محصول کمک می‌کند. با توجه به آثار دیگر پژوهشگران، افزایش دما باعث افزایش انتقال حرارت، سرعت تبخیر و انتقال آب از داخل محصول به سطح آن می‌شود و در نهایت محصول سریع‌تر خشک می‌شود (Kaur, Saha, Kumari, & Datta, 2017; Beigi, 2019). هرچه ضخامت نمونه کم‌تر باشد، نمونه سریع‌تر گرم می‌شود. در نتیجه به مولکول‌های آب اجازه می‌دهد تا در مدت زمان کوتاه‌تری به سطح نمونه رفته و تبخیر شوند. بنابراین، افزایش ضخامت محصول باعث کاهش در جریان جرمی شده و در نتیجه نرخ خشک شدن کم‌تر می‌شود.

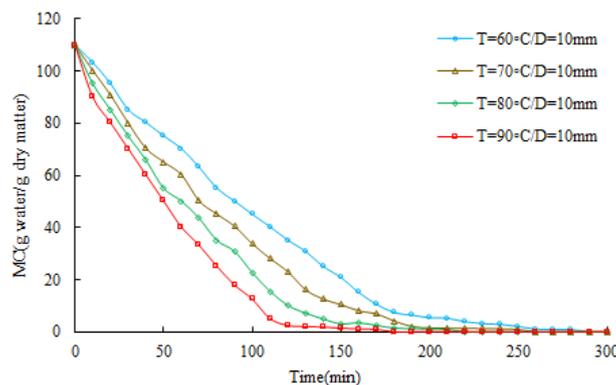
و ۱۲ به ترتیب برای ضخامت ۵ و ۱۰ میلی‌متر ملاحظه می‌شود، هنگام شروع فرآیند سرعت خشک‌شدن محصول بیش‌تر است، هرچه از فرآیند خشک‌شدن محصول می‌گذرد، سرعت خشک‌شدن کاهش می‌یابد.

از دست دادن سریع آب توسط خشک‌کن رفراکتانس ویندو نتیجه انتقال جرم و انرژی بالایی بود که هم‌زمان در صفحات آلوئه‌ورا رخ داد، زیرا در طول خشک‌کردن رفراکتانس ویندو، هر سه حالت انتقال حرارت فعال هستند. اگرچه در خشک‌کن‌های دیگر انتقال حرارت رسانشی غالب است، در این خشک‌کن رسانش، هم‌رفت و تشعشع در فصل مشترک آب گرم و فیلم مایلار، رسانش و تشعشع از طریق فیلم مایلار و هم‌رفت در فصل مشترک محصول و هوا رخ می‌دهد (Raghavi, Moses, & Anandharamakrishnan, 2018).



شکل ۱۱- نمودار خشک شدن ژل آلوئه‌ورا در دمای آب گرم ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سلسیوس با ضخامت ۵ میلی‌متر

Fig.11. Aloe vera gel drying diagram in hot water temperatures of 60, 70, 80, and 90 degrees Celsius with a thickness of 5 mm



شکل ۱۲- نمودار خشک شدن ژل آلوئه‌ورا در دمای آب گرم ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سلسیوس با ضخامت ۱۰ میلی‌متر

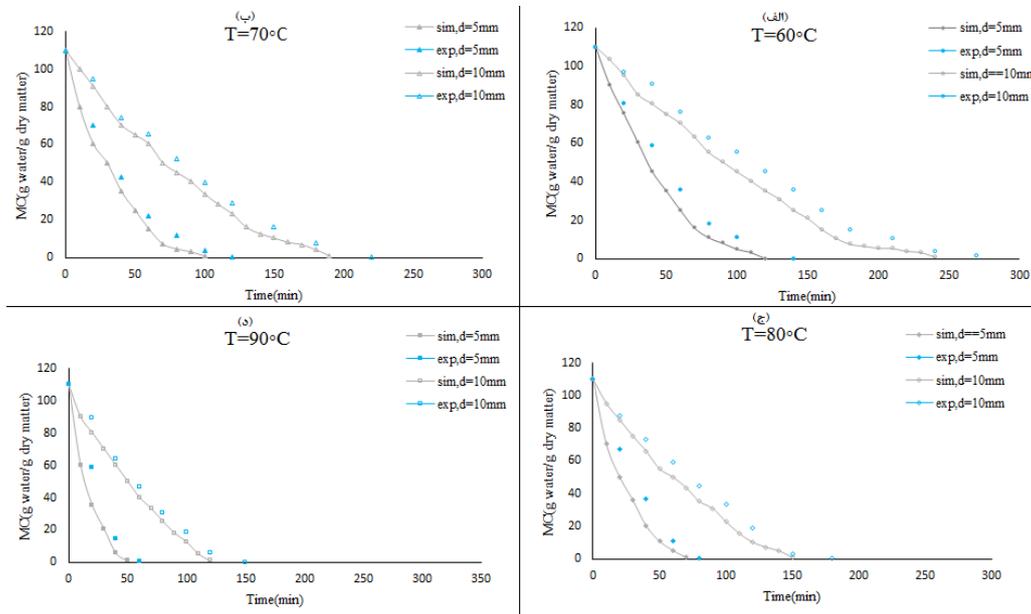
Fig.12. Aloe vera gel drying diagram in hot water temperatures of 60, 70, 80, and 90 degrees Celsius with a thickness of 10 mm

بودن بایستی اعتبارسنجی شوند. برای این منظور از نتایج حاصل آزمایش‌های تجربی مقاله‌ی آیالا-آپونته و همکاران (Ayala-Aponte

اعتبارسنجی مدت زمان خشک شدن محصول شبیه‌سازی انجام شده توسط نرم‌افزار کامسول به منظور قابل اعتماد

ضخامت ۱۰ میلی‌متر به ۲۷۰، ۲۲۰، ۱۶۰ و ۱۴۵ دقیقه در دمای ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سلسیوس نیاز است. طبق نتایج حاصل مدت زمان خشک شدن محصول از تطابق خوبی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی برخوردار بودند که این تطابق در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

(*et al.*, 2021) استفاده گردید. در این تحقیق دریافتند برای رسیدن به رطوبت نهایی ۰/۱ گرم آب بر گرم جامد، در صفحات ژل آلوتهورا با ضخامت ۵ میلی‌متر به مدت زمان ۱۴۵، ۱۲۰، ۸۱ و ۵۵ دقیقه در دمای ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سلسیوس و برای صفحات ژل آلوتهورا با



شکل ۱۳ - اعتبارسنجی مدت زمان خشک شدن محصول برای ضخامت ۵ و ۱۰ میلی‌متر در آب گرم با دمای (الف) ۶۰ درجه سلسیوس، (ب) ۷۰ درجه سلسیوس، (ج) ۸۰ درجه سلسیوس و (د) ۹۰ درجه سلسیوس

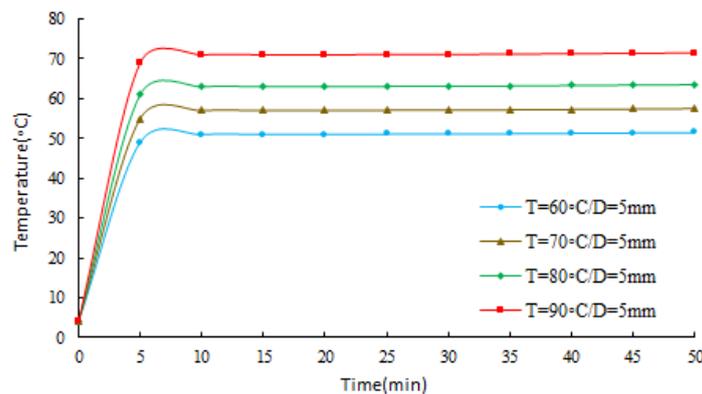
Fig.13. Validation of product drying time for thickness of 5 and 10 mm in hot water with temperature (A) 60 degrees Celsius, (B) 70 degrees Celsius, (C) 80 degrees Celsius, and (D) 90 degrees Celsius

بیش تر است.

همان‌طور که در شکل ۱۴ و ۱۵ به ترتیب برای ضخامت ۵ و ۱۰ میلی‌متر ملاحظه می‌شود، به‌طور کلی در هر چهار دمای آب گرم بررسی شده در فرآیند خشک کردن، دمای محصول در ابتدا افزایش سریعی دارد و پس از آن در طول فرآیند خشک کردن همان دما تقریباً ثابت می‌ماند و به دمای آب گرم نمی‌رسد. زیرا طبق ویژگی‌های خشک‌کن رفرکتانس ویندو هرچه از زمان خشک کردن محصول می‌گذرد، رطوبت محصول کاهش می‌یابد، انتقال حرارت نیز کم‌تر می‌شود و دمای محصول در همان مقادیر ثابت می‌ماند.

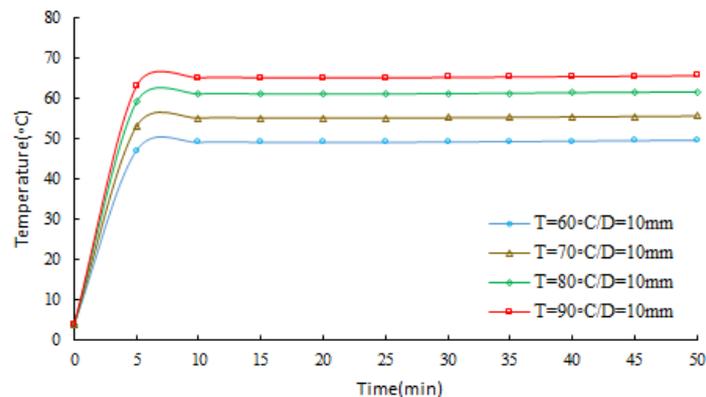
اثر دمای آب داغ و ضخامت محصول بر میانگین دمای محصول

در این شبیه‌سازی، دمای اولیه ژل آلوتهورا ۴ درجه سلسیوس (دمای یخچال) بود و با شروع فرآیند خشک شدن دمای محصول افزایش یافت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که، دمای محصول در آب گرم با دمای ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰ درجه سلسیوس برای ژل آلوتهورا با ضخامت ۵ میلی‌متر به ترتیب به ۵۱، ۵۷، ۶۳ و ۷۱ درجه سلسیوس و برای ژل آلوتهورا با ضخامت ۱۰ میلی‌متر به ترتیب به ۴۷، ۵۵، ۶۳ و ۶۵ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد. طبق نتایج هرچه ضخامت ژل آلوتهورا کم‌تر باشد، دمای محصول در طول فرآیند خشک کردن



شکل ۱۴- نمودار دما ژل آلوئه‌ورا در دمای آب گرم ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سلسیوس با ضخامت ۵ میلی‌متر

Fig.14. Temperature diagram of aloe vera gel in hot water temperatures of 60, 70, 80, and 90 degrees Celsius with a thickness of 5 mm



شکل ۱۵- نمودار دما ژل آلوئه‌ورا در دمای آب گرم ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سلسیوس با ضخامت ۱۰ میلی‌متر

Fig.15. Temperature diagram of aloe vera gel in hot water temperatures of 60, 70, 80, and 90 degrees Celsius with a thickness of 10 mm

مترمکعب رسید در قسمت (ب)، (ج) و (د) میزان رطوبت به‌ترتیب به حدود ۴۰، ۳۵ و ۳۰ مول بر مترمکعب رسیده و با توجه به این که طبق مقاله‌ی آیالا-آپونته و همکاران (Ayala-Aponte et al., 2021)، میزان رطوبت نهایی در ژل آلوئه‌ورا ۰/۱ گرم آب بر گرم جامد و یا حدود ۴۰ مول بر مترمکعب است، در این سه قسمت، آلوئه‌ورا خشک شده است. در شکل ۱۷ ضخامت ژل آلوئه‌ورا ۱۰ میلی‌متر است و بعد از گذشت ۱۰۰ دقیقه از شروع فرآیند خشک شدن ملاحظه می‌شود که در قسمت (الف)، (ب)، (ج) و (د) میزان رطوبت به‌ترتیب برای دمای آب گرم ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه‌سلسیوس به حدود ۶۵، ۷۵، ۸۵ و ۵۵ مول بر مترمکعب رسید و ژل آلوئه‌ورا کاملاً خشک نشده‌است. در شروع خشک‌کردن، میزان رطوبت در سراسر ژل آلوئه‌ورا یکنواخت بود، اما همان‌طور که در شکل ۱۶ و ۱۷ ملاحظه می‌شود در طول خشک‌کردن محصول (بعد از گذشت ۱۰۰ دقیقه) رطوبت ژل به سمت سطح خمیر کاهش می‌یابد. تفاوت در میزان رطوبت در

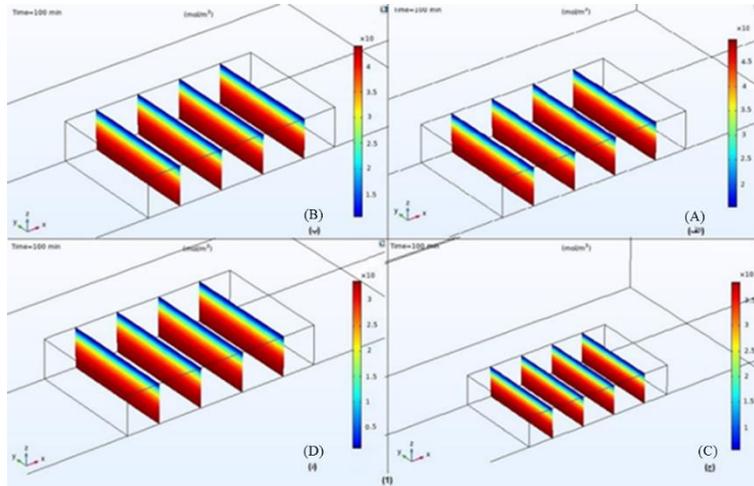
ارزیابی مدل در تعیین توزیع رطوبت

درک توزیع محتوای رطوبت بسیار مهم است زیرا ممکن است محصول ظاهراً در سطح خشک به نظر برسد، اما مقدار قابل‌توجهی رطوبت داشته باشد. اختلاف رطوبت در داخل محصول بر کیفیت نهایی محصول تأثیر می‌گذارد. بنابراین، بررسی توزیع رطوبت در محصول ضروری است (Khan, Kumar, Joardder, & Karim, 2017).

رطوبت را در کل محصول در هر مرحله زمانی می‌توان توسط نرم‌افزار کامسول محاسبه کرد. شکل ۱۶ و ۱۷ توزیع رطوبت سه‌بعدی به‌صورت مقاطع مختلف طولی در سراسر ژل آلوئه‌ورا را پس از ۱۰۰ دقیقه به‌ترتیب برای ضخامت ۵ و ۱۰ میلی‌متر نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۶ ملاحظه می‌شود، بعد از گذشت ۱۰۰ دقیقه از شروع فرآیند خشک شدن در قسمت (الف) دمای آب گرم ۶۰ درجه‌سلسیوس است و میزان رطوبت ژل آلوئه‌ورا به حدود ۴۵ مول بر

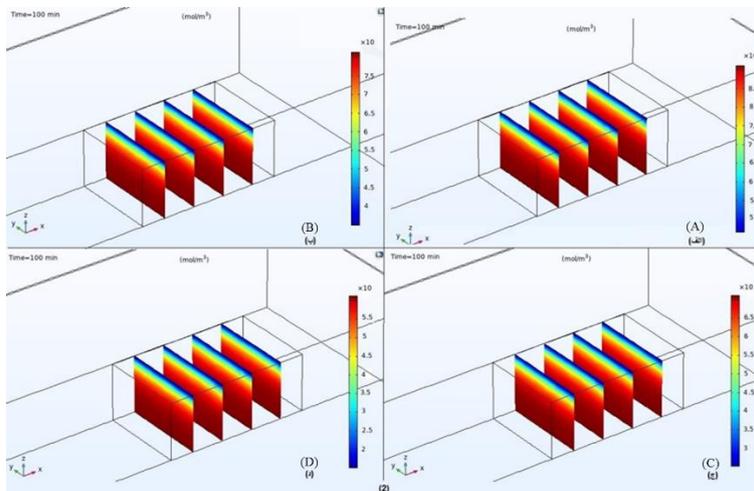
شده‌است در طول خشک کردن توزیع رطوبت در هر دو ضخامت به صورت یکنواخت است.

