



انجمن مهندسان
مکانیک ایران

نشریه علمی

ماشین های کشاورزی



شماره ۴

جلد ۱۴

سال ۱۴۰۳

(شماره پیاپی: ۳۴)

شاپا: ۶۸۲۹-۲۲۲۸

عنوان مقالات

مقالات پژوهشی

- اثر ترکیبی پلاسمای سرد فشار اتمسفری و پراکسید هیدروژن به عنوان یک رویکرد کارآمد برای کنترل
کپک سبز پس از برداشت مرکبات ۳۵۷
عصمت برزنونی، حسن صدرنیا، فرشاد صحبت زاده، صادق خداویسی
- بررسی اقتصادی پیامدهای زیست محیطی تولید آب میوه: مطالعه موردی آب انار ۳۶۹
لیلا بهروزنیا، مهدی خجسته پور، هما حسین زاده بندبافها
- توسعه روش مکان یابی بانک نشا برنج با استفاده از رهیافت ترکیبی فازی-ویکور-تاپسیس ۳۹۱
مرتضی زنگنه، مهدیه روحی فرج آباد
- مقایسه و ارزیابی سم پاش های متداول باغی با سم پاش های مجهز به فناوری نرخ متغیر ۴۰۷
رستم فتحی، محمود قاسمی نژاد رائینی، سامان آبدانان مهدی زاده، مرتضی تاکی، مصطفی مردانی نجف آبادی
- توسعه و مقایسه دو الگوریتم مبتنی بر وقفه و مبدل آنالوگ به دیجیتال برای شمارش بذور در ردیف کارها ۴۳۱
علی غفارنژاد، حسین نوید، هادی کریمی
- توسعه و بهینه سازی الگوریتم ویژه یادگیری عمیق در تشخیص بیماری های مختلف برگی درخت به ۴۴۷
امین نادری بنی، حسین باقرپور، جعفر امیری پریان
- طراحی، ساخت و ارزیابی سامانه کنترل خودکار تغذیه موزع دستگاه قلمه کار نیشکر ۴۶۱
بنیامین عباسیان، محمد اسماعیل خراسانی فردوانی، حسن ذکی دیزچی

نشریه ماشین های کشاورزی

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

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

زمستان ۱۴۰۳

جلد ۱۴ شماره ۴

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد

مدیر مسئول: سید محمدرضا مدرس رضوی

سر دبیر: محمدحسین عباسپور فرد

استاد- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم (دانشگاه فردوسی مشهد)

اعضای هیئت تحریریه:

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

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

- ۳۵۷ اثر ترکیبی پلاسمای سرد فشار اتمسفری و پراکسید هیدروژن به عنوان یک رویکرد کارآمد برای کنترل کپک سبز پس از برداشت مرکبات
عصمت برزنونی، حسن صدرنیا، فرشاد صحبت زاده، صادق خداویسی
- ۳۶۹ بررسی اقتصادی پیامدهای زیست محیطی تولید آب میوه: مطالعه موردی آب انار
لیلا بهروزنیا، مهدی خجسته پور، هما حسین زاده بندبافها
- ۳۹۱ توسعه روش مکان یابی بانک نشا برنج با استفاده از رهیافت ترکیبی فازی-ویکتور-تاپسیس
مرتضی زنگنه، مهدیه روحی فرج آباد
- ۴۰۷ مقایسه و ارزیابی سم پاش های متداول باغی با سم پاش های مجهز به فناوری نرخ متغیر
رستم فتحی، محمود قاسمی نژاد رائینی، سامان آبدانان مهدی زاده، مرتضی تاکی، مصطفی مردانی نجف آبادی
- ۴۳۱ توسعه و مقایسه دو الگوریتم مبتنی بر وقفه و مبدل آنالوگ به دیجیتال برای شمارش بذور در ردیف کارها
علی غفارنژاد، حسین نوید، هادی کریمی
- ۴۴۷ توسعه و بهینه سازی الگوریتم ویژه یادگیری عمیق در تشخیص بیماری های مختلف برگی درخت به
امین نادری بنی، حسین باقرپور، جعفر امیری پریان
- ۴۶۱ طراحی، ساخت و ارزیابی سامانه کنترل خودکار تغذیه موزع دستگاه قلمه کار نیشکر
بنیامین عباسیان، محمد اسماعیل خراسانی فردوانی، حسن ذکی دیزجی

Research Article

Vol. 14, No. 4, 2024, p. 355-366

Synergistic Effect of Atmospheric Pressure Cold Plasma and Hydrogen Peroxide as an Efficient Approach for the Control of Citrus Postharvest Green Mold

E. Barzanouni¹, H. Sadrnia^{2*}, F. Sohbatzadeh³, S. Khodavaissy⁴

1- PhD Student, 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

3- Department of Atomic and Molecular Physics, Faculty of Science, University of Mazandaran, Babolsar, Iran

4- Department of Medical Parasitology and Mycology, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran & Research Center for Antibiotic Stewardship and Antimicrobial Resistance, Imam Khomeini Hospital Complex, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

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

Received: 15 May 2023

Revised: 13 June 2023

Accepted: 04 July 2023

Available Online: 19 November 2024

How to cite this article:

Barzanouni, E., Sadrnia, H., Sohbatzadeh, F., & Khodavaissy, S. (2024). Synergistic Effect of Atmospheric Pressure Cold Plasma and Hydrogen Peroxide as an Efficient Approach for the Control of Citrus Postharvest Green Mold. *Journal of Agricultural Machinery*, 14(4), 355-366. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2023.82325.1165>

Introduction

Penicillium Digitatum (PD) and *Penicillium italicum* diseases pose significant economic challenges to citrus fruit production across the globe. The primary aim of this research is to investigate the synergistic effects of low concentrations of H₂O₂ solution combined with transient spark discharge plasma on the inactivation of PD. Additionally, assess the chemical and physical properties. Ultimately, this approach can be presented as an eco-friendly solution for rinsing citrus fruits on an industrial scale.

Materials and Methods

The *Penicillium digitatum* (PD) isolate (ATCC 24692) was obtained from the Tehran Molecular Mycology Laboratory and cultured on Sabouraud Dextrose Agar medium at pH 5.6 and 27°C for 7 days. The initial concentration of spores in the solution was determined using a UV absorption spectrophotometer, set to 0.1 at a wavelength of 420 nm, and the concentration of spores was approximately equivalent to 10⁶ spores per milliliter (Palou et al., 2002). In this study, the plasma reactor had a point-to-plane geometry. The high-voltage needle electrode was placed above a Petri dish filled with a microbial solution combined with H₂O₂, while the grounded electrode was immersed in the solution. The distance between the tip of the needle electrode and the surface of the solution was 15 mm. Solutions of 0.05%, 0.1% and 0.5%v/v H₂O₂ (35% soluble in water) were added to the microbial solution before plasma treatment. The final volume of the solution was 5 ml and exposure times were 2.5, 5, 10, and 15 minutes. The reactor was fed with an air flow of 2 l/min. A transient spark discharge was generated, characterized by a discharge voltage of approximately 18 kV, short durations of less than 100 ns, and high current pulses exceeding 1A, with a repetition frequency ranging from 0.5 to 10 kHz. After treatment, H₂O₂, NO₂⁻, and NO₃⁻ as the main long-lived species in plasma-activated solution are measured. Also, physical factors such as electrical conductivity and pH were measured. Data Analysis performed using SAS 9.4 software.

Results and Discussion

With increasing plasma treatment time and H₂O₂ concentration, the log reduction increased across all treatments. The combination of 0.1 and 0.5% H₂O₂ solution with plasma resulted in complete inactivation of *P*.



©2024 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.2023.82325.1165>

digitatum within just 15 minutes. In plasma-treated solutions, regarding chemical properties, the concentrations of H_2O_2 , NO_2^- , and NO_3^- increased linearly with the treatment time. Furthermore, the electrical conductivity increased linearly, with a notable acceleration in the treated 0.5% H_2O_2 solution, reaching $373\mu\text{S cm}^{-1}$. Additionally, pH value dropped from an initial value of 6.95, using distilled water as a control, to a low of 2.14 for plasma treated with 0.5% H_2O_2 after 15 min of exposure.

Conclusion

The combined treatment was more effective than the isolated use of hydrogen peroxide solution. H_2O_2 enhances the effectiveness of plasma sterilization without requiring additional power input. Consequently, the synergistic application of atmospheric pressure plasma and H_2O_2 proved to be a promising method for the inactivation of PD. The findings indicate that reactive oxygen species (ROS) significantly contribute to the inactivation of PD cells, as well as the concentration of H_2O_2 . Finally, the combination of H_2O_2 solution at 0.1 and 0.5% with cold plasma presents an environmentally friendly method for sanitizing citrus fruits.

Acknowledgment

This work was supported by the Ferdowsi University of Mashhad [Grant number 48527]. The authors greatly appreciate the technical support from Mazandaran University in Iran, particularly from the Department of Atomic and Molecular Physics.

Keywords: Hydrogen peroxide, Non-thermal plasma, *Penicillium digitatum*, Plasma-activated solution, Transient spark discharge

اثر ترکیبی پلاسمای سرد فشار اتمسفری و پراکسید هیدروژن به عنوان یک رویکرد کارآمد برای کنترل کپک سبز پس از برداشت مرکبات

عصمت برزنونی^۱، حسن صدرنیا^{۲*}، فرشاد صحبت‌زاده^۳، صادق خداویسی^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۱۳

چکیده

کپک سبز و آبی عوامل محدودکننده دوره انبارداری بسیاری از میوه‌ها و سبزی‌ها از جمله مرکبات می‌باشد. در این تحقیق اثر پلاسمای سرد فشار اتمسفری تولیدشده توسط تخلیه اسپارک گذرا جریان مستقیم در یک راکتور بسته بر روی سوسپانسیون قارچ پنی‌سیلیوم دیجیتاتوم بررسی شد. سوسپانسیون با غلظت‌های اولیه متفاوت شامل: صفر، پنج صدم، یک دهم و پنج دهم درصد پراکسید هیدروژن در زمان‌های مختلف معرض پلاسمای ۲/۵، ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه تحت پلاسمادهی قرار داده شدند. نتایج نشان داد که با افزایش زمان پلاسمادهی و نیز غلظت پراکسید هیدروژن محلول اثر غیرفعال‌سازی اسپوره‌های قارچ افزایش یافت. در غلظت‌های یک و پنج دهم درصد میزان توقف کامل اسپورها در زمان ۱۵ دقیقه پلاسمادهی مشاهده شد. پلاسمادهی توانست سبب افزایش اکسیداسیون محلول شده و در نتیجه منجر به مرگ سلولی بیشتر اسپورها شود. بنابراین استفاده از پلاسمای سرد موجب می‌شود که استفاده از محلول‌های با غلظت بالای پراکسید هیدروژن در هنگام شستشوی میوه‌ها و سبزی‌ها به منظور حفظ خواص پس از برداشت آن‌ها در مقیاس صنعتی اجتناب شود.

واژه‌های کلیدی: پراکسید هیدروژن، پلاسمای غیرحرارتی، پنی‌سیلیوم دیجیتاتوم، تخلیه اسپارک گذرا، محلول فعال شده با پلاسمای

مقدمه

فیزیکی در حین برداشت و حمل و نقل، اثربخشی تیمارهای ضد قارچی و همچنین محیط پس از برداشت بستگی دارد (Smilanick, Brown, & Eckert, 2006). متیل بروماید یک آفت‌کش موثر و پرکاربرد در برابر انواع آفات از جمله کپک‌ها (قارچ) بود اما از سال ۲۰۰۵، تحت عنوان "پروتکل مونترال در مورد موادی که لایه ازن را تخریب می‌کنند" به دلیل پتانسیل بالای آن در تخریب لایه ازن ممنوع شد (Ito, Ohta, & Hori, 2012). علاوه بر این، قارچ‌کش‌هایی مانند ایمازلیل، سدیم ارتوفیل فئات یا تیابندازول این بیماری‌ها را کنترل می‌کنند. با این حال، نگرانی‌های زیادی درباره مقاومت و نیز پسماند ناشی از استفاده این مواد وجود دارد. همچنین از عملیات حرارتی مانند غوطه‌وری در آب گرم، برس زدن با آب گرم و نیز هوای گرم استفاده می‌شود، اما گرما می‌تواند باعث تغییر رنگ و کاهش وزن میوه‌ها شود. هرچند تیمارهای فیزیکی به دلیل ضایعات کمتر و سازگاری بیشتر با محیط‌زیست به روش‌های شیمیایی ترجیح داده می‌شوند. تیمار پلاسمای سرد به عنوان یک روش فیزیکی غیرحرارتی، دوست‌دار محیط‌زیست، مقرون به صرفه و نیز با بهره‌وری

کپک سبز^۵ و کپک آبی^۶ از مهم‌ترین عوامل بیماری‌زای پس از برداشت مرکبات و نیز مشکل‌ساز از لحاظ اقتصادی در تمام مناطق تولیدکننده در جهان هستند. ضایعات واقعی ناشی از کپک‌های پنی‌سیلیوم به عوامل آب و هوایی و باغ، نوع رقم مرکبات، آسیب

- ۱- دانشجوی دکترای گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
- ۲- دانشیار گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
- ۳- استاد گروه فیزیک اتمی و مولکولی، دانشکده علوم پایه دانشگاه مازندران، بابل، ایران
- ۴- دانشیار گروه بیولوژی مولکولی و گروه انگل‌شناسی و قارچ‌شناسی پزشکی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی، تهران، تهران، ایران

(*) نویسنده مسئول: Email: hassan.sadrnia@um.ac.ir

doi <https://doi.org/10.22067/jam.2023.82325.1165>

5- *Penicillium Digitatum*

6- *Penicillium Italicum*

نیترژن و همچنین رادیکال اکسیژن اتمی در ۷۷ نانومتر به‌عنوان عامل مهم در غیرفعال‌سازی اسپور پنسیلیوم دیجیتاتوم شناخته شد. بالاترین کاهش بار میکروبی لگاریتمی تقریباً دو واحد در زمان تیمار سه ثانیه بود. همچنین اثر ضخامت دی‌الکتریک سیلیکون که از ۰/۵ تا ۰/۳ میلی‌متر برای ضدعفونی اسپور قارچ روی سطح میوه واضح نبود اما بیان کردند که ضخامت دی‌الکتریک بیشتر از یک میلی‌متر اثر بر ضدعفونی قارچ داشته باشد (Yagy et al., 2016). در تحقیقی دیگر با استفاده از تخلیه کروانی جت پلاسما با ولتاژ خروجی ۸ کیلوولت و جریان مستقیم ۲ تا ۴ آمپر روی میوه کامکوات، بار میکروبی لگاریتمی در جریان دو، سه و چهار آمپر به‌ترتیب ۰/۷۷ تا ۱/۰۴، ۱/۰۸ تا ۱/۵۷ و ۱/۵۱ کاهش یافت. همچنین تیمار پلاسما تفاوت معناداری در مزه، طعم، رنگ، بافت و پذیرش کلی ایجاد نکرد و سبب افزایش عمر ماندگاری میوه‌ها نسبت به نمونه‌های کنترل شد (Puligundla, Lee, & Mok, 2018).

تیمارهای پس از برداشت میوه‌ها با پراکسید هیدروژن به‌عنوان جایگزینی برای تیمارهای شیمیایی پیشنهاد شده است. این ماده به دو شکل مایع و گاز برای کاربردهای نگهدارنده، ضدعفونی و استریل‌کردن استفاده می‌شود که بر اساس برنامه ملی ارگانیک استفاده از آن در تولید محصولات ارگانیک مجاز است (NOP, 2003). ایالات متحده H_2O_2 را به‌عنوان یک ماده ایمن (GRAS)^۲ برای تیمار جایگزین پس از برداشت مواد شیمیایی به‌منظور افزایش ماندگاری میوه‌ها و سبزیجات پذیرفت (Suslow, 1997). پراکسید هیدروژن توانایی تولید عوامل اکسیدکننده سیتوتوکسیک مانند رادیکال‌های هیدروکسیل را دارد که غشای سلولی، بیومولکول‌ها و DNA میکروارگانیسم‌ها را اکسید می‌کند، بنابراین دارای خاصیت ضد باکتریایی و ضدقارچی می‌باشد. محلول‌های H_2O_2 با غلظت کم (معمولاً از ۱ تا ۵ درصد) برای ضدعفونی در مواد غذایی و بسته‌بندی استفاده می‌شود (Parish et al., 2003). بنابراین هدف اصلی این تحقیق بررسی اثر ترکیبی غلظت‌های پایین محلول H_2O_2 و پلاسما سرد فشار اتمسفری اسپارک‌گذرا برای غیرفعال کردن پنسیلیوم دیجیتاتوم در محیط آبی است، که در نهایت بتواند روش جایگزینی برای شستشو مرکبات به‌جای استفاده از قارچ‌کش‌ها و یا مواد شیمیایی باشد.

مواد و روش‌ها

اعمال تیمار پلاسما فشار اتمسفری هوا بر محلول قارچ پنسیلیوم دیجیتاتوم
در این پژوهش از سیستم پلاسما سرد هوای فشار اتمسفری

بالای انرژی و غیره در سال‌های اخیر محبوبیت بیشتری در صنایع کشاورزی و غذا توسعه یافته است. پلاسما سرد یک فناوری جدید بر پایه یونیزاسیون گازها می‌باشد که با اعمال روش‌های مختلف انرژی به گازها ایجاد می‌شود (Misra et al., 2015; Schlüter, & Cullen, 2016). پلاسما سرد در دو روش غیرتعادلی و تعادلی تقسیم‌بندی می‌شود که امروزه فرایند پلاسما سرد غیرتعادلی برای غیرفعال کردن میکروارگانیسم‌ها کاربرد زیادی دارد. فاکتورهای مختلفی مانند امواج مایکروویو UV-C، گونه‌های خنثی و باردار، میدان‌های الکتریکی و اثرات ترکیبی آن‌ها ممکن است سبب غیرفعال شدن میکروارگانیسم‌ها شوند. همچنین از مزایای این نوع پلاسما دمای پایین فرایند و زمان کوتاه تیماردهی است (Ito, Oh, Ohta, Shiratani, & Hori, 2018).

در سال‌های اخیر علاقه زیادی درباره تاثیر تیمار ترکیبی پلاسما سرد اتمسفری با روش‌های دیگر در زمینه کشاورزی و صنایع غذایی دیده شده است. اما برای مثال تا به حال، تقریباً هیچ تحقیقی در مورد غیرفعال کردن پنسیلیوم دیجیتاتوم با استفاده از تیمار ترکیبی پلاسما سرد و پراکسید هیدروژن^۱ صورت نگرفته است. تحقیقات موجود تنها توسط پلاسما سرد فشار اتمسفری انجام شده است. در پژوهشی با استفاده از پلاسما آرگون فشار اتمسفری غیرتعادلی روی پنسیلیوم دیجیتاتوم نشان دادند که شدت غیرفعال‌سازی با پرتوهای UV-C و گونه‌های واکنش‌پذیر تقریباً ۷ برابر بیشتر از میزان تولیدشده توسط پرتوهای UV-C به‌تنهایی است. روند غیرفعال‌سازی با افزایش جریان O_2 افزایش یافت. همچنین با مقایسه D- Value (زمان لازم برای کاهش یک واحد لگاریتم) در رطوبت ۳۵ و ۱۰۰ درصد مشخص شد که رادیکال OH نیز گونه مهمی برای از بین بردن اسپورها است (Ohta, Ito, Iseki, & Hori, 2010). در یک تحقیق مشابه دیگر از پلاسما Ar/O_2 برای غیرفعال کردن پنسیلیوم دیجیتاتوم استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که سهم تشعشعات UV-C و ازون غالب نیستند، بلکه اکسیژن اتمی سهم عمده‌ای در غیرفعال شدن داشت. رفتار سرعت غیرفعال شدن اسپورها به تراکم O (3Pj) بستگی دارد (Iseki et al., 2011). در مطالعه دیگری، اثر جت پلاسما آب-هوا بر بافر نمکی بافر فسفات ۳ میلی‌لیتری روی پنسیلیوم دیجیتاتوم نشان داد که ۹۱ درصد از سرعت بازدارندگی جوانه‌زنی در ولتاژ اعمالی ۶ کیلوولت و نسبت بخار آب ۱۰۰ درصد در ۹ دقیقه زمان پلاسمادهی به‌دست آمد (Liu, Wang, Hu, Lei, & Han, 2016). همچنین ضدعفونی پلاسما تخلیه سد دی‌الکتریک با ولتاژ ۱۰ کیلوولت و بسامد ۹-۱۱ کیلوهرتز برای غیرفعال کردن اسپورهای کپک سبز روی نارنگی انشو در شرایط محیط بررسی شد. نتایج طیف‌سنجی نشان داد شدت بالای باند مثبت

2- Generally recognized as safe

1- H_2O_2

تخلیه اسپارک گذرا متشکل از الکتروده میله‌ای نازک ولتاژ بالا از جنس تنگستن که در فاصله ۱۵ میلی‌متر از سطح محلول و همچنین الکتروده حلقوی زمین در کف پتری‌دیش بود، استفاده شد (شکل ۱). محلول در حجم نهایی ۵ میلی‌لیتر و با چهار غلظت ۰/۵، ۰/۱، ۰/۰۵ و ۰/۰۰۵ پراکسید هیدروژن از محلول ۳۵ درصد حجمی H_2O_2 (محلول در آب، شماره CAS: 7722-84-1، ایران) تهیه شد. همچنین زمان پلاسمادهی ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه بود. در این چینه‌آزمایشی تخلیه پلاسمای اسپارک گذرا^۱ توسط یک منبع تغذیه ولتاژ بالای جریان مستقیم با ولتاژ تخلیه حدود ۱۸ کیلوولت و پالس جریان بیشتر از یک آمپر با فرکانس ۰/۵ تا ۱۰ کیلوهرتز انجام شد. همچنین برای تولید و حفظ یکنواختی پلاسمای تخلیه از یک مقاومت بالاست ۱۱/۲ مگا اهمی استفاده شد. دبی جریان هوای ورودی به راکتور ۲ لیتر بر دقیقه بود. سیگنال ولتاژ تخلیه توسط پروب ولتاژ (SEW PD-28) و سیگنال جریان تخلیه توسط نمایشگر جریان (Pearson 4100) متصل به اسیلوسکوپ مدل (Tektronix DPO2012) اندازه‌گیری شد.

طیف‌سنجی نشر نوری^۲ پلاسمای

یک طیف انتشار منحصر به فرد خاص برای فوتون‌های ساطع شده و گونه‌های فعال (مولکول‌ها، اتم‌ها و یون‌ها) در حجم تخلیه پلاسمای تولید شده در شرایط اتمسفری، که برای از بین بردن قارچ پنی‌سیلیوم دیجیتاتوم مهم هستند، با طیف‌سنجی نشر نوری شناسایی شد. طیف انتشار یک پلاسمای هوای فشار اتمسفر با و بدون پتری‌دیش حاوی محلول توسط طیف‌سنج نوری (S100، UV-Vis، spectrometer, Solar laser systems) با آرایه آشکارساز CCD 3648 پیکسل و فاصله کانونی ۷۵ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. فیبر نوری در فاصله ۵ میلی‌متری از تخلیه الکتریکی تولید شده قرار گرفت. طیف انتشار نوری با زمان ادغام ۸۲ ثانیه و وضوح ۰/۵ نانومتر در محدوده طیفی ۲۵۰ تا ۹۰۰ نانومتر ثبت شد.

روش آماری تحلیل نتایج

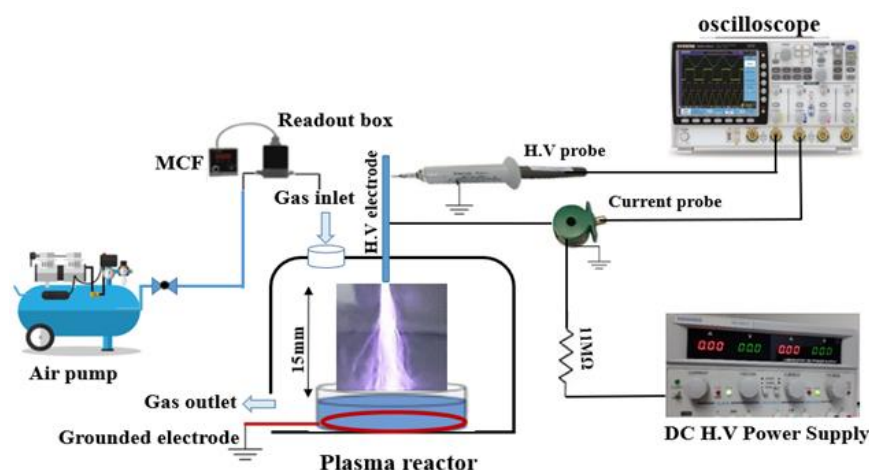
تجزیه و تحلیل واریانس داده‌ها و مقایسه میانگین با روش آزمون LSD با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۴ انجام شد. محاسبات میانگین و انحراف معیار و رسم نمودارها با نرم‌افزار اکسل ۲۰۱۳ انجام شد.

آماده‌سازی نمونه‌ها و انجام آزمون‌های میکروبی

برای انجام آزمون‌های میکروبی سویه پنی‌سیلیوم دیجیتاتوم (ATCC 24692) از آزمایشگاه قارچ‌شناسی مولکولی تهران تهیه شد. سپس بر روی محیط کشت سابرو دکستروز آگار (Ibresco, Iran) در دمای ۲۷ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷ روز کشت داده شد. پس از تهیه محلول، غلظت اولیه اسپورها توسط اسپکتروفتومتر مدل (آمریکا، WPA Biowave II) اندازه‌گیری شد. جذب سوسپانسیون در طول موج ۴۲۰ نانومتر روی ۰/۱ تنظیم شد که معادل 10^6 اسپور قارچ در یک میلی‌لیتر بود (Palou, Usall, Smilanick, Aguilar, & Vinas, 2002). سپس با افزودن پراکسید هیدروژن در غلظت‌های مورد بررسی به محلول قارچی حجم ۵ میلی‌لیتر را آماده نموده و تحت تیمار پلاسمای قرار داده شد. پس از تیماردهی، محلول با رقت ۰/۱ و ۰/۰۱ انجام و در نهایت ۲۰ میکرولیتر روی محیط آگار کشت داده شد و به مدت ۳ روز در انکوباتور با دمای ۲۷ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. در نهایت شمارش بار میکروبی بر حسب کلونی تشکیل یافته در میلی‌لیتر ($CFU mL^{-1}$) بیان شد.

خواص شیمیایی و فیزیکی آب مقطر فعال شده با پلاسمای

پراکسید هیدروژن، یون‌های نیتريت و نیترات گونه‌های اصلی با عمر طولانی در محلول فعال شده با پلاسمای هستند که اثرات بالقوه مهمی بر غیرفعال کردن میکروارگانیسم‌ها دارند. در این پژوهش، غلظت این گونه‌ها با استفاده از طیف‌سنج ماوراء بنفش (TUV-Vis)



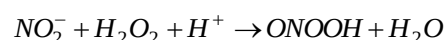
شکل ۱- چینش آزمایشی

Fig.1. Experimental setup

نتایج و بحث

نتایج ارزیابی بار میکروبی

اثر ضدقارچی غلظت‌های مختلف محلول پراکسید هیدروژن در برابر قارچ پنی‌سیلیوم در شکل ۲ نشان داده شده است. پلاسما تأثیر معناداری در سطح یک درصد بر غیرفعال‌سازی میکروبی وجود داشت ($p < 0.01$). با افزایش زمان پلاسمادهی و افزایش غلظت H_2O_2 ، کاهش بار میکروبی در تمام تیمارها افزایش یافت، به‌طوری‌که محلول ۰/۵ و ۰/۱ درصد پراکسید هیدروژن تحت پلاسما در زمان ۱۵ دقیقه منجر به توقف کامل رشد اسپورهای قارچ شد، در حالی‌که کاهش لگاریتمی محلول با غلظت‌های صفر و ۰/۰۵ درصد به‌ترتیب ۲/۴۵ و ۳/۰۳ بود. همچنین در تیمارهای بدون پلاسما (یعنی اثر H_2O_2 به‌تنهایی) با غلظت ۰/۰۵ و ۰/۵، کاهش لگاریتمی بار میکروبی به‌ترتیب ۰/۷۴ و ۱/۲۵ در زمان ۱۵ دقیقه مشاهده شد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد پلاسما با افزودن H_2O_2 بهبود یافته است. این تأثیرگذاری بیشتر را به احتمال زیاد می‌توان به آسیب اکسیداسیون ناشی از گونه‌های اکسیژن واکنشی تولیدشده در پلاسما نسبت داد (Puligundla et al., 2018; Timoshkin et al., 2012). این نتایج بیان می‌کند که پراکسیداسیون غشای سلولی از طریق گونه‌های اکسیژن واکنش‌پذیر یک مکانیسم مهم در خواص بیولوژیکی پلاسما است، در حقیقت واکنش بین هیدروژن در پراکسید هیدروژن و یون نیتريت پس از پلاسمادهی ممکن است منجر به تشکیل پراکسی نیتريت طبق واکنش زیر شود (Hao et al., 2014):

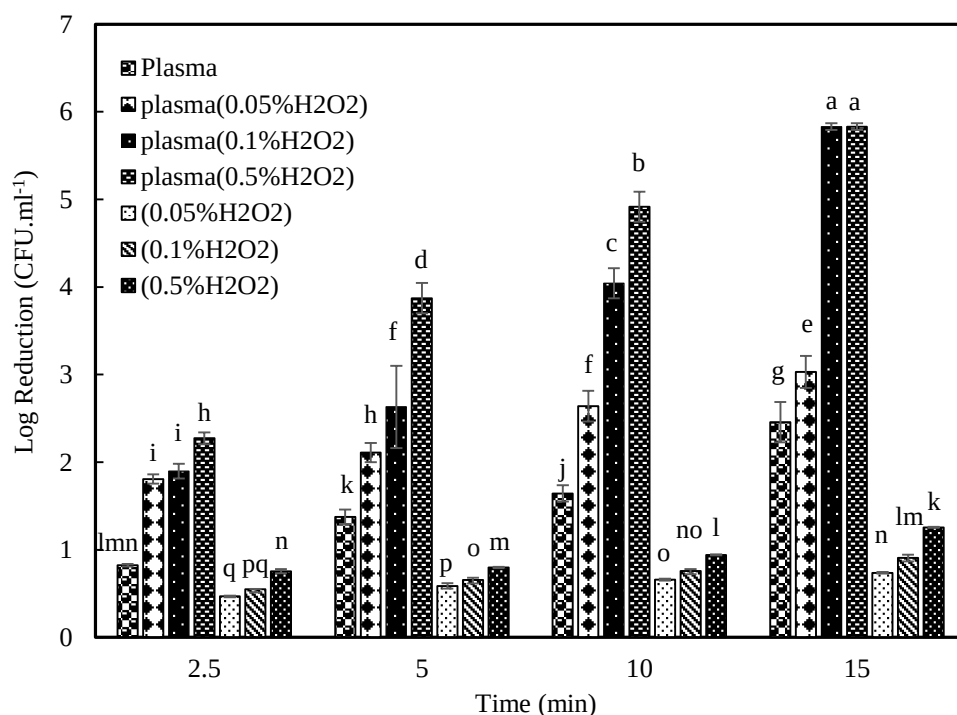


علاوه بر این نشان داده شده است که شیمی پراکسی نیتريت

به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای در خواص ضد میکروبی آب پلاسما شده نقش دارند (Naïtali, Kamgang-Youbi, Herry, Bellon-Fontaine, & Brisset, 2010; Traylor et al., 2011).

خواص شیمیایی و فیزیکی آب پلاسمایی‌شده

به‌منظور مطالعه دقیق‌تر مکانیسم‌های موثر در غیرفعال‌سازی پنی‌سیلیوم دیجیتاتوم، اثرات شیمیایی و فیزیکی آب پلاسمایی‌شده بررسی شد. تحلیل داده‌ها نشان داد که تأثیر فاکتور زمان مواجهه با پلاسما بیشتر از غلظت محلول بود (داده‌ها نشان داده نشده است). همان‌طوری‌که نمودارهای شکل ۳ نشان داده شده است در همه محلول‌های تحت پلاسما، غلظت H_2O_2 ، NO_2^- و NO_3^- به‌صورت خطی با گذشت زمان تیمار افزایش یافت. حداقل غلظت H_2O_2 در محلول با غلظت صفر برابر ۴/۱ میلی‌گرم در لیتر در زمان ۲/۵ دقیقه، در حالی‌که حداکثر غلظت ۳۱/۰۳ میلی‌گرم در لیتر در محلول ۰/۵ درصد و در زمان ۱۵ دقیقه پلاسمادهی مشاهده شد شکل ۳ (a). لیو و همکاران (Liu et al., 2016) گزارش کردند که ۳/۰۸۰۹ میکرومول در لیتر H_2O_2 تولیدشده در سیستم جت پلاسما سبب ممانعت از رشد اسپورهای پنی‌سیلیوم دیجیتاتوم تا ۹۱ درصد شد. پراکسید هیدروژن به‌عنوان یک اکسیدکننده قوی نقش مهمی در ضد عفونی دارد. علاوه بر این، NO_2^- و NO_3^- پراکسی نیتريت‌های تولیدشده در محلول‌های تحت پلاسما به دلیل مکانیسم آن‌ها در ضد عفونی مورد توجه محققین بسیاری قرار گرفته است (Lee, Paek, Ju, & Lee, 2006; Shen et al., 2016).



شکل ۲- غیرفعال سازی پنی سیلیوم دیجیتاتوم با غلظت های مختلف محلول پراکسید هیدروژن و زمان های مختلف پلازما
Fig.2. Inactivation of *Penicillium digitatum* with different concentrations of H₂O₂ solutions and different plasma treatment times

اختلال در DNA می شوند. به طور خلاصه در طول پلاسمادهی آب، رادیکال OH از طریق جدایش مولکول های آب طبق رابطه (۱) تولید می شود (Bekeschus et al., 2014):

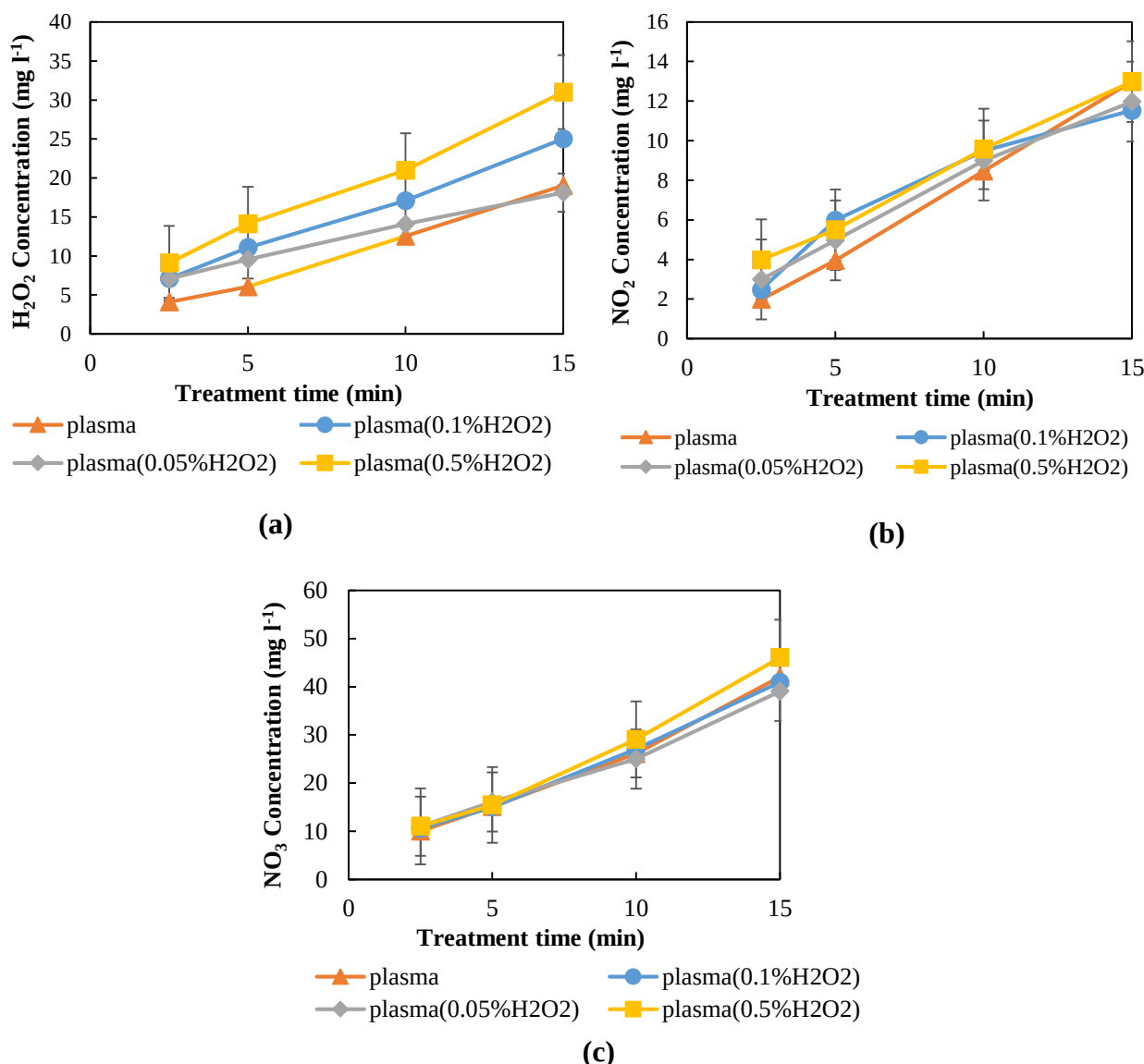


که P یک ذره دارای انرژی از پلازما (برای مثال: الکترون) (Bruggeman & Schram, 2010). با افزودن H₂O₂، بیشتر OH ممکن است از H₂O₂ و از طریق واکنش های (۲) تا (۴) ایجاد شوند (Lee et al., 2013).



همچنین، ارتباط ازون (تولید شده توسط پلازما از رابطه (۵) و پراکسید هیدروژن می تواند به طور مطلوبی OH تولید کند رابطه (۶)، که فرایند پراکسون نامیده می شود (Merenyi, Lind, Naumov, & Sonntag, 2010).

شکل ۳ (b) و (c) نشان داد که میزان غلظت های NO₂⁻ و NO₃⁻ تولید شده در زمان پلاسمادهی روند مشابهی در همه محلول ها داشتند به طوری که با افزایش زمان و غلظت افزایش یافتند. مقدار NO₂⁻ در محلول ها با غلظت صفر و نیم درصد به ترتیب ۱/۹۹ و ۱۲/۹۸ میلی گرم در لیتر به ترتیب در تیمار ۲/۵ و ۱۵ دقیقه مشاهده شد. همچنین حداکثر میزان تولید NO₃⁻، در طول مواجهه با پلازما، ۴۶/۰۵ میلی گرم بر لیتر که مربوط به تیمار با غلظت ۰/۵ درصد H₂O₂ بود، در حالی که کمترین مقدار ۱۰/۰۲ میلی گرم در لیتر برای محلول بدون H₂O₂ در زمان ۲/۵ دقیقه بود. نیترات به عنوان یک محصول ثانویه با عمر طولانی در فرایند پلاسمادهی دارای اثرات بیولوژیکی است. بیشتر گونه های اکسیژن و نیتروژن واکنش پذیر تولید شده در پلاسمای ترکیبی با H₂O₂ عمدتاً OH و NO بودند (Graves, 2012). که در نتیجه منجر به تولید بیشتر در تشکیل سایر گونه های واکنشی مانند O=NOOH و NO₂ می شود (Wu et al., 2017). این رادیکال ها می توانند به آسانی به اسیدهای چرب غیراشباع غشای سلولی حمله کرده و با نفوذ درون سلولی موجب



شکل ۳- غظت‌های H_2O_2 ، NO_2^- و NO_3^- در محلول تحت پلازما در زمان‌های مختلف

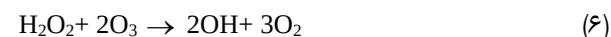
Fig.3. Concentrations of different plasma treatment times of H_2O_2 solutions (a) H_2O_2 , (b) NO_2^- , and (c) NO_3^-



به‌عنوان یک رادیکال، NO در حال تلاش برای واکنش با گونه‌های دیگر با یک الکترون جفت‌نشده است، طول عمر NO عملاً تنها با برخورد تصادفی با دیگر رادیکال‌ها محدود می‌شود. NO و سوپراکسید به سهولت واکنش داده و پراکسی‌نیتريت تولید می‌شود (Merenyi et al., 2010):



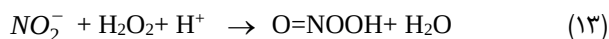
در محیط محلول اسیدی، پراکسی‌نیتريت به سرعت پروتونه شده تا اسید پروکسی‌نیتروس را تشکیل دهد:



وجود H_2O_2 منجر به تولید بیشتر تبدیل رادیکال O_2^- به OH شده و از تولید $^1\text{O}_2$ جلوگیری می‌کند، بنابراین نقش OH می‌تواند خیلی مهم باشد. اگرچه، رادیکال‌های O_2^- و $^1\text{O}_2$ در این سیستم وجود خواهند داشت و نقش متناظر خود را در ضدعفونی ایفا می‌کنند. اخیراً گونه‌های فعال نیتروژن در پلازما سرد، عمدتاً رادیکال‌های اکسید نیتريك و نیترات هستند. نیتريت از واکنش‌های جدایش N و O بر طبق رابطه‌های (۷) تا (۹) تولید می‌شود:



پروکسی نیتريت‌ها با استفاده از واکنش (۱۳) شود (Maeda, Igura, Shimoda, & Hayakawa, 2003):



و نکته مهم این که ONOOH می‌تواند بیشتر واکنش نشان دهد و OH و NO₂ را مانند رابطه (۱۴) تشکیل دهد:



بنابراین افزودن H₂O₂ به بازده بالاتر OH و NO کمک نموده و همچنین ممکن است سبب کارایی بیشتر سایر گونه‌های فعال مانند O=NOOH و NO₂ از طریق واکنش‌های فوق ذکر شود، که در نتیجه منجر به غیرفعال شدن بیشتر قارچ پنی‌سیلیوم دیجیتاتوم می‌شود.

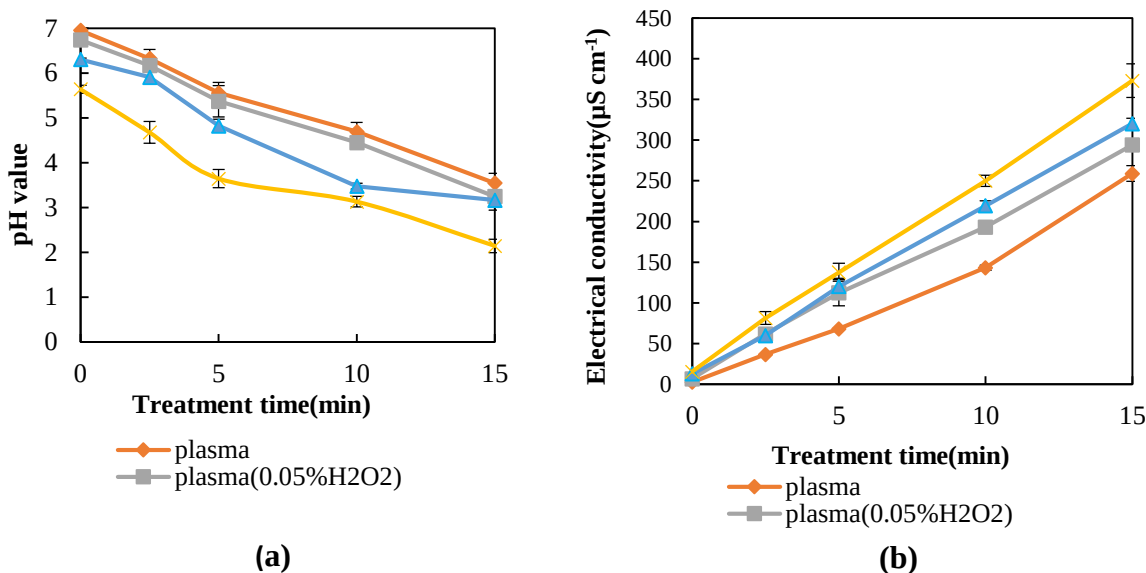


واکنش تعادلی بین پروکسی نیتريت و پراکسی نیتروس اسید بستگی به مقدار اسیدیته دارد. تحت شرایط فیزیولوژیکی برای مثال برای مقدار اسیدیته نزدیک ۷ هم پروکسی نیتريت و هم شکل پروتونه شده آن در غلظت‌های قابل توجهی وجود خواهند داشت (Van Gils, Hofmann, Boekema, Brandenburg, & Bruggeman, 2013).

NO ممکن است همچنین با اکسیژن محلول واکنش داده و یون‌های نیتريت و نیترات طبق واکنش کلی رابطه (۱۲) تشکیل شود:



تشکیل نیترات‌ها تحت شرایط اسیدی ممکن است از طریق واکنش نیترات‌ها با پراکسید هیدروژن منجر به تشکیل



شکل ۴- تغییرات اسیدیته و هدایت الکتریکی در غلظت‌های مختلف محلول تحت پلازما

Fig.4. Changes of (a) pH value and (b) Electrical conductivity of various concentrations of H₂O₂ solution treated by cold plasma

گسترش هیف‌ها، میسلیوم‌ها تأثیر منفی بگذارد و از رشد قارچ جلوگیری کند.

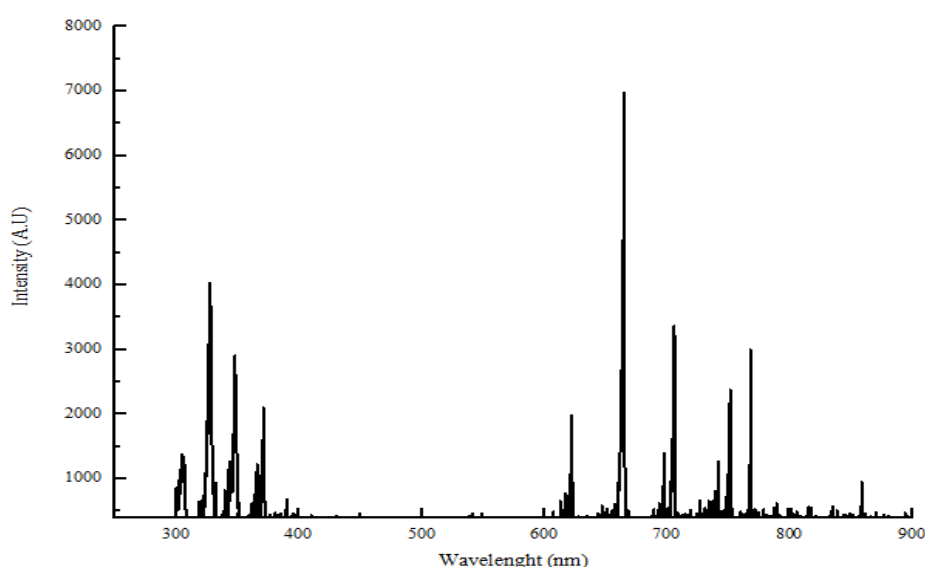
همان‌طوری که در شکل ۴ (a) مشاهده می‌شود میزان اسیدیته از مقدار ۶/۹۵ (آب مقطر به عنوان شاهد) به پایین‌ترین مقدار ۲/۱۴ بعد از ۱۵ دقیقه پلاسمادهی محلول نیم درصد H₂O₂ رسید. به‌طور مشابه در همان زمان ۱۵ دقیقه آب مقطر تحت پلازما میزان pH به ۳/۵۴ بود. بنابراین سرعت کاهش pH با افزودن H₂O₂ بیشتر شد. همچنین ثابت شده است که pH یک عامل کلیدی است که به غیرفعال‌سازی میکروارگانیسم‌ها کمک می‌کند. کاهش اسیدیته مربوط به واکنش‌های متعدد حاصل از O₃ و NO_x، O در پلاسمای هوا با آب

با توجه نتایج داده‌های ویژگی‌های فیزیکی اندازه‌گیری شده در شکل ۴ (a) میزان اسیدیته در تمام تیمارها با افزایش زمان پلاسمادهی در نتیجه تشکیل نیتريت، نیترات و اسیدی شدن محلول کاهش یافت. این گونه‌های شیمیایی در نتیجه کاهش دادن اسیدیته موجب فعالیت ضد میکروبی آب پلاسمایی می‌شوند (Ma et al., 2015; Xu et al., 2016). کمترین مقدار اسیدیته در محلول با غلظت ۰/۵ درصد تحت پلازما، ۲/۱۴ بود. وارگناو و همکاران (Wargenau et al., 2011) بیان کردند که pH پایین می‌تواند بر خواص الکترواستاتیکی اسپورهای قارچ تأثیر بگذارد، یعنی احتمالاً سبب پراکنده شدن اسپورها در حجم مایع شده، که می‌تواند بر

نتایج طیف‌سنجی نشر نوری

طیف نشر نوری پلاسمای هوای اتمسفری اسپارک گذرا در محدوده ۲۵۰ تا ۹۰۰ نانومتر در شکل ۵ نشان داده شده است. مهم‌ترین خطوط طیفی ثبت‌شده شامل نیتروژن دو بار مثبت با طول‌موج‌های ۳۱۴، ۳۳۵، ۳۵۶، ۳۷۹ نانومتر، نیتروژن یک بار مثبت با طول‌موج‌های تابشی ۳۹۹ و ۳۹۰ نانومتر مشاهده گردید. همچنین طول‌موج تابشی از رادیکال‌های اکسیژن در خطوط ۶۶۵، ۷۷۷ و ۸۴۴ نانومتر نیز ثبت شد. فاکتورهای غیرفعال‌سازی که از طیف‌سنجی موردتوجه است شامل گونه‌های واکنش‌پذیر اکسیژن مانند O، OH و O₃. رادیکال اتمی اکسیژن موثرترین عامل در توقف رشد اسپورها بود که توسط محققین دیگری نیز تایید شده است (Iseki et al., 2011; Yagyu et al., 2016).

در فصل مشترک گاز-آب انجام می‌شود، است (Liu et al., 2010). در واقع pH پایین‌تر عمدتاً در نتیجه تولید اسید نیتریک از NO تولیدشده در پلازما، است (Park, Ryu, Hong, Choi, & Uhm, 2012) با این حال، افزودن H₂O₂ باعث کاهش زمان غیرفعال‌شدن اسپورها شد (شکل ۲). در ارتباط با هدایت الکتریکی، این پارامتر فیزیکی به‌صورت خطی افزایش یافت، که افزایش آن در بالاترین زمان پلاسمادهی و غلظت محلول ۳۷۳ میکروزیمنس بر سانتی‌متر مشاهده شد. این بیان می‌کند که تجمع یون‌ها با افزایش زمان تیماردهی، افزایش یافت شکل ۴ (b).



شکل ۵- طیف‌سنجی نشر نوری پلاسمای هوا

Fig.5. Typical optical emission spectrum of air plasma

نتیجه‌گیری

نشان داد که گونه‌های اکسیژن واکنشی نقش مهمی در غیرفعال‌کردن سلول‌های قارچی علاوه بر غلظت H₂O₂ داشتند. در نهایت، محلول ترکیبی H₂O₂ با غلظت ۰/۱ و ۰/۵ درصد با پلاسمای سرد می‌تواند به‌عنوان یک روش ضدعفونی کردن سازگار با محیط‌زیست برای شستشوی مرکبات معرفی شود.

مشارکت نویسندگان

عصمت برزنونی: جمع‌آوری داده‌ها، پردازش داده‌ها، تحلیل آماری، خدمات نرم‌افزاری، تصویرسازی نتایج، استخراج و تهیه متن اولیه، شبیه‌سازی کامپیوتری

در حالت کلی با افزایش زمان پلاسمادهی، کاهش بار میکروبی در تیمارهای ترکیبی مشاهده شد. تفاوت معنی‌داری در اثر غیر فعال‌سازی اسپورها بین تیمارهای با و بدون پلازما وجود داشت. با این حال، تیمار ترکیبی موثرتر از استفاده جداگانه از محلول پراکسید هیدروژن بود. محلول‌های H₂O₂ بدون افزایش توان ورودی دارای اثرات بازدارندگی بیشتری روی رشد اسپورها داشتند. در نتیجه، درمان ترکیبی پلاسمای فشار اتمسفر و H₂O₂ یک روش امیدوارکننده برای غیرفعال کردن قارچ پنی‌سیلیوم دیجیتاتوم بود. نتایج طیف‌سنجی

صادق خداویسی: مفهوم سازی، روش شناسی، شماره فنی

حسن صدرنیا: نظارت و مدیریت

فرشاد صحبت زاده: نظارت و مدیریت، مفهوم سازی، روش شناسی،

مشاوره فنی، ویرایش متن، شبیه سازی کامپیوتری

References

1. Bekeschus, S., Kolata, J., Winterbourn, C., Kramer, A., Turner, R., Weltmann, K., Bröker, B., & Masur, K. (2014). Hydrogen peroxide: A central player in physical plasma-induced oxidative stress in human blood cells. *Free Radical Research*, 48(5), 542-549. <https://doi.org/10.3109/10715762.2014.892937>
2. Bruggeman, P., & Schram, D. C. (2010). On OH production in water containing atmospheric pressure plasmas. *Plasma Sources Science and Technology*, 19(4). <https://doi.org/10.1088/0963-0252/19/4/045025>
3. Graves, D. B. (2012). The emerging role of reactive oxygen and nitrogen species in redox biology and some implications for plasma applications to medicine and biology. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 45(26), 263001. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/45/26/263001>
4. Hao, X., Mattson, A. M., Edelblute, C. M., Malik, M. A., Heller, L. C., & Kolb, J. F. (2014). Nitric oxide generation with an air operated non-thermal plasma jet and associated microbial inactivation mechanisms. *Plasma Processes and Polymers*, 11(11), 1044-1056. <https://doi.org/10.1002/ppap.201300187>
5. Iseki, S., Hashizume, H., Jia, F., Takeda, K., Ishikawa, K., Ohta, T., Ito, M., & Hori, M. (2011). Inactivation of Penicillium digitatum spores by a high-density ground-state atomic oxygen-radical source employing an atmospheric-pressure plasma. *Applied Physics Express*, 4(11), 116201. <https://doi.org/10.1143/APEX.4.116201>
6. Ito, M., Oh, J. S., Ohta, T., Shiratani, M., & Hori, M. (2018). Current status and future prospects of agricultural applications using atmospheric-pressure plasma technologies. *Plasma Processes and Polymers*, 15(2), 1700073. <https://doi.org/10.1002/ppap.201700073>
7. Ito, M., Ohta, T., & Hori, M. (2012). Plasma agriculture. *Journal of the Korean Physical Society*, 60, 937-943. <https://doi.org/10.3938/jkps.60.937>
8. Lee, H. W., Lee, H., Kang, S., Kim, H., Won, I., Jeon, S., & Lee, J. (2013). Synergistic sterilization effect of microwave-excited nonthermal Ar plasma, H₂O₂, H₂O and TiO₂, and a global modeling of the interactions. *Plasma Sources Science and Technology*, 22(5), 055.008. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/22/5/055008>
9. Lee, K. N., Paek, K. H., Ju, W. T., & Lee, Y. H. (2006). Sterilization of bacteria, yeast, and bacterial endospores by atmospheric-pressure cold plasma using helium and oxygen. *Journal of Microbiology*, 44(3), 269-275.
10. Liu, F., Sun, P., Bai, N., Tian, Y., Zhou, H., Wei, S., Zhou, Y., Zhang, J., Zhu, W., & Becker, K. (2010). Inactivation of bacteria in an aqueous environment by a direct current, cold atmospheric pressure air plasma microjet. *Plasma Processes and Polymers*, 7(3-4), 231-236. <https://doi.org/10.1002/ppap.200900070>
11. Liu, K., Wang, C., Hu, H., Lei, J., & Han, L. (2016). Indirect treatment effects of water-air MHCD jet on the inactivation of Penicillium Digitatum suspension. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 44(11), 2729-2737. <https://doi.org/10.1109/TPS.2016.2608926>
12. Liu, Z., Zhou, C., Liu, D., He, T., Guo, L., Xu, D., & Kong, M. G. (2019). Quantifying the concentration and penetration depth of long-lived RONS in plasma-activated water by UV absorption spectroscopy. *AIP Advances*, 9(1), 015014. <https://doi.org/10.1063/1.5037660>
13. Ma, R., Wang, G., Tian, Y., Wang, K., Zhang, J., & Fang, J. (2015). Non-thermal plasma-activated water inactivation of food-borne pathogen on fresh produce. *Journal of Hazardous Materials*, 300, 643-651. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.07.061>
14. Maeda, Y., Igura, N., Shimoda, M., & Hayakawa, I. (2003). Bactericidal effect of atmospheric gas plasma on Escherichia coli K12. *International Journal of Food Science and Technology*, 38(8), 889-892.
15. Merenyi, G., Lind, J., Naumov, S., & Sonntag, C. V. (2010). Reaction of ozone with hydrogen peroxide (peroxone process): a revision of current mechanistic concepts based on thermokinetic and quantum-chemical considerations. *Environmental Science & Technology*, 44(9), 3505-3507. <https://doi.org/10.1021/es100277d>
16. Misra, N., Kaur, S., Tiwari, B. K., Kaur, A., Singh, N., & Cullen, P. (2015). Atmospheric pressure cold plasma (ACP) treatment of wheat flour. *Food Hydrocolloids*, 44, 115-121. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.08.019>
17. Misra, N., Schlüter, O., & Cullen, P. (2016). Plasma in food and agriculture. In *Cold plasma in food and agriculture* (pp. 1-16). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801365-6.00001-9>
18. Naitali, M., Kamgang-Youbi, G., Herry, J. M., Bellon-Fontaine, M. N., & Brisset, J. L. (2010). Combined effects of long-living chemical species during microbial inactivation using atmospheric plasma-treated water. *Applied and Environmental Microbiology*, 76(22), 7662-7664. <https://doi.org/10.1128/AEM.01615-10>
19. NOP. (2003). *National Organic Program, Federal Register*
20. Ohta, T., Ito, M., Iseki, S., & Hori, M. (2010). Inactivation mechanism of Penicillium digitatum using atmospheric pressure plasma. TENCON 2010-2010 IEEE Region 10 Conference. <https://doi.org/10.1109/TENCON.2010.5685967>