مکان‌های مختلف در یک زمان خاص به دلیل نرخ تبخیر بالاتر در سطح، با سرعت انتشار رطوبت قابل توجه به سمت سطح محصول است. با توجه به این که بخش عمده‌ی ژل آلوئه‌ورا از آب تشکیل



شکل ۱۶- توزیع رطوبت ژل آلوئه‌ورا با ضخامت ۵ میلی‌متر در ۱۰۰ دقیقه هنگامی که دمای آب (الف) ۹۰ درجه سلسیوس، (ب) ۸۰ درجه سلسیوس، (ج) ۷۰ درجه سلسیوس و (د) ۶۰ درجه سلسیوس است.

Fig.16. Moisture distribution of aloe vera gel with a thickness of 5 mm at 100 minutes when the water temperature is (A) 90 °C, (B) 80 °C, (C) 70 °C, and (D) 60 °C



شکل ۱۷- توزیع رطوبت ژل آلوئه‌ورا با ضخامت ۱۰ میلی‌متر در ۱۰۰ دقیقه هنگامی که دمای آب (الف) ۹۰ درجه سلسیوس، (ب) ۸۰ درجه سلسیوس، (ج) ۷۰ درجه سلسیوس و (د) ۶۰ درجه سلسیوس است.

Fig.17. Moisture distribution of aloe vera gel with a thickness of 10 mm at 100 minutes when the water temperature is (A) 90 °C, (B) 80 °C, (C) 70 °C, and (D) 60 °C

مانند دمای آب گرم و ضخامت محصول بر روی توزیع دما و توزیع رطوبت در کل محصول شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی شده درک بهتری نسبت به توزیع دما و رطوبت در کل محصول نشان داد. مهم‌ترین نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر است:

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با استفاده از نرم‌افزار کامسول مولتی فیزیکس، مدلی سه‌بعدی برای درک و تجسم اثر متغیرهای ورودی مختلف

۱- توزیع رطوبت نشان می‌دهد در حالی که رطوبت سطح محصول پایین و تقریباً خشک بود، مرکز و کف آن دارای رطوبت قابل توجهی بودند. نحوه توزیع رطوبت شبیه‌سازی شده مطابقت خوبی با داده‌های مقالات مشابه نشان داده‌اند.

۲- با توجه به بررسی توزیع رطوبت در نرم‌افزار کامسول سرعت خشک شدن برای صفحات ژل آلوئه‌ورا با ضخامت ۵ میلی‌متر در آب گرم با دمای ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۰/۹۱۵، ۱/۰۹۹، ۱/۵۷ و ۲/۱۹۸ گرم آب بر دقیقه و برای صفحات ژل آلوئه‌ورا با ضخامت ۱۰ میلی‌متر در آب گرم با دمای ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۰/۴۵۷

۳- توزیع رطوبت و توزیع دما درون محصول با حل معادلات انتقال جرم و حرارت در مدل المان محدود در طول فرآیند خشک شدن به دست می‌آید. این شبیه‌سازی به درک مکانیسم انتقال حرارت و انتقال جرم در طول خشک کردن مواد غذایی مختلف کمک می‌کند و امکان توسعه خشک‌کن‌های کارآمدتر را برای صنعت فرآوری مواد غذایی فراهم می‌کند.

۱- توزیع رطوبت نشان می‌دهد در حالی که رطوبت سطح محصول پایین و تقریباً خشک بود، مرکز و کف آن دارای رطوبت قابل توجهی بودند. نحوه توزیع رطوبت شبیه‌سازی شده مطابقت خوبی با داده‌های مقالات مشابه نشان داده‌اند.

۲- با توجه به بررسی توزیع رطوبت در نرم‌افزار کامسول سرعت خشک شدن برای صفحات ژل آلوئه‌ورا با ضخامت ۵ میلی‌متر در آب گرم با دمای ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۰/۹۱۵، ۱/۰۹۹، ۱/۵۷ و ۲/۱۹۸ گرم آب بر دقیقه و برای صفحات ژل آلوئه‌ورا با ضخامت ۱۰ میلی‌متر در آب گرم با دمای ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۰/۴۵۷

References

1. Antury, K. L. A., Rojas, D. A. V., & Bermeo, O. M. B. (2021). Conservación de las propiedades nutraceuticas del Aloe Vera (Aloe Barbadensis Miller), mediante técnicas de secado. *Ingeniería y Región*, (25), 6-21. <https://doi.org/10.25054/22161325.2818>
2. Ayala-Aponte, A. A., Cárdenas-Nieto, J. D., & Tirado, D. F. (2021). Aloe vera Gel Drying by Refractance Window®: Drying Kinetics and High-Quality Retention. *Foods*, 10(7), 1445. <https://doi.org/10.3390/foods10071445>
3. Añibarro-Ortega, M., Pinela, J., Barros, L., Ćirić, A., Silva, S. P., Coelho, E., ... & Ferreira, I. C. (2019). Compositional features and bioactive properties of Aloe vera leaf (fillet, mucilage, and rind) and flower. *Antioxidants*, 8(10), 444. <https://doi.org/10.3390/antiox8100444>
4. Beigi, M. (2019). Drying of mint leaves: Influence of the process temperature on dehydration parameters, quality attributes, and energy consumption. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 21(1), 77-88.
5. Compaoré, A., Putranto, A., Dissa, A. O., Ouoba, S., Rémond, R., Rogaume, Y., ... & Koulidiati, J. (2019). Convective drying of onion: modeling of drying kinetics parameters. *Journal of Food Science and Technology*, 56(7), 3347-3354.
6. Dev, S. R., & Raghavan, V. G. (2012). Advancements in drying techniques for food, fiber, and fuel. *Drying Technology*, 30(11-12), 1147-1159. <https://doi.org/10.1080/07373937.2012.692747>
7. Durigon, A., Parisotto, E. I. B., Carciofi, B. A. M., & Laurindo, J. B. (2018). Heat transfer and drying kinetics of tomato pulp processed by cast-tape drying. *Drying Technology*, 36(2), 160-168. <https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1304411>
8. Duarte-Correa, Y., Vargas-Carmona, M. I., Vásquez-Restrepo, A., Ruiz Rosas, I. D., & Perez Martinez, N. (2021). Native potato (Solanum phureja) powder by Refractance Window Drying: A promising way for potato processing. *Journal of Food Process Engineering*, 44(10), e13819. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13819>
9. Franco, S., Jaques, A., Pinto, M., Fardella, M., Valencia, P., & Núñez, H. (2019). Dehydration of salmon (Atlantic salmon), beef, and apple (Granny Smith) using Refractance window™: Effect on diffusion behavior, texture, and color changes. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 52, 8-16. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.12.001>
10. Herrera Ardila, P. A. (2022) Mathematical modeling and simulation of refractance window drying of whole milk and yoghurt (Master's thesis, Universidad de La Sabana).
11. Jafari, S. M., Azizi, D., Mirzaei, H., & Dehnad, D. (2016). Comparing quality characteristics of oven dried and Refractance Window dried kiwifruits. *Journal of Food Processing and Preservation*, 40(3), 362-372. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12613>
12. Kaur, G., Saha, S., Kumari, K., & Datta, A. K. (2017). Mango pulp drying by refractance window method. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 19(4).
13. Kudra, T., & Mujumdar, A. S. (2009). Advanced drying technologies. CRC press. <https://doi.org/10.1201/9781420073898>
14. Kumar, R., Singh, A. K., Gupta, A., Bishayee, A., & Pandey, A. K. (2019). Therapeutic potential of Aloe vera—A miracle gift of nature. *Phytotherapy*, 60, 152996. <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2019.152996>
15. Kumar, M., Madhumita, M., Srivastava, B., & Prabhakar, P. K. (2022). Mathematical modeling and simulation of refractance window drying of mango pulp for moisture, temperature, and heat flux distribution. *Journal of Food Process Engineering*, 45(9), e14090. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14090>
16. Khan, M. I. H., Kumar, C., Joardder, M. U. H., & Karim, M. A. (2017). Determination of appropriate effective diffusivity for different food materials. *Drying Technology*, 35(3), 335-346.

- <https://doi.org/10.1080/07373937.2016.1170700>
17. Mahapatra, A., & Tripathy, P. P. (2018). Modeling and simulation of moisture transfer during solar drying of carrot slices. *Journal of Food Process Engineering*, 41(8), e12909.
 18. Milczarek, R. R., & Alleyne, F. S. (2017). *Mathematical and computational modeling simulation of solar drying systems*. In *Solar drying technology* (pp. 357-379). Springer, Singapore.
 19. Nindo, C. I., & Tang, J. (2007). Refractance window dehydration technology: a novel contact drying method. *Drying Technology*, 25(1), 37-48. <https://doi.org/10.1080/07373930601152673>
 20. Nindo, C. I., Feng, H., Shen, G. Q., Tang, J., & Kang, D. H. (2003). Energy utilization and microbial reduction in a new film drying system. *Journal of Food Processing and Preservation*, 27(2), 117-136. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2003.tb00506.x>
 21. Ortiz-Jerez, M. J., Gulati, T., Datta, A. K., & Ochoa-Martínez, C. I. (2015). Quantitative understanding of Refractance Window™ drying. *Food and Bioprocess Processing*, 95, 237-253. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2015.05.010>
 22. Raghavi, L. M., Moses, J. A., & Anandharamkrishnan, C. (2018). Refractance window drying of foods: A review. *Journal of Food Engineering*, 222, 267-275. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.11.032>
 23. Rajoriya, D., Shewale, S. R., & Hebbar, H. U. (2019). Refractance window drying of apple slices: Mass transfer phenomena and quality parameters. *Food and Bioprocess Technology*, 12(10), 1646-1658. <https://doi.org/10.1007/s11947-019-02334-7>
 24. Sánchez, A. M. C., Lancheros, E. Y. M., Carvajal, M. X. Q., & Moreno, F. L. M. (2020). Sorption isotherms and drying kinetics modelling of convective and refractance window drying of feijoa slices (*Acca sellowiana* Berg). *International Journal of Postharvest Technology and Innovation*, 7(2), 118-136. <https://doi.org/10.1504/IJPTI.2020.109634>
 25. Shende, D., Shrivastav, A., & Datta, A. K. (2019). Effect of mango puree thickness on refractance window drying for making mango leather. *IMPACT: International Journal of Research in Engineering & Technology*, 7, 41-54.
 26. Shende, D., & Datta, A. K. (2020). Optimization study for refractance window drying process of Langra variety mango. *Journal of Food Science and Technology*, 57(2), 683-692. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12435>
 27. Shende, D., & Datta, A. K. (2019). Refractance window drying of fruits and vegetables: A review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(4), 1449-1456.
 28. Zou, Q., Opara, L. U., & McKibbin, R. (2006). A CFD modeling system for airflow and heat transfer in ventilated packaging for fresh foods: I. Initial analysis and development of mathematical models. *Journal of Food Engineering*, 77(4), 1037-1047. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.08.042>

Research Article

Vol. 14, No. 2, 2024, p. 215-234

Balancing Time and Cost in Resource-Constrained Project Scheduling Using Meta-Heuristic Approach

A. Taheri hajivand^{1*}, K. Shirini², S. Samadi Gharehveran³

1- Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agriculture, Tabriz University, Tabriz, Iran

2- PhD Student of Computer Engineering, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran

3- PhD Student of Electrical Engineering, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran

(* - Corresponding Author Email: a.taheri@tabrizu.ac.ir)

Received: 24 April 2023

Revised: 25 July 2023

Accepted: 30 July 2023

Available Online: 30 July 2023

How to cite this article:

Taheri hajivand, A., Shirini, K., & Samadi Gharehveran, S. (2024). Balancing Time and Cost in Resource-Constrained Project Scheduling Using Meta-Heuristic Approach. *Journal of Agricultural Machinery*, 14(2), 215-234. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2023.81735.1157>

Introduction

Agricultural production involves a series of tasks including tillage, planting, and harvesting, which must be done at the right time for each region and type of product. Failing to complete these tasks on time can lead to a decrease in yield. Farmers may wrongly attribute this to factors such as infertile land, pests, diseases, and uneven rainfall distribution. However, this decrease in yield may not always be evident or tangible. To avoid such losses and unforeseen expenses, it is crucial to plan agricultural mechanization projects using the principles of project control. Agricultural projects, like industrial projects, must be carried out in the correct order and at the right time to achieve optimal results. Given the limited availability of resources for mechanization projects, it is imperative to meticulously plan activities to ensure that they are carried out on time and with maximum utilization of resources. To address these challenges, researchers have used meta-heuristic methods in project control, such as the colonial competition algorithm, which has been proven effective in solving the issue of scheduling projects with limited resources. The algorithm has been tested across various industrial activities and projects, and its performance in scheduling the Resource-Constrained Project Scheduling Problem (RCPSP) has been validated by researchers globally.

Materials and Methods

There is a scheduling issue regarding limited resources in agriculture, and this study presents a novel approach using the imperialist competitive algorithm (ICA). The algorithm not only explores a wider solution space but also strives to minimize deviation from the optimal solution, thereby improving the success rate of the proposed method. This research focuses on two dominant products, wheat and rapeseed, produced in Moghan Agriculture and Industry located in Northwest Iran. To evaluate the effectiveness of ICA, we compared it with other well-known meta-heuristic algorithms. We successfully resolved the problem of project scheduling problem with limited resources by implementing the imperialist competitive algorithm. Our findings have shown that this approach not only significantly increased efficiency but also outperformed other algorithms.

Results and Discussion

In this study, we assessed the efficiency of meta-heuristic methods in solving the RCPSP, which can be useful in optimizing the timeliness of project execution, especially for large-scale projects. Some meta-heuristic methods are only useful for smaller problems, while others can provide near-optimal solutions for larger problems, making them suitable for RCPSP. The algorithm explores a wide range of solutions and avoids premature convergence and getting stuck in local optima, unlike other algorithms such as the genetic algorithm.



©2023 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jam.2023.81735.1157>

Optimization reduced the required budget and shortened the duration by 42 days for wheat and 25 days for rapeseed.

Conclusion

We utilized the colonial competition algorithm to address the RCPSP problem in agricultural mechanization projects for two agricultural products in Moghan. Our results show that the proposed algorithm converged and reached the optimal solution. The proposed algorithm was compared with other algorithms and it outperformed them.

Keywords: Imperialist Competitive Algorithm, Meta-heuristic algorithm, Project scheduling, Resource allocation, Timeliness

مقاله پژوهشی

جلد ۱۴، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۳، ص ۲۳۴-۲۱۵

ارائه الگوریتم بهینه‌سازی فرامکاشفه‌ای برای حل مسأله تخصیص منابع محدود به پروژه‌های مکانیزاسیون کشاورزی: مطالعه موردی دشت مغان

عادل طاهری حاجی‌وند^{۱*}، کیمیا شیرینی^۲، سینا صمدی قره‌ورن^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۰۸

چکیده

پروژه‌های زمان‌بندی در کشاورزی شامل عملیات و فعالیت‌هایی است که با ترتیب معین و در یک بازه زمانی مشخص انجام می‌گیرند. چنانچه این عملیات و فعالیت‌ها به‌موقع انجام نشوند، به دلیل افت کمی و کیفی محصول، سبب افزایش هزینه‌های واحد کشاورزی و در نتیجه سبب ایجاد هزینه‌های به‌موقع نبودن خواهند شد. انجام به‌موقع عملیات و پروژه‌های مکانیزاسیون کشاورزی یکی از مهم‌ترین مسائلی است که در سال‌های اخیر مدنظر بوده است. برای حل مسأله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود روش‌های مختلفی ارائه شده است که هر یک سعی در یافتن جواب بهینه می‌باشند. با توجه به این‌که این مسائل از نوع NP-hard می‌باشند، در این پژوهش از الگوریتم رقابت استعماری به‌منظور زمان‌بندی پروژه‌های مکانیزاسیون کشاورزی دو محصول غالب کشت و صنعت مغان استفاده شده است. هدف اصلی این زمان‌بندی کمینه‌کردن زمان تکمیل پروژه و کاهش هزینه‌ها است به‌صورتی که در انجام به‌موقع عملیات کشاورزی اختلالی ایجاد نشود. اطلاعات مربوط به فعالیت‌ها، منابع مورد نیاز هر فعالیت و پیش‌نیازی فعالیت‌های هر محصول و پارامترهای الگوریتم پیشنهادی برای مسأله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود مدل‌سازی و پیاده‌سازی شده است و نتایج حاصل از اجرای الگوریتم نشان‌دهنده موفقیت‌آمیز بودن روش رقابت استعماری در زمان‌بندی و تخصیص بهینه منابع به هر یک از فعالیت‌ها است. الگوریتم رقابت استعماری ارائه‌شده در این مقاله با الگوریتم‌های شناخته‌شده از جمله الگوریتم ژنتیک، الگوریتم پرندگان و الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی مقایسه گردیده است. نتایج حاکی از صرفه‌جویی ۲۵ روزه در زمان انجام پروژه‌ها و ۱۶۷۰۰ واحد پولی در هزینه‌ها در روش رقابت استعماری در محصول کلزا و صرفه‌جویی ۴۲ روزه و ۳۳۳۳ واحد پولی در هزینه محصول گندم شده است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم فراابتکاری، به‌موقع‌بودن، تخصیص منابع، رقابت استعماری، زمان‌بندی پروژه

مقدمه

باعث افت در میزان عملکرد خواهد شد. کشاورزان، این کاهش عملکرد که به دلیل به‌موقع انجام نشدن عملیات به‌وجود آمده است را به حساب حاصلخیز نبودن زمین، آفات و بیماری‌ها، پراکنش نامناسب نزولات و دیگر عوامل می‌گذارند زیرا این کاهش محصول زیاد ملموس و مشخص نیست (Dumond, & Mabert, 1988, Kiani, 2008). به‌منظور جلوگیری از ایجاد هزینه‌های به‌موقع نبودن، ضروری است تا پروژه‌های مکانیزاسیون کشاورزی همانند پروژه‌های صنعتی به‌صورت علمی و با استفاده از علم کنترل پروژه طرح‌ریزی و برنامه‌ریزی شوند تا فعالیت‌های موجود در جهت به ثمر رسیدن پروژه به‌ترتیبی صحیح و در زمان مناسب انجام گیرند (Abdi, 2009). آن‌جایی که در اجرای هر پروژه تنها عامل زمان در رسیدن به حداکثر سود دخیل نمی‌باشد و عملیات کشاورزی برای اجرا نیازمند منابع هستند و با توجه به این‌که سطح منابع پروژه‌های مکانیزاسیون

در انجام کارهای مربوط به تولیدات کشاورزی در هر منطقه و با توجه به نوع محصول، برای انجام هر یک از مراحل، خاک‌ورزی، کاشت، داشت و برداشت، یک مدت زمان مناسب وجود دارد که چنانچه عملیات مربوطه در آن محدوده مناسب زمانی انجام نشود

۱- استادیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲- دانشجوی دکتری مهندسی کامپیوتر، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۳- دانشجوی دکتری مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

*- نویسنده مسئول

(Email: a.taheri@tabrizu.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2023.81735.1157>

متخصصان صنایع غذایی دانشگاه ایالتی میشیگان اظهار کرده‌اند که هرروز تاخیر در برداشت یونجه پس از اول ژوئن یک کاهش ۲/۵٪ در ارزش غذایی آن در پی خواهد داشت. بخش کشاورزی دانشگاه کليسمون اثر آماری مهمی در هورمون‌پاشی به‌موقع نیافتند، اما مشاهده کردند در زمان برداشت بر کیفیت و عملکرد پنبه و بازده برداشت اثر چشمگیری دارد. در پروژه‌های مکانیزاسیون کشاورزی لازم و ضروری است که عملیات و فعالیت‌های پروژه با یک ترتیب معین در یک بازه زمانی مشخص و کوتاه انجام گیرد در غیر این صورت هزینه‌های به‌موقع انجام نشدن عملیات که هزینه بسیار هنگفتی می‌باشد، پیش خواهد آمد. با توجه به اهمیت شاخص زمان جهت کاهش هزینه‌های مذکور و کاهش لنگی‌های حین کار، تکنیک‌های زمان‌بندی پروژه و مطالعه کار، به‌ویژه مدل‌های شبکه‌ای به‌منظور بررسی دقیق روش انجام کار، کاهش حجم کار و در نتیجه آن، کاهش زمان انجام کار، کاربرد دارند (Gonçalves et al., 2009).

از آن‌جا که مسئله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود جزو مسائل NP-hard است، جواب‌های دقیق برای آن تنها با استفاده از روش‌های قطعی به‌دست می‌آید که این روش‌ها هم فقط برای پروژه‌های کوچک قابل استفاده است. روش‌های اکتشافی جایگزینی برای پروژه‌های بزرگ‌تر هستند که بهترین آن‌ها جواب‌های خوبی را در زمان مناسب تولید می‌کند. در این روش برخلاف روش‌های قطعی، تنها بخشی از فضای جستجو که احتمال یافتن جواب در آن بیشتر است مورد توجه قرار می‌گیرد. روش‌های فرااکتشافی آخرین نسل از روش‌های اکتشافی هستند که برای حل مسئله RCPSP مورد استفاده قرار گرفتند. در واقع نیاز به جستجو در حل مسائل کاربردی امری غیرقابل اجتناب و در عین حال دشوار است. به همین جهت تعداد زیادی از الگوریتم‌های جستجو با فلسفه متفاوت و دامنه استفاده متفاوت به‌وجود آمده‌اند.

در مقاله (Vartouni & Khanli, 2014) یک الگوریتم ژنتیک ترکیبی فازی اصلاح‌شده برای ایجاد این مدل زمان‌بندی پیشنهاد شده‌است. یک مطالعه تجربی از یک مجموعه ماشین‌آلات کشاورزی در استان آنبویی چین نشان داده که مدل‌ها و الگوریتم زمان‌بندی پیشنهادی در این مطالعه می‌تواند کارایی استفاده از مراکز منابع ماشین‌آلات کشاورزی را بهبود بخشد و هزینه‌های استفاده از ماشین‌آلات کشاورزی را کاهش دهد. فیکری و همکاران (Fekri, Amiri, Sajjad, & Golestaneh, 2016) به مطالعه مسئله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود چندحالتی و چندهدفه پرداخته‌اند. به‌عنوان یک روش حل، الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیرمسلط (NSGA2) (4) اتخاذ شده‌است. به‌منظور بهبود کیفیت راه‌حل، روش

کشاورزی محدود می‌باشد، باید در برنامه‌ریزی فعالیت‌ها و عملیات، پروژه طوری عمل شود که فعالیت‌ها در بهترین زمان و دسترسی به حداکثر منابع ممکن انجام پذیرند، می‌توان از روش‌های فرااکتشافی در علم کنترل پروژه استفاده کرد که عملکرد آن در زمان‌بندی پروژه با منابع محدود در خیلی از فعالیت‌ها و پروژه‌های صنعتی به اثبات رسیده است. در این مقاله برای حل مسئله طرح‌ریزی برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پروژه و همچنین تخصیص بهینه منابع از الگوریتم رقابت استعماری که جزو روش‌های فرااکتشافی در زمان‌بندی پروژه‌هاست استفاده می‌شود که کارایی آن در حل مسئله‌های زمان‌بندی پروژه با منابع محدود (RCPSP) توسط محققان مختلف در سراسر جهان به اثبات رسیده است. برای رسیدن به یک برنامه منسجم که بتواند اهداف پروژه را تامین کند، می‌توان از علم برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پروژه کمک گرفت. برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پروژه که مهم‌ترین بحث این مقاله است، زیر حوزه خاصی از طرح‌ریزی پروژه^۳ بوده که یکی از فرآیندهای اصلی مدیریت پروژه است. زمان‌بندی پروژه یکی از مهم‌ترین مسائل در زمینه مدیریت پروژه محسوب می‌شود. مساله زمان‌بندی پروژه شامل فعالیت‌ها، منابع، روابط پیش‌نیازی و معیارهایی برای ارزیابی کارایی می‌باشد. این مسئله در زمینه‌های مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از کاربردهای این مسئله، می‌توان به نقش گسترده آن در حوزه مهندسی سازه و توسعه نرم‌افزار اشاره کرد. امروزه از تکنیک‌های مدیریت پروژه علاوه بر طرح‌های مختلف صنعتی، نظامی و عمرانی در طرح‌های کشاورزی نیز استفاده کنند.

مدل‌های ابتدایی مدیریت پروژه، پروژه را با در نظر گرفتن منابع نامحدود حل می‌کردند، اما از آن‌جایی که این فرض در محیط‌های عملی غیرواقعی است، لذا تاثیر محدودیت منابع بر روی پروژه‌ها در نظر گرفته شد. در این مسئله که زمان‌بندی پروژه با منابع محدود نام دارد، فعالیت‌ها باید به‌گونه‌ای زمان‌بندی شوند که با توجه به محدودیت‌های روابط پیش‌نیازی و ظرفیت منابع، زمان حاصل از پروژه حداقل شود مدل واقعی‌تر این مسئله زمانی مطرح می‌شود که چند حالت اجرای مختلف برای هر یک از فعالیت‌ها تعریف شود. در این صورت مسئله زمان‌بندی مشخص می‌کند که حالت اجرا انتخاب و هر فعالیت در چه زمانی آغاز شود تا تعدادی از اهداف از پیش‌تعریف‌شده محقق شوند. آمارهایی از هزینه‌ها و اثرات به‌موقع نبودن با پژوهش‌های مزرعه‌ای به‌دست آمده‌اند. طبق این پژوهش‌ها تاخیر در عملیات‌های کشاورزی نه تنها منجر به کاهش عملکرد محصول می‌شود، بلکه بر کیفیت محصول نیز تاثیر دارد و این اثر در محصولات مختلف و ارقام مختلف محصولات متفاوت است.

- 1- Resource Constrained Project Scheduling Problem
- 2- Project Scheduling
- 3- Project Planning

4- Non dominated sorting genetic algorithm

استعماری، کارایی را به‌صورت چشمگیری افزایش داده‌است. کارایی قابل‌رقابت با الگوریتم‌های شناخته‌شده از دیگر دلایل انتخاب این روش می‌باشد.

هدف از انجام پژوهش حاضر، بررسی هم‌زمان دو هدف اصلی شامل: ۱- کاهش زمان انجام پروژه و ۲- کاهش هزینه‌های انجام پروژه با استفاده از الگوریتم فراابتکاری رقابت استعماری می‌باشد. در این مقاله به‌عنوان نوآوری به بررسی دو هدف به‌صورت هم‌زمان در کنار یکدیگر پرداخته خواهد شد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، زمان‌بندی و مدل‌سازی تخصیص منابع برای پروژه‌های مکانیزاسیون کشاورزی در کشت و صنعت مغان انجام شده است. چرا که برنامه‌ریزی زمان قبل از انجام پروژه و تخصیص بهینه منابع به فعالیت‌های آن تأثیر به‌سزایی در به‌موقع‌بودن کار کشاورزی و کاهش هزینه تولید و در نهایت افزایش درآمد واحد کشاورزی دارد.

دشت حاصل‌خیز مغان که دارای مساحت تقریبی ۳۵۰ هزار هکتار می‌باشد در غرب دریای خزر و در شمالی‌ترین بخش از کشور واقع شده است. رودخانه ارس که از بخش شمالی آن عبور می‌کند خط مرزی کشورهای جمهوری اسلامی ایران و جمهوری آذربایجان را تشکیل می‌دهد.

این دشت در ۳۹/۲۰-۳۹/۴۲ درجه شمالی و ۴۸-۴۷/۳۰ درجه نصف‌النهار شرقی واقع شده است در پاره‌ای از مقاطع زمان دارای زمستان‌های نسبتاً سرد است. میانگین گرما در دشت ۲۰/۷ و میانگین سرما ۳/۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. حداکثر حرارت در ماه‌های تیر و مرداد به‌ندرت به ۴۰ درجه سانتی‌گراد رسیده و حداقل آن در آذرماه و دی ماه معمولاً به ۸ درجه سانتی‌گراد زیر صفر می‌رسد.

پس‌انتشار برای پس‌پردازش و همچنین برای تولید جدید جمعیت پیشنهاد شده‌است. عملکرد الگوریتم و زمان‌های CPU گزارش شده است. علاوه بر این، روش جدیدی برای تولید نمونه‌های تست داده‌های کشاورزی چند پروژه‌ای پیشنهاد شده است و عملکرد الگوریتم از طریق نمونه‌های آزمایشی تولیدشده از طریق این روش تولید داده ارزیابی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که روش پس‌انتشار برای بهبود کیفیت راه‌حل موفقیت‌آمیز است (Fekri et al., 2016). فکری و همکاران (Fekri, Amiri, Sajjad, & Golestaneh, 2016) یک الگوریتم تکاملی چندهدفه به نام الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب (NSGA-II) را برای حل مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع (RCPSP) با حالت‌های عملکردی چندگانه و دو هدف برای به حداقل رساندن ساخت پروژه و استفاده از منابع پیشنهاد کرده است. راه‌حل با یک لیست فعالیت امکان‌پذیر اولویت و یک تخصیص حالت نشان داده می‌شود. یک مثال کشاورزی با دو هدف برای آزمایش عملکرد الگوریتم پیشنهادی استفاده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که NSGA-II برای حل RCPSP چندهدفه کارآمد است و تقریب‌های چندگانه راه‌حل‌های بهینه پارتو را در یک اجرای الگوریتم پیدا می‌کند (Wang, Lin, & Li, 2005).