21. Palou, L., Usall, J., Smilanick, J. L., Aguilar, M. J., & Vinas, I. (2002). Evaluation of food additives and low toxicity compounds as alternative chemicals for the control of *Penicillium digitatum* and *Penicillium italicum* on citrus fruit. *Pest Management Science*, 58(5), 459-466. <https://doi.org/10.1002/ps.477>
22. Parish, M., Beuchat, L., Suslow, T., Harris, L., Garrett, E., Farber, J., & Busta, F. (2003). Methods to reduce/eliminate pathogens from fresh and fresh cut produce. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2, 161-173. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2003.tb00033.x>
23. Park, G., Ryu, Y. H., Hong, Y. J., Choi, E. H., & Uhm, H. S. (2012). Cellular and molecular responses of *Neurospora crassa* to non-thermal plasma at atmospheric pressure. *Applied Physics Letters*, 100(6), 063703. <https://doi.org/10.1063/1.3684632>
24. Puligundla, P., Lee, T., & Mok, C. (2018). Effect of intermittent corona discharge plasma treatment for improving microbial quality and shelf life of kumquat (*Citrus japonica*) fruits. *LWT*, 91, 8-13. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.01.019>
25. Shen, J., Tian, Y., Li, Y., Ma, R., Zhang, Q., Zhang, J., & Fang, J. (2016). Bactericidal effects against *S. aureus* and physicochemical properties of plasma activated water stored at different temperatures. *Scientific Reports*, 6(1), 28505. <https://doi.org/10.1038/srep28505>
26. Smilanick, J., Brown, G., & Eckert, J. (2006). The biology and control of postharvest diseases. *Fresh Citrus Fruits*, 339-396.
27. Suslow, T. (1997). Postharvest Chlorination: Basic Properties & Key Points for Effective Distribution.
28. Timoshkin, I. V., Maclean, M., Wilson, M. P., Given, M. J., MacGregor, S. J., Wang, T., & Anderson, J. G. (2012). Bactericidal effect of corona discharges in atmospheric air. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 40(10), 232. <https://doi.org/10.1109/TPS.2012.2193621>
29. Traylor, M. J., Pavlovich, M. J., Karim, S., Hait, P., Sakiyama, Y., Clark, D. S., & Graves, D. B. (2011). Long-term antibacterial efficacy of air plasma-activated water. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 44(47), 472001. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/47/472001>
30. Van Gils, C., Hofmann, S., Boekema, B., Brandenburg, R., & Bruggeman, P. (2013). Mechanisms of bacterial inactivation in the liquid phase induced by a remote RF cold atmospheric pressure plasma jet. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 46(17), 175203. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/46/17/175203>
31. Wargenau, A., Fleißner, A., Bolten, C. J., Rohde, M., Kampen, I., & Kwade, A. (2011). On the origin of the electrostatic surface potential of *Aspergillus niger* spores in acidic environments. *Research in Microbiology*, 162(10), 1011-1017. <https://doi.org/10.1016/j.resmic.2011.07.006>
32. Wu, S., Zhang, Q., Ma, R., Yu, S., Wang, K., Zhang, J., & Fang, J. (2017). Reactive radical-driven bacterial inactivation by hydrogen-peroxide-enhanced plasma-activated-water. *The European Physical Journal Special Topics*, 226(13), 2887-2899. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2016-60330-y>
33. Xu, D., Wang, B., Xu, Y., Chen, Z., Cui, Q., Yang, Y., Chen, H., & Kong, M. G. (2016). Intracellular ROS mediates gas plasma-facilitated cellular transfection in 2D and 3D cultures. *Scientific Reports*, 6(1), 1-14. <https://doi.org/10.1038/srep27872>
34. Yagyu, Y., Hatayama, Y., Hayashi, N., Mishima, T., Nishioka, T., Sakudo, A., Ihara, T., Ohshima, T., Kawasaki, H., & Suda, Y. (2016). Direct plasma disinfection of green mold spore on citrus by atmospheric pressure dielectric barrier discharge for agricultural applications. *Transactions of the Materials Research Society of Japan*, 41(1), 127-130. <https://doi.org/10.14723/tmrj.41.127>

Research Article

Vol. 14, No. 4, 2024, p. 367-387

Economic Evaluation of the Environmental Impacts of Juice Production: A Case Study of Pomegranate Juice

L. Behrooznia¹, M. Khojastehpour^{2*}, H. Hosseinzadeh-Bandbafha³

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

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

3- Department of Agricultural Machinery Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

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

Received: 31 May 2023

Revised: 19 July 2023

Accepted: 29 July 2023

Available Online: 20 October 2024

How to cite this article:Behrooznia, L., Khojastehpour, M., & Hosseinzadeh-Bandbafha, H. (2024). Economic Evaluation of the Environmental Impacts of Juice Production: A Case Study of Pomegranate Juice. *Journal of Agricultural Machinery*, 14(4), 367-387. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2023.82678.1170>

Introduction

Pomegranate has gained global popularity due to its high vitamin content and antioxidant properties, attracting fans worldwide. The processing of pomegranate into various products, including pomegranate juice, has become a thriving industry. However, this processing requires significant energy and chemicals—most of which are derived from fossil fuels. The combustion of these fuels releases harmful gases, contributing to global warming, environmental damage, and health risks. The costs tied to these environmental burdens are often overlooked, neglecting the principles of environmental sustainability. Therefore, it is vital to assess the monetary value of the environmental impacts throughout the entire life cycle of pomegranate juice production. This research aims to investigate the costs imposed on society, including the social costs of carbon emissions, damage costs from air pollution, and costs associated with environmental prevention measures related to processing pomegranate juice. Feel free to ask for further changes or adjustments.

Materials and Methods

This study focuses on assessing the environmental impact and associated costs generated during the processing of pomegranate juice in Mashhad, Iran, from 2022 to 2023. The research examines the case study of Saman Bazar Razavi Co. to conduct an environmental impact cost assessment. The study begins by evaluating the environmental impacts associated with the pomegranate juice production process using a life cycle assessment (LCA) approach. The costs related to these impacts are then estimated by multiplying the impact amounts with predetermined monetary coefficients. The study adopts a system boundary that extends from the arrival of the fruit at the factory to the departure of the packaged juice, defining a 160g pack of pomegranate juice as the functional unit (FU). SimaPro software, version 9, is utilized for analyzing the environmental impacts. The evaluation of environmental impact costs encompasses three categories: social costs of carbon emissions, damage costs from air pollution, and costs for environmental prevention measures. Carbon dioxide emissions are considered to assess social costs, while five other gases—nitrogen oxides, particulate matter, sulfur dioxide, volatile organic compounds, and ammonia vapor—are included in investigating air pollution damage costs. Furthermore, the calculation of environmental prevention costs takes into account seven impact categories: global warming, photochemical oxidation, respiratory inorganic effects, human toxicity, ecotoxicity, eutrophication, and acidification.

©2024 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.2023.82678.1170>

Results and Discussion

Here's the edited text with corrections marked: The investigation reveals that the production of pomegranate juice emits approximately 0.12 kg CO₂ eq of carbon, with a social cost of \$0.0062 per functional unit. The primary contributors to carbon emissions are natural gas and electricity. Furthermore, the evaluation of air-polluting gases indicates a total cost of \$0.021 for air pollution damage. Among the five considered gases, ammonia vapor, sulfur dioxide, and nitrogen oxides incur the highest damage costs. The assessment of environmental prevention costs demonstrates a total calculated cost of \$0.026, with the impact categories of global warming and acidification making the most substantial contributions of 59% and 28%, respectively. This finding suggests that the majority of costs for preventing damage in pomegranate juice production should be focused on mitigating the effects of global warming. The consumption of natural gas and electricity during the pomegranate juice production process is the main source of carbon dioxide emissions and global warming. Additionally, in terms of acidification, the contributions of pomegranate, electricity, apple, natural gas, and sugar are noteworthy. Based on these findings, it is evident that the resources used in pomegranate juice processing, derived from fossil fuels, have the most significant impact on environmental damage. Therefore, one practical method to prevent the creation of these pollutants is the utilization of alternative bioproducts produced from biomass. Considering the substantial amount of pomegranate waste generated after juice processing, which is often not utilized; these wastes can be effectively employed to produce bioenergy, such as biogas. This approach not only prevents waste disposal but also offers economic and environmental benefits.

Conclusion

This article provides an overview of the environmental impacts and associated costs of pomegranate juice production in Mashhad. Using the life cycle assessment approach, the study calculates the environmental impacts per functional unit (a 160g juice pack) and estimates the corresponding costs. The results indicate that the social cost of carbon emissions, the total damage costs of air pollution, and the total environmental prevention costs per functional unit are \$0.0062, \$0.021, and \$0.026, respectively. These costs should be allocated to mitigating the environmental damage caused by pomegranate juice production in the region.

Acknowledgments

The authors express their gratitude to Ferdowsi University of Mashhad for funding this research (Grant No. 54189).

Keywords: Environmental costs, Environmental impact, Life cycle assessment, Pomegranate juice

مقاله پژوهشی

جلد ۱۴، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۳، ص ۳۸۷-۳۶۷

بررسی اقتصادی پیامدهای زیست‌محیطی تولید آب‌میوه: مطالعه موردی آب انار

لیلا بهروزنیا^۱، مهدی خجسته‌پور^{۲*}، هما حسین‌زاده بندبافها^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۰۷

چکیده

بارهای زیست‌محیطی ناشی از تولید و خدمات مختلف به‌نوبه خود منجر به بروز هزینه‌هایی می‌شوند که اگرچه در حسابداری‌ها مورد توجه قرار نمی‌گیرند، به جامعه تحمیل شده و اصول توسعه پایدار در تولید و خدمات را به چالش می‌کشند. با توجه به این حقیقت، هدف از پژوهش حاضر بررسی هزینه‌های تحمیل شده ناشی از بارهای زیست‌محیطی در چرخه زندگی تولید آب‌میوه انار است. هزینه‌های مورد بررسی در این پژوهش، هزینه‌های اجتماعی نشر کربن، هزینه خسارت به کیفیت هوا و هزینه‌های پیش‌گیرانه زیست‌محیطی در نظر گرفته شده‌اند. در این راستا، شرکت سامان بازار رضوی در مشهد به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب و بارهای زیست‌محیطی مربوط به تولید آب‌میوه انار، با استفاده از رویکرد ارزیابی چرخه زندگی محاسبه شد. متعاقباً هزینه‌های ناشی از بارهای زیست‌محیطی تولید آب‌میوه انار مورد بررسی قرار گرفت. نتایج میزان هزینه اجتماعی نشر کربن، هزینه کل خسارت به هوا و هزینه‌های پیش‌گیرانه زیست‌محیطی به ازای تولید آب‌میوه پاکتی ۱۶۰ گرمی را به ترتیب برابر ۰/۰۶۲، ۰/۰۲۱ و ۰/۰۲۶ دلار نشان داد. این پژوهش مهم‌ترین عوامل مؤثر بر ایجاد هزینه‌های مربوط به بارهای زیست‌محیطی ناشی از تولید آب‌میوه انار را گاز طبیعی و الکتریسیته معرفی و توصیه به استفاده از جایگزین‌های پایدارتری برای این نهاده‌ها نمود.

واژه‌های کلیدی: آب انار، ارزیابی چرخه زندگی، اثرهای زیست‌محیطی، هزینه‌های زیست‌محیطی

مقدمه

مصرف میوه‌ها و سبزیجات، به دلیل داشتن کسر بالایی از فیبر و ویتامین‌ها و فعالیت آنتی‌اکسیدانی ترکیبات فعال زیستی، نقش تغذیه‌ای مهمی برای سلامت انسان ایفا می‌کنند (Li et al., 2021; Pinto et al., 2022). از بین میوه‌های مختلف تولیدشده در سراسر جهان، انار به دلیل داشتن مقدار قابل توجهی از مواد مغذی، معدنی و ویتامین‌ها و همچنین خواص دارویی شگفت‌آور به‌منظور حفظ و نگهداری سلامت انسان مانند خواص آنتی‌اکسیدانی، ضدالتهابی و ضد توموری، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌است (Lavoro et al., 2021; Melgarejo, Núñez-Gómez, Legua, Martínez-

(Nicolás, & Almansa, 2020; Singh et al., 2020). به‌رغم

استقبال گسترده از انار به‌عنوان یک میوه فوق‌العاده با خواص پزشکی متعدد در دنیا، امکان تولید آن برخلاف بسیاری از میوه‌ها در همه نوع اقلیمی ممکن نیست. باوجود پیشرفت‌های مختلف در جهت نگهداری میوه تازه، امکان ذخیره‌سازی و صادرات انار تازه در حجم وسیع با مشکلات و چالش‌های زیادی روبه‌رو است. این در حالی است که انار می‌تواند به‌صورت‌های مختلف فرآوری و در اختیار مصرف‌کنندگان بی‌شماری در سراسر جهان قرار گیرد. بدین سبب، تقاضای جهانی برای محصولات فرآوری‌شده از انار در دهه‌های گذشته روند رو به رشدی را به خود اختصاص داده‌اند. همگام با این افزایش، صنایع تبدیلی متعدد برای فرآوری انار به انواع محصولات مختلف مانند آب انار گسترش یافته و از این طریق امکان مصرف انار فرآوری‌شده در همه نقاط فراهم شده است (Talekar, Patti, Vijayraghavan, & Arora, 2018).

علی‌رغم مزایای قابل توجه فرآوری انار، این بخش همچون دیگر بخش‌های کشاورزی و صنایع غذایی، مصرف مقدار قابل توجهی انرژی به‌ویژه انرژی فسیلی و مواد شیمیایی را به خود اختصاص داده است. به‌خوبی مستند شده است که احتراق سوخت‌های فسیلی به

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیزاسیون، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- استاد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳- گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

(*) نویسنده مسئول:

(Email: mkhpour@um.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2023.82678.1170>

Kaab, & Rafiee, 2020; Khezri *et al.*, 2022; Longo, Mistretta, Guarino, & Cellura, 2017; Zarei, Kazemi, & Marzban, 2019). مطالعات محدودی به ارزیابی هزینه‌های ناشی از بارهای زیست‌محیطی فرآیند تولیدی و خدماتی پرداخته‌اند. به‌عنوان مثال، در پژوهشی جالب، دانشمندان چینی به ارزیابی هزینه‌های زیست‌محیطی رسوب اسید در صنایع کشاورزی، جنگل‌داری، ساخت‌وساز و حمل‌ونقل پرداخته‌اند و به‌ضرورت انجام مطالعات مبنی بر بررسی هزینه‌های زیست‌محیطی فرآیندهای مختلف، جهت دستیابی به اهداف توسعه پایدار تأکید کرده‌اند (Zhang *et al.*, 2023). علاوه بر این، در پژوهشی که به‌منظور ارزیابی چرخه زندگی و هزینه‌های پیش‌گیرانه زیست‌محیطی برای یک کارخانه اکریلونیتریل، به دلیل افزایش ظرفیت تولید، انجام شد، به اهمیت ارزیابی هزینه‌های زیست‌محیطی به‌عنوان بخشی از شاخص‌های مالی یک پروژه جهت پایدار بودن از نظر شرایط زیست‌محیطی اشاره شده است (Morales-Mora, Rosa-Dominguez, Suppen-Reynaga, & Martinez-Delgadillo, 2012). در پژوهشی دیگر، به ارزیابی اثرهای زیست‌محیطی و هزینه‌های ناشی از این اثرهای مرتبط با تولید و تأمین زیرساخت‌های راه‌آهن پرداخته شده است. به‌طوری‌که در این تحقیق ابتدا اثرهای زیست‌محیطی ارزیابی شده است و سپس هزینه‌های زیست‌محیطی این اثرها مورد محاسبه قرار گرفته است (Landgraf *et al.*, 2022). علاوه بر این، در پژوهشی که اخیراً توسط محققان ایرانی در جهت ارزیابی هزینه‌های زیست‌محیطی پروژه‌های معدنی انجام شده است، به‌ضرورت گنجانیدن هزینه‌های زیست‌محیطی در مطالعات اشاره شده است (Badakhshan, Shahriar, Afraei, & Bakhtavar, 2023). در این راستا و با توجه به موارد ذکرشده و همچنین اهمیت مباحث مرتبط با پایداری در هر فرآیند تولیدی و خدماتی و با توجه به اهمیت فرآوری میوه انار و جایگاه ویژه آن در صنایع تبدیلی ایران، بررسی هزینه‌های ناشی از اثرهای زیست‌محیطی ایجادشده در اثر تولید آب‌میوه انار ضروری به نظر می‌رسد. در راستای این مهم، در این پژوهش سعی بر آن است که در ابتدا بارهای زیست‌محیطی فرآیند تولید آب‌میوه انار در طی مراحل مختلف چرخه زندگی آن براساس رویکرد ارزیابی چرخه زندگی^۱ مورد محاسبه قرار گیرد و سپس میزان هزینه‌های ناشی از این بارها با استفاده روابط موجود مورد محاسبه قرار گیرد. پژوهش حاضر نخستین مطالعه موردی در راستای برآورد هزینه‌های زیست‌محیطی ناشی از تولید و فرآوری انار در ایران است. بنابراین، از مزیت‌های مهم این پژوهش می‌توان به شناسایی مهم‌ترین عوامل مؤثر بر ایجاد هزینه‌های مربوط به اثرات نامطلوب زیست‌محیطی برای فرآیند تولید آب‌میوه انار اشاره کرد.

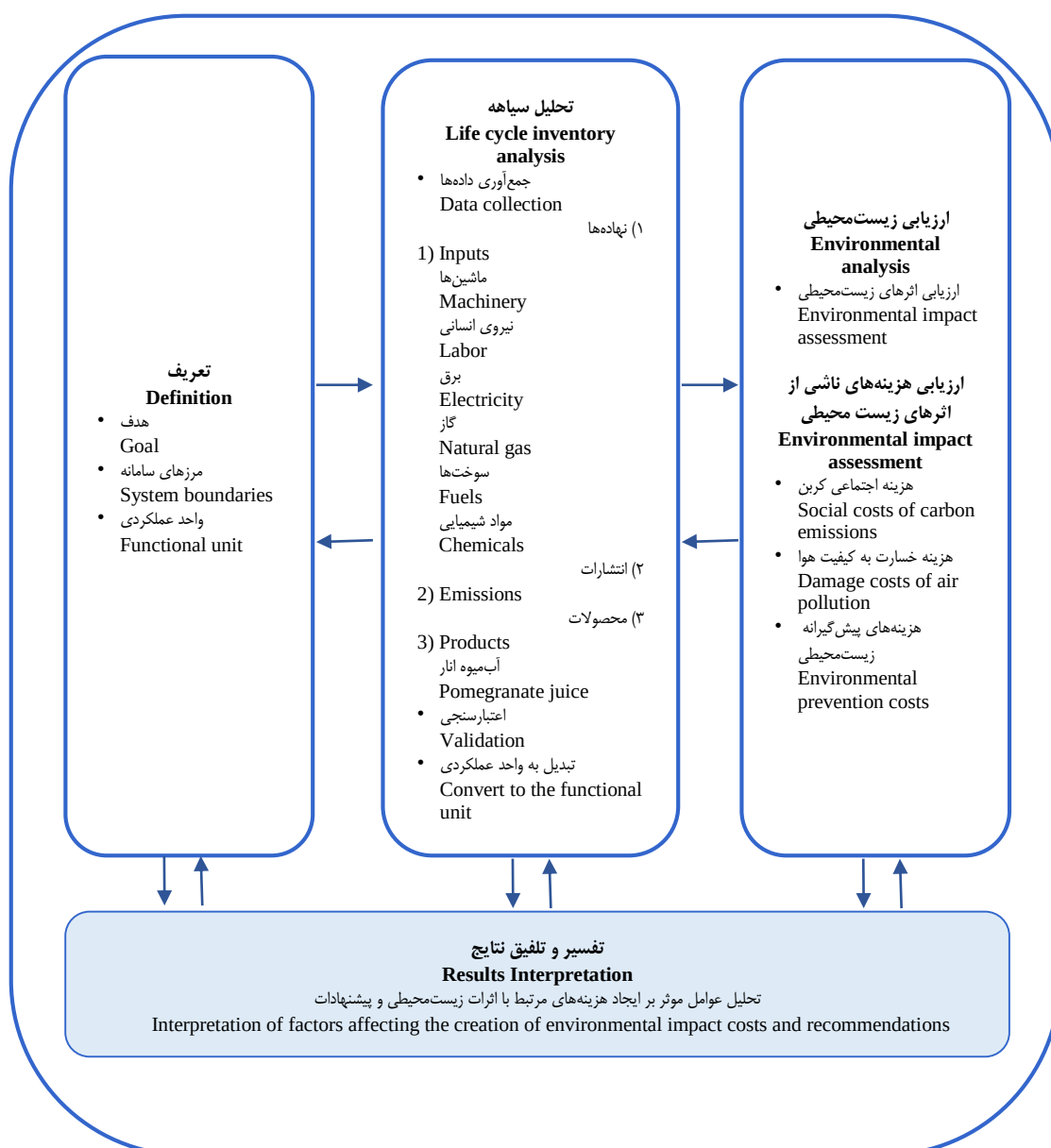
دلیل نشر گازهای گل‌خانه‌ای مشارکت قابل‌توجهی در پدیده گرمایش جهانی و همچنین آسیب‌های غیرقابل‌انکار و تهدیدکننده ناشی از تغییر اقلیم به‌ویژه در رابطه با سلامت انسان و تخریب زیست‌بوم دارد (Papong, Rewlay-ngo, Itsubo, & Malakul, 2017). از سوی دیگر، به‌منظور تولید و پردازش مواد شیمیایی و نهاده‌های مختلف استفاده‌شده در فرآوری انار، مقادیر قابل‌توجهی نهاده و حامل‌های انرژی مصرف می‌شوند که به‌نوبه خود، بارهای زیست‌محیطی قابل‌توجهی را به دنبال دارند. این در حالی است که با توجه به اصول توسعه پایدار، هر فعالیت تولیدی و خدماتی باید به محدودیت‌هایی در خصوص پایداری اجتماعی، حفاظت از زیست‌بوم، شکوفایی اقتصادی، حفظ سلامت انسان و پایداری زیست‌محیطی از نظر حفظ هوا، خاک و آب پایبند باشد (El Barnossi, Moussaid, & Iraqi Housseini, 2021; Gigliotti, Schmidt-Traub, & Bastianoni, 2019). به‌عبارتی، هر فعالیت تولیدی یا خدماتی بایستی به تلفیقی از بخش‌های اثرگذار بر توسعه پایدار توجه کند. این در حالی است که اکثر فعالیت‌های اقتصادی صرفاً بر پایداری اقتصادی یعنی تلاش برای دستیابی به درآمد بالاتر متمرکز هستند. این در حالی است که چالش‌های زیست‌محیطی نه‌تنها منجر به بروز پدیده‌های جبران‌ناپذیری مانند گرمایش جهانی می‌شوند بلکه متعاقباً این پدیده‌ها هزینه‌هایی را برای جهان به دنبال دارند که بسیار قابل‌توجه هستند. درحالی‌که موضوع هزینه‌های پنهان شامل هزینه‌های ایجادشده به‌واسطه بارهای زیست‌محیطی انتشار یافته مورد توجه قرار نمی‌گیرد، این هزینه‌ها آثار جانبی منفی هر فعالیت و خدمات اقتصادی را بیان می‌کنند که در هزینه‌های خصوصی آن‌ها لحاظ نشده است، ولی در غالب آسیب به سلامت انسان و محیط‌زیست به جامعه تحمیل می‌شود (Landgraf, Zeiner, Knabl, & Corman, 2022). به‌عبارتی، اگرچه این هزینه‌ها در قیمت بازار کالاها یا خدمات مصرفی که باعث آلودگی هوا می‌شوند، محاسبه نمی‌شوند، ولی مطابق با اصول توسعه پایدار مبنی بر ضرورت مناسب بودن یک سامانه تولیدی یا خدماتی از نظر زیست‌محیطی، می‌توان با محاسبه این هزینه‌ها، اقدامات لازم را جهت کاهش پیامدهای ناشی از عوامل آلوده‌کننده انجام داد. ازاین‌رو، علاوه بر آشکار کردن عوامل مؤثر در آلودگی محیط‌زیست و عوامل نگران‌کننده برای سلامت عمومی و زیست‌بوم، ارزیابی پولی پیامدهای زیست‌محیطی در طول چرخه حیات محصول تولیدی یا خدمات امری ضروری است.

گرچه تاکنون پژوهش‌های گسترده‌ای به‌منظور ارزیابی بارهای زیست‌محیطی ناشی از تولید کالا و خدمات در بخش کشاورزی و صنایع غذایی و سایر بخش‌های تولیدی و خدماتی انجام شده است (Chen, Pinar, & Stengos, 2022; Fathollahi, Mousavi-Avval, Akram, & Rafiee, 2018; Ghasemi-Mobtaker,

مواد و روش‌ها

این پژوهش با هدف ارزیابی هزینه‌های ناشی از اثرهای زیست‌محیطی ایجادشده طی فرآیند تولید آب‌میوه انار، در سال‌های ۱۴۰۱-۱۴۰۲ انجام شده است. در این بخش روش تولید آب‌میوه انار در صنعت تولید آب‌میوه، روش تحلیل داده‌ها، نحوه ارزیابی هزینه‌های ناشی از اثرهای زیست‌محیطی بیان شده است. به‌طورکلی، برای انجام مطالعه ارزیابی هزینه‌های ناشی از اثرهای زیست‌محیطی، در مرحله

اول نیاز به ارزیابی اثرهای انتشاریافته از فرآیند تولید آب‌میوه با استفاده از رویکرد ارزیابی چرخه زندگی است و سپس هزینه‌های زیست‌محیطی مرتبط با آن اثرها بر اساس روابط و ضریب‌های تعیین‌شده برآورد می‌شود. مراحل انجام این پژوهش و ورودی‌ها، خروجی‌ها و تعاملات بین هر مرحله ارزیابی در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱- چارچوب کلی برای ارزیابی اثرهای زیست‌محیطی و هزینه‌های ناشی از آن اثرهای زیست‌محیطی طبق استاندارد ایزو ۱۴۰۴۰
Fig.1. General framework for evaluating the environmental impacts and the costs resulting from those impacts according to ISO 14040

مطالعه موردی

استان خراسان رضوی، با تولید بیش از ۹۷۰ هزار تن محصولات باغی، به‌عنوان یکی از استان‌های دارای رتبه بالای تولیدکننده این محصولات در کشور به‌شمار می‌آید (SMAJ, 2023). در همین راستا، این استان سهم قابل‌توجهی را در فرآوری محصولات باغی و میوه‌های مختلف در صنایع تبدیلی و تکمیلی دارا است. خراسان رضوی با تولید حدود ۹۰ هزار تن میوه انار در سال، از جایگاه خوبی برای فرآوری آن در کارخانه‌های صنایع تبدیلی و غذایی به‌ویژه شهرستان مشهد برخوردار است. به‌طوری‌که از بین محصولات مختلف فرآوری‌شده، رتبه تولید آب‌میوه انار از دیگر محصولات بالاتر است. در راستای این مهم، به‌منظور انجام این پژوهش، تولید آب‌میوه انار در کارخانه تولید آب‌میوه سامان بازار رضوی شهرستان مشهد مورد مطالعه قرار گرفته است.

به‌طور کلی، برای تهیه آب‌میوه انار، پس از حمل میوه انار به کارخانه، در ابتدا آن در طی فرایندهای مختلف تبدیل به کنسانتره می‌شود و سپس این کنسانتره برای تولید آب‌میوه به‌کار گرفته می‌شود. در این راستا، جزئیات مراحل تولید کنسانتره و آب‌میوه انار طبق اطلاعات شرکت سامان بازار رضوی در شکل ۲ ارائه شده است. ذکر این مهم ضروری است که بسته‌بندی آب‌میوه انار به‌صورت دوی پک^۱ ۱۶۰ گرمی است و در نهایت در بسته‌های کارتنی چهل‌تایی برای فروش بسته‌بندی می‌شوند. علاوه‌براین، در طی فرآوری انار برای تولید آب‌میوه، پسماندی باقی می‌ماند که شامل پوست و دانه انار است و این بخش از چرخه تولید خارج شده و به‌عنوان خوراک دام به فروش می‌رسد.

ارزیابی چرخه زندگی

به‌منظور ارزیابی هزینه‌های زیست‌محیطی ابتدا نیاز به محاسبه و برآورد بارهای زیست‌محیطی هر فرآیند است. رویکردهای مختلفی برای این هدف توسعه داده شده‌اند که یکی از مهم‌ترین آن‌ها بررسی اثرهای زیست‌محیطی براساس رویکرد ارزیابی چرخه زندگی است. این رویکرد با توجه به توانایی بالا در حل مسائل پیچیده و مبهم به‌عنوان یک ابزار قدرتمند برای ارزیابی و کمی کردن پیامدهای زیست‌محیطی مربوط به یک محصول، فرآیند یا خدمات از گهواره تا گور با استفاده از یک رویکرد منسجم، مطرح و توسعه داده‌شده است (ISO, 2006). مطالعه ارزیابی چرخه زندگی برای بررسی تولید آب‌میوه انار در این تحقیق بر اساس ایزو ۱۴۰۴۰ استاندارد شده و همچنین برای تجزیه و تحلیل اثرهای زیست‌محیطی مرتبط با تولید آب‌میوه از نرم‌افزار سیماپرو^۲ استفاده شده است. بر اساس این

استاندارد، ارزیابی چرخه زندگی دارای چهار مرحله الزامی شامل (۱) تعریف هدف و دامنه، (۲) تحلیل سیاهه، (۳) ارزیابی اثرهای چرخه زندگی و (۴) تفسیر و تلفیق نتایج است که برای انجام تحقیق در این مطالعه به‌کار گرفته شده‌اند.