در این مقاله ابتدا روش‌های حل مسئله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود مورد بررسی قرار گرفته و سپس به معرفی روش پیشنهادی پرداخته می‌شود. الگوریتم مورد استفاده روش رقابت استعماری نام دارد که سعی دارد فضای گسترده‌تری از جواب را برای مسئله مورد بررسی قرار داده و میانگین انحراف از جواب بهینه را برای آن به حداقل برساند برای بررسی میزان موفقیت روش پیشنهادی الگوریتم مذکور با الگوریتم‌های موجود که از جمله الگوریتم‌های مهم فرااکتشافی هستند مقایسه شده است. در این تحقیق مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع با استفاده از یکی از الگوریتم‌های فرامکاشفه‌ای حل شده است. الگوریتم رقابت

جدول ۱- طبقه‌بندی زمین و منطقه‌ای بر اساس طرح کشت و صنعت مغان

Table 1- Land and regional classification based on the Moghan Agriculture and Industry plan

طبقه‌بندی زمین Land classification	مساحت تقریبی (هکتار) Approximate area (hectares)	مساحت تقریبی (درصد) Approximate area (percentage)
خوب قابل آبیاری Good, irrigable	3100	4.13
بالاتر از حد متوسط خوب قابل آبیاری Above average, irrigable	12600	17.5
نسبتاً خوب و قابل آبیاری Fairly good, irrigable	37600	52.22
غیرقابل آبیاری مگر در شرایط ویژه Not irrigable except under special conditions	1200	1.66
در حال حاضر مناسب آبیاری نیست Currently not suitable for irrigation	12900	17.92
غیرقابل آبیاری Not irrigable	4600	6.39

شرکت داشته باشد. جدول، این محدوده زمانی را برای انجام عملیات کشاورزی در منطقه مغان بیان می‌کند.

کلیه عملیات زراعی برای تولید دو محصول زراعی اشاره شده به صورت مکانیزه در جدول ۲ اشاره شده است. این عملیات پایه در یک محدوده خاص زمانی انجام می‌گیرد تا حداکثر سود را برای

جدول ۲- محدوده زمانی انجام عملیات زراعی در منطقه مغان برای محصولات مختلف

Table 2- Time range of agricultural operations in Moghan region for different crops

محصول Product	عملیات کشاورزی Agricultural operations		
	آماده‌سازی زمین Land preparation	کاشت Planting	برداشت Harvest
	گندم و کلزا خوراکی و بذری Edible rapeseed and wheat and seeds	۱۵ شهریور تا ۲۰ آذر September 15 to December 20	۲۰ آبان تا ۱۰ دی November 20 to January 10

$$\text{subject to } \sum_{t=EF_j}^{LF_j} x_{jt} = 1 \text{ for } j = 0, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{t=EF_i}^{LF_j} tx_{it} \leq \sum_{t=EF_j}^{LF_j} tx_{jt} - d_j \text{ for all } (A_i, A_j)P \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{q=\max\{t, EF_j\}}^{\min\{t+d_j-1\}LF_j} r_{jk} x_{jq} \leq R_k \quad (4)$$

$$\text{for } k = 1, \dots, R \text{ and } t = 1, \dots, H, x_{jt} \in \{0,1\} \text{ for } 0, \dots, n+1; t = EF_j, \dots, LF_j \quad (5)$$

$$\sum_{t=EF_i}^{LF_j} cx_{it} \leq \sum_{t=EF_j}^{LF_j} cx_{jt} - d_j \text{ for all } (A_i, A_j)P \quad (6)$$

مدل نهایی ارائه شده به صورت یک مدل برنامه‌ریزی خطی آمیخته با اعداد صحیح است که مسئله به دلیل پیچیدگی بالا جزو مسائل NP Complete قرار می‌گیرد و حل آن در یک زمان چندجمله‌ای کوتاه امکان‌پذیر نیست (Hussain, Mohd Salleh, Cheng, & Shi, 2019). در واقع چون مسئله پیشنهادی شامل مسئله زمان‌بندی پروژه است و هر یک از مسائل زمان‌بندی پروژه به طور جداگانه جزو مسائل NP Complete هستند؛ بنابراین مسئله پیشنهادی این پژوهش نیز جزو مسائل NP Complete هستند (Küçüksayacıgil, 2014). حل این دسته از مسائل با ابعاد کوچک با روش‌های دقیق منطقی است؛ اما حل آن‌ها با ابعاد متوسط و بزرگ توسط روش‌های دقیق به علت زمان حل بسیار زیاد توجیه‌پذیر نیست؛ بنابراین استفاده از روش‌های حل ابتکاری و فراابتکاری برای حل و توجیه مسئله ضروری هستند (Mirjalili, 2019). از طرفی برای اعتبارسنجی مدل ریاضی ارائه شده پس از تولید مسائل تصادفی نمونه با ابعاد کوچک از روش دقیق استفاده می‌شود. در این پژوهش

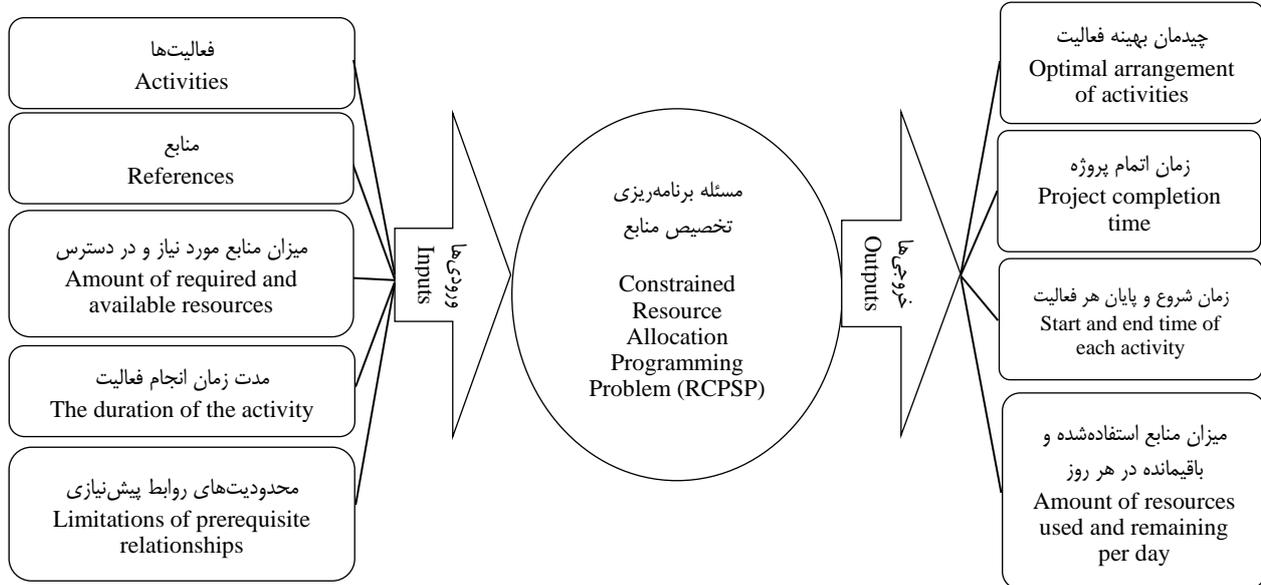
مسائل RCPSP

به طور کلی هدف اصلی در حل مسائل RCPSP کمینه‌کردن زمان انجام پروژه است. اما در کنار این، اهداف دیگری نیز از جمله کاهش هزینه و افزایش سوددهی، کارایی منابع و افزایش کیفیت می‌تواند مد نظر باشد. این اهداف همیشه باهم در تضاد هستند. بدیهی است که هرچه اهداف در مسئله افزایش یابد، تضاد بین آن‌ها نیز بیشتر می‌شود. بنابراین برای تعیین ارتباط بین اهداف مسئله و تصمیم‌گیری در مورد آن‌ها نیاز به تعریف یک مکانیزم است مساله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع (RCPSP) جزء مسائل غیرچندجمله‌ای سخت (NP-Hard) است که برای حل آن، روش‌های ابتکاری و فراابتکاری در مقایسه با راه‌حل‌های دقیق، کارایی بیشتری دارند. در حل مسئله RCPSP، مجموعه فعالیت‌ها، انواع منابع، مدت زمان انجام فعالیت‌ها، میزان منابع مورد نیاز و در دسترس و محدودیت‌های روابط اولیاتی به عنوان ورودی وارد مسئله می‌شوند و خروجی مسئله یک زمان‌بندی امکان‌پذیر برای فعالیت‌ها می‌باشد که محدودیت‌های مربوط به روابط اولیاتی و منابع را برطرف کرده و اهداف تعیین شده را تامین می‌کند (Abdolshah, 2014).

رابطه (۱) هدف مسئله یعنی کاهش زمان تکمیل پروژه را بیان می‌کند. محدودیت (۲) اطمینان حاصل می‌کنند که هر فعالیت دقیقاً یک بار کامل اجرا می‌شود. محدودیت (۳) به محدودیت روابط پیش‌نیازی بین فعالیت‌ها اشاره می‌کند. مقدار در دسترس هر منبع نیز در هر بازه زمانی با محدودیت (۴) مشخص می‌شود. محدودیت (۵) بیان‌کننده متغیرهای تصمیم‌گیری باینری است.

$$\text{Minimize } \sum_{t=EF_{n+1}}^{LF_{n+1}} tx_{n+1,t} + cx_{n+1,t} \quad (1)$$

با توجه به تعداد زیاد محصولات تولیدی در کشت و صنعت مغان تنها دو محصول غالب تولیدی گندم و کلزا مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱- ورودی‌ها و خروجی‌های مسئله RCPSp
Fig.1. Inputs and outputs of the RCPSP problem

جایگشتی برای این مسئله جواب تا زمانی که در جایگشت به صورت کامل رعایت شود جواب همیشه امکان‌پذیر است و هیچ‌یک از عملگرها کامل بودن جایگشت را از بین نمی‌برند. تابع هزینه هر یک از کشورها محاسبه می‌شود و به تعداد امپراطوری، از بهترین اعضای این جمعیت که دارای کمترین مقدار تابع هزینه هستند، به‌عنوان استعمارگر انتخاب می‌شوند. جمعیت باقیمانده به‌عنوان کشورهای مستعمره هستند که هر یک به یک امپراطوری تعلق دارند. برای تقسیم مستعمرات اولیه در میان استعمارگرها از «انتخاب چرخه رولت» استفاده شده است. برای انجام این کار با داشتن هزینه همه استعمارگرها، هزینه آن‌ها بر اساس رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

$$C_j = \max \{ r_j C_K + q_{kj} S_{kj} \} \quad (7)$$

روش چرخه رولت یکی از معروفترین روش‌های انتخابی است. در این روش ابتدا تمام مقادیر احتمال انتخاب در کنار یکدیگر چیده‌شده و سپس یک عدد تصادفی در بازه صفر تا یک تولید می‌شود. انتخاب این بازه به این دلیل است که مجموع مقادیر احتمال انتخاب، همیشه برابر با یک خواهد بود. از مقایسه عدد تصادفی با بازه چرخه رولت، شماره استعمارگر متناظر با عدد تصادفی مشخص می‌شود. از آن‌جا که مقدار احتمال هر استعمارگر، بخشی از فضای چرخ رولت را به خود اختصاص داده است، احتمال انتخاب استعمارگرهای شایسته‌تر (دارای تابع هزینه‌ی کمتر) بیشتر خواهد بود. با این روش همه کشورهای مستعمره به استعمارگرها تخصیص داده می‌شوند و با

الگوریتم رقابت استعماری (ICA)^۱

الگوریتم رقابت استعماری ماهیتی پیوسته دارد و این خاصیت آن استفاده از آن در مسائل گسسته را دشوار می‌کند و محقق مجبور خواهد شد از کلیدهای تصادفی برای تبدیل اعداد گسسته به ماهیت پیوسته استفاده کند که این امر تا حد زیادی از کارایی الگوریتم رقابت استعماری خواهد کاست. در این تحقیق با اصلاح ماهیت الگوریتم رقابت استعماری گونه‌ای خاص از آن به‌منظور حل مسائل گسسته جایگشتی (همچون مسئله RCPSp) ایجاد شده است. از آن‌جا که مسئله مورد بررسی از جمله مسائل NP-hard است، برای حل آن دو الگوریتم رقابت استعماری توسعه داده می‌شود. الگوریتم رقابت استعماری یک الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر جمعیت است. این الگوریتم نخستین بار توسط آتش‌پز و لوکاس (۲۰۰۷) ارائه شد. معمولاً الگوریتم‌های فراابتکاری از یک پدیده طبیعی الهام می‌گیرند. این الگوریتم علاوه بر توجه به تکامل زیستی انسان و سایر موجودات، به تکامل اجتماعی و تاریخی او به‌عنوان پیچیده‌ترین و موفق‌ترین حالت تکامل، توجه می‌کند.

مرحله راه‌اندازی اولیه و شرایط توقف

نخستین مرحله الگوریتم شامل نحوه نمایش جواب، تولید جمعیت اولیه و شکل‌دهی امپراطوری‌های اولیه است. در روش نمایش

1- Imperialist Competitive Algorithm

رقابتی در میان کلیه امپراطوری‌ها ایجاد می‌شود. مستعمرات یادشده لزوماً توسط قوی‌ترین امپراطوری تصاحب نخواهد شد. بلکه امپراطوری‌های قوی‌تر احتمال تصاحب بیشتری دارند. احتمال تصاحب مستعمره رقابت توسط هر امپراطوری از طریق رابطه (۹) محاسبه می‌شود:

$$P_i = \frac{\exp\{-\alpha \cdot [\text{imp}_j \cdot \text{cost} / \max(\text{Imp}_j \cdot \text{cost})]\}}{\sum_{j \in \text{Imp}} \exp\{-\alpha \cdot [\text{Imp}_j \cdot \text{Cost} / \max(\text{Imp}_j \cdot \text{cost})]\}} \quad (9)$$

طبق تحقیقات انجام‌شده الگوریتم رقابت استعماری نسبت به الگوریتم ازدحام ذرات و ژنتیک همگرایی بهتری برای رسیدن به جواب مسئله را دارد. در تشریح مراحل این الگوریتم برای به‌دست‌آوردن جواب بهینه یک یا چند مستعمره از ضعیف‌ترین امپراتوری انتخاب‌شده و به امپراتوری‌های قوی‌تر تزریق می‌شود و سپس امپراتوری ضعیف حذف می‌شود. این عمل به جواب‌های ضعیف شانس مجدد می‌دهد و در مراحل بعدی احتمال بقا و قدرتمند شدن آن را فراهم می‌کند این‌گونه کارکرد در ژنتیک و ازدحام ذرات وجود ندارد. علاوه بر آن الگوریتم رقابت استعماری علاوه بر پیدا کردن جواب‌های سراسری از مسئله امکان بهبود این جواب‌ها به‌صورت محلی را نیز دارا هست. این ویژگی‌ها سبب شده تا الگوریتم رقابت استعماری نسبت به الگوریتم‌های تکاملی دیگر عملکرد بهتری از خود نشان دهد. از ویژگی‌های این الگوریتم نو بودن ایده، مبتنی بر رفتار اجتماعی انسان که هوشمندانه‌تر از رفتارهای بیولوژیکی است، سرعت همگرایی بالا، توانایی بهینه‌سازی توابعی با تعداد متغیرهای بسیار زیاد، سرعت یافتن جواب بهینه، توانایی بهینه‌سازی خوب را می‌توان بیان کرد (Xing & Gao, 2014). الگوریتم محاسبه جواب ابتدایی الگوریتم رقابت استعماری در این مقاله بر مبنای محدودیت‌های پیش‌نیازی بین فعالیت بنا نهاده شده‌است.

الگوریتم ژنتیک (GA)

الگوریتم‌های ژنتیک نوعی الگوریتم بهینه‌سازی هستند که می‌توانند برای حل مسائل زمان‌بندی محدود منابع (RCSP) استفاده شوند. ایده اصلی پشت الگوریتم‌های ژنتیک تقلید از فرآیند انتخاب طبیعی و تکامل برای یافتن راه‌حل بهینه است. در مورد RCSP‌ها، الگوریتم‌های ژنتیک با ایجاد جمعیتی از راه‌حل‌های بالقوه کار می‌کنند که هر کدام به‌صورت رشته‌ای از ژن‌ها نمایش داده می‌شوند. این ژن‌ها تصمیم‌های زمان‌بندی متفاوتی را نشان می‌دهند، مانند این‌که کدام وظایف در چه زمان‌هایی و بر اساس کدام منابع باید برنامه‌ریزی شود. سپس الگوریتم ژنتیک هر راه‌حل بالقوه را بر اساس تناسب آن، یا این‌که چقدر محدودیت‌ها و اهداف RCSP را برآورده می‌کند،

داشتن حالت اولیه تمام امپراطوری‌ها، الگوریتم رقابت استعماری شروع می‌شود. روند تکامل در یک حلقه قرار دارد که تا برآورده‌شدن شرط توقف، ادامه می‌یابد.

عملگر جذب و انقلاب

در هر امپراطوری، کشور استعمارگر به‌منظور افزایش نفوذ خود سعی می‌کند تعداد مستعمره‌هایش را افزایش دهد؛ بنابراین در هر امپراطوری، کشورهای مستعمره به سمت استعمارگر مربوطه حرکت می‌کنند.

بروز انقلاب، تغییرات ناگهانی در ویژگی‌های اجتماعی سیاسی یک کشور ایجاد می‌کند. در الگوریتم رقابت استعماری، انقلاب با جابه‌جایی تصادفی یک کشور مستعمره به یک موقعیت تصادفی جدید مدل‌سازی می‌شود. انقلاب از دیدگاه الگوریتمی باعث می‌شود که حرکت تکاملی از گیرکردن در دام بهینه موضعی نجات یابد که در بعضی موارد باعث بهبود موقعیت یک کشور می‌شود و آن را به محدودی‌های که وضعیت بهتری دارد، انتقال می‌دهد. در الگوریتم پیشنهادشده، در هر امپراطوری هر یک از مستعمره‌ها با احتمال مشخص شده‌ای، انقلاب خواهند کرد. در این عملگر، دو کار به تصادف انتخاب شده و جای دو کار با هم جابه‌جا می‌شود. در حین حرکت مستعمرات به سمت کشور استعمارگر و اجرای سیاست انقلاب، ممکن است بعضی از این مستعمرات به موقعیت بهتری نسبت به کشور استعمارگر دست یابند. در این حالت استعمارگر و مستعمره جای خود را با یکدیگر عوض می‌کنند و الگوریتم با کشور استعمارگر در موقعیت جدید ادامه خواهد یافت. در ادامه، این کشور استعمارگر جدید است که شروع به اعمال سیاست همگون‌سازی بر مستعمرات خود می‌کند.

قدرت امپراطوری، رقابت استعماری و حذف

امپراطوری‌های ضعیف

قدرت کشور استعمارگر به اضافه درصدی از قدرت کل مستعمرات آن، قدرت کل یک امپراطوری است؛ بنابراین هزینه کل یک امپراطوری از طریق رابطه (۸) محاسبه می‌شود:

$$\text{emp}_j \cdot \text{Totalcost} = \text{emp}_j \cdot \text{Imp} \cdot \text{Cost} + \omega \times \frac{1}{n_{\text{col}}} \times \sum_{i=1}^{n_{\text{col}}} \text{emp}_j \cdot \text{Col}_i \cdot \text{cost} \quad (8)$$

where $0 < \omega < 1$.

هر امپراطوری که نتواند بر قدرت خود بیفزاید و قدرت رقابت خود از دست بدهد در جریان رقابت‌های استعمارگری حذف خواهد شد. برای مدل کردن این واقعیت فرض می‌شود که امپراطوری در حال حذف، ضعیف‌ترین امپراطوری موجود است؛ بنابراین در هر تکرار از الگوریتم یک یا تعدادی از ضعیف‌ترین مستعمرات، ضعیف‌ترین امپراطوری را برداشته و برای تصاحب این مستعمرات

می‌کند و در عین حال، طول عمر یا سایر توابع هدف را به حداقل می‌رساند.

الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی (BBO)

الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی (BBO) یک الگوریتم بهینه‌سازی الهام‌گرفته از طبیعت است که فرآیندهای جغرافیایی زیستی مهاجرت و تکامل گونه‌ها را تقلید می‌کند. BBO برای حل مسائل مختلف بهینه‌سازی، از جمله مسائل زمان‌بندی محدود منابع (RCSP) استفاده شده است. RCSP یک مشکل پیچیده است که شامل تخصیص منابع به وظایف و در عین حال ارضای محدودیت‌های مختلف مانند زمان، هزینه و در دسترس بودن منابع است. از BBO می‌توان برای حل RCSP با نمایش مسئله به‌عنوان مجموعه‌ای از متغیرهای تصمیم‌گیری و محدودیت‌ها استفاده کرد. الگوریتم BBO با مقداردهی اولیه جمعیتی از راه‌حل‌های کاندید شروع می‌شود که به‌عنوان بردار متغیرهای تصمیم نشان داده می‌شوند. سپس این راه‌حل‌ها بر اساس تناسب آن‌ها ارزیابی می‌شوند، که مشخص می‌شود تا چه حد محدودیت‌های مسئله RCSP را برآورده می‌کنند. سپس الگوریتم BBO از عملگرهای مهاجرت و جهش برای تولید راه‌حل‌های کاندید جدید از جمعیت موجود استفاده می‌کند. مهاجرت شامل تبادل اطلاعات بین راه‌حل‌های مختلف در جمعیت است، در حالی که جهش شامل تغییر تصادفی برخی از متغیرهای تصمیم در یک راه‌حل است. سپس راه‌حل‌های نامزد جدید برای تناسب اندام ارزیابی می‌شوند و بهترین‌ها برای تشکیل نسل بعدی راه‌حل‌ها انتخاب می‌شوند. این روند تا زمانی ادامه می‌یابد که یک راه‌حل رضایت‌بخش پیدا شود یا به حداکثر تعداد تکرار برسد. به‌طور کلی، BBO با استفاده از فرآیندهای جغرافیایی زیستی برای ایجاد راه‌حل‌های با کیفیت بالا که محدودیت‌های پیچیده را برآورده می‌کند، یک رویکرد مؤثر برای حل مشکلات RCSP ارائه می‌کند.

نتایج و بحث

در این پژوهش با توجه به تعداد زیاد محصولات تولیدی در کشت و صنعت مغان، دو محصول غالب تولیدی یعنی گندم و کلزا مورد بررسی قرار گرفته‌است، لذا عملیات مذکور روی این محصولات انجام گرفته است. در اولین قدم از زمان‌بندی پروژه نمودار WBS^۲ به روش RWBS برای پروژه مکانیزاسیون کشاورزی هر دو محصول فوق‌الذکر تهیه گردیده است. ابتدا نمودار PBS^۳ برای محصولات که در شکل ۳ مشخص شده است و سپس نمودار FBS^۴ مطابق شکل ۴

ارزیابی می‌کند. سپس مناسب‌ترین محلول‌ها برای تولید مثل انتخاب می‌شوند، جایی که ژن‌های آن‌ها ترکیب می‌شوند و برای ایجاد راه‌حل‌های بالقوه جدید جهش می‌یابند. این فرآیند در چندین نسل تکرار می‌شود و مناسب‌ترین راه‌حل‌ها از هر نسل برای تولید مثل انتخاب می‌شوند. با گذشت زمان، این فرآیند بر روی یک راه‌حل بهینه که تمام محدودیت‌ها و اهداف RCSP را برآورده می‌کند، همگرا می‌شود. به‌طور خلاصه، الگوریتم‌های ژنتیک RCSP را با استفاده از انتخاب طبیعی و تکامل برای ایجاد و اصلاح جمعیتی از راه‌حل‌های بالقوه تا زمانی که یک راه‌حل بهینه پیدا شود، حل می‌کنند.

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)^۱

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) یک تکنیک بهینه‌سازی فراابتکاری است که می‌تواند برای حل مسائل مختلف بهینه‌سازی از جمله مسئله زمان‌بندی محدود منابع (RCSP) استفاده شود. RCSP یک مشکل شناخته‌شده در تحقیقات عملیاتی است که شامل زمان‌بندی وظایف مشروط به محدودیت منابع است. در PSO، جمعیتی از ذرات در فضای جستجو برای یافتن راه‌حل بهینه حرکت می‌کنند. هر ذره نشان‌دهنده یک محلول بالقوه است و یک بردار موقعیت و سرعت دارد. بردار موقعیت نشان‌دهنده راه‌حل فعلی است، در حالی که بردار سرعت نشان‌دهنده جهت و بزرگی حرکت در فضای جستجو است. برای اعمال PSO برای حل RCSP، باید تابع تناسب را تعریف کنیم که راه‌حل هر ذره را ارزیابی می‌کند. تابع تناسب باید هم تابع هدف (به‌عنوان مثال، به حداقل رساندن طول عمر) و هم محدودیت‌های منابع را در نظر بگیرد. تابع هدف میزان عملکرد یک برنامه زمانی خاص را از نظر زمان یا هزینه اندازه‌گیری می‌کند، در حالی که محدودیت‌های منبع تضمین می‌کند که هر وظیفه به یک منبع در دسترس اختصاص داده شده است. در طول هر تکرار PSO، هر ذره موقعیت و سرعت خود را بر اساس بهترین راه‌حل خود تاکنون (بهترین راه‌حل شخصی) و بهترین راه‌حل یافت‌شده توسط هر ذره در ازدحام (بهترین راه‌حل جهانی) به‌روز می‌کند. قانون به‌روزرسانی برای بردارهای موقعیت و سرعت به پارامترهای مختلفی مانند وزن اینرسی، مؤلفه شناختی و مؤلفه اجتماعی بستگی دارد. الگوریتم PSO تا رسیدن به یک معیار توقف مانند رسیدن به حداکثر تعداد تکرار یا دستیابی به یک مقدار تناسب رضایت‌بخش ادامه می‌یابد. در این مرحله، یک زمان‌بندی بهینه به‌دست آمد که تمام محدودیت‌های منابع را برآورده می‌کند و در عین حال مقدار makepan یا سایر توابع هدف را به حداقل می‌رساند. به‌طور خلاصه، PSO یک تکنیک بهینه‌سازی مؤثر برای حل RCSP با جستجوی یک زمان‌بندی بهینه است که تمام محدودیت‌های منابع را برآورده

2- Work Breakdown Structure

3- Product Breakdown Structure

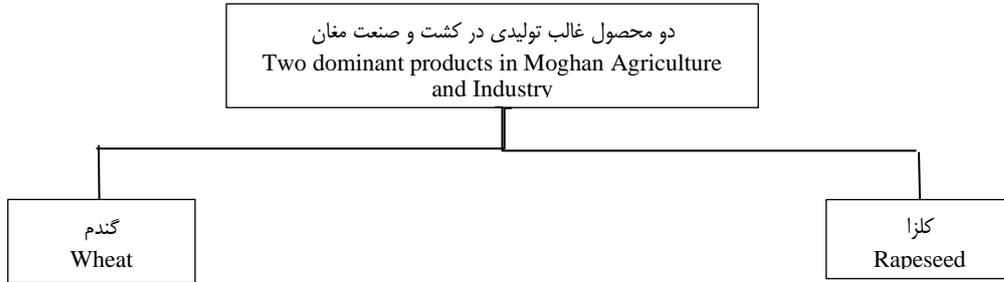
4- Structure Breakdown Functional

1- Particle swarm optimization

فعالیت‌ها براساس توزیع سه پارامتری بتا که در برآورد فعالیت‌ها در شبکه‌های PERT استفاده می‌شود، انجام می‌گیرد. جداول ۳ و ۴ نشان‌دهنده‌ی زمان انجام فعالیت‌ها و همچنین اطلاعات مربوط به منابع استفاده‌شده برای هر فعالیت به‌صورت جداگانه می‌باشد.

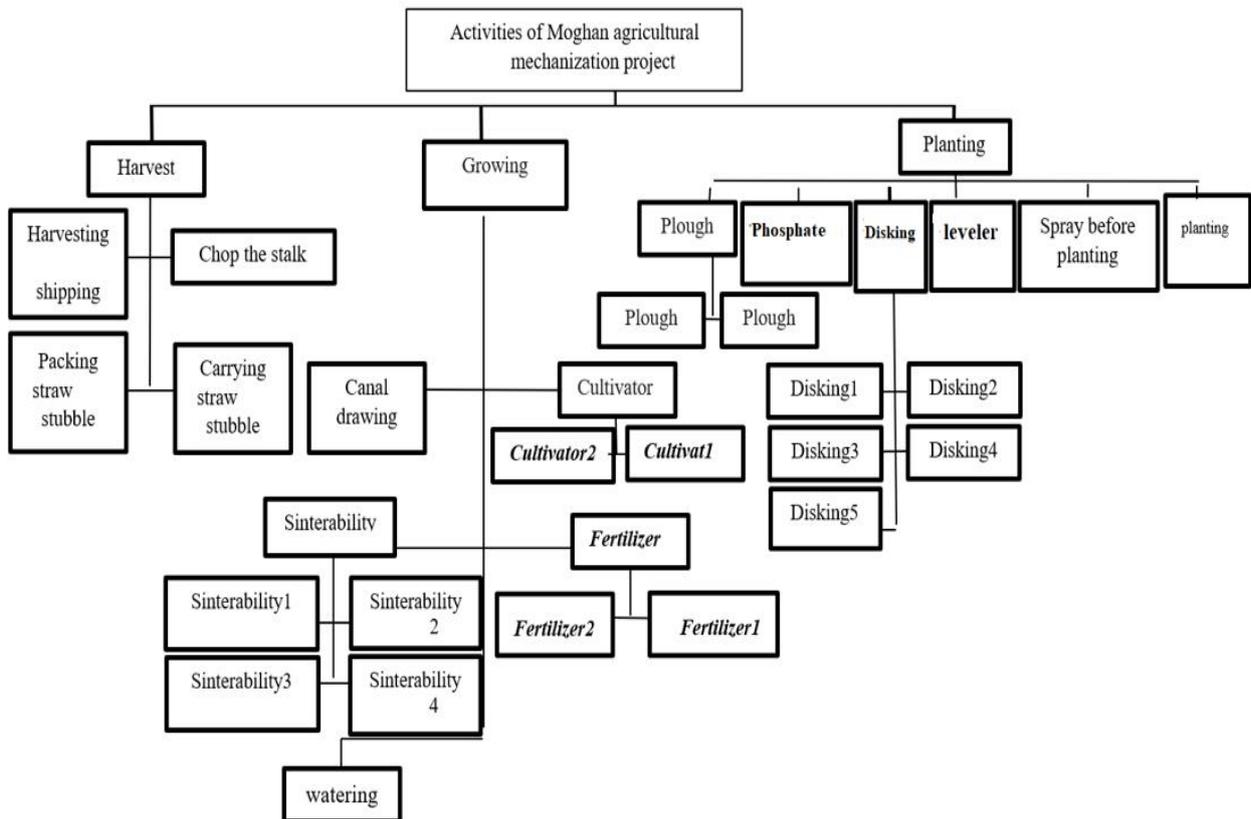
نشان‌دهنده‌ی فعالیت‌های مکانیزاسیون کشاورزی است.