تعریف هدف و دامنه

در این مرحله چارچوب کلی کار مشخص می‌شود که شامل: تعریف هدف از انجام این بررسی، تعیین واحدهای عملکردی (کارکردی) و مرزهای سامانه است. به‌طوری‌که هدف اولیه از این تحقیق شامل ارزیابی اثرهای زیست‌محیطی بالقوه تولید آب‌میوه انار است و هدف اصلی ارزیابی هزینه‌های ناشی از آن اثرهای زیست‌محیطی ایجادشده برای سامانه تولید آب‌میوه انار است. علاوه‌براین، از آنجایی که مطالعه موردی در این پژوهش کارخانه تولید آب‌میوه است و محصول آب‌میوه این شرکت در بسته‌های پکتی دوی پک ۱۶۰ گرمی بسته‌بندی می‌شود، واحد عملکردی در نظر گرفته‌شده، تولید آب‌میوه ۱۶۰ گرمی پکتی به‌صورت دوی پک است. بدین معنی که تمام اثرهای زیست‌محیطی و هزینه‌های ناشی از اثرهای زیست‌محیطی بر مبنای تولید ۱۶۰ گرم آب‌میوه انار بسته‌بندی‌شده محاسبه شده است. در این پژوهش مرز سامانه محدود به تولید انار در باغ، فرآوری انار در کارخانه و در نهایت بسته‌بندی آب‌میوه است (شکل ۳).

تحلیل سیاهه چرخه زندگی

داده‌های موردنیاز برای تکمیل تحلیل سیاهه جهت محاسبه پارامترهای زیست‌محیطی در این تحقیق شامل دو مجموعه داده‌های پیش‌زمینه‌ای و داده‌های پس‌زمینه‌ای در تولید محصول آب‌میوه انار است. داده‌های پیش‌زمینه‌ای شامل تمام مقادیر مواد و انرژی مصرفی، ازجمله نهاده‌های موردنیاز به‌عنوان مواد افزودنی جهت تولید آب‌میوه، برق و گاز، ماشین‌ها، نیروی انسانی و سایر و خروجی شامل محصول آب‌میوه انار است. این اطلاعات مربوط به بخش تولید آب‌میوه انار، از شرکت سامان بازار رضوی واقع در مشهد اخذ شده است. علاوه‌براین، داده‌های پس‌زمینه‌ای برای مطالعه ارزیابی چرخه زندگی، شامل داده‌های مرتبط با تولید و پردازش مواد و انرژی و انتشارات ناشی از سوختن گاز و دیگر حامل‌های انرژی است که از پایگاه داده اکواینونت^۳ (نسخه ۳،۰) موجود در نرم‌افزار سیماپرو (نسخه ۹) جمع‌آوری شده است. شایان ذکر است داده‌های اولیه مربوط به تولید میوه انار در باغ از مطالعه انجام‌شده توسط اسماعیل‌پور تروجنی و همکاران اخذ و در نرم‌افزار سیماپرو تعریف شده است (Esmailpour Troujeni, Emadi, Khojastehpour, & Vahedi, 2014). به‌منظور برآورد انتشارات ناشی از مصرف کودهای

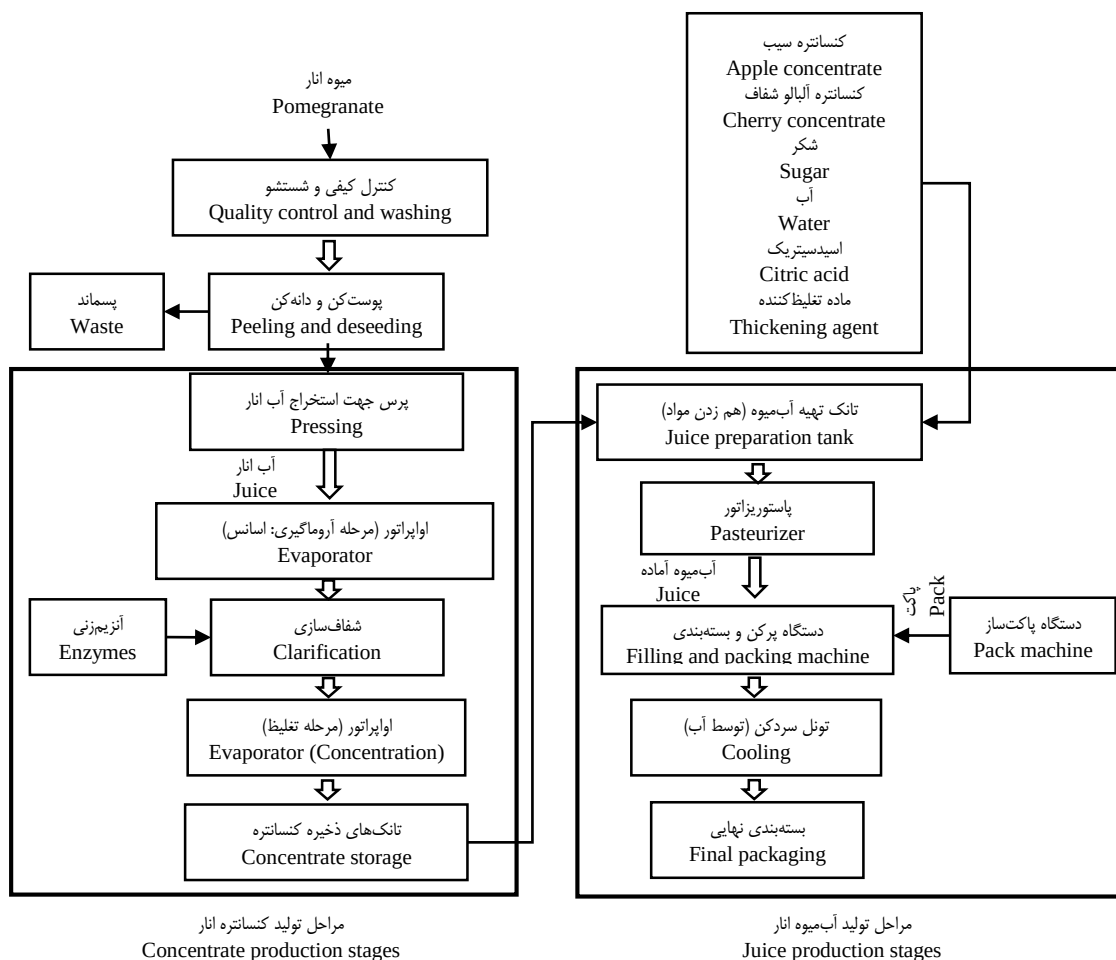
1- Doy-pack

2- SimaPro

3- Ecoinvent v3.0

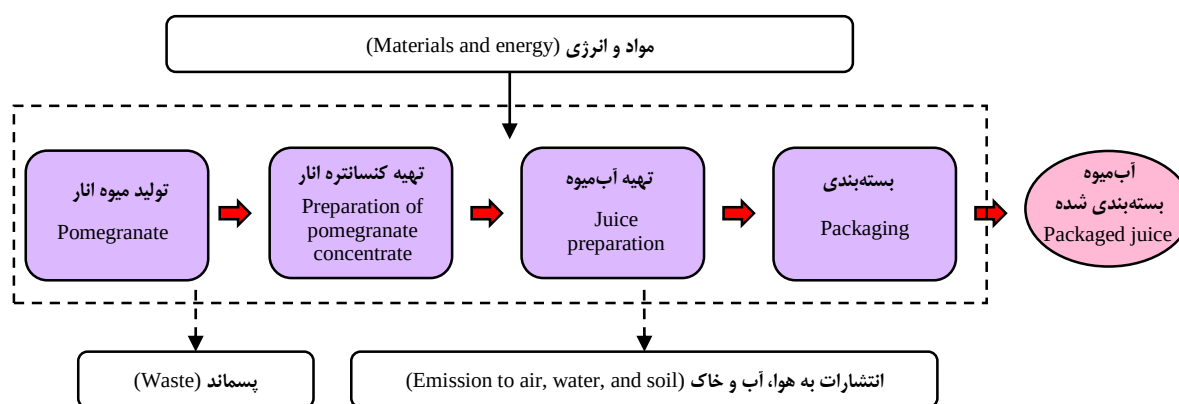
ناشی از سوختن بنزین مصرف‌شده در باغ انار از بانک اطلاعاتی موجود در نرم‌افزار سیمپرو اخذ شده است. اطلاعات تحلیل سیاهه مربوط به ورودی‌ها و محصول تولیدی مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۱ ارائه شده است.

شیمیایی و حیوانی و همچنین احتراق سوخت دیزل در ادوات کشاورزی در باغ انار، از ضرایب و روابط موجود در پژوهش‌ها و دستورالعمل‌های مختلف استفاده شده است (IPCC, 2006; Nemecek & Kagi, 2007). لازم به ذکر است تولید و انتشارات



شکل ۲- طرح‌واره مراحل فرآوری آب‌میوه انار در شرکت سامان بازار رضوی واقع در مشهد، ایران

Fig.2. A schematic flow chart of pomegranate juice processing stages in Saman Bazar Razavi Co. located in Mashhad, Iran



شکل ۳- مرز سامانه تولید آب‌میوه انار

Fig.3. System boundary of pomegranate juice production

جدول ۱- موجودی‌های ورودی و محصول مورد استفاده در این مطالعه (واحد عملکردی: یک پاکت آب‌میوه انار ۱۶۰ گرمی)
Table 1- Input inventory and product used in this study (Functional unit (FU): A pomegranate juice pack of 160 g)

تولید آب‌میوه در کارخانه			تولید انار در باغ		
Juice production in the factory			Pomegranate production in the orchard		
موارد	واحد	مقدار	موارد	واحد	مقدار
Items	Unit	Quantity	Items	Unit	Quantity
الف) ورودی‌ها A) Inputs			الف) ورودی‌ها A) Inputs		
کنسانتره سیب* Apple concentrate	g	4.11	نیروی انسانی Human labor	hr	3.64E-04
کنسانتره آلبالو* Cherry concentrate	g	0.4	بنزین Gasoline	l	1.11E-05
انار Pomegranate	g	62.68	دیزل Diesel	l	7.31E-05
خاک بنتونیت Bentonite	g	0.14	برق شبکه Electricity	kWh	2.04E-04
خاک پرلیت Perlite	g	0.05	علف‌کش Herbicide	g	1.63E-04
شکر Sugar	g	9.55	حشره‌کش Insecticide	g	5.42E-04
اسیدسیتریک منوهیدراته Citric Acid Monohydrate	g	0.5	قارچ‌کش Fungicides	g	4.33E-04
گاز مایع Liquid gas	MJ	0.02	کود نیتروژن Nitrogen fertilizer	g	2.74E-02
روغن موتور Oil	g	3.75E-06	کود فسفر Phosphorus fertilizer	g	2.56E-02
کربن دی‌اکسید Carbon dioxide	g	0.005	کود پتاسیم Potassium fertilizer	g	2.10E-02
سدیم هیدروکسید Sodium hydroxide	g	0.05	کود حیوانی Manure	g	0.76
برق شبکه Electricity	kWh	0.03	آب آبیاری Irrigation water	m ³	7.33E-05
گاز طبیعی Natural gas	MJ	1.19	ب) محصول B. Product		
آب Water	kg	1.04	انار Pomegranate	g	62.68
آنزیم Enzyme	g	0.005	پ) انتشارات C. Emissions		
پاکت آب‌میوه Juice pack	g	5	انتشارات به هوا Emissions to air		
کارتن Packaging carton	g	5	دی‌نیتروژن مونوکسید Dinitrogen monoxide	g	7.61E-04
نی آب‌میوه Straw	g	0.35	آمونیاک Ammonia	g	7.02E-03
نوارچسب Adhesive tape	g	0.12	اکسید نیتروژن Nitrogen oxides	g	1.60E-04
نیروی انسانی Human labor	hr	0.09	گلیفوسیت Glyphosate	g	4.88E-05
ب) محصول B. Product			دلتامترین Deltamethrin	g	1.63E-04
آب‌میوه انار Pomegranate juice	g	160	بنومیل Benomyl	g	1.30E-04
پ) انتشارات C. Emissions			کربن دی‌اکسید Carbon dioxide	g	0.16

انتشارات از سوختن گاز طبیعی** Emissions from natural gas burning	انتشارات به آب Emissions to water		
انتشارات از سوختن گاز مایع** Emissions from liquid gas burning	نیتрат Nitrate	g	5.66E-02
	فسفات Phosphate	g	6.64E-04
	کادمیوم Cadmium	g	7.43E-08
	مس Copper	g	6.52E-06
	زینک Zinc	g	3.74E-05
	سرب Lead	g	8.18E-07
	کروم Chromium	g	3.89E-05
	جیوه Mercury	g	1.14E-09

* در شرکت مورد مطالعه، کنسانتره سیب و آلبالو به‌عنوان افزودنی جهت ارتقای کیفیت (طعم و مزه و رنگ و غیره) در تهیه آب‌میوه انار مورد استفاده قرار می‌گیرد.

* In the studied company, apple and cherry concentrate are used as an additive to improve the quality (taste, color, etc.) in the preparation of pomegranate juice.

** انتشارات مستقیم شامل انتشارات ناشی از سوختن گاز طبیعی و گاز مایع مورد استفاده برای ماشین‌ها می‌باشد که این موارد از بانک اطلاعاتی موجود در نرم‌افزار سیماپرو اخذ شده است.

** Direct emissions include emissions from burning of natural gas and liquid gas used for machinery, which are obtained from the database available in SimaPro software.

ارزیابی اثرهای چرخه زندگی

بر اساس آنچه در استاندارد ایزو ۱۴۰۴۰ بیان شده است، ارزیابی اثرهای چرخه زندگی به‌عنوان یک مرحله مهم از مطالعه ارزیابی چرخه زندگی است. در همین راستا، برای ارزیابی اثرهای زیست‌محیطی در این پژوهش برای مدل‌سازی داده‌های محاسبه‌شده مربوط به تولید آب‌میوه انار در مرحله تحلیل سیاهه و تبدیل آن‌ها به رده‌های اثر، از نرم‌افزار سیماپرو، نسخه ۹ استفاده‌شده و برای تحلیل اثرها با توجه به اهداف مرتبط با هر بخش مورد بررسی مربوط به ارزیابی هزینه‌های اثرهای زیست‌محیطی عمل شد.

هزینه‌های ناشی از اثرهای زیست‌محیطی

تجزیه و تحلیل هزینه‌های ناشی از اثرات زیست‌محیطی، ابزار مهمی است که برای حمایت از تصمیمات در مورد مدیریت یا تنظیم منابع زیست‌محیطی استفاده می‌شود (McIntosh, & Pontius, 2017). به‌طور کلی، خسارت ناشی از بارهای زیست‌محیطی در هر مرحله از زنجیره تولید محصول/خدمت برحسب پول بیان می‌شود که به آن هزینه‌های زیست‌محیطی مجازی نیز گفته می‌شود. در پژوهش حاضر برخی از مهم‌ترین و شناخته‌شده‌ترین این هزینه‌ها شامل هزینه‌های اجتماعی نشر کربن، هزینه‌های خسارت کیفیت به هوا و هزینه‌های پیش‌گیرانه زیست‌محیطی در فرآیند تولید آب‌میوه انار بررسی و برآورد می‌شود.

هزینه اجتماعی کربن

کربن دی‌اکسید تقریباً ۷۵ درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای منتشرشده توسط انسان در جو را تشکیل که افزایش آن‌ها در جو، منجر به افزایش گرمایش جهانی می‌شود (Khezri et al., 2022). در حال حاضر، یکی از عوامل اصلی انتشار کربن دی‌اکسید، مصرف سوخت‌های فسیلی مورد استفاده در تولید انرژی است (Chen et al., 2022). به‌طور کلی، با سوزاندن سوخت‌های فسیلی، کربن دی‌اکسید در جو آزاد می‌شود که تقریباً نیمی از این گازهای اضافی توسط زمین و اقیانوس‌ها جذب می‌شود، اما باقی‌مانده در اتمسفر جمع شده و اثر گلخانه‌ای طبیعی را افزایش می‌دهد و باعث ایجاد تغییر اقلیم می‌شود (Dilling et al., 2003). در همین راستا، هزینه اجتماعی کربن، تخمینی از هزینه خسارت ناشی از هر تن کربن دی‌اکسید واردشده به جو، به دلار است. در سال‌های اخیر، دانشمندان اقلیم و اقتصاددانان زیادی به بررسی میزان هزینه اجتماعی کربن پرداخته‌اند و مدل‌هایی را جهت پیش‌بینی میزان تأثیر کربن دی‌اکسید انتشار یافته به جو برای شاخص‌هایی همچون شاخص سلامتی انسان، محصولات کشاورزی و ارزش اموال ارائه کرده‌اند. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که تجمع قابل‌ملاحظه کربن در جو به دلیل کاهش بیماری‌های مختلف و کاهش طول عمر انسان، آسیب به محصولات زراعی و بالا آمدن سطح دریاها و سایر پیامدهای افزایش دمای کره زمین منجر به هزینه‌های قابل‌ملاحظه‌ای خواهند شد (Awuni et al., 2023).

اطلاع از این هزینه برای سیاست‌گذاران، مدیران و عموم مردم همانند یک هشدار جدی، آن‌ها را به سمت تلاش گسترده‌تر برای کاهش نشر کربن سوق خواهد داد. از این‌رو، پژوهش حاضر به برآورد میزان هزینه اجتماعی ناشی از نشر کربن دی‌اکسید در طول چرخه زندگی تولید آب‌میوه انار پرداخته شده است.

برآوردهای اخیر، متوسط هزینه جهانی اجتماعی کربن را ۵۱ دلار برای هر تن کربن دی‌اکسید تخمین زده‌اند (Rennert et al., 2022). جهت برآورد هزینه اجتماعی نشر کربن در این مطالعه، ابتدا میزان کربن دی‌اکسید منتشرشده در طول چرخه زندگی تولید آب‌میوه انار، با استفاده از نرم‌افزار سیمپرو و دستورالعمل IPCC 2013 برآورد شد. لازم به ذکر است استفاده از این دستورالعمل به‌منظور برآورد کربن معادل دلایل مختلف دارد. به‌طور کلی، اجماع علمی در مورد تعیین کربن معادل با استفاده از این دستورالعمل وجود دارد که به هزاران دانشمند از سراسر جهان متکی است که در گزارش‌های آن مشارکت دارند. این دستورالعمل از طریق یک فرآیند بررسی‌شده عمل می‌کند و اطمینان می‌دهد که یافته‌ها جامع و دقیق هستند. ارزیابی کربن براساس این دستورالعمل به‌صورت شفاف و باز انجام شده و توسط کارشناسان و دولت‌ها مورد بازبینی گسترده قرار می‌گیرند تا اطمینان حاصل شود که یافته‌ها قوی و معتبر هستند. همچنین این دستورالعمل معتبرترین و به‌روزترین منابع اطلاعاتی در مورد مسائل مربوط به تغییرات آب و هوا محسوب می‌شود. از سوی دیگر، دستورالعمل ذکرشده در مقیاس جهانی با حضور کارشناسانی از کشورها و مناطق مختلف فعالیت می‌کند. این فراگیری کمک می‌کند تا اطمینان حاصل شود که طیف گسترده‌ای از دیدگاه‌ها و تجربیات در ارزیابی‌های آن در نظر گرفته شود. این دستورالعمل از سیاست‌ها یا

اقدامات خاصی حمایت نمی‌کند و تمرکز آن صرفاً بر ارائه اطلاعات عینی و مبتنی بر شواهد به تصمیم‌گیرندگان است. به عبارت بهتر، درحالی‌که این دستورالعمل به‌خاطر کمک‌هایش در علم آب و هوا، سیاست‌گذاری و آگاهی عمومی به‌طور گسترده مورد احترام و شناسایی است، باید به خاطر داشت که این روشی برای تعیین سیاست‌ها یا اقدامات خاص نیست. در عوض، به‌عنوان یک سکوی علمی عمل می‌کند که سیاست‌گذاران و مردم را در مورد وضعیت فعلی دانش تغییرات آب و هوا، خطرات بالقوه و پاسخ‌های احتمالی آگاه می‌کند (IPCC, 2006). درنهایت میزان نشر کربن دی‌اکسید به‌دست‌آمده برای سامانه موردبررسی در ضریب ۵۱ دلار برای هر تن کربن دی‌اکسید ضرب شده و هزینه نهایی نشر کربن دی‌اکسید به‌دست آمد.

هزینه خسارت به کیفیت هوا

در این پژوهش، هزینه خسارت به‌عنوان هزینه‌ای که بر اثر پیامدهای آلودگی هوا ایجاد شده است، برای سامانه تولید آب‌میوه انار موردبررسی قرار گرفته است. به‌طور کلی، این هزینه ترکیبی از هزینه آلودگی هوا توسط پنج گاز شامل اکسیدهای نیتروژن، ذرات معلق، گوگرد دی‌اکسید، ترکیبات آلی فرار و بخار آمونیاک است (Defra, 2019). بر اساس برآوردهایی که از میزان خسارت ناشی از این گازها شده است، هزینه‌های در نظر گرفته‌شده به‌ازای هر تن گاز در منابع مختلف گزارش شده است که میانگین جهانی این هزینه‌ها در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

جدول ۲- میانگین جهانی هزینه خسارت ناشی از آلودگی هوا

Table 2- Average global cost of damage caused by air pollution (Defra, 2019)

گازها Gases	میزان هزینه (دلار برای هر تن) Cost (\$ ton ⁻¹)
اکسیدهای نیتروژن Nitrogen oxide	6830
ذرات معلق Particulate matter	6911
گوگرد دی‌اکسید Sulfur dioxide	6661
ترکیبات آلی فرار Volatile organic compounds	112
بخار آمونیاک Ammonia vapor	116610

شده است. به‌منظور برآورد نشر گازها در فعالیت‌های پیش‌زمینه‌ای به دلیل گستردگی مواد و انرژی‌های مورد استفاده در تولید انار و فراوری آن به‌صورت آب‌میوه و فقدان اطلاعات جامع و قابل‌استناد، از پایگاه

برای محاسبه هزینه‌های ناشی از گازهای خسارت‌دهنده به کیفیت هوا در این پژوهش، در ابتدا میزان انتشار این گازها در تولید آب‌میوه انار در دو بخش فعالیت‌های پیش‌زمینه و پس‌زمینه برآورد

و مه دود تابستانی در نظر گرفته می‌شود (Behrooznia, Sharifi, Mousavi-Avval, Hosseinzadeh-Bandbafha, 2019). در این پژوهش نیز بررسی این هزینه‌ها برای تولید آب‌میوه انار در نظر گرفته شده‌اند. لازم به ذکر است که برای برآورد مقدار هر یک از رده‌های اثر ذکر شده به‌ازای واحد عملکردی، بر اساس روش‌های ارائه‌شده در جدول ۳ و با استفاده از نرم‌افزار سیمپرو عمل شده است. اگرچه روش‌های مختلفی برای برآورد اثرهای زیست‌محیطی ارائه شده‌اند، روش‌های مورد استفاده به منظور برآورد اثرهای زیست‌محیطی در این بخش براساس دستورالعمل ارائه شده توسط "Eco Cost Value" انتخاب شده‌اند (Ecocostsvalue, 2022).

جهت برآورد مقدار هزینه پیش‌گیرانه برای هر رده اثر به‌ازای تولید هر واحد آب‌میوه انار در این پژوهش، مقدار هر یک از رده اثرهای برآوردشده، در هزینه معادل آن‌ها که در جدول ۳ ذکر شده است، ضرب گردید. ذکر این نکته دارای اهمیت است که نتایج به‌دست‌آمده برای هر یک از هزینه‌های پیش‌گیرانه زیست‌محیطی فوق‌الذکر در رده میانی، می‌توانند در سه گروه جداگانه "رده پایانی" ترکیب شوند که این دسته‌بندی نیز در جدول ۳ ارائه شده است.

نتایج و بحث

هزینه اجتماعی نشر کربن

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، مقدار نشر کربن برای تولید آب‌میوه انار به‌ازای واحد عملکردی برابر حدود ۰/۱۲ کیلوگرم است که با ضرب این مقدار در ضریب ۰/۰۵۱ (دلار بر کیلوگرم)، میزان هزینه اجتماعی این مقدار نشر کربن برابر ۰/۰۶۲ دلار به‌ازای واحدی عملکردی محاسبه شده است. به‌طورکلی، این هزینه بیانگر خسارت ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای مانند کربن دی‌اکسید بر تغییرات آب‌وهوایی از نظر پولی است که برای تدوین سیاست‌های اقلیمی از اهمیت بالایی برخوردار است (Rennert et al., 2022). به‌طوری‌که امروزه سیاست‌های اصلی برای جلوگیری از انتشار کربن، قانون مالیات بر کربن و تجارت است (Rahil, Gammon, Brown, Udie, & Mazhar, 2019). شکل ۴ سهم تأثیر هر یک از نهاده‌های مصرفی برای تولید آب‌میوه انار بر نشر کربن را نشان می‌دهد. همان‌طور که پیداست، گاز طبیعی مصرفی در فرآیند تولید آب‌میوه بیش‌ترین سهم را در ایجاد نشر کربن به‌جود دارد که همین مورد بیش‌تر از دیگر نهاده‌های مصرفی باعث افزایش هزینه‌های اجتماعی کربن شده است. طبیعی است که با سوختن گاز طبیعی، مقدار قابل‌توجهی گازهای گلخانه‌ای و کربن دی‌اکسید آزاد می‌شود. بنابراین، برای حل این چالش نیاز به استفاده بیش‌تر از سوخت‌های تجدیدپذیر در صنعت غذا و نوشیدنی است (O'Shea, Lin, Wall, Browne, & Murphy, 2020). یافته‌های مشابهی از نقش انتشار

داده اکوانونت استفاده شده است. به‌منظور برآورد نشر گازهای ذکر شده در فعالیت‌های پس‌زمینه‌ای، انتشار اکسیدهای نیتروژن در تولید انار در باغ ناشی از مصرف کودهای شیمیایی و همچنین احتراق سوخت دیزل در ادوات کشاورزی با استفاده از روابط موجود در ادبیات برآورد شده است (IPCC, 2006; Nemecek & Kagi, 2007). همچنین نشر آمونیاک ناشی از کاربرد کودهای حاوی نیتروژن در باغ انار براساس روابط موجود محاسبه شده است (IPCC, 2006; Nemecek & Kagi, 2007). ذرات معلق، گوگرد دی‌اکسید و همچنین ترکیبات آلی فرار به‌طور مستقیم از احتراق سوخت دیزل و گاز طبیعی طی فرآوری انار وارد جو شده‌اند که براساس اطلاعات موجود در پایگاه داده مربوط به احتراق سوخت‌های فسیلی موجود در نرم‌افزار سیمپرو برآورد شده است. درنهایت مقادیر مربوط به انتشار این گازهای مورد بررسی در معادل هزینه آن ضرب شده و مورد ارزیابی قرار گرفت.

هزینه‌های پیش‌گیرانه زیست‌محیطی

هزینه‌های پیش‌گیرانه زیست‌محیطی، هزینه‌هایی هستند که باید برای کاهش آلودگی محیط‌زیست و از بین رفتن منابع ناشی از تولید هر محصول/خدمت صرف برنامه‌های زیست‌محیطی شوند تا با ظرفیت زمین مطابقت داشته باشد (Vogtlander, 2010). به‌عبارتی دیگر، هزینه‌های پیش‌گیرانه زیست‌محیطی یک شاخص بر اساس ارزیابی چرخه زندگی است و بار زیست‌محیطی را بر اساس جلوگیری یا کاهش از آن بار توصیف می‌کند (Čuček, Klemeš, & Kravanja, 2015). به‌عنوان مثال، برای نشر هر تن کربن دی‌اکسید معادل، باید در حدود ۱۳۰ دلار در زمینه‌هایی که منجر به کاهش نشر کربن دی‌اکسید می‌شود، سرمایه‌گذاری شود (Ecocostsvalue, 2022). به‌طورکلی، اثر کل اقدامات پیش‌گیری بر جامعه این است که بدون صرف هزینه‌های اضافی باعث می‌شود محیط بهتری برای زندگی انسان و سایر موجودات حاصل شود.

درحالی‌که منابع مختلف از اهمیت در نظر گرفتن هزینه‌های پیش‌گیرانه زیست‌محیطی بحث می‌کنند، اما این هزینه‌ها، هزینه‌های مجازی یا از نوع هزینه‌های غیرمستقیم هستند، زیرا هنوز در هزینه‌های واقعی زنجیره‌های تولید فعلی (هزینه‌های چرخه زندگی) ادغام نشده‌اند (Čuček et al., 2015)؛ اما با توجه به اهمیت آن، لازم است که این هزینه‌ها به‌عنوان تعهد پنهان تولید یک محصول/خدمت در نظر گرفته شود (Vogtlander, Bijma, & Brezet, 2002). جهت بررسی و محاسبه هزینه‌های پیش‌گیرانه زیست‌محیطی، هفت رده اثر شامل پتانسیل گرمایش جهانی، پتانسیل مسمومیت انسان‌ها (سرطانی و غیرسرطانی)، مسمومیت زیست‌محیطی، پتانسیل اسیدی شدن، اختناق دریاچه‌ای، ریز گردوغبار

بیبان‌های نیمه‌گرمسیری، تغییرات در محصول کشاورزی و افزایش بیماری‌ها در انسان‌ها (به دلیل افزایش عوامل بیماری‌زا مثل باکتری‌ها و ویروس‌ها) می‌شود (Staudt, Huddleston, & Kraucunas, 2008; Mora et al., 2018). بر این اساس، اگر هدف کاهش انتشار کربن دی‌اکسید باشد، در گام اول باید میزان مصرف سوخت‌های فسیلی کاهش یابد و با منابع تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی و هیدروژن و دیگر منابع انرژی زیستی جایگزین شود. علاوه‌براین، استفاده از روش مالیات بر کربن دی‌اکسید برای هر فعالیت اقتصادی، راهی برای کاهش پیامدهای ناشی از نشر کربن است.