برآورد زمان انجام فعالیت‌ها و اطلاعات مربوط به منابع تخمین زمان انجام فعالیت‌ها با استناد به تحقیقات انجام‌شده توسط (Hourzadeh, 2013) صورت گرفته است. این پیش‌بینی زمان



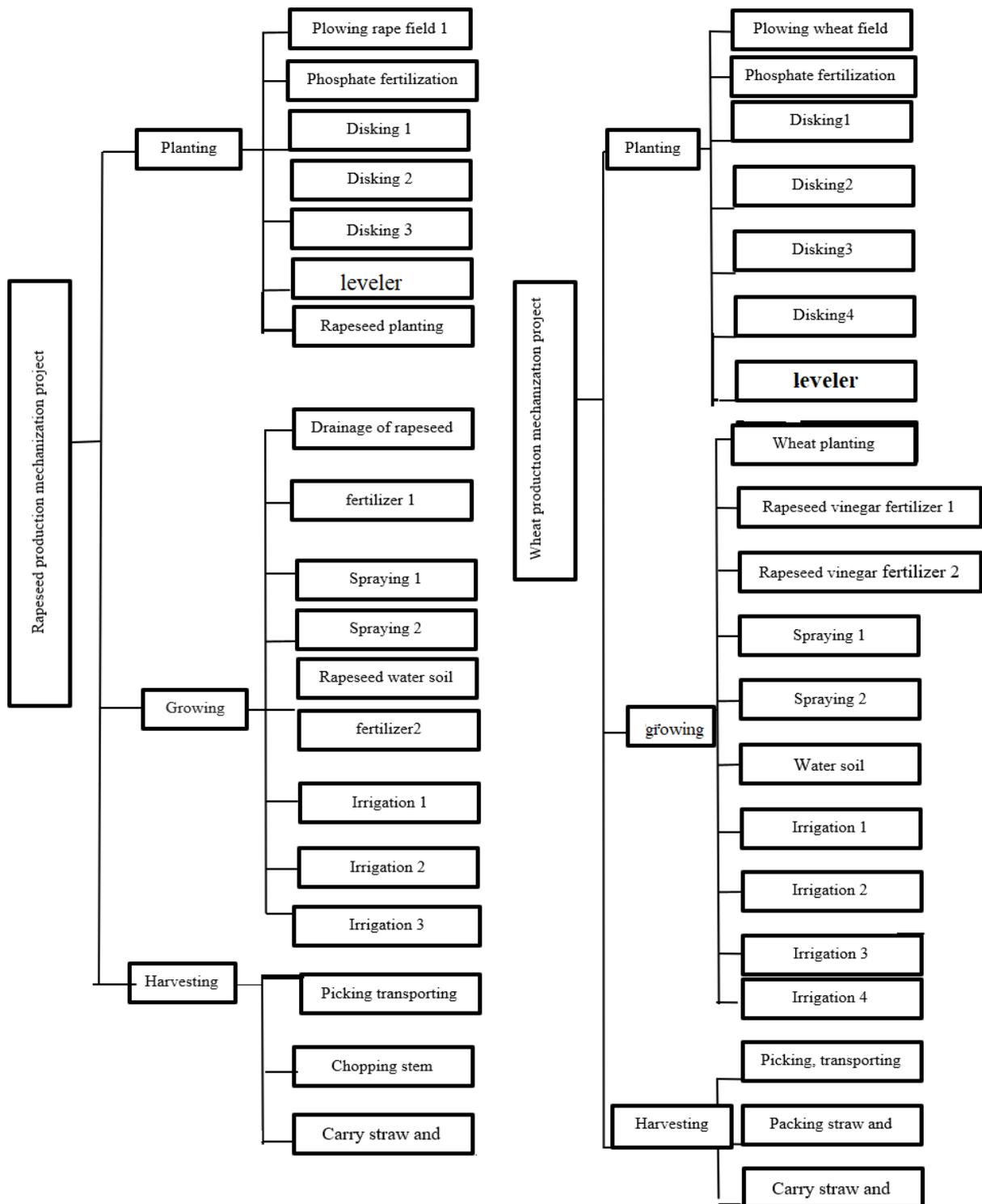
شکل ۲- نمودار PBS ساختار شکست کار دو محصول گندم و کانولا تولیدی در کشت و صنعت مغان

Fig.2. PBS diagram of the work breakdown structure of wheat and rapeseed produced by Moghan Agriculture and Industry



شکل ۳- نمودار FBS ساختار شکست کار فعالیت‌های پروژه

Fig.3. FBS diagram of the work breakdown structure of the project activities



شکل ۴- نمودار نهایی WBS برای دو محصول کلزا و گندم
 Fig.4. The final WBS chart for the two products rapeseed and wheat

جدول ۳- مدت زمان انجام، پیش‌نیازی و منابع مورد نیاز برای هر فعالیت برای محصول کلزا
Table 3- Duration, prerequisites and required resources for each activity for the rapeseed crop

فعالیت‌های پروژه مکانیزاسیون کلزا						
Rapeseed mechanization project activities						
فعالیت Activity	کد فعالیت Activity code	زمان انجام فعالیت Activity time (days)	پیش‌نیاز فعالیت Activity prerequisite	منبع ماشین‌آلات Source of machinery	منبع نیروی انسانی Human resource	منبع مالی (میلیون ریال) Financial source (million Rials)
شروع Start	R01	0	ندارد None	0	0	0
شخم‌زنی زمین Plowing field	R02	16	R01	47	47	532
کوددهی فسفات‌ه زمین Phosphate fertilization	R04	2	R05&06	25	50	358
دیسک‌زنی زمین ۱ field disking 1	R05	4	R02	48	48	255
دیسک‌زنی زمین ۲ field disking 2	R06	4	R02	48	48	222
دیسک‌زنی زمین ۳ field disking 3	R07	4	R04	48	48	222
لولر زمین field leveling	R09	5	R07	64	64	251
کاشت کلزا Rapeseed planting	R12	7	R09	34	68	172
نهرکشی زمین Drainage of land	R13	4	R12	12	12	78
کود سرک ۱ fertilizer 1	R14	3	R23	17	34	1303
کود سرک کلزا ۲ fertilizer 2	R15	3	R24	17	34	2528
سم‌پاشی ۱ Spraying 1	R16	3	R23	23	46	3298
سم‌پاشی ۲ Spraying 2	R17	4	R24	17	34	657
خاک آب water soil	R22	5	R13	0	90	981
آبیاری ۱ Irrigation 1	R23	5	R22	0	90	885
آبیاری ۲ Irrigation 2	R24	5	R14&16	0	90	750
آبیاری ۳ Irrigation 3	R25	5	R15&17	0	90	750
برداشت و حمل کلزا Picking and transporting rapeseed	R29	9	R25	34	68	5310
ساقه خردکنی کلزا Chopping rapeseed stalks	R30	3	R29	16	16	123
پایان End	R33	0	R30	0	0	0
حداکثر منابع در روز Maximum resources per day				64	88	2800

جدول ۴- مدت زمان انجام، پیش‌نیازی و منابع مورد نیاز برای هر فعالیت برای محصول گندم

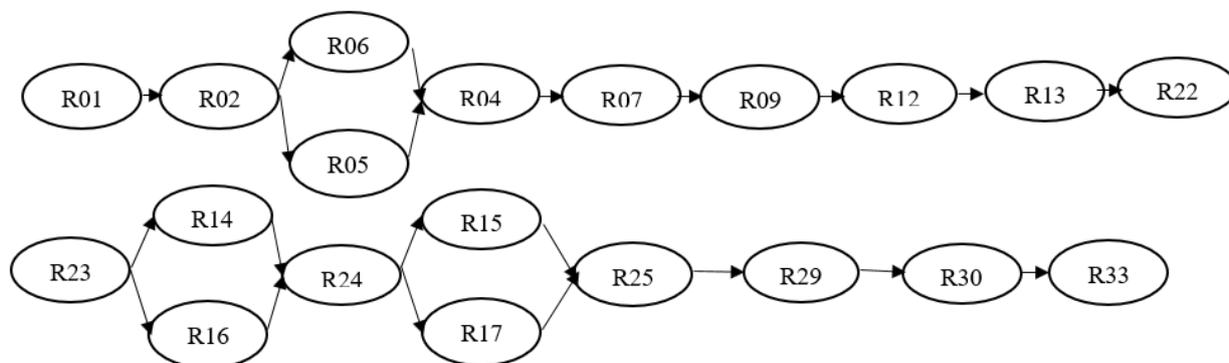
Table 4- Duration, prerequisites, and required resources for each activity for the rapeseed crop

فعالیت‌های پروژه مکانیزاسیون گندم						
Wheat mechanization project activities						
فعالیت Activity	کد فعالیت Activity code	زمان انجام فعالیت Activity time (days)	پیش‌نیاز فعالیت Activity prerequisite	منبع ماشین‌آلات Source of machinery	منبع نیروی انسانی Human resource	منبع مالی (میلیون ریال) Financial source (million Rials)
شروع Start	W01	0	ندارد None	0	0	0
شخم‌زنی زمین گندم Plowing field	W02	27	W01	62	62	1210
کوددهی فسفات Phosphate fertilization	W04	8	W05 & W06	14	42	6172
دیسک‌زنی زمین ۱ field disking 1	W05	11	W02	57	57	560
دیسک‌زنی زمین ۲ field disking 2	W06	10	W02	42	42	495
دیسک‌زنی زمین ۳ field disking 3	W07	10	W04	42	42	452
دیسک‌زنی زمین ۴ field disking 4	W08	14	W12	30	30	450
لولر زمین field leveling	W9	16	W07	44	44	550
کاشت گندم Wheat planting	W12	20	W09	26	52	383
نهرکشی زمین Drainage of land	W13	8	W08	12	12	158
کود سرک ۱ Fertilizer 1	W14	4	W23	28	56	2845
کود سرک ۲ Fertilizer 2	W15	5	W24	22	44	5537
سم‌پاشی ۱ Spraying 1	W16	7	W23	22	44	7221
سم‌پاشی ۲ Spraying 2	W17	10	W24	15	30	1417
خاک آب گندم Water soil	W22	12	W13	0	84	2065
آبیاری ۱ Irrigation 1	W23	8	W22	0	84	1867
آبیاری ۲ Irrigation 2	W24	8	W14 & W16	0	84	1578
آبیاری ۳ Irrigation 3	W25	8	W15 & W17	0	84	1578
آبیاری ۴ Irrigation 4	W26	8	W25	0	84	1578
برداشت و حمل گندم Harvesting and transporting wheat	W29	16	W26	42	84	9000
بسته‌بندی کاه و کلش گندم Packing straw and wheat stubble	W31	10	W29	5	10	370
حمل کاه و کلش گندم Carrying wheat straw and stubble	W32	5	W31	6	18	238
پایان End	W33	0	W32	0	0	0
حداکثر منابع در روز Maximum resources per day				61	84	5800

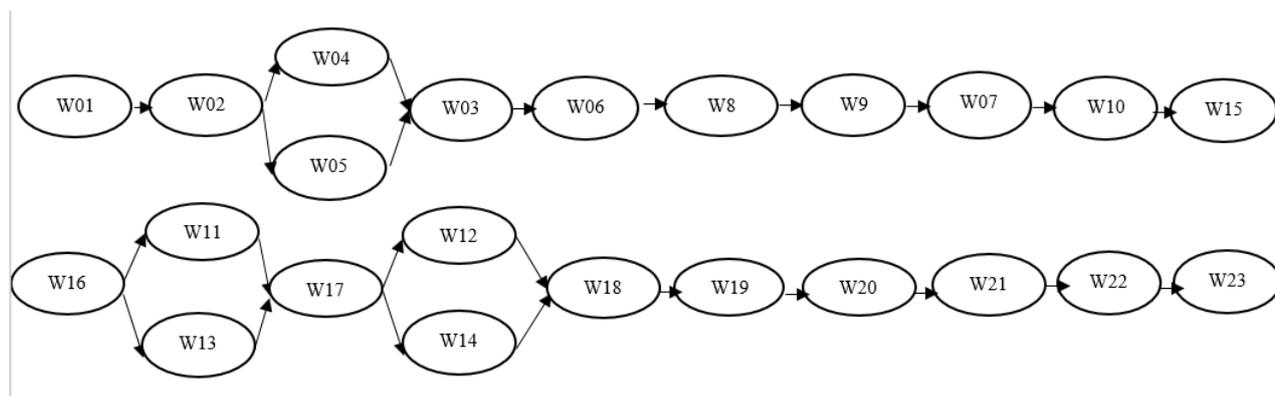
نمایش شبکه‌ای پروژه‌های مکانیزاسیون

بعد از مشخص شدن روابط وابستگی طبیعی و امکانی بین فعالیت‌های پروژه مکانیزاسیون دو محصول، مدل شبکه‌ای برای

پروژه‌ها رسم شد که نتایج آن در شکل‌های ۵ و ۶ آمده است. در این مدل شبکه‌ای فعالیت‌ها با دایره‌ها و مسیرها با بردار مشخص شده‌اند. کد فعالیت‌ها داخل دایره‌ها نوشته شده است.



شکل ۵- مدل شبکه‌ای پروژه مکانیزاسیون کلزا
Fig.5. Network model of rapeseed mechanization project



شکل ۶- مدل شبکه‌ای پروژه مکانیزاسیون گندم
Fig.6. Network model of wheat mechanization project

ارزیابی قرار گرفته است. به منظور حل مسأله زمان‌بندی پروژه‌های مکانیزاسیون کشاورزی با منابع محدود، الگوریتم پیشنهادی در نرم‌افزار MATLAB کدنویسی و اجرا شده است. ورودی‌های این الگوریتم شامل لیست پیش‌نیازی فعالیت‌ها، منابع مورد نیاز برای هر فعالیت، زمان مورد نیاز برای هر فعالیت و حداکثر منابع موجود در هر روز که برای هر یک از پروژه‌های مکانیزاسیون کشاورزی محصولات به صورت جداگانه محاسبه شده است. در اجرای الگوریتم متغیر مورد نظر، چیدمان فعالیت‌ها می‌باشد. هدف کمینه‌کردن زمان اتمام پروژه و هزینه ناشی از انجام فعالیت‌ها است. محدودیت‌هایی در اجرای الگوریتم وجود دارد که شامل وجود پیش‌نیازهای همه فعالیت‌ها و محدودیت منابع می‌باشد. هر فعالیت باید بعد از اتمام پیش‌نیازهای خود شروع به فعالیت کند شود و همچنین هر فعالیت در روزهایی می‌تواند انجام شود که منابع مورد نیاز آن موجود باشد.

نتایج برنامه‌ریزی منابع با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری

به منظور بررسی میزان موفقیت الگوریتم پیشنهادی از شبیه‌سازی کامپیوتری استفاده شده است. به همین جهت برنامه‌نویسی این الگوریتم در محیط برنامه‌نویسی نرم‌افزار MATLAB انجام شده و بر روی پروژه‌های مکانیزاسیون کشاورزی محصولات گندم و کلزا که اطلاعات این پروژه در جداول ۱ و ۲ برآورد شده است پیاده‌سازی شده است. در همین راستا به منظور مقایسه کارایی الگوریتم پیشنهادی این پروژه مکانیزاسیون کشاورزی با استفاده از الگوریتم ژنتیک (Wang *et al.*, 2005)، تخمین توزیع (Larrañaga, 2002) و الگوریتم پرندگان (Paraskevopoulos, Tarantilis, & Ioannou, 2016) علاوه بر این موضوع پژوهش انجام شده و نتایج آن‌ها با یکدیگر مورد

از پروژه‌های مکانیزاسیون کشاورزی در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ آورده شده است.

چیدمان فعالیت‌ها

یکی از نتایج و خروجی‌های الگوریتم، چیدمان انجام فعالیت‌ها می‌باشد که ترتیب انجام هر فعالیت را نشان می‌دهد. نتایج چینش فعالیت‌های در جداول ۵ و ۶ نشان داده شده است. همانطور که قبلاً در جدول ۲ و ۳ اشاره شد، ترتیب انجام فعالیت‌ها بر اساس داده‌های در دسترس می‌باشد و هیچ فعالیتی اجازه آغاز بدون گذارندن پیش‌نیازهای مربوط را ندارد.

چیدمان بهینه فعالیت‌ها، زمان اتمام پروژه، زمان شروع و پایان هر فعالیت و میزان منابع استفاده‌شده و باقی‌مانده در هر روز، خروجی هستند.

در این قسمت از بررسی نتایج به سبب این‌که در جواب ارائه‌شده بین الگوریتم‌های ژنتیک و الگوریتم پرندگان و الگوریتم رقابت استعماری تفاوت‌هایی وجود دارد، مقایسه‌ای بین این دو الگوریتم صورت گرفته است. به همین منظور، بررسی همگرایی الگوریتم‌های PSO، ICA و GA به جواب بهینه مورد استفاده قرار گرفت. در همین راستا اطلاعات مربوط به پروژه‌های مکانیزاسیون کشاورزی به هر دو الگوریتم داده شده است و نتایج آن‌ها از جمله بهترین زمان تکمیل پروژه و میانگین زمان تکمیل پروژه در هر نسل برای هر یک

جدول ۵- چیدمان بهینه فعالیت‌های پروژه مکانیزاسیون کلزا

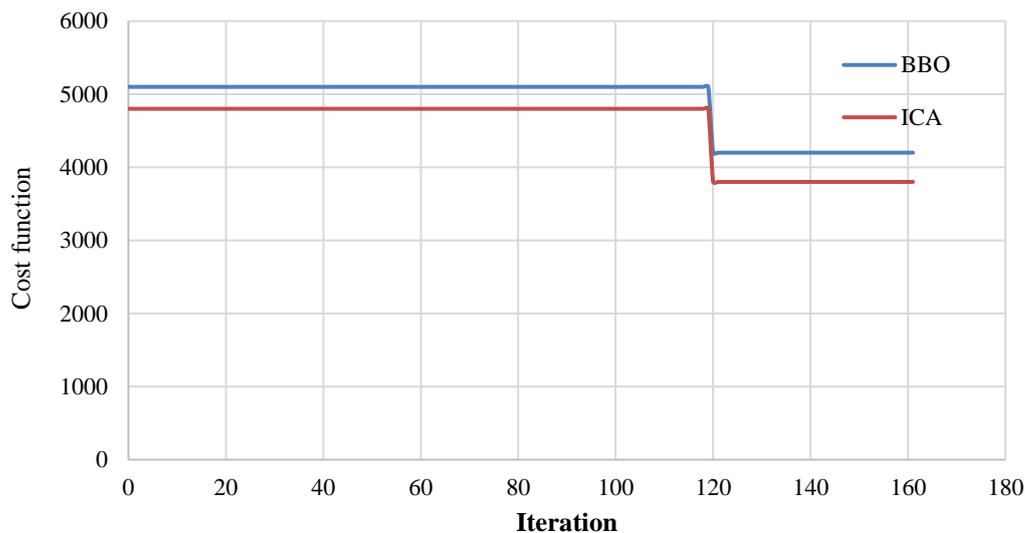
Table 5- Optimum arrangement of rapeseed mechanization project activities

ردیف Row	1	2	3	4	6	5	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
چینش Order	1	2	4	5	6	3	7	8	9	14	15	12	10	16	11	13	17	18	19	20
فعالیت‌ها Activities	R01	R02	R05	R06	R07	R04	R09	R12	R13	R22	R23	R16	R14	R24	R15	R17	R25	R29	R30	R33

جدول ۶- چیدمان بهینه فعالیت‌های پروژه مکانیزاسیون گندم

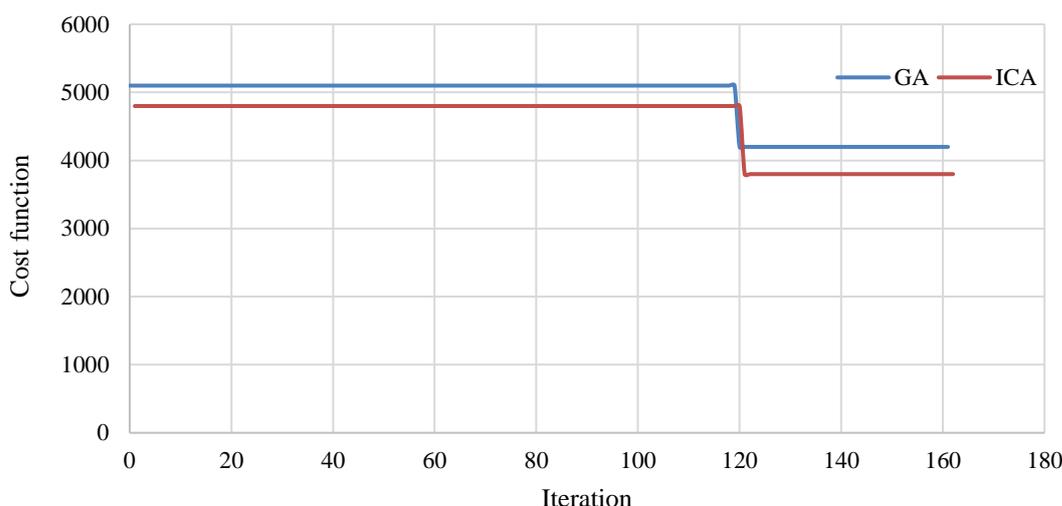
Table 6- Optimum arrangement of wheat mechanization project activities

ردیف Row	13	1	2	3	4	5	6	7	8	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
چینش Order	13	1	2	4	5	3	6	8	9	10	15	16	13	11	17	14	12	18	19	20	21	22	23
فعالیت‌ها Activities	W16	W01	W02	W05	W06	W04	W07	W09	W12	W13	W22	W23	W16	W14	W24	W17	W15	W25	W26	W29	W31	W32	W33



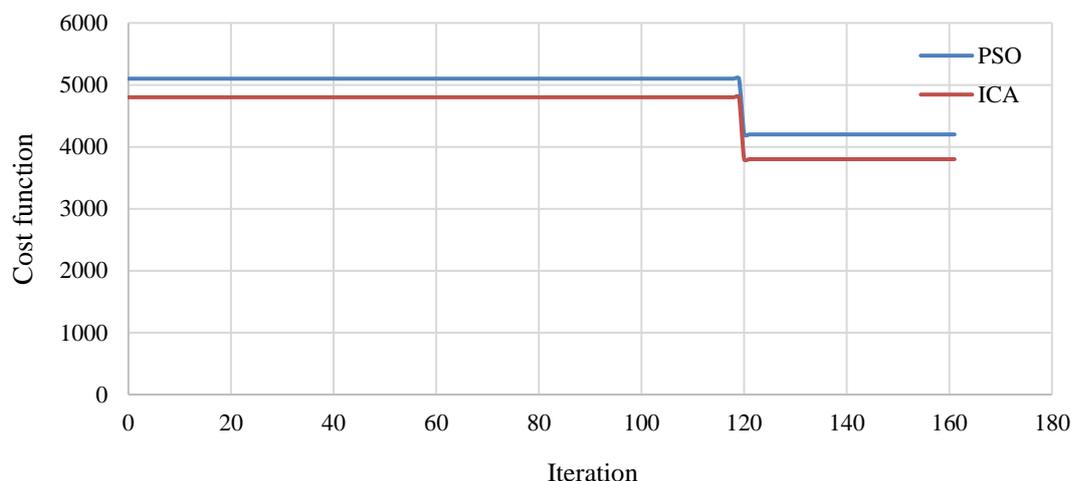
شکل ۸- مقایسه سرعت همگرایی دو الگوریتم BBO و ICA

Fig.8. Comparison of the speed of convergence of BBO and ICA algorithms



شکل ۹- مقایسه سرعت همگرایی دو الگوریتم ICA و GA

Fig.9. Comparison of the speed of convergence of ICA and GA algorithms



شکل ۱۰- مقایسه سرعت همگرایی دو الگوریتم PSO و ICA

Fig.10. Comparison of the speed of convergence of PSO and ICA algorithms

نتایج جواب بهینه و بررسی همگرایی آن

در این قسمت از بررسی نتایج به سبب این که در جواب ارائه شده بین الگوریتم رقابت استعماری (Hosseini & Al Khaled, 2014)، الگوریتم پرنندگان (Wang et al., 2018)، الگوریتم ژنتیک و (Dasgupta, Mandal, Dutta, Mandal, & Dam, 2013) و بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی (Simon, 2008) تفاوت‌هایی وجود دارد، مقایسه بین این الگوریتم‌ها صورت گرفته است. به همین منظور، بررسی همگرایی الگوریتم‌ها به جواب بهینه مورد مقایسه قرار گرفته است. در همین راستا اطلاعات مربوط به پروژه مکانیزاسیون کشاورزی به ۴ الگوریتم داده شده است و نتایج آن‌ها از

همان‌طور که در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ مشخص شده است الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی و الگوریتم پرنندگان و الگوریتم ژنتیک به مقایسه با الگوریتم رقابت استعماری بهبود بهتری داشته و توانسته تابع هزینه را نسبت به روش‌های دیگر کاهش بهتری دهد. سیر نزولی نمودارها حاکی از عملکرد بهینه روش ارائه شده است. همچنین با توجه به شکل‌های اشاره‌شده، روش رقابت استعماری توانسته در زمان کمتری و در ایتريشن‌های آغازین جواب بهینه را به‌عنوان جواب نهایی اعلام کند.

واحد کاهش یافته است. ICA (الگوریتم رقابتی امپریالیستی) یک الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری است که برای حل مسائل پیچیده بهینه‌سازی استفاده می‌شود. در مقایسه با سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی مانند BBO (بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی)، GA (الگوریتم ژنتیک) و PSO (بهینه‌سازی ازدحام ذرات)، ICA دارای چندین مزیت است:

۱- همگرایی سریع‌تر: نشان داده شده است که ICA سریع‌تر از سایر الگوریتم‌ها همگرا می‌شود، به این معنی که می‌تواند راه‌حل بهینه را در مدت زمان کوتاه‌تری پیدا کند.

۲- کاوش و بهره‌برداری بهتر: ICA بهتر از سایر الگوریتم‌ها می‌تواند بین اکتشاف و بهره‌برداری تعادل برقرار کند، به این معنی که می‌تواند راه‌حل بهینه را پیدا کند و در عین حال مناطق مختلف فضای جستجو را نیز کاوش کند.

۳- استحکام: ICA از سایر الگوریتم‌ها قوی‌تر است، به این معنی که می‌تواند داده‌های پر سر و صدا یا ناقص را بهتر مدیریت کند.

۴- انعطاف‌پذیری: ICA را می‌توان به راحتی با انواع مختلف مسائل بهینه‌سازی تطبیق داد و آن را به یک الگوریتم همه‌کاره تبدیل کرد.

۵- مقیاس‌پذیری: ICA را می‌توان برای مسائل بهینه‌سازی در مقیاس بزرگ با متغیرها و محدودیت‌های بسیاری استفاده کرد.

به طور کلی، ICA یک الگوریتم بهینه‌سازی قدرتمند است که مزایای متعددی را نسبت به سایر الگوریتم‌های محبوب مانند BBO، GA و PSO ارائه می‌دهد. به عبارت دیگر الگوریتم‌های ژنتیک می‌توانند زمان بر باشند، به خصوص زمانی که اندازه مسئله بزرگ باشد. این به این دلیل است که الگوریتم باید تعداد زیادی از راه‌حل‌های بالقوه را قبل از یافتن راه‌حل بهینه ارزیابی کند، که یکی از معایب بزرگ این مسأله است همچنین الگوریتم‌های ژنتیک ممکن است زودتر از موعد همگرا شوند، به این معنی که ممکن است به جای بهینه جهانی، راه‌حلی کمتر از حد بهینه (محلی) پیدا کنند. الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی (BBO) به دلیل پیچیدگی محاسباتی و نیازهای حافظه برای مسائل در مقیاس بزرگ مناسب نمی‌باشد. الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی (BBO) به آرامی به راه‌حل بهینه همگرا شده است، به‌ویژه برای نمونه‌های RCSP در مقیاس بزرگ، کمی زمان بر و از نظر محاسباتی گران است. همچنین الگوریتم BBO به دلیل وجود عملگر مهاجرت خود فاقد تنوع در جمعیت است، به همین دلیل منجر به همگرایی زودرس و راه‌حل‌های غیربهینه شده است. همچنین تنظیمات پارامترهای الگوریتم‌های ارائه‌شده در جدول ۷ ارائه شده است. جدول ۸ جهت آرایه مقدار تابع ارزیابی (شامل دو هدف هزینه و تاخیر) به‌ازای اجرای ۱۶۰ دوره اجرای الگوریتم می‌باشد. همانطور که از داده‌های ارائه‌شده در جدول ۸ مشخص است، الگوریتم رقابت استعماری با دستیابی به

جمله بهترین زمان تکمیل پروژه و میانگین زمان تکمیل پروژه در هر نسل برای هر یک از پروژه‌های مکانیزاسیون کشاورزی در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ آورده شده است. همان‌طور که در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود، روند همگرایی هر ۴ الگوریتم به سمت جواب بهینه می‌باشد که این بیانگر کارایی آن‌ها می‌باشد. در این بین الگوریتم ژنتیک به سرعت خود را به مقدار بهینه همگرا می‌کند که نشان از مشکل همگرایی زودرس در این الگوریتم می‌باشد و الگوریتم رقابت استعماری به تدریج و با گذشت زمان خود را به مقدار بهینه نزدیک می‌کند که علت آن هم این است که الگوریتم رقابت استعماری جواب‌هایی را که در الگوریتم ژنتیک نامناسب تشخیص می‌دهد، آن‌ها را نیز بررسی می‌کند تا اگر در بین آن‌ها جواب‌ها مقدار بهینه‌ای هم وجود دارد لحاظ شود. به همین علت هم است که زمان پردازش الگوریتم رقابت استعماری نسبت به الگوریتم ژنتیک کمی زیاد است. پس از فرموله کردن مدل، برای یافتن جواب بهینه باید با استفاده از نرم‌افزار به حل مدل پرداخت. در این مقاله الگوریتم رقابت استعماری در مسائل ایجادشده، بررسی و تحلیل می‌شود. یکی از دلایل اصلی استفاده از الگوریتم رقابت استعماری آن است که در مبانی نظری مسائل بهینه‌سازی چندهدفه به‌عنوان یکی از کاراترین و پرکاربردترین روش‌های حل گزارش شده است. دلیل اصلی آن است که از ویژگی‌های الگوریتم ژنتیک و مفهوم پارتو به‌طور هم‌زمان بهره می‌برد؛ از سوی دیگر، هدف مقایسه با روش‌های فراابتکاری دیگر نظیر ICA، GA، PSO و BBO به‌عنوان یکی از روش‌های فراابتکاری پرکاربرد، ارزیابی کارایی الگوریتم در ابعاد بزرگ است. نتایج تجزیه و تحلیل داده‌های استاندارد با الگوریتم این تحقیق به نسبت سایر روش‌های مورد مقایسه کارایی خوبی دارد. همچنین با بررسی دقیق‌تر نتایج مشخص می‌شود که کارایی الگوریتم با افزایش تعداد فعالیت‌ها نسبت به سایر روش‌ها بهتر می‌شود. شاخص‌های دیگری که اغلب برای مقایسه روش‌های فراابتکاری استفاده می‌شوند، سرعت رسیدن به جواب و تعداد تکرارها برای رسیدن به جواب است. روش پیشنهادی این مقاله با توجه به حذف جواب‌های غیرموجه در مرحله اول، به نسبت سایر روش‌ها با سرعت بیشتر و تکرار کمتر به جواب می‌رسد. با توجه به گستردگی فعالیت‌های پروژه در دشت مغان عملکرد مدل ارائه‌شده در این مقاله به‌خوبی بررسی شده است. پروژه زمان‌بندی با محدودیت منابع در کلزا در حالت عادی در ۹۱ روز کاری محصول گندم در ۲۲۵ روز انجام می‌گرفت. که با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری توانستیم این زمان را در کلزا به ۶۶ روز کاری و در محصول گندم به ۱۸۳ روز کاری برسانیم. همچنین هزینه مورد نیاز برای انجام محصول کلزا ۱۸۴۵۳ واحد پولی بوده است که با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری به ۱۶۷۰۰ واحد پولی کاهش یافته است. همچنین در محصول گندم هزینه انجام کار در حالت عادی معادل ۵۱۵۲۴ بود که با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری به ۴۸۲۹۱

الگوریتم‌های رقابت استعماری و ژنتیک کمی بیشتر طول کشید، اما همچنان نتایج رقابتی را نشان داد و ثابت کرد که یک گزینه مناسب برای حل مسائل مشابه است. به طور خلاصه، بر اساس یافته‌های ارائه شده در جدول ۸، می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم رقابت استعماری با دستیابی به همگرایی با بهترین مقدار در کوتاه‌ترین زمان ممکن، بهتر از سایر الگوریتم‌ها عمل کرد. با این حال، هر دو الگوریتم ژنتیک و روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات نیز عملکرد قوی را نشان می‌دهند و بسته به الزامات و محدودیت‌های خاص می‌توانند به‌عنوان گزینه‌های جایگزین در نظر گرفته شوند.