مستقیم ناشی از احتراق گاز طبیعی به‌عنوان تأثیرگذارترین نهاده در افزایش گرمایش جهانی در طول فراوری آب‌میوه تولیدشده در ایران گزارش شده است (Khanali et al., 2020). علاوه‌براین، بر اساس شکل ۴، الکتریسیته مصرفی مبتنی بر سوخت‌های فسیلی، بعد از گاز طبیعی، دومین سهم را در نشر کربن به خود اختصاص داده است؛ بنابراین می‌توان نقش احتراق سوخت‌های فسیلی را در این موارد تأیید کرد. با احتراق سوخت‌های فسیلی، کربن دی‌اکسید در جو افزایش یافته و اثر تغییر اقلیم و گرم شدن کره زمین اتفاق می‌افتد که همین امر باعث تغییرات قابل‌توجهی در سطح دریاها، زیست‌بوم‌ها، ذوب شدن یخچال‌ها، آتش‌سوزی‌های جنگلی، گسترش احتمالی

جدول ۳- روش محاسبه هر یک از رده‌های اثر در نرم‌افزار سیماپرو و هزینه‌های پیش‌گیرانه زیست‌محیطی معادل آن‌ها*

Table 3- Calculation method of each category in SimaPro software and their equivalent environmental prevention costs*

رده پایانی End-point category	رده اثر میانی Mid-point category	واحد Unit	روش محاسبه Calculation method	هزینه (دلار) Cost (\$)
تغییر اقلیم Climate change	گرمایش جهانی Global warming	kg CO ₂ eq	IPCC 2013 GWP 100a V1.03	0.128
سلامت انسان Human health	تشکیل اکسیداسیون فتوشیمیایی (محدود تابستانی) Photochemical oxidation	kg NO eq	CML-IA baseline V3.04 / World 2000	9.99
	ریز گرد و غبار Respiratory inorganics	kg PM _{2.5} eq	IMPACT 2002+ V2.13 / IMPACT 2002+	38.5
	سمیت انسان - سرطان Human toxicity, cancer	CTUh	USEtox Recommended + Interim V1.01	4129.4
	سمیت انسان - غیرسرطانی Human toxicity, non-cancer	CTUh	USEtox Recommended + Interim V1.02	28050
	سمیت زیست‌محیطی **Ecotoxicity	CTUe	USEtox Recommended + Interim V1.02	374
زیست‌بوم Ecosystem	یوتروفیکاسیون (اختناق دریاچه‌ای) Eutrophication	kg PO ₄ eq	CML-IA baseline V3.04 / World 2000	5.17
	اسیدی شدن Acidification	kg SO ₂ eq	CML-IA baseline V3.04 / World 2000	9.63

* اطلاعات مربوط به هزینه پیش‌گیرانه زیست‌محیطی در نظر گرفته شده (۲۰۲۲)، در www.ecocostsvalue.com ارائه شده است.

* Information on estimated environmental prevention costs (2022) is provided at www.ecocostsvalue.com.

** جهت محاسبه میزان هزینه پیش‌گیرانه رده اثر سمیت زیست‌محیطی، رقم هزینه معادل در ضرب 5.54×10^{-5} ضرب می‌شود.

** In order to calculate the environmental prevention costs of the Ecotoxicity category, the equivalent cost is multiplied in the factor of 5.54×10^{-5} .

هزینه خسارت به کیفیت هوا

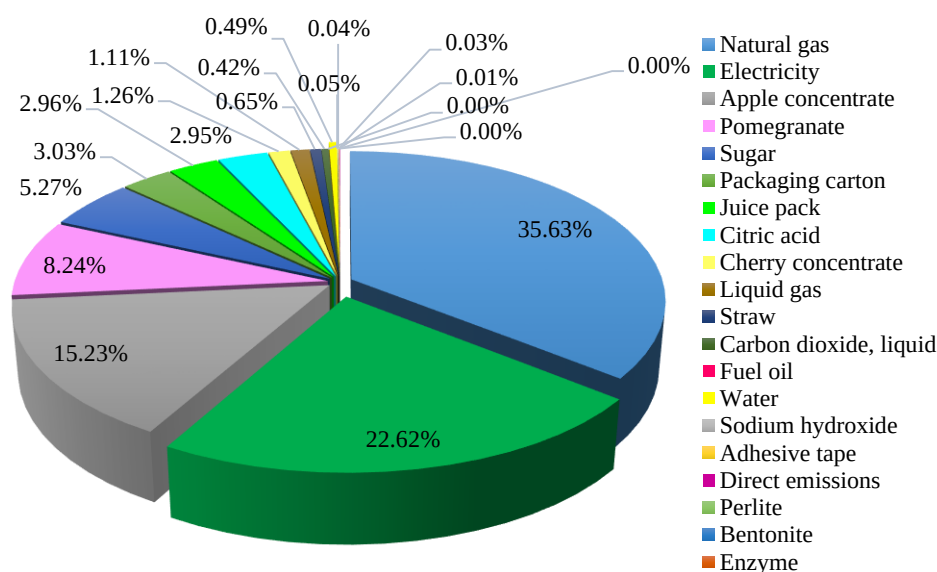
هزینه خسارت به هوا از دیگر هزینه‌های غیرمستقیم موردبررسی در این مطالعه است. بر این اساس، مقدار هرکدام از گازهای تأثیرگذار بر کیفیت هوا به‌ازای هر واحد عملکردی در نظر گرفته‌شده با استفاده از بانک اطلاعاتی اکواینونت موجود در نرم‌افزار سیماپرو و از بخش سیاهه نرم‌افزار به‌دست‌آمد و سپس میزان هزینه خسارت آلودگی هوا مورد ارزیابی قرار گرفت (جدول ۴).

با توجه به جدول ۴، نتایج ارزیابی هزینه کل خسارت آلودگی هوا نشان داد که هزینه کل خسارت آلودگی هوا ناشی از تولید ۱۶۰ گرم آب‌میوه انار برابر ۰/۰۲۱ دلار است. از این مقدار بیش‌ترین سهم در هزینه کل خسارت آلودگی هوا با اختلاف زیاد مربوط به بخار آمونیاک انتشاریافته به هوا است (شکل ۵).

بر همین اساس، با بررسی منشأ این آلودگی بخار آمونیاک که نتیجه آن در شکل ۶ ارائه شده است، می‌توان به این نتیجه رسید که

باشد، زیرا کود دامی دارای مقدار قابل‌توجهی نیتروژن است که با اضافه کردن مستقیم این کودها به خاک، منجر به تجزیه سریع نیتروژن شده و در نتیجه سبب آزاد شدن آمونیاک می‌شود (Chang, Fabian-Wheeler, Richard, & Hile, 2023). این پدیده نه تنها باعث آلودگی جدی زیست‌محیطی می‌شود و پایداری جهانی را به چالش می‌کشد، بلکه منجر به خسارات مالی قابل‌توجهی نیز می‌شود.

بیش‌ترین تأثیر بر انتشار آمونیاک را تولید انار، عمدتاً ناشی از کاربرد کودهای دامی، در باغ به همراه داشته است. پیش‌ازاین، خانعلی و همکاران در پژوهشی که برای ارزیابی زیست‌محیطی چرخه زندگی تولید سیب انجام دادند، نشان دادند که مصرف کودهای دامی تأثیر زیادی در انتشار بارهای زیستی در مرحله تولید میوه در باغ دارند (Khanali et al., 2020). میزان بالای این انتشارات می‌تواند به دلیل استفاده از کود دامی به‌صورت آزاد و بدون هیچ عمل‌آوری در باغ



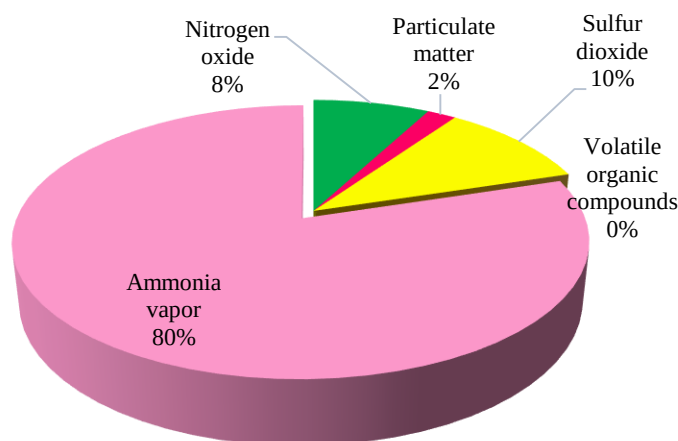
شکل ۴- سهم تأثیر هر یک از نهاده‌های ورودی در نشر کربن (واحد عملکردی: یک پاکت آب‌میوه انار ۱۶۰ گرمی)

Fig.4. Contribution of the impact of each input to carbon emission (FU: A pomegranate juice pack of 160 g)

جدول ۴- میزان گازهای آلوده‌کننده هوا و هزینه خسارت آلودگی هوا (واحد عملکردی: یک پاکت آب‌میوه انار ۱۶۰ گرمی)

Table 4- The amount of air polluting gases and the cost of air pollution damage (FU: A pomegranate juice pack of 160 g)

گازهای آلوده‌کننده Air polluting gases	مقدار (میلی‌گرم) Amount (mg)	هزینه خسارت (دلار) Damage cost (\$)
نیتروژن اکسید Nitrogen oxide	244.69	1.67E-03
ذرات معلق Particulate matter	59.92	4.14E-04
گوگرد دی‌اکسید Sulfur dioxide	338.53	2.25E-03
ترکیبات آلی فرار Volatile organic compounds	314.43	3.52E-05
بخار آمونیاک Ammonia vapor	146.84	0.017
هزینه کل خسارت آلودگی هوا Total cost of air pollution damage		0.021

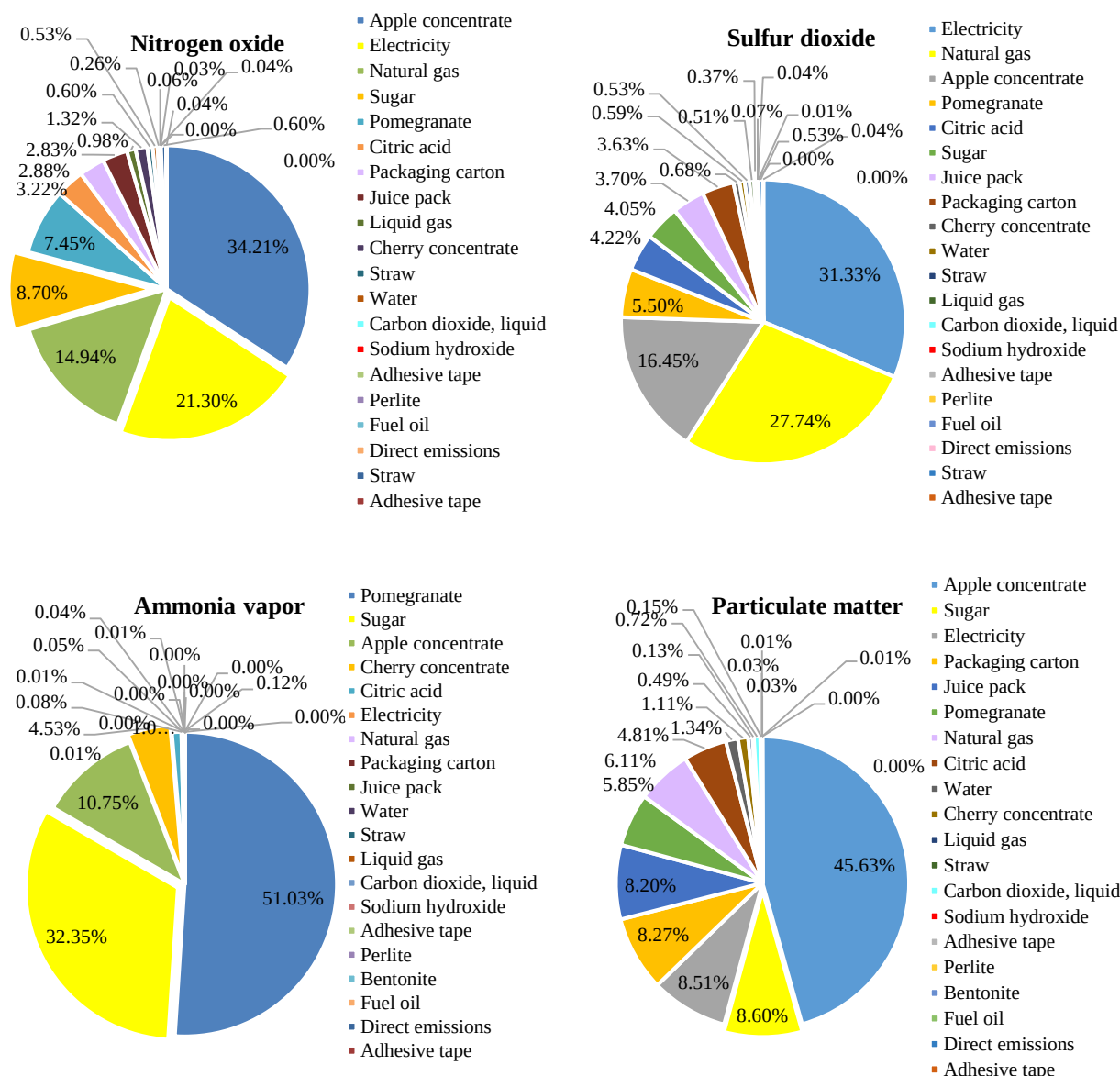


شکل ۵- سهم تأثیر هر کدام از گازها در هزینه‌های خسارت به هوا (واحد عملکردی: یک پاکت آب‌میوه انار ۱۶۰ گرمی)

Fig.5. Contribution of the effect of each gas to the cost of air damage (FU: A pomegranate juice pack of 160 g)

جایگزین گاز طبیعی حاصل از منابع فسیلی کرد (Nandi, Ahmed, & Khurpade, 2023). در این راستا، پژوهش‌های مختلف نشان دادند که بخش قابل توجهی از تقاضای گاز طبیعی صنعتی می‌تواند از طریق هضم بی‌هوازی پسماندها تأمین شود (O'Shea et al., 2020). بیوگاز تولیدشده از باقی‌مانده‌های صنایع، علاوه بر بهبود بهره‌وری منابع، مصرف سوخت‌های فسیلی را کاهش می‌دهد (de Jesús Vargas-Soplín, Prochnow, Herrmann, Tscheuschner, & Kreidenweis, 2022). به عبارتی، بیوگاز می‌تواند برای تولید برق و گرما در واحدهای تولیدی یا برای تغذیه شبکه‌های گاز محلی به‌عنوان جایگزین گاز طبیعی تولیدشده توسط صنعت سوخت فسیلی استفاده شود (Korberg, Skov, & Mathiesen, 2020). علاوه بر این، طبق نتایج به‌دست‌آمده، سهم انار مصرفی در تهیه فرمول آب‌میوه انار برای انتشار ترکیبات آلی فرار ۱۰۰٪ می‌باشد. به‌طوری‌که نشر ترکیبات آلی فرار به دلیل احتراق سوخت‌های فسیلی مصرف‌شده توسط موتورهای می‌باشد. با توجه به تحلیل سیاهه موجود، نتایج نشان داد که مصرف بنزین توسط تجهیزات کشاورزی در باغ تولید انار، عامل اصلی انتشار ترکیبات آلی فرار بوده است. ذکر این نکته دارای ارزش است که نتایج به‌دست‌آمده از بررسی گازهای آلوده‌کننده هوا، رد پای منابع فسیلی را در ایجاد این آلودگی‌ها اثبات می‌کند که همین امر باعث افزایش پیامدهای زیست‌محیطی نامطلوب و در نتیجه افزایش هزینه‌های خسارت به هوا می‌شود.

از آنجایی که نیتروژن عامل مهمی در رشد و بهره‌وری محصول است، کشاورزان به‌منظور افزایش عملکرد محصول، معمولاً مقادیر زیادی کود دامی معمولی مصرف می‌کنند که این امر نیز با توجه به موارد ذکرشده، منجر به آزاد شدن مقادیر قابل توجهی آمونیاک می‌شود (Kiba, & Krapp, 2016). از این رو، برای مقابله با معایب کودهای معمولی، کودهای آهسته‌رهش به‌عنوان یک منبع پایدار و قابل اطمینان نیتروژن به‌طور هدفمند طراحی شده و توجه جهانی را به خود جلب کرده‌اند (Wang et al., 2022). کودهای آهسته‌رهش در مقایسه با کودهای معمولی، دارای نرخ پایینی در رهاسازی مواد مغذی و تأخیر در دسترس بودن مواد مغذی نیتروژن و در نتیجه کاهش اتلاف مواد مغذی در محیط‌زیست هستند (Zhao et al., 2023). علاوه بر این، تولید شکر و مصرف آن در فرمول تهیه آب‌میوه انار از دیگر عوامل انتشار بخار آمونیاک است که سهم اثر آن در هزینه‌های زیست‌محیطی ۳۲٪ می‌باشد. بر اساس شکل ۶، تأثیرگذارترین نهاده‌ها در افزایش انتشار گازهای نیتروژن اکسید، گوگرد دی‌اکسید و ذرات معلق در تولید آب‌میوه انار، نهاده‌های کنسانتره سیب، الکتریسیته و گاز طبیعی استفاده‌شده در فرآیند است. لازم به ذکر است کنسانتره سیب، به دلیل رنگ و طعم خنثی‌ای که دارد، به‌عنوان شیرین‌کننده و کاهش میزان ترشی انار، در فرمول تهیه آب‌میوه انار مورد استفاده قرار می‌گیرد. جهت کاهش اثر گاز طبیعی و الکتریسیته مصرفی در نشر گازهای آلوده‌کننده، همان‌طور که ذکر شد، می‌توان از منابع انرژی تجدیدپذیر و کم‌کربن استفاده کرد. به‌عنوان مثال، می‌توان بیوگاز حاصل از زیست‌توده را به‌عنوان یک انرژی ارزشمند تجدیدشدنی



شکل ۶- سهم تأثیر هر کدام از نهاده‌های مصرفی در انتشار گازهای آلوده‌کننده هوا (واحد عملکردی: یک پاکت آب‌میوه انار ۱۶۰ گرمی)
Fig.6. Contribution of each of the inputs in the emission to air polluting gases (FU: A pomegranate juice pack of 160 g)

بارهای زیست‌محیطی، می‌توان به‌طور مؤثر هزینه‌های زیست‌محیطی را کاهش داد (Zhang et al., 2023).

هزینه‌های پیش‌گیرانه زیست‌محیطی

برای محاسبه هزینه پیش‌گیرانه زیست‌محیطی تولید آب‌میوه انار به‌ازای واحد عملکردی، هفت رده اثر ذکرشده در فوق مورد ارزیابی قرار گرفتند و نتایج مربوط به ارزیابی هر کدام از رده‌های اثر و هزینه‌های پیش‌گیرانه زیست‌محیطی مربوط به آن‌ها در جدول ۵ ارائه شده است.

به‌طور کلی، یکی از تأثیرگذارترین منابع بر ایجاد آلودگی هوا مصرف سوخت‌های فسیلی در طی فرآیند تولید محصول است که در مراحل و به شیوه‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. همین امر منجر به افزایش هزینه‌های ناشی از اثرهای زیست‌محیطی تولید می‌شود. این درحالی است که نقش آلودگی هوا در آسیب به سلامتی انسان و زیست‌بوم به‌قدری زیاد است که در حال حاضر یکی از هر هشت مورد مرگ در سراسر جهان محسوب می‌شود (Li, Hussain, Sobri, & Md Said, 2021). اجرای اقدامات معقول از جمله کنترل انتشار آلاینده‌های اسیدی و ترویج انرژی پاک برای کاهش نشر

جدول ۵- مقادیر رده‌های اثر مورد ارزیابی و هزینه‌های پیش‌گیرانه زیست‌محیطی (واحد عملکردی: یک پاکت آب‌میوه انار ۱۶۰ گرمی)

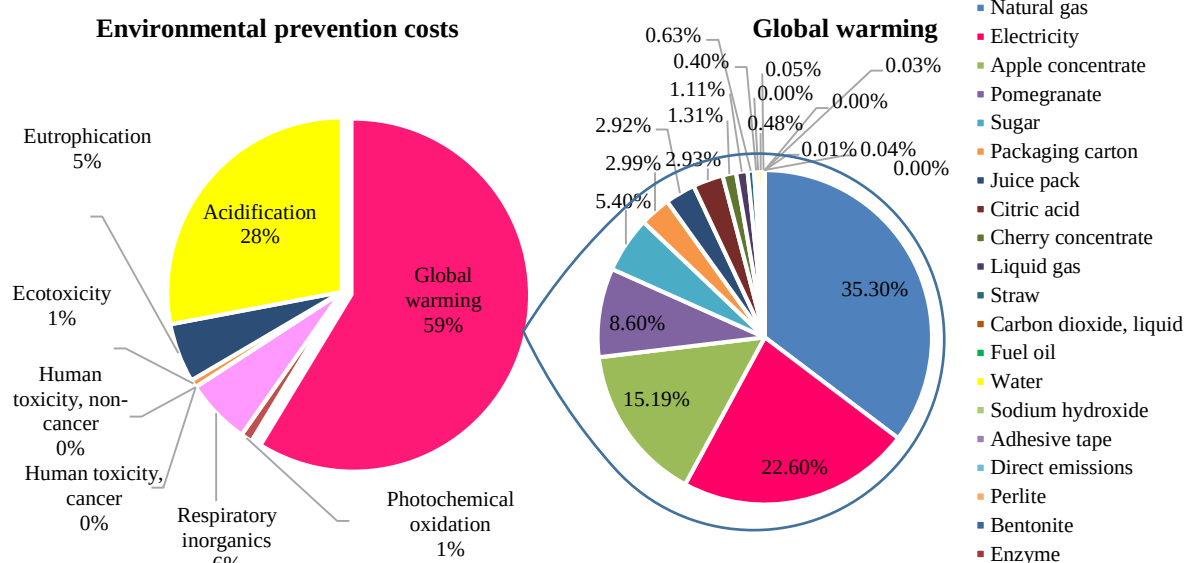
Table 5- Values of impact categories and environmental prevention costs (FU: A pomegranate juice pack of 160 g)

رده اثر میانی Mid-point category	واحد Unit	مقدار Quantity	هزینه پیش‌گیرانه (دلار) Prevention costs (\$)
گرمایش جهانی Global warming	kg CO ₂ eq	0.12	0.0154
تشکیل اکسیداسیون فتوشیمیایی (مه دود تابستانی) Photochemical oxidation	kg NO eq	2.84E-05	2.83E-04
ریز گردوغبار Respiratory inorganics	kg PM _{2.5} eq	4.15E-05	1.60E-03
سمیت انسان - سرطان Human toxicity, cancer	CTUh	7.81E-12	3.22E-08
سمیت انسان - غیر سرطانی Human toxicity, non-cancer	CTUh	8.12E-11	2.28E-06
سمیت زیست‌محیطی Ecotoxicity	CTUe	0.09	1.88E-04
یوتروفیکاسیون (اختناق دریاچه‌ای) Eutrophication	kg PO ₄ eq	2.79E-04	1.44E-03
اسیدی شدن Acidification	kg SO ₂ eq	7.64E-04	7.35E-03

آب‌میوه کرد که این روش در حال حاضر یکی از مورد توجه‌ترین گزینه برای جایگزین شدن به‌جای سوخت‌های فسیلی است (Nandi *et al.*, 2023).

بنابر شکل ۷، سهم هزینه‌های پیش‌گیرانه زیست‌محیطی برای رده اثر اسیدی‌شدن به‌ازای هر واحد عملکردی، ۲۸٪ از هزینه کل پیش‌گیرانه را شامل می‌شود. این رده اثر که بر اساس کیلوگرم گوگرد دی‌اکسید معادل محاسبه می‌شود، میزان هزینه‌ای که به‌عنوان هزینه پیش‌گیرانه برآورد شده باید در راستای برنامه‌هایی صورت گیرد که منجر به کاهش آن گازهای آلوده‌کننده شود درحالی‌که گوگرد دی‌اکسید به دلیل سمیت آن شناخته شده است، اقدامات متقابل مؤثر متعددی برای کاهش خطرات آن برای محیط‌زیست ابداع شده است. به‌طور خاص، یکی از روش‌های پیشنهادشده، روش کاهش کاتالیزوری، به دلیل پتانسیل آن در تبدیل گوگرد دی‌اکسید به محصول بی‌ضرر و درعین‌حال قابل‌فروش مانند گوگرد، است که این کار به‌نوبه خود از محیط‌زیست در برابر آلودگی آن گاز سمی محافظت می‌کند (Ng, Lai, Jamaludin, & Mohamed, 2022). علاوه‌براین، نهاده‌های مصرفی انار، الکتریسیته، کنسانتره سیب، گاز و شکر در فرآیند تولید آب‌میوه انار به‌ترتیب بیش‌ترین سهم را بر رده اثر اسیدی‌شدن دارند، این بدان معنی است که اکثر هزینه‌های پیش‌گیرانه محاسبه‌شده برای این رده اثر، باید جهت کاهش خسارت ناشی از این موارد صرف شود.

بنابر نتایج درج‌شده در جدول ۵، میزان هزینه‌های پیش‌گیرانه‌ای که باید برای هر کدام از رده‌های اثر پرداخت شود بین $2/31 \times 10^{-6}$ دلار (برای جمع سمیت انسان) و $1/54 \times 10^{-2}$ دلار (برای گرمایش جهانی) متغیر است. به‌طوری‌که بیش‌ترین سهم در هزینه پیش‌گیرانه زیست‌محیطی برای تولید آب‌میوه انار مربوط به رده اثر گرمایش جهانی با درصد سهم ۵۹٪ است (شکل ۷). این بدان معنی است که بیش‌ترین هزینه پیش‌گیرانه باید صرف استفاده از روش‌هایی شود که منجر به کاهش آلاینده‌گی ناشی از کربن دی‌اکسید می‌شود. علاوه‌براین، همان‌طور که در شکل ۷ قابل‌مشاهده است، منشأ اصلی ایجاد کربن دی‌اکسید و درنتیجه گرمایش جهانی، مصرف گاز و الکتریسیته در فرآیند تولید آب‌میوه انار است؛ بنابراین، بایستی مقدار معینی هزینه صرف اقداماتی شود که باعث کنترل و خنثی‌سازی آلاینده‌گی‌های ایجادشده می‌شود. به عنوان مثال، در مناطقی که امکان رشد درختان مقاوم به خشکی و کم‌نیاز به آب وجود دارد، می‌توان بخشی از این هزینه‌ها را صرف درخت‌کاری در جهت خنثی کردن میزان کربن دی‌اکسید تولیدشده در اثر تولید آب‌میوه کرد. در مثالی دیگر، با توجه به موقعیت خوب کشور ایران از نظر دریافت انرژی خورشیدی، این هزینه‌ها می‌تواند صرف احداث نیروگاه خورشیدی و پنل‌های خورشیدی در جهت تولید انرژی تجدیدپذیر و در نتیجه کاهش کربن دی‌اکسید شود. علاوه‌براین، جهت کاهش تأثیر کربن دی‌اکسید تولیدشده می‌توان هزینه‌ای را صرف فناوری‌های جدید در جهت تولید برق یا بیوگاز از پسماند باقی‌مانده پس از فرآیند تولید



شکل ۷- سهم هر یک از رده‌های اثر در هزینه پیش‌گیرانه زیست‌محیطی تولید آب‌میوه انار و عوامل مؤثر بر گرمایش جهانی (واحد عملکردی: یک پاکت آب‌میوه انار ۱۶۰ گرمی)

Fig.7. Contribution of each of the impact categories to the environmental prevention costs of pomegranate juice production and the factors affecting the global warming (FU: A pomegranate juice pack of 160 g)

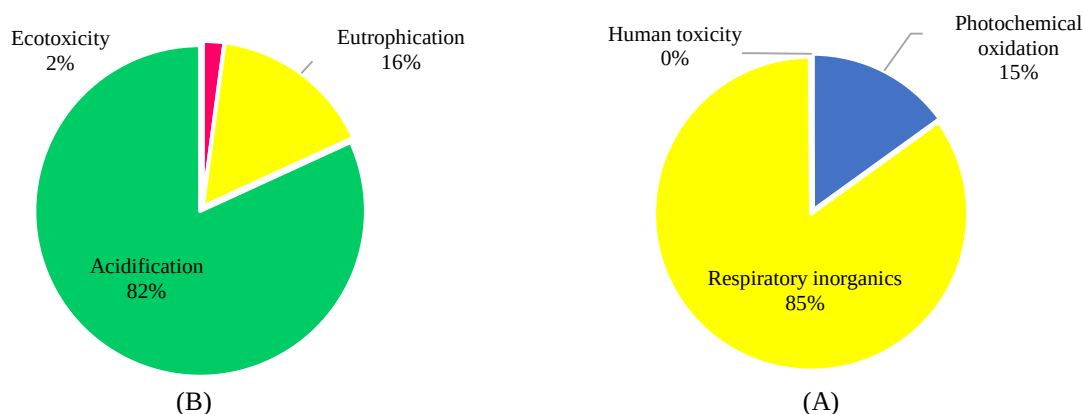
سمیت زیست‌محیطی با درصد ۸۲٪ می‌باشد (شکل ۸، ب). این هزینه باید صرف خدماتی شود که منجر به حفاظت از زیست‌بوم در برابر بحران‌ها و فجایع اقلیمی بیش‌تر می‌شوند. این در حالی است که با صرف هزینه‌های پیش‌گیرانه این‌چنین، این امکان پیش می‌آید که زیست‌بوم در شرایط کنونی باقی مانده و از آلودگی‌های نابودگر در امان بماند. ولی جدای از دو رده اثر ذکرشده، بیش‌ترین هزینه‌های پیش‌گیرانه باید صرف جلوگیری از ایجاد گرمایش جهانی و در نتیجه تغییر اقلیم شود. به‌طوری‌که میزان این هزینه با استفاده از رویکرد چرخه زندگی برابر حدود ۰/۰۱۵ دلار تخمین زده شده است و بیش‌ترین سهم هزینه پیش‌گیرانه (حدود ۶۰٪) را به خود اختصاص داده است. این امر نشان می‌دهد که تولید آب‌میوه انار، از بین رده‌های اثر پایانی، بیش‌ترین تأثیر را بر گرم شدن کره زمین دارد و هزینه‌های صرف‌شده اغلب باید در راستای تقلیل و جلوگیری از نشر کربن دی‌اکسید به جو باشد. به‌طور مشابه، در تحقیقی که برای ارزیابی هزینه‌های ناشی از اثرهای زیست‌محیطی انجام شده است، از دسته‌های اثر ارزیابی‌شده، رده اثر گرمایش جهانی بیش‌ترین سهم را در هزینه‌های زیست‌محیطی دارا بود (Landgraf et al., 2022).

همان‌طور که ذکر شد هرکدام از رده‌های اثر میانی در نظر گرفته‌شده برای برآورد هزینه‌های پیش‌گیرانه را می‌توان در سه رده پایانی تغییر اقلیم، سلامتی انسان و زیست‌بوم دسته‌بندی کرد. با توجه به جدول ۶، میزان هزینه‌های پیش‌گیرانه زیست‌محیطی با استفاده از رویکرد چرخه زندگی برای سلامت انسان برابر ۰/۰۰۲ دلار به‌ازای تولید ۱۶۰ گرم آب‌میوه انار است. این در حالی است که هزینه پیش‌گیرانه رده اثر ریز گردوغبار بیش‌ترین سهم را در پیش‌گیری از خسارت به سلامتی انسان دارد (شکل ۸، الف). با بررسی نتایج به‌دست‌آمده، بیش‌ترین سهم تأثیر در افزایش ریز گردوغبار را به‌ترتیب نهاده‌های کنسانتره سیب، گاز و الکتریسیته مصرفی با سهم ۳۴٪، ۲۸٪ و ۱۶٪ در فرآیند تولید آب‌میوه انار دارند؛ بنابراین می‌توان گفت که بیش‌تر هزینه‌های پیش‌گیری در این رده اثر باید برای این موارد صرف شود. به‌طوری‌که این هزینه‌ها بایستی صرف خدمات مرتبط با سلامت انسان و همچنین روش‌هایی شود که منجر به کاهش ذرات گردوغبار تولیدشده در اثر تولید آب‌میوه انار می‌شود و در نهایت از آسیب به سلامت انسان جلوگیری شود. همچنین میزان هزینه پیش‌گیرانه محاسبه‌شده برای زیست‌بوم برابر ۰/۰۰۹ دلار به‌ازای هر واحد عملکردی است که از این مقدار بیش‌ترین سهم متعلق به

جدول ۶- هزینه‌های پیش‌گیرانه زیست‌محیطی برای رده‌های اثر پایانی (واحد عملکردی: یک پاکت آب‌میوه انار ۱۶۰ گرمی)

Table 6- Environmental prevention costs of end-point categories (FU: A pomegranate juice pack of 160 g)

رده پایانی End-point category	هزینه پیش‌گیرانه زیست‌محیطی (دلار) Environmental prevention costs (\$)
تغییر اقلیم Climate change	0.002
سلامت انسان Human health	0.009
زیست‌بوم Ecosystem	0.015
جمع کل	0.026



شکل ۸- سهم هر یک از رده‌های اثر در هزینه پیش‌گیرانه زیست‌محیطی برای سلامتی انسان (الف) و هزینه پیش‌گیرانه زیست‌محیطی برای زیست‌بوم (ب)، (واحد عملکردی: یک پاکت آب‌میوه انار ۱۶۰ گرمی)

Fig.8. Contribution of each impact category to the environmental prevention cost for human health (A), and the environmental prevention cost for the ecosystem (B), (FU: A pomegranate juice pack of 160 g)

پیش‌گیری از ایجاد این آلاینده‌ها استفاده از منابع جایگزین است. در این میان، یکی از گزینه‌های پیشنهادی می‌تواند استفاده از سوخت‌های زیستی به‌عنوان جایگزینی برای منابع انرژی متعارف فسیلی باشد. بدان معنی که به‌جای استفاده از منابع فسیلی و مشتقات نفتی جهت تولید انرژی، از زیست‌توده و پسماند باقی‌مانده از کشاورزی و صنایع غذایی استفاده شود (Hosseinzadeh-Bandbafha, Aghbashlo, & Tabatabaei, 2021). در این‌جا، اضافه کردن این نکته دارای ارزش است که مقدار قابل‌توجهی پسماند انار، شامل پوست و دانه، پس از فرآوری آب‌میوه باقی می‌ماند و هیچ استفاده‌ای از آن در کارخانه‌های تولید آب‌میوه نمی‌شود و این مواد صرفاً جهت دفع از محیط کارخانه، به دام‌پروری‌ها ارسال شده یا در برخی موارد در محیط بیرون از کارخانه رها می‌شود. این در حالی است که این ضایعات دارای محتوای ارزشمندی است که می‌تواند جهت تولید انواع محصولات زیستی با ارزش افزوده بالا و انرژی زیستی استفاده شود. با این کار نه تنها از دفع این پسماند جلوگیری

در نهایت میزان هزینه‌های پیش‌گیرانه زیست‌محیطی کل برای تولید آب‌میوه انار با استفاده از رویکرد چرخه زندگی طبق جدول ۶ برابر ۰/۰۲۶ دلار تخمین زده شد. این هزینه‌ها باید در راستای خنثی کردن آلودگی زیست‌محیطی ایجادشده در اثر تولید آب‌میوه انار در منطقه صرف شود. با این‌حال، این که این هزینه‌های برآوردشده در چه قسمت و چه زمینه‌ای باید صرف شود، جای بحث دارد. به‌عنوان مثال، در تحقیقی که به‌منظور تعیین هزینه‌های زیست‌محیطی پروژه‌های معدنی انجام شده است، نتایج حاکی از آن بود که بیش‌تر هزینه‌ها باید برای جلوگیری، کاهش و جبران اثرهای زیست‌محیطی ناشی از فعالیت‌های روباز در معدن صرف شود (Badakhshan et al., 2023).

همان‌طور که ذکر شد، استفاده از سوخت‌های فسیلی جهت تأمین انرژی برای فرآیند تولید آب‌میوه و یا در دیگر بخش‌ها مانند استفاده به‌عنوان سوخت تجهیزات و ماشین‌ها بیش‌ترین سهم را در ایجاد آلودگی به محیط‌زیست دارند. یکی از کاربردی‌ترین روش‌ها برای

مزایای استفاده از رویکرد چرخه زندگی و ارزیابی کمی اثرهای زیست‌محیطی و در نتیجه هزینه‌های ناشی از این اثرها را در طول توسعه محصول نشان می‌دهد. با بررسی مهم‌ترین عوامل مؤثر بر ایجاد بارهای زیست‌محیطی، نتایج نشان داد که تأثیرگذارترین نهاده‌ها، گاز طبیعی و الکتریسیته مصرفی در تولید آب‌میوه بودند و در نتیجه، میزان هزینه‌های ناشی از بارهای این نهاده‌ها بیش‌ترین سهم را در هزینه‌های تحمیل‌شده به جامعه داشتند. در این راستا، این مطالعه پیشنهاد داد که با صرف هزینه‌هایی برای زیرساخت‌های فناوری‌های جدید جهت تولید سوخت‌های زیستی از پسماند، می‌توان مقدار آلودگی‌های ایجادشده در اثر مصرف سوخت‌های متداول را کاهش داد و درنهایت قدم بزرگی در جهت حرکت به سمت توسعه پایدار برداشت.

سپاسگزاری

نویسندگان از دانشگاه فردوسی مشهد بابت تأمین مالی (کد طرح: ۵۴۱۸۹) این پژوهش تشکر می‌کنند.

مشارکت نویسندگان

لیلا بهروزنیا: جمع‌آوری داده‌ها، روش‌شناسی، پردازش داده‌ها، نرم‌افزار و استخراج و تهیه متن اولیه
مهدی خجسته‌پور: نظارت و مدیریت، اعتبارسنجی و ویرایش متن
هما حسین‌زاده بندبافها: نظارت و مدیریت، اعتبارسنجی و ویرایش متن

می‌شود، بلکه مزایای اقتصادی و همین‌طور زیست‌محیطی از نظر جلوگیری از ایجاد بارهای آلوده‌کننده را نیز به همراه داشت. علاوه‌براین، با توجه به این‌که یکی مهم‌ترین هدف سازمان محیط‌زیست جهانی کاهش نشر کربن و درنتیجه رسیدن به سامانه پایدار از نظر زیست‌محیطی است، با تولید سوخت‌های زیستی از پسماند، می‌توان مقدار آلودگی‌های ایجادشده در اثر مصرف سوخت‌های متداول را کاهش داد و درنهایت قدم بزرگی در جهت حرکت به سمت اقتصاد زیست‌چرخشی و توسعه پایدار برداشت. بنابراین، هزینه‌های پیش‌گیرانه زیست‌محیطی می‌تواند برای زیرساخت‌های فناوری‌های جدید جهت تولید انرژی زیستی و دیگر محصولات زیستی دارای ارزش‌افزوده از پسماند باقی‌مانده از فرآیند تولید آب‌میوه استفاده شود. شایان ذکر است که در محاسبه میزان اثرهای زیست‌محیطی با استفاده از نرم‌افزار سیمپرو، با توجه به استفاده از داده‌های پایگاه داده اکواینونت و محدودیت در دسترسی به داده‌های کاملاً واقعی، نتایج ممکن است کمی با عدم قطعیت همراه باشد.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، میزان هزینه‌های ناشی از اثرهای زیست‌محیطی ایجادشده شامل هزینه‌های نشر کربن، هزینه‌های خسارت آلودگی هوا و هزینه‌های پیش‌گیرانه، در اثر تولید آب‌میوه انار در شهر مشهد و در شرکت سامان بازار رضوی به‌ازای واحد عملکردی آب‌میوه پاکتی ۱۶۰ گرمی مورد بررسی قرار گرفت. این مطالعه

References

- Awuni, S., Adarkwah, F., Ofori, B. D., Purwestri, R. C., Huertas Bernal, D. C., & Hajek, M. (2023). Managing the challenges of climate change mitigation and adaptation strategies in Ghana. *Heliyon*, 9(5), e15491. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15491>
- Badakhshan, N., Shahriar, K., Afraei, S., & Bakhtavar, E. (2023). Determining the environmental costs of mining projects: A comprehensive quantitative assessment. *Resources Policy*, 82, 103561. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103561>
- Behrooznia, L., Sharifi, M., Mousavi-Avval, S. H., Hosseinzadeh-Bandbafha, H. (2019). Estimation of energy consumption and environmental ECO-costs of compost production from municipal solid waste in Rasht. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 50(1), 43-55. <https://doi.org/10.1001.1.20084803.1398.50.1.4.6>
- Chang, F., Fabian-Wheeler, E., Richard, T. L., & Hile, M. (2023). Compaction effects on greenhouse gas and ammonia emissions from solid dairy manure. *Journal of Environmental Management*, 332, 117399. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117399>
- Chen, C., Pinar, M., & Stengos, T. (2022). Renewable energy and CO₂ emissions: New evidence with the panel threshold model. *Renewable Energy*, 194, 117-128. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.095>
- Čuček, L., Klemeš, J. J., & Kravanja, Z. (2015). Chapter 5- Overview of environmental footprints. In J. J. Klemeš (Ed.), *Assessing and Measuring Environmental Impact and Sustainability* (pp. 131-193). Oxford: Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-799968-5.00005-1>
- de Jesús Vargas-Soplín, A., Prochnow, A., Herrmann, C., Tscheuschner, B., & Kreidenweis, U. (2022). The potential for biogas production from autumn tree leaves to supply energy and reduce greenhouse gas emissions- A case study from the city of Berlin. *Resources, Conservation and Recycling*, 187, 106598. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106598>
- Defra. (2019). Air quality damage cost guidance. Department of Environment, Food and Rural Affairs (Defra), London.

9. Dilling, L., Doney, S. C., Edmonds, J., Gurney, K. R., Harriss, R., Schimel, D., Stephens, B., & Stokes, G. (2003). The role of carbon cycle observations and knowledge in carbon management. *Annual Review of Environment and Resources*, 28(1), 521-558. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.28.011503.163443>
10. Ecocostsvalue. (2022). www.ecocostsvalue.com
11. El Barnossi, A., Moussaid, F., & Iraqi Housseini, A. (2021). Tangerine, banana and pomegranate peels valorisation for sustainable environment: A review. *Biotechnology Reports*, 29, e00574. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00574>
12. Esmaeilpour Troujeni, M., Emadi, B., Khojastehpour, & M., Vahedi, A. (2014). *Analysis of energy flow in pomegranate fruit production- case study: Behshahr city*. The first national conference on new and clean energy management. Hamadan. <https://civilica.com/doc/307957>
13. Fathollahi, H., Mousavi-Avval, S. H., Akram, A., & Rafiee, S. (2018). Comparative energy, economic and environmental analyses of forage production systems for dairy farming. *Journal of Cleaner Production*, 182, 852-862. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.073>
14. Ghasemi-Mobtaker, H., Kaab, A., & Rafiee, S. (2020). Application of life cycle analysis to assess environmental sustainability of wheat cultivation in the west of Iran. *Energy*, 193, 116768. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116768>
15. Gigliotti, M., Schmidt-Traub, G., & Bastianoni, S. (2019). The Sustainable Development Goals. In B. Fath (Ed.), *Encyclopedia of Ecology* (Second Edition) (Second Edi, pp. 426-431). Oxford: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10986-8>
16. Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Aghbashlo, M., & Tabatabaei, M. (2021). Life cycle assessment of bioenergy product systems: a critical review. *E-Prime*, 100015. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2021.100015>
17. IPCC. (2006). IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Kanagawa, Japan.
18. ISO. (2006). 14040 International standard. Environmental Management–Life Cycle Assessment–Principles and Framework, International Organisation for Standardization, Geneva, Switzerland.
19. Khanali, M., Kokei, D., Aghbashlo, M., Nasab, F. K., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., & Tabatabaei, M. (2020). Energy flow modeling and life cycle assessment of apple juice production: Recommendations for renewable energies implementation and climate change mitigation. *Journal of Cleaner Production*, 246, 118997. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118997>
20. Khezri, M., Heshmati, A., & Khodaei, M. (2022). Environmental implications of economic complexity and its role in determining how renewable energies affect CO₂ emissions. *Applied Energy*, 306, 117948. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117948>
21. Kiba, T., & Krapp, A. (2016). Plant Nitrogen Acquisition Under Low Availability: Regulation of Uptake and Root Architecture. *Plant and Cell Physiology*, 57(4), 707-714. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcw052>
22. Korberg, A. D., Skov, I. R., & Mathiesen, B. V. (2020). The role of biogas and biogas-derived fuels in a 100% renewable energy system in Denmark. *Energy*, 199, 117426. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117426>
23. Landgraf, M., Zeiner, M., Knabl, D., & Corman, F. (2022). Environmental impacts and associated costs of railway turnouts based on Austrian data. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 103, 103168. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103168>
24. Lavoro, A., Falzone, L., Gattuso, G., Salemi, R., Cultrera, G., Leone Marco, G., Scandurra, G., Candido, S., & Libra, M. (2021). Pomegranate: A promising avenue against the most common chronic diseases and their associated risk factors (Review). *International Journal of Functional Nutrition*, 2(2), 6. <https://doi.org/10.3892/ijfn.2021.16>
25. Li, H., Xie, S., Zhang, X., Xia, Y., Zhang, Y., & Wang, L. (2021). Mid-pregnancy consumption of fruit, vegetable and fruit juice and the risk of gestational diabetes mellitus: A correlation study. *Clinical Nutrition ESPEN*, 46, 505-509. <https://doi.org/10.1016/j.clnesp.2021.08.033>
26. Li, X., Hussain, S. A., Sobri, S., & Md Said, M. S. (2021). Overviewing the air quality models on air pollution in Sichuan Basin, China. *Chemosphere*, 271, 129502. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129502>
27. Longo, S., Mistretta, M., Guarino, F., & Cellura, M. (2017). Life Cycle Assessment of organic and conventional apple supply chains in the North of Italy. *Journal of Cleaner Production*, 140, 654-663. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.049>
28. McIntosh, A., & Pontius, J. (2017). Chapter 1- Tools and Skills. In A. McIntosh & J. Pontius (Eds.), *Science and the Global Environment* (pp. 1–112). Boston: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801712-8.00001-9>
29. Melgarejo, P., Núñez-Gómez, D., Legua, P., Martínez-Nicolás, J. J., & Almansa, M. S. (2020). Pomegranate (*Punica granatum* L.) a dry pericarp fruit with fleshy seeds. *Trends in Food Science & Technology*, 102, 232-236. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.02.014>
30. Mora, C., Spirandelli, D., Franklin, E. C., Lynham, J., Kantar, M. B., Miles, W., Smith, C. Z., Freel, K., Moy, J., Louis, L. V., Barba, E. W., Bettinger, K., Frazier, A. G., Colburn IX, J. F., Hanasaki, N., Hawkins, E., Hirabayashi, Y., Knorr, W., Little, C. M., ..., & Hunter, C. L. (2018). Broad threat to humanity from cumulative climate

- hazards intensified by greenhouse gas emissions. *Nature Climate Change*, 8(12), 1062-1071. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0315-6>
31. Morales-Mora, M. A., Rosa-Dominguez, E., Suppen-Reynaga, N., & Martinez-Delgadillo, S. A. (2012). Environmental and eco-costs life cycle assessment of an acrylonitrile process by capacity enlargement in Mexico. *Process Safety and Environmental Protection*, 90(1), 27-37. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2011.10.002>
32. Nandi, S., Ahmed, S., & Khurpade, P. D. (2023). Chapter 5- Anaerobic digestion of fruit and vegetable waste for biogas and other biofuels. In S. A. Mandavgane, I. Chakravarty, & A. K. Jaiswal (Eds.), *Fruit and Vegetable Waste Utilization and Sustainability* (pp. 101–119). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91743-8.00007-1>
33. Nemecek, T., & Kagi, T. (2007). Life cycle inventories of agricultural production systems. Final report ecoinvent v2. 0 No. 15. Swiss center for life cycle inventories, Dübendorf, Switzerland.
34. Ng, K. H., Lai, S. Y., Jamaludin, N. F. M., & Mohamed, A. R. (2022). A review on dry-based and wet-based catalytic sulphur dioxide (SO₂) reduction technologies. *Journal of Hazardous Materials*, 423, 127061. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127061>
35. O'Shea, R., Lin, R., Wall, D. M., Browne, J. D., & Murphy, J. D. (2020). Using biogas to reduce natural gas consumption and greenhouse gas emissions at a large distillery. *Applied Energy*, 279, 115812. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115812>
36. Papong, S., Rewlay-ngoen, C., Itsubo, N., & Malakul, P. (2017). Environmental life cycle assessment and social impacts of bioethanol production in Thailand. *Journal of Cleaner Production*, 157, 254-266. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.122>
37. Pinto, E. P., Perin, E. C., Schott, I. B., Düsman, E., da Silva Rodrigues, R., Lucchetta, L., Manfroi, V., & Rombaldi, C. V. (2022). Phenolic compounds are dependent on cultivation conditions in face of UV-C radiation in 'Concord' grape juices (*Vitis labrusca*). *LWT*, 154, 112681. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112681>
38. Rahil, A., Gammon, R., Brown, N., Udie, J., & Mazhar, M. U. (2019). Potential economic benefits of carbon dioxide (CO₂) reduction due to renewable energy and electrolytic hydrogen fuel deployment under current and long term forecasting of the Social Carbon Cost (SCC). *Energy Reports*, 5, 602-618. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.05.003>
39. Rennert, K., Erickson, F., Prest, B. C., Rennels, L., Newell, R. G., Pizer, W., Kingdon, C., Wingenroth, J., Cooke, R., Parthum, B., Smith, D., Cromar, K., Diaz, D., Moore, F. C., Müller, U. K., Plevin, R. J., Raftery, A. E., Ševčíková, H., Sheets, H., ... & Anthoff, D. (2022). Comprehensive evidence implies a higher social cost of CO₂. *Nature*, 610(7933), 687-692. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05224-9>
40. Singh, N. V., Parashuram, S., Sharma, J., Potlannagari, R. S., Karuppannan, D. B., Pal, R. K., Patil, P., Mundewadikar, D. M., Sangnure, V. R., Parvati Sai Arun, P. V., Mutha, N. V. R., Kumar, B., Tripathi, A., Peddamma, S. K., Kothandaraman, H., Yellaboina, S., Baghel, D. S., & Reddy, U. K. (2020). Comparative transcriptome profiling of pomegranate genotypes having resistance and susceptible reaction to *Xanthomonas axonopodis* pv. *punicae*. *Saudi Journal of Biological Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.07.023>
41. SMAJ. (2023). Statistics of Ministry of Agriculture Jahad, Iran.
42. Staudt, A., Huddleston, N., & Kraucunas, I. (2008). Understanding and Responding to Climate Change: Highlights of National Academies Reports. <https://www.preventionweb.net/quick/3915>
43. Talekar, S., Patti, A. F., Vijayraghavan, R., & Arora, A. (2018). An integrated green biorefinery approach towards simultaneous recovery of pectin and polyphenols coupled with bioethanol production from waste pomegranate peels. *Bioresource Technology*, 266, 322-334. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.06.072>
44. Vogtlander, J. (2010). *LCA-based assessment of sustainability: the Eco-costs/Value Ratio EVR*.
45. Vogtlander, J. G., Bijma, A., & Brezet, H. C. (2002). Communicating the eco-efficiency of products and services by means of the eco-costs/value model. *Journal of Cleaner Production*, 10(1), 57-67. [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(01\)00013-0](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(01)00013-0)
46. Wang, C., Luo, D., Zhang, X., Huang, R., Cao, Y., Liu, G., Zhang, Y., & Wang, H. (2022). Biochar-based slow-release of fertilizers for sustainable agriculture: A mini review. *Environmental Science and Ecotechnology*, 10, 100167. <https://doi.org/10.1016/j.ese.2022.100167>
47. Zarei, M. J., Kazemi, N., & Marzban, A. (2019). Life cycle environmental impacts of cucumber and tomato production in open-field and greenhouse. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 18(3), 249-255. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2017.07.001>
48. Zhang, Q., Zhu, J., Mulder, J., Wang, Q., Liu, C., & He, N. (2023). High environmental costs behind rapid economic development: Evidence from economic loss caused by atmospheric acid deposition. *Journal of Environmental Management*, 334, 117511. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117511>
49. Zhao, S., Deng, K., Zhu, Y., Jiang, T., Wu, P., Feng, K., & Li, L. (2023). Optimization of slow-release fertilizer application improves lotus rhizome quality by affecting the physicochemical properties of starch. *Journal of Integrative Agriculture*, 22(4), 1045-1057. <https://doi.org/10.1016/j.jia.2023.01.005>

Research Article

Vol. 14, No. 4, 2024, p. 389-403

Development of Rice Seedling Bank Location Method using Fuzzy-VIKOR-TOPSIS Hybrid Approach

M. Zangeneh^{1*}, M. Rouhi Farajabad²

1- Biosystems Engineering Department, University of Guilan, Rasht, Iran

2- Economic and Rural Development Department, University of Guilan, Rasht, Iran

(*- Corresponding Author Email: zanganeh@guilan.ac.ir)

Received: 01 July 2023

Revised: 31 October 2023

Accepted: 04 November 2023

Available Online: 23 October 2024

How to cite this article:

Zangeneh, M., & Rouhi Farajabad, M. (2024). Development of Rice Seedling Bank Location Method using Fuzzy-VIKOR-TOPSIS Hybrid Approach. *Journal of Agricultural Machinery*, 14(4), 389-403. (in Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jam.2023.83155.1175>

Introduction

To successfully provide and distribute agricultural services throughout the supply chain and enhance efficiency in this sector, selecting the right locations for service centers is a crucial and complex challenge. One of the ways to develop rice mechanization infrastructure is to establish rice seedling banks. A rice seedling bank is a specialized facility dedicated to the large-scale industrial production of rice seedlings, utilizing seedling trays to optimize space, resources, and labor. The primary aim of this research is to identify the most suitable location for establishing a rice seed bank by employing multiple-criteria decision-making (MCDM) methods.

Materials and Methods

The present research was conducted in Fuman County, Guilan Province, Iran. The main objective of identifying a location for the seedling bank in the studied area is to minimize transportation costs for the seedling trays while selecting a site with the greatest potential for successfully establishing the seedling bank. To achieve this, we analyzed the location criteria for the seedling bank at the district level during the early stages of the research. The selection criteria for identifying a suitable district include several factors, such as the number of farmers, land leveling, area under cultivation, the number of agricultural machines, the level of mechanized transplanting and harvesting, and the number of seed banks in each district. Subsequently, the best village in the district, chosen in the prior step, was evaluated using several key criteria: total cultivated area, number of farmers, cultivated area per farmer, and total distance from other villages within the district. Shannon's entropy method was employed to estimate the weight and rank for the location criteria in both stages. The districts were ranked using the Fuzzy VIKOR method, while the TOPSIS method was used to prioritize villages within the selected district.

Results and Discussion

According to the results of the Fuzzy VIKOR method, among the five studied districts in Fuman County, Lulaman rural district stands out as the best location for establishing a seedling bank. Furthermore, based on the results obtained from the TOPSIS method, Khoshknudhan-e Bala village is identified as the most favorable site for establishing a seedling bank within the Lulaman district, among the fifteen alternatives considered. The VIKOR model excels in ranking alternatives due to its ability to generate ideal positive and negative maps, making it particularly well-suited for location and spatial analysis. By utilizing this model, we can assess not only the locations themselves but also evaluate how each alternative measures up against both positive and negative ideals. In contrast, other models lack this capability, as they merely identify the optimal location without providing a comprehensive understanding of each alternative's standing.



©2024 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.2023.83155.1175>

Conclusion

The purpose of this research is to provide a suitable algorithm for locating a seedling bank in Fuman County. Given the numerous influencing factors and available options, the integration of the VIKOR MCDM model with fuzzy numbers to identify the most suitable district, followed by the TOPSIS MCDM model to determine the best village, yielded promising results. The findings indicate that several factors play a crucial role in identifying the optimal location for the seedling bank. However, integrating all these elements through traditional methods—such as manual map analysis—proves impractical due to the sheer volume of data involved. Furthermore, neglecting these factors in site selection leads to substantial waste of material resources, energy, and environmental resources. Overall, the results of the Fuzzy VIKOR analysis revealed that Khoshknudhan-e Bala village in the Lulaman district is the best option for establishing a seedling bank in Fuman County.

Keywords: Fuzzy VIKOR, Geographical Information System, Rice Seedling Bank Location, Shannon Entropy, TOPSIS

توسعه روش مکان‌یابی بانک نشا برنج با استفاده از رهیافت ترکیبی فازی-ویکور-تاپسیس

مرتضی زنگنه^{۱*}، مهدیه روحی فرج آباد^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۱۳

چکیده

طی سال‌های اخیر، کشاورزان همواره با افزایش هزینه‌های کارگری مواجه بوده‌اند. ادامه این روند عرصه را بر کشاورزان تنگ‌تر خواهد کرد. استفاده از ماشین‌نشاکار برنج و گسترش و توسعه مکانیزاسیون در فرایند تولید برنج می‌تواند نقش مهمی در غلبه بر سختی‌های تولید این محصول راهبردی و محدودیت‌های اقلیمی و زمانی زراعت داشته باشد. مطالعه حاضر به‌جایابی برای ایجاد بانک نشا برنج در شهرستان فومن از توابع استان گیلان به‌عنوان یکی از زیرساخت‌های مهم مکانیزاسیون زراعت برنج با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی پرداخته است. بدین منظور چندین معیار، مورد استفاده قرار گرفته است. جهت وزن‌دهی پارامترهای مؤثر مکان‌یابی از روش آنتروپی شانون بهره گرفته شد. براین اساس، معیارهای تعداد بانک نشا، تعداد بهره‌بردار و سطح تسطیح اراضی بالاترین رتبه را کسب کردند. سپس رتبه‌بندی دهستان‌های شهرستان فومن به روش فازی ویکور و وزن معیارها انجام شد. در ادامه، روستاهای موجود در دهستان منتخب به کمک تحلیل تاپسیس مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. نتایج تحلیل ویکور فازی نشان داد که دهستان لولمان و روستای خشک‌نودهان بالا به‌ترتیب بهترین دهستان و روستا برای استقرار بانک نشا در شهرستان فومن هستند.