همگرایی با بهترین مقدار در کوتاه‌ترین مدت، کارایی قابل توجهی را نشان داده است. این الگوریتم ثابت کرده است که در حل مسئله مورد نظر بسیار مؤثر است و برتری خود را نسبت به سایر الگوریتم‌ها نشان می‌دهد. در ادامه الگوریتم ژنتیک قرار دارد که عملکرد بسیار خوبی نیز از خود نشان داده است. اگرچه رسیدن به همگرایی در مقایسه با الگوریتم رقابت استعماری کمی بیشتر طول کشید، اما همچنان از نظر کارایی و اثربخشی از سایر الگوریتم‌ها بهتر بود. در نهایت، الگوریتم PSO (بهینه‌سازی ازدحام ذرات) را داریم که عملکرد قابل‌تحسینی را نیز به نمایش می‌گذارد. در حالی که همگرایی در مقایسه با

جدول ۷- تنظیم پارامترهای مورد استفاده در الگوریتم‌ها

Table 7- The parameters setting used in the algorithms

پارامترهای الگوریتم رقابت استعماری Parameters of ICA	پارامترهای الگوریتم ژنتیک Genetic algorithm parameters	پارامترهای بهینه‌سازی ازدحام ذرات Particle swarm optimization parameters	پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی Parameters of optimization algorithm based on biogeography
'FitnessFunc'ProblemParams.NPar = 30 ProblemParams.VarMin = 0.01 ProblemParams.VarMax = 1 ProblemParams.landa = 0.02 AlgorithmParams.NumOfCountries = 200 AlgorithmParams.NumOfInitialImperialists = 10 AlgorithmParams.NumOfDecades = 50 AlgorithmParams.RevolutionRate = 0.7 AlgorithmParams.AssimilationCoefficient = 0.3 AlgorithmParams.AssimilationAngleCoefficient = .5 AlgorithmParams.Zeta = 0.02	Initial population =300 Probability of crossover =0.8 Probability of mutation =0.2 NumOfIteration=160 VarMin =0.01 VarMax =1	N = 30 Number of Portfolios VarMin =0.01 VarMax =1 Landa=0.02 Algorithmic Parameter Setting Number of particles P =50 NumOfIteration=160 Alfa=0.06 K=10	VarMin =0.01 VarMax =1 NumOfIteration=160 nPop=50; Habitats (Population Size) KeepRate=0,2;

جدول ۸- مقدار تابع ارزیابی به‌ازای ۱۶۰ دوره اجرای الگوریتم‌ها

Table 8- The value of the evaluation function for 160 iterations of the algorithms

Iteration	ICA	GA	PSO	BBO
20	4000	5500	7400	6000
60	4000	5500	7400	6000
100	4000	5500	4000	5300
125	3000	3200	3900	4000
160	3000	3200	3800	3910

نتیجه‌گیری

می‌کنند. لذا روش‌های فرااکتشافی برای حل مسائل RCPSP که بتواند زمان اجرای پروژه را به حداقل برساند می‌تواند بسیار مفید واقع شود. در این پژوهش از الگوریتم‌های رقابت استعماری (ICA) برای حل مسأله RCPSP استفاده شده است. این الگوریتم دامنه گسترده‌ای از راه‌حل‌ها را مورد بررسی قرار می‌دهد و همچنین از همگرایی زودرس و گیرکردن در بهینه‌های محلی که برخی از الگوریتم‌ها همانند الگوریتم ژنتیک دچار آن می‌شوند، جلوگیری می‌کند. الگوریتم پیشنهادی روی داده‌هایی از پروژه‌هایی مکانیزاسیون کشاورزی دو محصول کشت و صنعت مغان انجام شده است و نتایج حاصل نشان‌دهنده همگرایی مناسب الگوریتم در رسیدن به جواب بهینه می‌باشد. ۱. استفاده کارآمد از منابع: ICA در RCSP خوب است زیرا

در برنامه‌ریزی یک پروژه، زمان‌بندی فعالیت‌های آن در حداقل زمان ممکن جزء مهم‌ترین کارها محسوب می‌شود به‌خصوص زمانی که از لحاظ منابع دچار محدودیت باشد از اهمیت خاصی برخوردار خواهد بود. برای حل این‌گونه راه‌کارهای گوناگون ارائه شده که شامل روش‌های قطعی که جواب دقیق مسأله در صورت وجود تضمین می‌کند. روش‌های فرااکتشافی که برای حل مسائل بزرگ مناسب نیستند و تنها راه‌کاری برای پروژه‌های بزرگ‌تر ارائه می‌دهند و روش‌های فرااکتشافی که برخلاف روش‌های قطعی و اکتشافی، یافتن راه‌حل‌های نزدیک به بهینه را برای مسائل بزرگ تضمین

به‌طور موثر منابع را به وظایف اختصاص دهد. ۵. استحکام: ICA قوی است و می‌تواند عدم قطعیت‌ها و تغییرات در مدت زمان کار، در دسترس بودن منابع و سایر عواملی را که ممکن است بر فرآیند زمان‌بندی تأثیر بگذارد، کنترل کند. این تضمین می‌کند که برنامه زمانی بهینه باقی می‌ماند حتی زمانی که تغییرات یا اختلالات غیرمنتظره در سیستم وجود دارد به منظور بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی، این الگوریتم با الگوریتم‌های مختلف مقایسه گردید که نتایج خوب و قابل‌قبولی را از خود نشان داده‌اند. هدف از انجام این مقاله بررسی زمان‌بندی پروژه با منابع محدود با استفاده از الگوریتم فراابتکاری بود که به بررسی مساله بدر حالت ایستا پرداخته شده است (بدون در نظر گرفتن حالت‌های تصادفی و ناگهانی) به‌عنوان کارهای آتی می‌توان مساله را به‌صورت پویا در نظر گرفت.

به استفاده بهینه از منابع کمک می‌کند، تخصیص منابع به وظایف را بهینه می‌کند و اطمینان می‌دهد که هر منبع تا حداکثر ظرفیت خود استفاده می‌شود. ۲. بهبود دقت زمان‌بندی: ICA با در نظر گرفتن تمام محدودیت‌ها و وابستگی‌های موجود در فرآیند زمان‌بندی به بهبود دقت زمان‌بندی کمک می‌کند. این تضمین می‌کند که همه وظایف در مهلت‌های مربوطه تکمیل می‌شوند و هیچ تضاد یا هم‌پوشانی بین وظایف وجود ندارد. ۳. انعطاف‌پذیری: ICA یک رویکرد انعطاف‌پذیر است که می‌تواند با انواع مختلف RCSPها سازگار شود. می‌تواند مشکلات زمان‌بندی پیچیده را با محدودیت‌ها و وابستگی‌های متعدد مدیریت کند و برای طیف وسیعی از برنامه‌ها مناسب باشد. ۴. مقیاس‌پذیری: ICA مقیاس‌پذیر است، به این معنی که می‌تواند RCSPهای در مقیاس بزرگ را با وظایف و منابع زیادی مدیریت کند. حتی زمانی که تعداد کارها و منابع زیاد است، می‌تواند

References

1. Abdolshah, M. (2014). A review of resource-constrained project scheduling problems (RCPS) approaches and solutions. *International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies*, 5(4), 253-286.
2. Abdi, A. E. (2009). Planning and scheduling of agricultural mechanization projects with Gant networks.
3. Dumond, J., & Mabert, V. A. (1988). Evaluating project scheduling and due date assignment procedures: an experimental analysis. *Management Science*, 34(1), 101-118. <https://doi.org/10.1287/mnsc.34.1.101>
4. Dasgupta, K., Mandal, B., Dutta, P., Mandal, J. K., & Dam, S. (2013). A genetic algorithm (ga) based load balancing strategy for cloud computing. *Procedia Technology*, 10, 340-347. <https://doi.org/10.1016/j.protecy.2013.12.369>
5. Fekri, R., Amiri, M., Sajjad, R., & Golestaneh, R. (2016). Optimization of bank portfolio investment decision considering resistive economy. *Journal of Money and Economy*, 11(4), 375-400.
6. Gonçalves, G., Marques, P. A., Granadeiro, C. M., Nogueira, H. I., Singh, M. K., & Gracio, J. (2009). Surface modification of graphene nanosheets with gold nanoparticles: the role of oxygen moieties at graphene surface on gold nucleation and growth. *Chemistry of Materials*, 21(20), 4796-4802. <https://doi.org/10.1021/cm901052s>
7. Hourzadeh. (2013). Modeling and planning of resource allocation and cost-time balance of agricultural mechanization projects with PERT networks.
8. Hussain, K., Mohd Salleh, M. N., Cheng, S., & Shi, Y. (2019). Metaheuristic research: a comprehensive survey. *Artificial Intelligence Review*, 52, 2191-2233. <https://doi.org/10.1007/s10462-017-9605-z>
9. Küçüksayacıgil, F. (2014). Use of genetic algorithms in multi-objective multi-project resource constrained project scheduling.
10. Larrañaga, P. (2002). A Review on Estimation of Distribution Algorithms. In: Larrañaga, P., Lozano, J.A. (eds) Estimation of Distribution Algorithms. *Genetic Algorithms and Evolutionary Computation*, 2. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1539-5_3
11. Mirjalili, S. (2019). Evolutionary algorithms and neural networks. *Studies in computational intelligence*, Springer. 780.
12. Paraskevopoulos, D. C., Tarantilis, C. D., & Ioannou, G. (2016). An adaptive memory programming framework for the resource-constrained project scheduling problem. *International Journal of Production Research*, 54(16), 4938-4956. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1145814>
13. Simon, D. (2008). Biogeography-based optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 12(6), 702-713. <https://doi.org/10.1109/tevc.2008.919004>
14. Vartouni, A. M., & Khanli, L. M. (2014). A hybrid genetic algorithm and fuzzy set applied to multi-mode resource-constrained project scheduling problem. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 26(3), 1103-1112. <https://doi.org/10.3233/ifs-120747>
15. Wang, H., Lin, D., & Li, M. Q. (2005). A competitive genetic algorithm for resource-constrained project scheduling problem. 2005 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, IEEE. <https://doi.org/10.1109/icmlc.2005.1527446>
16. Wang, F., Zhang, H., Li, K., Lin, Z., Yang, J., & Shen, X. L. (2018). A hybrid particle swarm optimization algorithm using adaptive learning strategy. *Information Sciences*, 436, 162-177. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2018.01.027>

17. Xing, B., & Gao, W. J. (2014). Innovative computational intelligence: a rough guide to 134 clever algorithms, Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-03404-1>

Contents

Research Articles

- Investigation of Brown Rice Losses in the Paddy Drying Process** 105
S. Sharifi, M. H. Aghkhani, A. Rohani
- Rapid and Non-destructive Estimation of Apple Tree NPK Contents based on Leaf Spectral Analysis** 119
R. Azadnia, A. Rajabipour, B. Jamshidi, M. Omid
- Performance Evaluation of the UAV Sprayer in Controlling *Brevicoryne Brassicae* L. Pest in Canola** 135
N. Bagheri, M. Safari, A. Sheikhi Garjan
- Design, Construction, and Optimization of Performance of Electrodynamic Spraying Head of Atomizer Motorized Knapsack Sprayer** 147
M. Rezaei, J. Khodaei, B. Astinchap
- Simulation of Natural Frequencies of Orange Fruit Using Finite Element Method** 163
V. Kahrizi, E. Ahmadi, A. R. Shoshtari
- Evaluation of the Energy Efficiency of a Solar Parabolic Collector Equipped with Phase Change Materials inside the Receiver Tube of a Desalination System** 177
J. Seifi Laleh, H. Samimi Akhijahani, P. Salami
- Simulation of Heat and Mass Transfer in a Refractance Window Dryer for Aloe vera gel** 197
A. Shahraki, M. Khojastehpour, M. R. Golzarian, E. Azarpazhooh
- Balancing Time and Cost in Resource-Constrained Project Scheduling Using Meta-Heuristic Approach** 215
A. Taheri hajivand, K. Shirini, S. Samadi Gharehveran

Journal of Agricultural Machinery

Vol. 14

No. 2

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. 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. Associate 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. 2

2024

Journal of Agricultural Machinery



Iranian Society of
Mechanical Engineers
(ISME)

ISSN: 2228-6829

Contents

Research Articles

- Investigation of Brown Rice Losses in the Paddy Drying Process**105
S. Sharifi, M. H. Aghkhani, A. Rohani
- Rapid and Non-destructive Estimation of Apple Tree NPK Contents based on Leaf Spectral Analysis**119
R. Azadnia, A. Rajabipour, B. Jamshidi, M. Omid
- Performance Evaluation of the UAV Sprayer in Controlling *Brevicoryne Brassicae* L. Pest in Canola**135
N. Bagheri, M. Safari, A. Sheikhi Garjan
- Design, Construction, and Optimization of Performance of Electrodynamics Spraying Head of Atomizer Motorized Knapsack Sprayer**147
M. Rezaei, J. Khodaei, B. Astinchap
- Simulation of Natural Frequencies of Orange Fruit Using Finite Element Method**163
V. Kahrizi, E. Ahmadi, A. R. Shoshtari
- Evaluation of the Energy Efficiency of a Solar Parabolic Collector Equipped with Phase Change Materials inside the Receiver Tube of a Desalination System**177
J. Seifi Laleh, H. Samimi Akhijahani, P. Salami
- Simulation of Heat and Mass Transfer in a Refractance Window Dryer for Aloe vera gel**197
A. Shahraki, M. Khojastehpour, M. R. Golzarian, E. Azarpazhooh
- Balancing Time and Cost in Resource-Constrained Project Scheduling Using Meta-Heuristic Approach**215
A. Taheri hajivand, K. Shirini, S. Samadi Gharehveran