واژه‌های کلیدی: آنتروپی شانون، تاپسیس، سامانه اطلاعات جغرافیایی، مکان‌یابی بانک نشا، ویکور فازی

مقدمه

محدودیت‌های اقلیمی و زمانی زراعت آن داشته باشد. بهبود وضعیت درآمدی و معیشتی کشاورزان، افزایش تولید و تأثیرات رفاهی مثبت بر بازار برنج از نتایج مهم توسعه مکانیزاسیون و کشت مکانیزه شلتوک شمرده می‌شود. مکانیزاسیون برنج از سال ۱۳۷۴ در کشور آغاز گردید، هرچند در ابتدا پیشرفت زیادی نداشت، اما طی سال‌های اخیر با برنامه‌ریزی‌های انجام‌شده مسیر رو به رشدی را تجربه نموده است. گسترش مکانیزاسیون و تولید مکانیزه برنج علاوه بر کاهش ۵۰ درصدی هزینه تولید، دشواری تولید این محصول را کاهش داده و میل و رغبت نیروی کار جوان روستایی برای ادامه این رشته فعالیت را افزایش می‌دهد. یکی از راهکارهای توسعه زیرساخت‌های مکانیزاسیون کشت برنج تأسیس بانک‌های نشا برنج است. بانک نشای برنج به مکانی اطلاق می‌شود که با استفاده از فضا، امکانات و نیروی کار محدود قابلیت تولید صنعتی نشا برنج در داخل سینی نشاء را در سطح وسیع دارا است. نشاء تولیدشده علاوه بر قابلیت حمل، عاری از هرگونه آفت و بیماری بوده و با مصرف حداقل آب، بذر و انرژی تولید می‌شود. کاهش صعوبت کاری، امکان توسعه فرصت‌های شغلی جدید برای اقشار تحصیل کرده و ممانعت از مهاجرت جوانان روستایی و ایجاد انگیزه‌های لازم برای سرمایه‌گذاری بیشتر در بخش

با رشد جمعیت و افزایش تقاضا برای مواد غذایی و به‌خصوص، جذب نیروی کار از سمت سایر بخش‌های اقتصادی و پیامد آن، مهاجرت نیروی انسانی از بخش کشاورزی، بهره‌برداری از ماشین‌آلات به سبب انجام بسیاری از فعالیت‌های سخت بخش کشاورزی بسیار معمول شده است (Motamed & Kavooosi Kalashami, 2018). مکانیزاسیون از شروط اساسی عبور از مرحله کشاورزی سنتی به کشاورزی مدرن است. کشت سنتی با صرف زمان بیشتر و پرهزینه است. از این‌رو، به‌منظور افزایش درآمد و جاذبه اقتصادی کشاورزی، مکانیزاسیون کشاورزی در بسیاری از نقاط جهان به کار گرفته شده است. گسترش و توسعه مکانیزاسیون در فرایند تولید برنج می‌تواند نقش مهمی در غلبه بر سختی‌های تولید این محصول استراتژیک و

۱- استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد توسعه روستایی، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: zanganeh@guilan.ac.ir)

 <https://doi.org/10.22067/jam.2023.83155.1175>

(Yoon, 1981). الگوریتم ویکور روش مناسبی برای حل مسائل مکان‌یابی است (Amin nayeri & Peyvastehgar, 2020)، زیرا جایگاه اهمیت هر کدام از شاخص‌ها را در ارزیابی گزینه‌ها پیش‌بینی کرده اما الگوی کارآمدی برای وزن‌دهی ارائه نکرده است. لذا استفاده از الگوی ترکیبی برای وزن‌دهی و ویکور برای رتبه‌بندی منجر به نتایج قابل‌اعتمادی خواهد شد (Mansouri & Bagheri, 2015).

پیشینه تحقیق

روش‌های رتبه‌بندی برای مکان‌یابی تسهیلات در پژوهش‌های این حوزه مطالعاتی تنوع زیادی دارد. در این میان مطالعات زیادی می‌توان یافت که از روش تاپسیس بهره برده‌اند. صفری و همکاران (Safari, Faghih, & Fathi, 2012) در پژوهش خود برای انتخاب مکان بهینه تسهیلات از روش تاپسیس فازی استفاده کردند. آن‌ها ابتدا عوامل مؤثر در انتخاب مکان بهینه را مشخص کردند، سپس وزن هر یک از این عوامل را بر اساس نظرات خبرگان تعیین کردند. در نهایت پس از تشکیل ماتریس تصمیم و به‌کارگیری روش تاپسیس - فازی مکان بهینه انتخاب شد. در مطالعات مکان‌یابی سیستم فتوولتائیک روی پشت بام در چین (Wu, Zhang, Xu, & Li, 2018) و ایستگاه پمپ بنزین در شرایط حاد کرونایی در استان‌های (Ayyildiz & Taksin, 2022) از ادغام منطق فازی و روش‌های تصمیم‌گیری VIKOR و TOPSIS بهره گرفته شده است.

به‌کارگیری سامانه اطلاعات جغرافیایی برای تحلیل‌های مکانی کمک شایانی به تحقیقات در این زمینه کرده است. باباجانی و همکاران (Babajani, Kalantari, Rezvanfar, & Shabanali, 2009) در تحقیقی با بررسی مبانی نظری مکان‌یابی صنعتی و با بهره‌گیری از فنون مناسب، عوامل محیطی مؤثر در استقرار صنایع تبدیلی در نواحی روستایی استان کرمانشاه را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش ابتدا مهم‌ترین شاخص‌های مربوط به استقرار صنایع موردبحث تعیین شد و سپس وزن آن‌ها با استفاده از نظرسنجی از مدیران واحدهای صنایع فراوری محصولات باغی در استان محاسبه شد. تهیه یک شاخص ترکیبی در قالب پایگاه‌داده سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) منجر به تهیه نقشه‌های مربوطه به مکان استقرار این نوع صنایع در سطح استان کرمانشاه شد.

در کنار روش تاپسیس، روش رتبه‌بندی ویکور نیز جزو روش‌های متداول در تحقیقات مکان‌یابی است. پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه مکان‌یابی تسهیلات خدماتی به دلیل تشابه عملکردی می‌توانند در کاربردهای مشابه مورد مقایسه قرار گیرند. امین‌نیری و پیوسته‌گر (Amin nayeri & Peyvastehgar, 2020) در پژوهش خود

کشاورزی در راستای توسعه اهداف مکانیزاسیون از دیگر مزایای بانک نشای برنج است. سطح زیر کشت برنج در کل کشور ۶۵۰ هزار و ۷۸۱ هکتار است که استان گیلان حدود ۲۲/۳ درصد تولید و ۲۷/۳ درصد سطح زیر کشت برنج در کشور را داراست (Anonymous, 2017). در این استان هرساله بیش از ۱۹۳ هزار بهره‌بردار در اراضی حاصل‌خیز و مستعد، برنج‌کاری می‌نمایند (Anonymous, 2017). به‌منظور موفقیت در تأمین و توزیع خدمات کشاورزی در طول زنجیره تأمین کشاورزی و دستیابی به ارتقای کارایی در این زمینه، انتخاب مکان صحیح مراکزی که این‌گونه خدمات را عرضه می‌کنند موضوع بسیار مهم و چالش‌برانگیزی است. در منابع، روش‌های بسیار متنوعی برای رتبه‌بندی گزینه‌های یک مسئله بهینه‌سازی وجود دارد. در بسیاری از مسائل دنیای واقعی، تصمیم‌گیرنده ترجیح می‌دهد بیش از یک هدف یا عامل را در تصمیم‌گیری خود دخیل کند که این موضوع منجر به شکل‌گیری مسائل تصمیم‌گیری چندهدفه و چندشاخصه شده است. در تصمیم‌گیری چندشاخصه معمولاً تعداد محدودی گزینه از پیش تعیین‌شده وجود دارد. این گزینه‌ها هر هدف را در یک سطح مشخص ارضا می‌کند و تصمیم‌گیرنده (DM) بهترین پاسخ (یا پاسخ‌ها) را بر اساس اولویت هر هدف و اثر متقابل بین آن‌ها از بین تمام گزینه‌ها انتخاب می‌کند. روش‌های زیادی برای حل مسائل تصمیم‌گیری چندشاخصه وجود دارد که معروف‌ترین آن‌ها عبارتند از: دومینانت^۲، ماکسی‌مین، ماکسی‌ماکس، روش عطفی^۳، روش فصلی^۴، روش لکسیکوگرافی^۵، حذف به‌وسیله منظر^۶، روش جایگزشت^۷، روش انتقال خطی^۸، روش مجموع ساده توزین (SAW)^۹، روش مجموع سلسله مراتبی توزین^{۱۰}، روش حذف و انتخاب ابراز واقعیت (ELECTRE)^{۱۱}، تکنیک اولویت‌بندی بر اساس شباهت به راه‌حل ایده‌آل (TOPSIS)^{۱۲}، مبادله‌های سلسله مراتبی^{۱۳}، برنامه‌ریزی خطی برای تحلیل‌های شباهت چندبعدی (LINMAP)^{۱۴}، روش SAW اندرکنشی^{۱۵} و MDS با نقطه ایده‌آل^{۱۶} (Hwang &

- 1- Decision Maker
- 2- Dominant
- 3- Conjunctive Method
- 4- Disjunctive Method
- 5- Lexicographic Method
- 6- Elimination by Aspects
- 7- Permutation Method
- 8- Linear Assignment Method
- 9- Simple Additive Weighting
- 10- Hierarchical Additive Weighting
- 11- Elimination and Choice Expressing Reality
- 12- Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
- 13- Hierarchical Tradeoffs
- 14- Linear Programming Techniques for Multidimensional Analysis of Preference
- 15- Interactive SAW Method

به‌منظور مکان‌یابی فضاهای آموزشی در یکی از مناطق شهر تهران، جهت وزن‌دهی معیارها از نظر متخصصین در قالب مدل ANP استفاده کردند. همچنین با استفاده از GIS و روش VIKOR مکان‌های اولویت‌دار برای ایجاد مدارس ابتدایی را شناسایی کردند. مطالعاتی نیز وجود دارد که روش‌های مختلف رتبه‌بندی را تلفیق کردند تا بتوانند با دقت بیشتری مناطق مورد بررسی خود جهت استقرار یک واحد خدماتی را اولویت‌بندی کنند. به‌عنوان مثال می‌توان به پژوهش قلی‌پور و همکاران (Gholipoor, Rahmati, & Mozaffari, 2021) اشاره کرد که پنج مکان صنعتی از جمله آبیک، خرم دشت، حیدریه، آراسنج و لیا در استان قزوین را جهت تعیین مکان صنعتی مناسب برای احداث مرکز خدمات فن‌آوری کسب و کار مورد بررسی قرار دادند. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از روش ویکور و تاپسیس انجام شد.

به‌کارگیری منطق فازی در روش‌های رتبه‌بندی برای افزایش قابلیت روش‌ها در بسیاری از مطالعات حوزه علوم تصمیم‌گیری مشاهده می‌شود. تئوری مجموعه‌های فازی و منطق فازی برای پردازش اصطلاحات زبانی ریاضی ایجاد شدند. تصمیم‌گیری فازی مجموعه‌ای از فنون تک یا چندمعیاره باهدف انتخاب بهترین جایگزین در صورت وجود داده‌های نادقیق، ناقص و مبهم است. در مواردی که برای جمع‌آوری داده‌ها از روش پرسشنامه استفاده می‌شود یا داده‌های نادقیق وجود دارد، تلفیق منطق فازی با روش‌های رتبه‌بندی می‌تواند نتایج بهتری به دنبال داشته باشد.

مطالعات بسیاری در حوزه مکان‌یابی با تلفیق منطق فازی و روش‌های تصمیم‌گیری با موضوعات متنوع مانند اجرای عملیات کپه‌کاری مراتع در حوزه آبخیز مراوه تپه، استان گلستان (Keykha, Fakhire, Roohani, & Behmanesh, 2020)، توسعه گیاه دارویی کاکوتی حوزه آبخیز سیلان استان اردبیل (Alikhah Asl, Moameri, Naseri, & Meftahi, 2021)، استقرار سیستم‌های استحصال آب از رطوبت هوا در استان سیستان و بلوچستان (Mohammadi & Sobhani, 2022) انجام شده است. محققان در پژوهشی (Khosravi, Raeisi, Almodaresi, & Esteqlal, 2020) برای مکان‌یابی بازار روز در شهر سیرجان که یک تسهیل خدماتی محسوب می‌شود برای وزن‌دهی به معیارهای مکان‌یابی‌شان از مدل AHP استفاده کردند. سپس با استفاده از GIS و منطق فازی نقشه‌های متناسب برای معیارها را به‌دست آورده و در آخر با هم تلفیق کرده و با استفاده از روش ویکور مکان‌های پیشنهادی را رتبه‌بندی کردند. نتایج بررسی پیشینه تحقیقات انجام‌شده در این زمینه نشان می‌دهد که پژوهش مشابهی در ایران به منظور مکان‌یابی بانک نشای برنج انجام نشده است. ضرورت تشکیل یک گروه از خبرگان یا متخصصان مرتبط با موضوع موردبررسی در روش AHP که در برخی مطالعات مورد استفاده قرار گرفته و همچنین وابستگی به

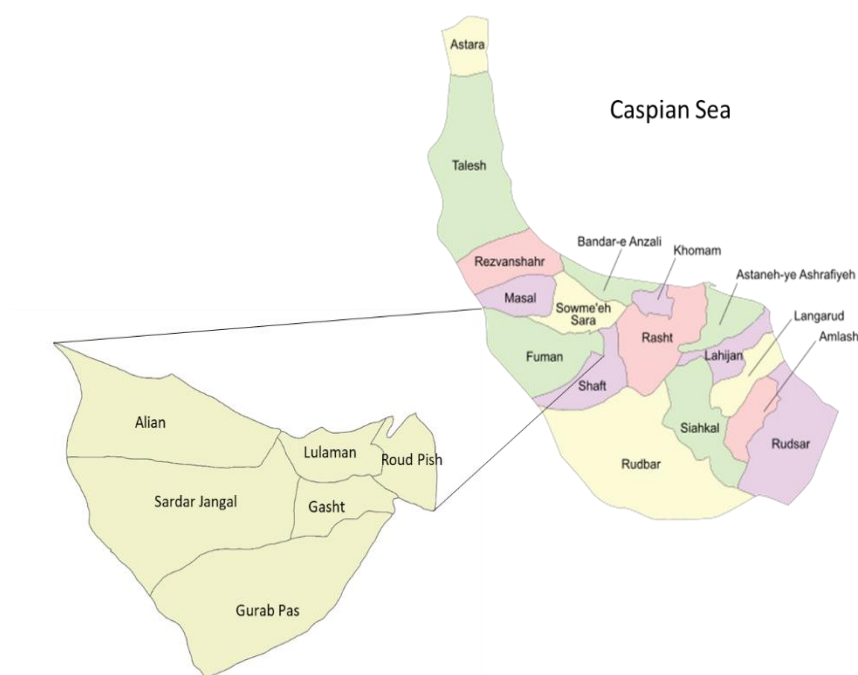
نظرات متخصصان، کاربرد آن را محدود می‌کند. دسترسی به افرادی که بتوانند مشارکت موثری برای فرآیند مقایسات زوجی در روش AHP در موضوع مورد بررسی را داشته باشند همواره مقدور نیست و در عمل محدودیت‌هایی را برای محقق به دنبال دارد. لذا استفاده از سایر روش‌های رتبه‌بندی که به قضاوت افراد وابسته نیست دامنه کاربرد بیشتری پیدا می‌کند. روش آنتروپی شانون در سال ۱۹۷۴ توسط شانون و ویور ارائه شد. آنتروپی بیان‌کننده مقدار عدم اطمینان در یک توزیع احتمال پیوسته است. ایده اصلی این روش آن است که هرچه پراکندگی در مقادیر یک شاخص بیشتر باشد آن شاخص از اهمیت بیشتری برخوردار است (Ji, Ma, Zhu, & Wang, 2020). این روش برای محاسبه میزان اهمیت یا به عبارت دیگر وزن نسبی معیارها در روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش بر اساس پراکندگی یا آنتروپی درونی شاخص‌ها، میزان اهمیت نسبی آن‌ها در تصمیم‌گیری را محاسبه می‌کند و لذا نیازی به قضاوت افراد یا مقایسات زوجی مانند روش AHP نیست. از این رو محدودیت به‌کارگیری خبرگان برای محاسبه اهمیت نسبی معیارها در این روش وجود ندارد و سرعت و سهولت بیشتری در اختیار محقق قرار می‌دهد.

تحقیق حاضر در شهرستان فومن استان گیلان انجام شده است. هدف اصلی پژوهش حاضر آن است که مناسب‌ترین مکان (دهستان و روستای برتر) در شهرستان فومن به کمک روش فازی ویکور و تاپسیس جهت ایجاد بانک نشا برنج تعیین شود. در مطالعه حاضر، وزن‌دهی معیارها توسط آنتروپی شانون انجام‌شده است.

مواد و روش‌ها

مشخصات منطقه مورد مطالعه

شهرستان فومن (شکل ۱) از شهرستان‌های استان گیلان در شمال ایران است که در فاصله ۲۷ کیلومتری شهر رشت و ۳۵۶ کیلومتری تهران، از شمال به شهرستان صومعه‌سرا (نزدیک‌ترین شهر به آن) و شهرستان ماسال، از جنوب و جنوب غربی به خط‌الرأس رشته‌کوه‌های البرز (استان‌های زنجان و اردبیل) که مرز حوزه‌های آبخیز کوهستان مزبور حد طبیعی فومن و طارم است و از شرق به شهرستان شفت محدود می‌شود. شهرستان فومن یکی از چهار شهرستان اولیه استان گیلان در کنار رشت، طالش و انزلی بوده است. شهر مزبور در حال حاضر دارای مساحتی معادل ۲۹ کیلومترمربع بوده و در ارتفاع ۳- متر از سطح آب‌های دریای آزاد است. دارای ۵ دهستان به نام سردار جنگل، گشت، رودپیش، لولمان و آلیان و ۱۲۳ روستا است. فومن دارای اقلیم معتدل و مرطوب است.



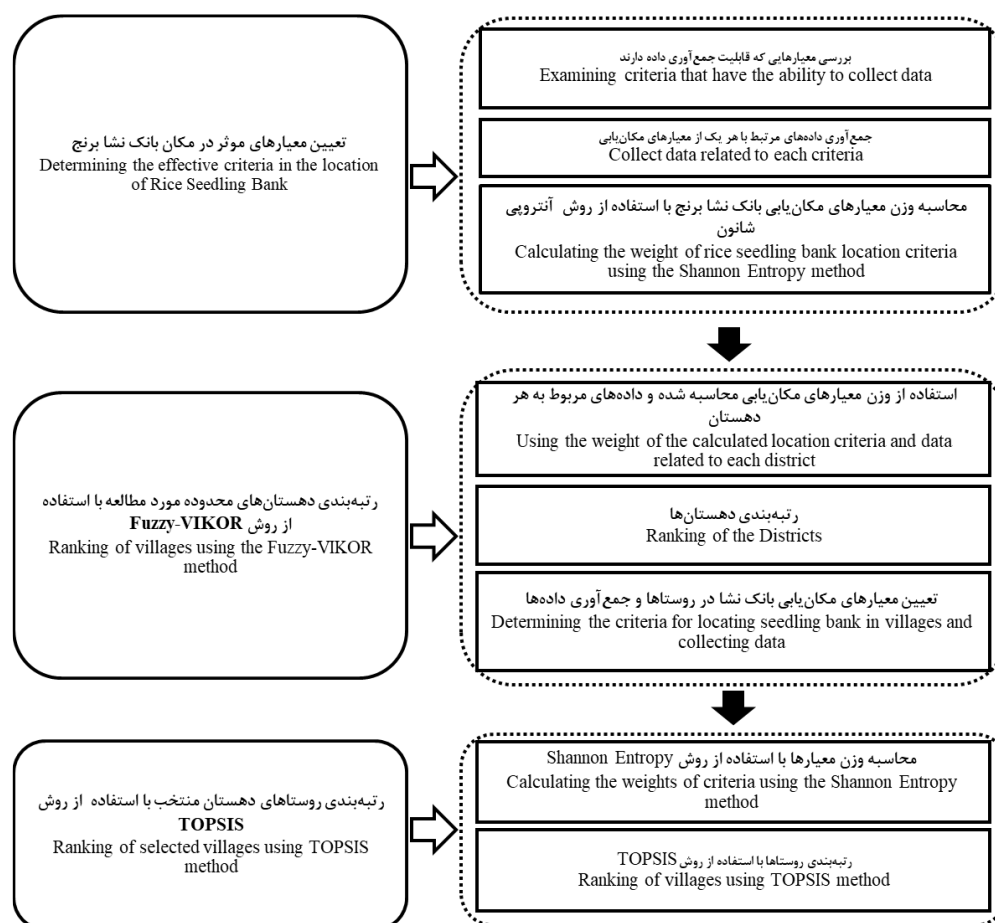
شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه
Fig.1. Geographical location of the studied area

معیارهای مکان‌یابی بانک نشا برنج

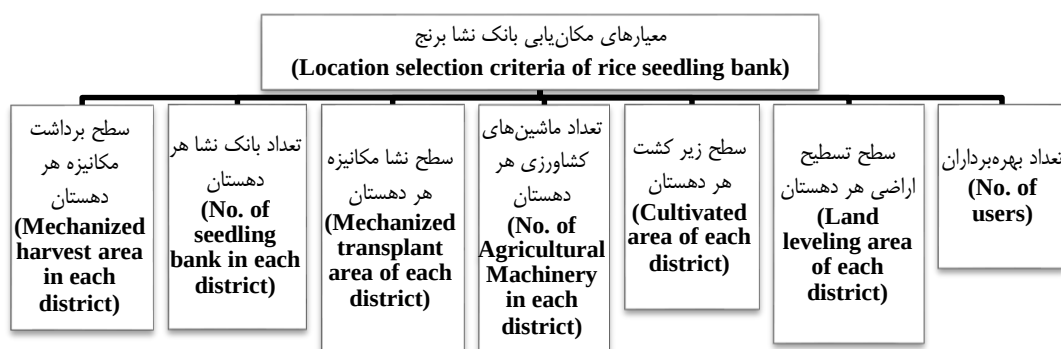
معیارهای متعددی می‌تواند در مکان‌یابی یک بانک نشا مؤثر واقع شود. در رابطه با انتخاب معیارهای این تحقیق از آنجایی که تحقیقات مشابهی برای مکان‌یابی بانک نشای برنج مشاهده نشد، بر اساس ماهیت مسئله، متغیرهای مورد بررسی توسط محقق تعیین شد. همچنین امکان دسترسی به داده‌های مربوط به هر معیار نیز در انتخاب معیارها اثرگذار بود. برای یافتن اهمیت نسبی معیارها و تعیین معیارهای مهم‌تر از روش آنالیز شانون استفاده شد. در این تحقیق، برای مکان‌یابی مناسب برای احداث بانک نشا، از هفت معیار مهم‌تر بهره‌برداری شد که در شکل ۳ نشان داده شده است. جهت تخمین وزن و رتبه‌بندی معیارهای مکان‌یابی در دو مرحله از روش آنالیز شانون استفاده شد. در مرحله اول هفت معیار برای انتخاب دهستان وزن‌دهی شدند و در مرحله دوم چهار معیار مهم‌تر برای وزن‌دهی روستاها مورد استفاده قرار گرفتند.

یکی از اولین گام‌هایی که بایستی برای حل مسئله مکان‌یابی مطرح شده در پژوهش حاضر برداشته شود یافتن اهداف^۱ و مشخصه‌های^۲ مکان مورد نظر به منظور استقرار بانک نشا در مدل‌های مکان‌یابی چندمعیاره^۳ (MCDM) است. شکل ۲ مراحل اصلی تحقیق را نشان می‌دهد. هدف اصلی مکان‌یابی بانک نشا در محل مورد مطالعه، کاهش هزینه حمل و نقل سینی‌های نشا و انتخاب مکانی است که بیشترین استعداد را برای تاسیس بانک نشا داشته باشد. بدین منظور در مراحل ابتدایی تحقیق، معیارهای مکان‌یابی بانک نشا مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر اهمیت معیارها در انتخاب مکان بهینه، موضوع دسترسی به داده‌های مربوط به معیارهای مکان‌یابی نیز بسیار مهم است. چنانچه معیارهایی که انتخاب می‌شوند قابلیت جمع‌آوری داده نداشته باشند عملاً قابل استفاده نخواهند بود. بنابراین پس از بررسی منابع داده قابل دسترس، از بین معیارهایی که در بررسی منابع مرتبط مشخص شده بود، معیارهایی که داده‌های مرتبط با آن‌ها در بانک‌های اطلاعاتی سازمان جهاد کشاورزی استان گیلان قابل دستیابی بود انتخاب شد.

- 1- Objectives
- 2- Attributes
- 3- Multi-Criteria Decision Making (MCDM)



شکل ۲- مراحل اصلی تحقیق
Fig.2. The main steps of the research



شکل ۳- معیارهای مکان‌یابی بانک نشا برنج
Fig.3. location criteria of the rice seedling bank

بیان می‌شود و یافتن آن که چه‌قدر فضای ذخیره برای محاسبه همه اطلاعات دارای عدم اطمینان لازم است. محاسبات مربوط به این روش در ادامه آورده شده است (Shakouri, Nabaee, &)

محاسبه وزن معیارها با روش آنتروپی شانون
آنتروپی شانون از مفهومی تئوری اطلاعات به‌دست‌آمده است، جایی که از آن برای اندازه‌گیری عدم اطمینان که به‌وسیله توزیع p_i

(Aliakbarisani, 2014):

$$E_j = -k \sum_{i=1}^n [P_{ij} \times \ln(P_{ij})] \quad \forall j \quad (1)$$

که در آن:

هر P_{ij} به‌عنوان یک برآورد از توزیع احتمالی مشخصه‌ها با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شده است:

$$P_{ij} = \frac{Z_{ij}}{\sum_{i=1}^n Z_{ij}} \quad \forall i, j \quad (2)$$

و k یک ضریب ثابت است که برابر است با:

$$k = \frac{1}{\ln(n)} \quad (3)$$

عدم اطمینان با درجه انحراف داده‌ها برای شاخص d_j که نامیده می‌شود، بیان می‌کند که چه حجمی از اطلاعات هر معیار که توسط j اندیس شده است برای تصمیم‌گیری موجود است، یعنی چه قدر اطلاعات وجود دارد. این مقدار توسط رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$d_j = 1 - E_j \quad \forall j \quad (4)$$

سپس، وزن هر معیار با استفاده از رابطه (۵) به‌دست می‌آید:

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{i=1}^n d_j} \quad \forall j \quad (5)$$

بدین ترتیب وزن معیارهای مکان‌یابی بانک نشا محاسبه شد.

رتبه‌بندی دهستان‌ها با استفاده از روش Fuzzy-VIKOR

این روش که مبتنی بر برنامه‌ریزی توافقی مسائل تصمیم‌گیری

چندمعیاره است، مسائلی با معیارهای نامتناسب و ناسازگار را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. در شرایطی که تصمیم‌گیران به علت وجود شاخص‌های متناقض، به راحتی نمی‌توانند ترجیحات خود را در مسئله تصمیم‌گیری ابراز کنند، این روش می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر برای تصمیم‌گیری مطرح شود (Shemshadi, Shirazi, Toreihi, & Tarokh, 2011). متغیرهای زبانی مورد استفاده برای رتبه‌بندی گزینه‌ها در این مطالعه، با توجه به اعداد فازی مثلثی در جدول ۱ تعریف شده‌اند، در شکل ۴ نیز، توابع عضویت معادل، برای تجسم بهتر ترسیم شده است.

فرایند محاسباتی ویکور فازی در پژوهش حاضر مطابق رویه زیر انجام شده است (Amin Nayeri & Peyvastehgar, 2020):

ابتدا نقطه ایده‌آل مثبت فازی $\tilde{f}_i^* = (l_i^*, m_i^*, u_i^*)$ و نقطه ایده‌آل منفی فازی $\tilde{f}_i^\circ = (l_i^\circ, m_i^\circ, u_i^\circ)$ مطابق رابطه (۶) تعیین می‌شوند.

$$\tilde{f}_i^* = \max_j \tilde{x}_{ij}, \tilde{f}_i^\circ = \min_j \tilde{x}_{ij} \quad (6)$$

مقدار تفاوت $\tilde{d}_{ij}$ بین هر نقطه $\tilde{x}_{ij}$ تا نقطه ایده‌آل مثبت $\tilde{f}_i^*$ (یا منفی $\tilde{f}_i^\circ$) توسط رابطه (۷) محاسبه می‌گردد:

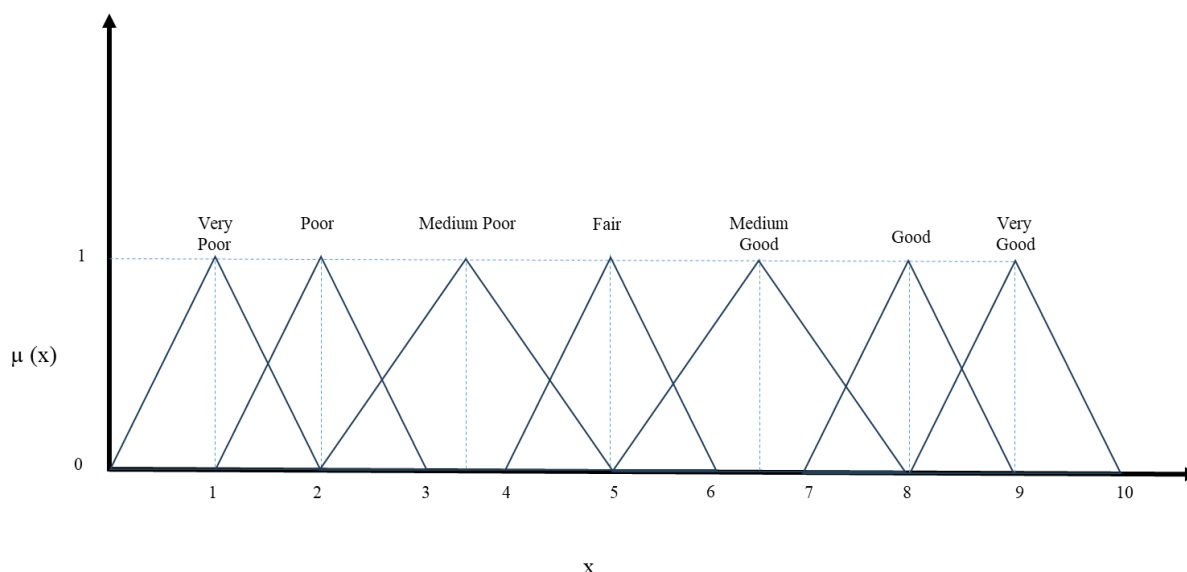
$$\tilde{d}_{ij} = (\tilde{f}_i^* - \tilde{x}_{ij}) / (u_i^* - l_i^*) \quad (7)$$

تفکیک تأمین‌کننده A_j از نقطه ایده‌آل مثبت مقدار سودمندی $\tilde{S}_j$ و نیز تفکیک تأمین‌کننده A_j از نقطه ایده‌آل منفی مقدار تأسّف R_j برای هر گزینه است.

جدول ۱- متغیرهای زبانی برای رتبه‌بندی مکان‌های بانک نشا

Table 1- Linguistic variables for ranking the locations of seedling bank

شماره	اعداد فازی مثلثی	متغیر زبانی (درجه اهمیت)
No.	Fuzzy triangle number	Linguistic variables
1	(0,1,2)	خیلی ضعیف (VP) Very Poor
2	(1,2,3)	ضعیف (P) Poor
3	(2,3,5,5)	نسبتاً ضعیف (MP) Medium Poor
4	(4,5,6)	متوسط (F) Fair
5	(5,6,5,8)	نسبتاً خوب (MG) Medium Good
6	(7,8,9)	خوب (G) Good
7	(8,9,10)	خیلی خوب (VG) Very Good



شکل ۴- توابع عضویت برای رتبه‌بندی مکان‌های بانک نشا

Fig.4. Membership functions for ranking the locations of seedling bank

زیر در آن صدق نماید: (الف) مزیت قابل قبول: $Q(A^{(2)}) - Q(A^{(1)}) \geq DQ$ که $A^{(2)}$ گزینه‌ای با رتبه دو در لیست رتبه‌بندی با Q است؛ $DQ = 1/(m-1)$ (به این معناست راهکار سازشی می‌بایست با راهکار بعدی خود تفاوت زیادی داشته باشد). (ب) ثبات قابل قبول در تصمیم‌گیری: همچنین گزینه $A^{(1)}$ ، باید بهترین رتبه‌بندی با S یا R را داشته باشد. (به این معناست که راهکار سازشی انتخاب شده باید حداکثر مطلوبیت گروهی و حداقل تأثیر فردی را داشته باشد). این راهکار سازشی در طول فرایند تصمیم‌گیری بایستی پایدار باشد که می‌تواند "رای با قانون حداکثری" (وقتی $v > 0.5$) یا "با اتفاق آرا" (وقتی $v \approx 0.5$) و یا "با وتو" (وقتی $v < 0.5$) باشد. که در این جا v نشان‌دهنده وزن راهبرد تصمیم‌گیری در سودمندی گروه بیشینه است. اگر یکی از شرایط فوق احراز نشود، مجموعه‌ای از راهکارهای سازشی پیشنهاد می‌گردد که شامل موارد زیر است: (۱) گزینه‌های $A^{(1)}$ و $A^{(2)}$ اگر شرط (۲) صادق نباشد، یا (۲) گزینه‌های $A^{(1)}, A^{(2)}, \dots, A^{(M)}$ اگر شرط (۱) صادق نباشد. $A^{(M)}$ توسط رابطه $Q(A^{(M)}) - Q(A^{(1)}) < DQ$ برای بیشینه M (موقعیت گزینه‌ها با توجه به شاخص نزدیکی) به‌دست می‌آید.

رتبه‌بندی روستاهای دهستان منتخب با استفاده از روش

تاپسیس

روش تاپسیس^۱ یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره است که در

$$\tilde{S}_j = \sum_{i=1}^n (\tilde{w}_i \otimes \tilde{d}_{ij}) \quad (8)$$

$$\tilde{R}_j = \text{MAX}_i (\tilde{w}_i \otimes \tilde{d}_{ij}) \quad (9)$$

که $\tilde{S}_j = (S_j^l, S_j^m, S_j^u)$ مجموع وزن‌دار فازی تفکیک مقدار A_j از نقطه ایده‌آل مثبت است و به‌طور مشابهی $\tilde{R}_j = (R_j^l, R_j^m, R_j^u)$ عملگر فازی بیشینه‌ای است که تفکیک مقدار A_j از نقطه ایده‌آل منفی است و w_i مقدار متوسط اهمیت (وزن) معیار C_i است. مقدار شاخص ویکور فازی $\tilde{Q}_j = (l_j, m_j, u_j)$ ، برای هر گزینه از رابطه (۱۰) به‌دست می‌آید:

$$\tilde{Q}_j = v[(\tilde{S}_j - \tilde{S}^*)/(S^{ou} - S^{*l})] \oplus (1 - v) \left[\frac{\tilde{R}_j - \tilde{R}^*}{R^{ou} - R^{*l}} \right] \quad (10)$$

که در آن:

$$\tilde{S}^* = \text{MIN}_j \tilde{S}_j \quad (11)$$

$$S^{ou} = \text{MAX}_j S_j^u \quad (12)$$

$$\tilde{R}^* = \text{MIN}_j \tilde{R}_j \quad (13)$$

$$R^{ou} = \text{MIN}_j \tilde{R}_j \quad (14)$$

$$v = n + 1/2n \quad (15)$$

که بهترین مقدار S و $\tilde{S}^*$ به ترتیب R و $\tilde{R}^*$ است. مقادیر $\tilde{S}_j$ ، $\tilde{R}_j$ و $\tilde{Q}_j$ غیرفازی شده و به مقادیر صریح واقعی R_j ، S_j و Q_j تبدیل شده‌اند. سپس گزینه‌ها می‌توانند بر اساس این سه شاخص رتبه‌بندی شوند. در راهکار سازشی، گزینه $A^{(1)}$ ، در صورتی می‌تواند به‌عنوان بهترین گزینه (کم‌ترین مقدار Q) انتخاب شود که دو شرط

تسطیح اراضی هر دهستان، سطح زیر کشت هر دهستان، تعداد ماشین‌های کشاورزی هر دهستان، تعداد ماشین‌های کشاورزی هر دهستان، سطح نشا مکانیزه هر دهستان، تعداد بانک نشا هر دهستان، سطح برداشت مکانیزه هر دهستان) برای گزینش دهستان و چهار معیار مهم‌تر (سطح زیر کشت، تعداد بهره‌بردار، سطح زیر کشت به‌ازای هر بهره‌بردار، مجموع فاصله از سایر روستاهای دهستان) برای گزینش روستای محل استقرار بانک نشا برنج مورد استفاده قرار گرفت. وضعیت معیارهای فوق به تفکیک هر دهستان در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. کمترین سطح زیر کشت برنج مربوط به دهستان آلیان ۴۱۳/۴۷ هکتار و بیشترین مقدار مربوط به دهستان رودپیش ۴۰۰۶ هکتار است. کمترین نشا مکانیزه در دهستان آلیان ۱۱۰ هکتار و بیشترین مقدار در دهستان گشت ۲۴۸۰ هکتار انجام می‌شود. در مورد عملیات نشا هنوز در بخش قابل توجهی از اراضی مورد مطالعه از کارگر به شیوه نشای سنتی استفاده می‌شود و عمدتاً زنان عهده‌دار این عملیات طاقت‌فرسا هستند. توسعه کشت مکانیزه و استفاده از ماشین‌های نساکار نیاز به بانک‌های نشا را افزایش می‌دهد. در مورد عملیات برداشت وضعیت مکانیزاسیون بهتر از عملیات نشا است. بیشترین برداشت مکانیزه نیز در دهستان گشت ۱۸۲۰ هکتار انجام می‌شود.

محاسبه وزن معیارها بر اساس روش Shannon Entropy

روش آنتروپی شانون در دو مرحله برای ارزیابی و وزن‌دهی معیارها در رتبه‌بندی دهستان و سپس روستاها مورد استفاده قرار گرفت. نتایج وزن‌دهی در جدول ۲ و ۳ آمده است. در هنگام انتخاب معیارهای مکان تسهیلات، هدف باید حداکثر پوشش باشد (Shahbandarzadeh & Kabgani, 2021)، که معیارهای منتخب را توجیه می‌کند. تعداد بانک نشا در دهستان و سطح زیر کشت هر روستا و تعداد بهره‌بردار مهم‌ترین معیارها برای رتبه‌بندی دهستان و روستا در مکان‌یابی بانک نشای شهرستان فومن بودند.

تعیین دهستان برتر به روش Fuzzy-VIKOR

همان‌گونه که پیش‌ازاین بیان شد شاخص‌های مختلف عملکردی از قبیل سطح تسطیح اراضی، سطح زیر کشت برنج، تعداد بهره‌بردار، سطح برداشت هرچند همگی اهمیت داشته و باید در ارزیابی شاخص‌ها مورد استفاده قرار گیرد؛ اما از اهمیت یکسانی در ارزیابی گزینه‌ها برخوردار نیستند؛ بنابراین، ضرایب اهمیت معیارها (جدول ۲) در الگوی فازی ویکور مورد استفاده قرار گرفته و گزینه‌ها (دهستان‌های شهرستان فومن) رتبه‌بندی شدند. جدول ۴، رتبه دهستان‌ها برای استقرار بانک نشا را با استفاده از ویکور فازی و رتبه‌بندی مکان‌ها را بر اساس شاخص‌های S، R و Q نشان می‌دهد. بر اساس این جدول، گزینه A4 (دهستان لولمان) بهترین مکان برای

ابتدا توسط هوانگ و یون مطرح شد (Hwang & Yoon, 1981). این روش بر پایه این ایده است که بهترین پاسخ بهتر است کمترین فاصله را با پاسخ ایده‌آل مثبت^۱ و بیشترین فاصله را با پاسخ ایده‌آل منفی^۲ داشته باشد (Oztaysi, 2014). در این تحقیق برای مشخصه‌های مثبت که مقادیر بیشتر برای هر مشخصه ترجیح داده می‌شود، بیشینه پاسخ متخصصان به هر مشخصه به‌عنوان پاسخ ایده‌آل مثبت و کمینه پاسخ به‌عنوان پاسخ ایده‌آل منفی در نظر گرفته شد. برای مشخصه‌های منفی که مقادیر کمتر برای آن‌ها ترجیح داده می‌شود برعکس حالت اول عمل می‌شود. با استفاده از روش تاپسیس مهم‌ترین مشخصه‌های مطلوبیت مکان تعیین شد. برای شروع روش تاپسیس، ماتریس تصمیم تشکیل داده شد و سپس توسط روش نرمال‌سازی خطی نرمال شد. برای نرمال‌سازی خطی از رابطه (۱۶) استفاده شد.

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m a_{kj}^2}} \quad (16)$$

سپس پاسخ ایده‌آل مثبت (A^+) و ایده‌آل منفی (A^-) تعیین شد (Roy, 2004). پس از محاسبه پاسخ‌های ایده‌آل، فاصله هر گزینه از A^+ و A^- به ترتیب به‌عنوان R^+ و R^- به شکل زیر محاسبه شد (Oztaysi, 2014):

$$R_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^m (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad i = 1, 2, \dots, J \quad (17)$$

$$R_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^m (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad i = 1, 2, \dots, J \quad (18)$$

که در این روابط v_j^+ ایده‌آل مثبت و v_j^- ایده‌آل منفی برای معیار j است.

با استفاده از مقادیر محاسبه شده، می‌توان مقدار شاخص نزدیکی^۳ (C.I.) را برای هر یک از گزینه‌ها با استفاده از رابطه (۱۹) محاسبه نمود (Roy, 2004):

$$C.I. = \frac{(R^-)}{(R^+) + (R^-)} \quad (19)$$

شاخص نزدیکی می‌تواند مقادیری بین صفر و یک اختیار کند و گزینه‌هایی که شاخص نزدیکی آن‌ها مقادیر بزرگ‌تری دارد حائز رتبه بالاتری در بین سایر گزینه‌ها هستند (Oztaysi, 2014).

نتایج و بحث

در این مطالعه مجموعاً هفت معیار (تعداد بهره‌برداران، سطح

- 1- Positive ideal solution
- 2- Negative ideal solution
- 3- Closeness Index

استقرار بانک نشا در شهرستان فومن در میان پنج دهستان است. شکل ۵ و ۶ متوسط سطح زیر کشت به‌ازای هر بهره‌بردار و سطح زیر کشت برنج در روستاهای دهستان لولمان را نشان می‌دهد. جدول ۵، رتبه روستاها برای استقرار بانک نشا را با استفاده از روش تاپسیس بر اساس شاخص نزدیکی نشان می‌دهد. بر اساس این جدول، در میان پانزده گزینه، روستای خشک‌نودهان بالا بهترین مکان برای استقرار بانک نشا در شهرستان فومن در میان سایر روستاهای دهستان لولمان است. شکل ۷ موقعیت نهایی مکان انتخاب‌شده برای بانک نشا در شهرستان فومن (دهستان لولمان، روستای خشک‌نودهان بالا) را نشان می‌دهد.

جدول ۲- شرح و وزن معیارها برای رتبه‌بندی دهستان

Table 2- Description and weight of the criteria for ranking the districts

شماره معیار Criteria No.	معیار Criteria	ماهیت معیار Criteria type	وزن معیار Criteria weight
C1	سطح تسطیح اراضی Land leveling area	+1	0.145
C2	سطح زیر کشت برنج Area under rice cultivation	+1	0.141
C3	مجموع تعداد ماشین Total No. of machinery	+1	0.139
C4	سطح نشا مکانیزه و سنتی Mechanized and traditional transplanting area	+1	0.140
C5	سطح برداشت مکانیزه Mechanized harvesting area	+1	0.138
C6	تعداد بانک نشا No. of seedling banks	-1	0.150
C7	تعداد بهره‌بردار No. of users	+1	0.145

جدول ۳- شرح و وزن معیارها برای رتبه‌بندی روستاها

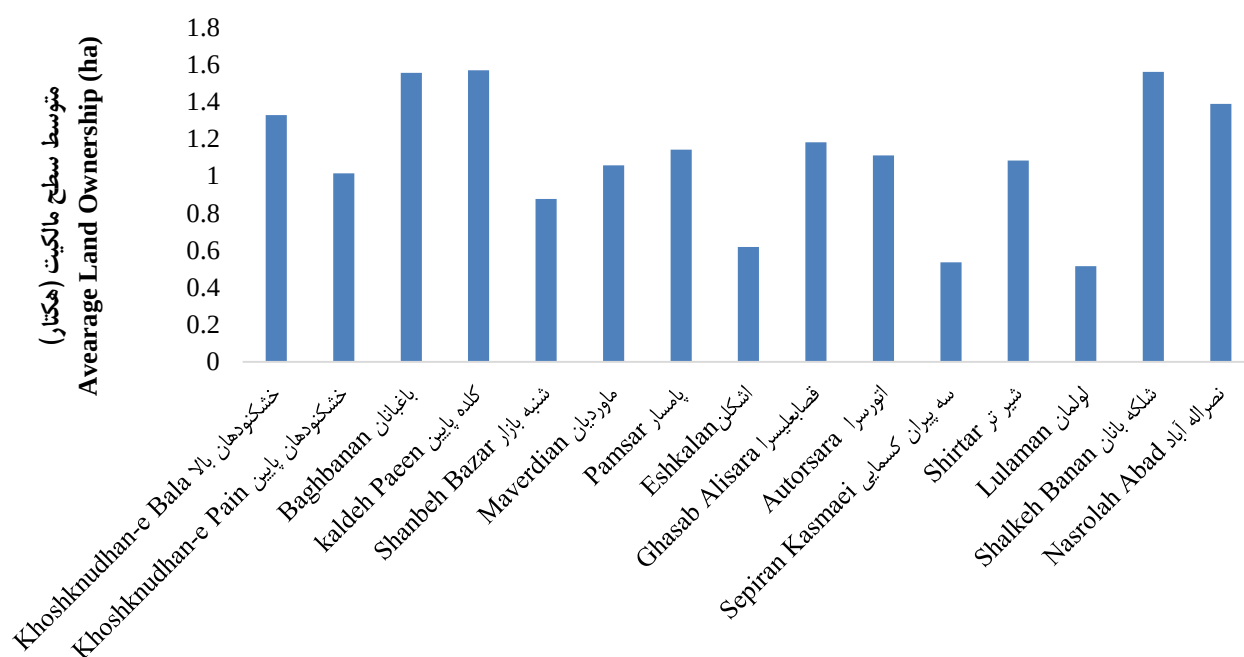
Table 3- Description and weight of criteria for ranking the villages

شماره معیار Criteria No.	معیار Criteria	ماهیت معیار Criteria type	وزن معیار Criteria weight
C1	سطح زیر کشت برنج روستا Cultivated area of rice in each village	+1	0.104
C2	تعداد بهره‌بردار No. of users	+1	0.140
C3	سطح زیر کشت به‌ازای هر بهره‌بردار Cultivated area per user	+1	0.447
C4	مجموع فاصله از سایر روستاهای دهستان Total distance from all villages in the district	+1	0.309

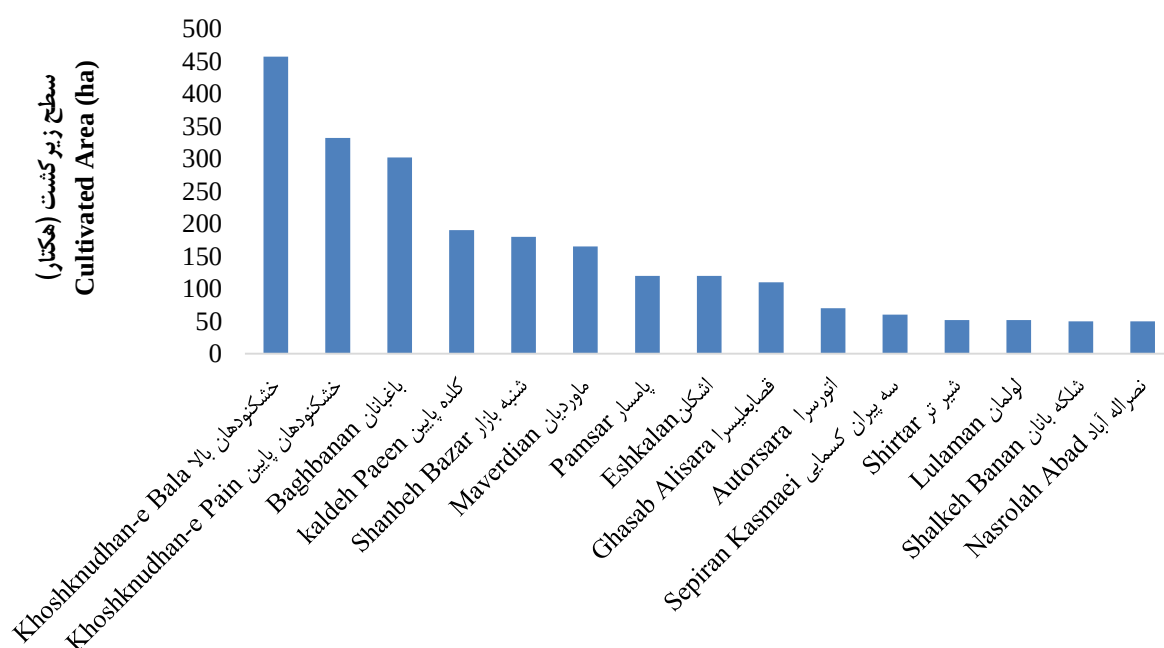
جدول ۴- محاسبه رتبه دهستان‌ها برای استقرار بانک نشا با استفاده از روش Fuzzy-VIKOR

Table 4- Calculating the ranking of villages for the establishment of seedling bank using the Fuzzy-VIKOR method

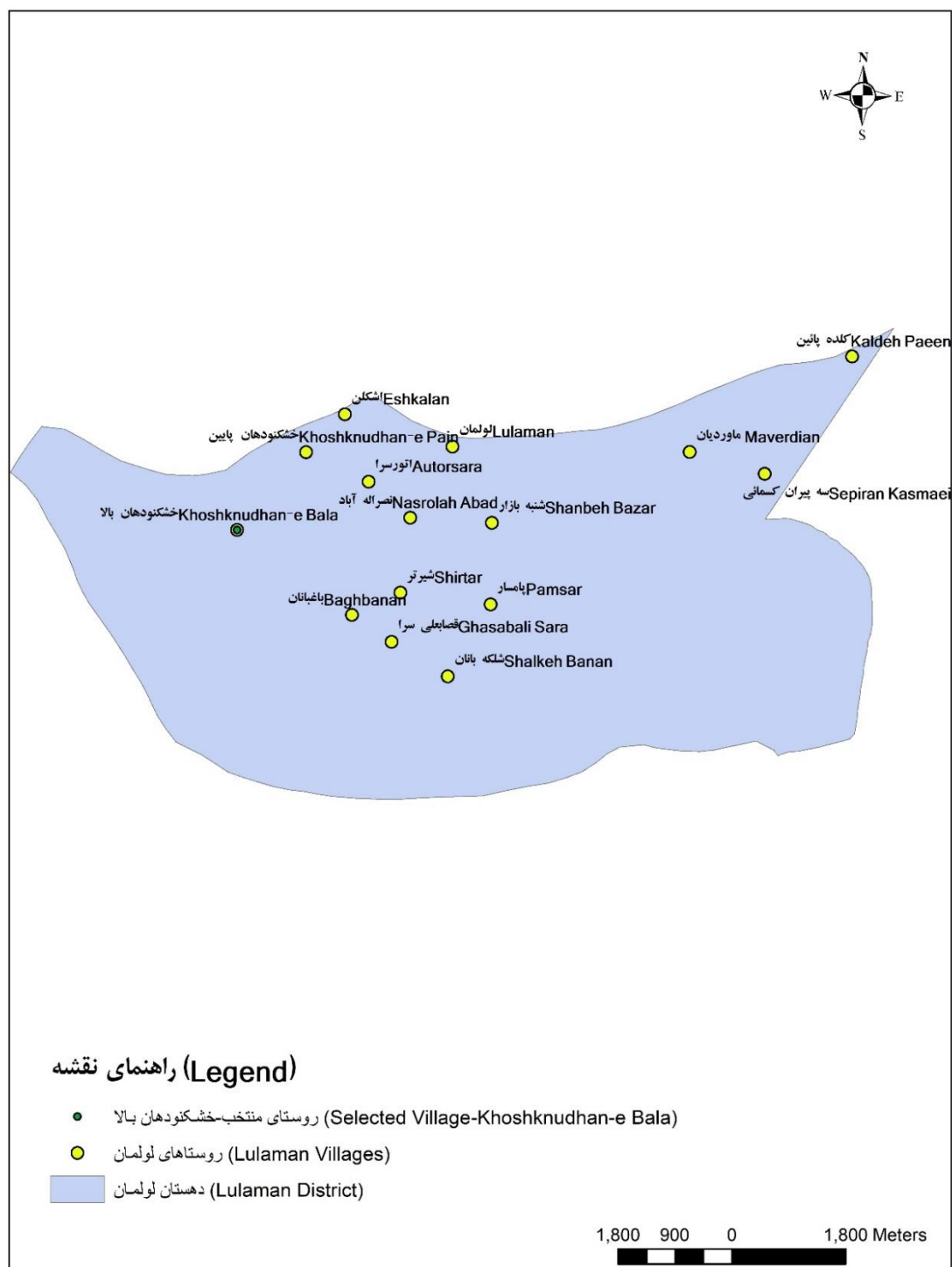
گزینه‌ها Alternatives	دهستان District	رتبه بر اساس S_i Rank based on S_i	S_i	رتبه بر اساس R_i Rank based on R_i	R_i	Q_i	رتبه بر اساس Q_i Rank based on Q_i
A1	سردار جنگل Sardar Jangal	4	0.346	5	0.122	0.143	5
A2	گشت و گوراب پس Gasht and Gurab Pas	2	0.278	3	0.101	0.040	2
A3	رودپیش Roud Pish	3	0.328	5	0.122	0.133	4
A4	لولمان Lulaman	1	0.261	3	0.101	0.030	1
A5	آلیان Alian	5	0.458	1	0.092	0.117	3



شکل ۵- متوسط سطح زیر کشت به‌ازای هر بهره‌بردار روستاهای دهستان لولمان (رتبه یک)
Fig.5. Average cultivated area per farmer in the villages of Lulaman district (1st rank)



شکل ۶- سطح زیر کشت برنج در روستاهای دهستان لولمان (رتبه یک)
Fig.6. The area under rice cultivation in the villages of Lulaman district (1st rank)



شکل ۷- موقعیت روستای منتخب برای استقرار بانک نشا
Fig.7. The location of the selected village for the establishment of seedling bank

جدول ۵- نتایج رتبه‌بندی نقاط نامزد دهستان لولمان با استفاده از روش TOPSIS**Table 5- Ranking results based on the candidate points of Lulman district using the TOPSIS method**

مکان‌های نامزد Candidate locations	رتبه Rank	شاخص‌های روش TOPSIS Indicators of TOPSIS method		
		D_i^+	D_i^-	CI
خشک‌نودهان بالا Khoshknudhan-e Bala	1	0.025	0.149	0.857
کلده پایین Kaldeh Paeen	2	0.060	0.144	0.705
خشک‌نودهان پایین Khoshknudhan-e Pain	3	0.058	0.128	0.686
شلکه بانان Shalkeh Banan	4	0.088	0.135	0.607
ماوردیان Maverdian	5	0.077	0.109	0.586
نصراله آباد Nasrolah Abad	6	0.089	0.123	0.582
قصابعلی سرا Ghasabali Sara	7	0.083	0.107	0.563
شنبه بازار Shanbeh Bazar	8	0.085	0.107	0.559
باغبانان Baghbanan	9	0.104	0.115	0.526
اتورسرا Autorsara	10	0.094	0.098	0.509
پامسار Pamsar	11	0.092	0.083	0.474
لولمان Lulaman	12	0.130	0.097	0.428
سه پیران کسمایی Sepiran Kasmaei	13	0.128	0.082	0.390
اشکلن Eshkalan	14	0.116	0.072	0.383
شیرتر Shirtar	15	0.116	0.066	0.362

نتیجه‌گیری

مشکلات امروزه کشت برنج، کشاورزان را به سمت توسعه مکانیزاسیون و استفاده از ماشین‌نشاکار سوق داده است. به‌منظور شناسایی پیش‌برنده‌ها و بازدارنده‌های مکانیزاسیون کشت برنج در استان گیلان، بایستی تحقیقات در خصوص مکان‌یابی مناسب برای ایجاد بانک نشا برنج در مناطق مختلف استان گیلان انجام شود. هدف از انجام این تحقیق، ارائه الگوریتمی مناسب جهت مکان‌یابی بانک نشا در شهرستان فومن با استفاده از سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی است. در این زمینه با توجه به تعدد عوامل مؤثر و گزینه‌های پیش رو، تلفیق مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره ویکور با اعداد فازی برای انتخاب دهستان مناسب و سپس مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس برای انتخاب روستای مناسب انتخاب شد. این مدل یکی از روش‌های کاربردی است که کارایی بالایی در حل این‌گونه مسائل دارد. قابلیت استفاده هم‌زمان از روش‌های تصمیم‌گیری چندمتغیره و اخذ خروجی‌های با صحت بالا در مطالعات متعددی به اثبات رسیده است (Zangeneh & Akram, 2020). نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که عوامل متعددی در مکان‌یابی بانک نشا مؤثر هستند که تحلیل یکپارچه همه آن‌ها به‌وسیله روش‌های سنتی مکان‌یابی مانند روی هم‌گذاری دستی نقشه‌ها به دلیل حجم زیاد داده‌ها امکان‌پذیر نیست و از طرفی

بی‌توجهی به این عوامل در مکان‌یابی موجب هدر رفتن سهم قابل‌توجهی از منابع مادی و از دست دادن حجم زیاد انرژی و منابع محیطی می‌شود لذا استفاده از GIS به‌عنوان ابزاری جهت انجام این تحلیل ضروری است. در اندازه‌گیری وزن عوامل مؤثر از روش آنتروپی شانون بهره گرفته شد. از طرفی استفاده از مدل ویکور برای رتبه‌بندی گزینه‌ها، از این لحاظ که قابلیت تولید نقشه‌های ایده‌آل مثبت و ایده‌آل منفی را دارد مدل مناسبی جهت مکان‌یابی و تجزیه و تحلیل مکانی است زیرا می‌توان از این طریق علاوه بر مکان‌یابی به این پی برد که هر گزینه در وضع موجود خود، چه قدر از ایده‌آل مثبت و ایده‌آل منفی فاصله دارد، درحالی که مدل‌های دیگر این توانایی را ندارند و صرفاً به تعیین مکان بهینه می‌پردازند. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، از این روش برای مکان‌یابی بانک نشا در سایر شهرستان‌ها نیز بهره گرفته شود. از طرفی معرفی سایر الگوریتم‌های تلفیقی در مطالعات مکان‌یابی و تصمیم‌گیری می‌تواند به بالا بردن دقت و صحت انتخاب‌ها کمک نماید.

مشارکت نویسندگان

مرتضی زنگنه: مفهوم سازی، روش‌شناسی، نظارت و مدیریت، استخراج متن و ویرایش متن
مهدیه روحی فرج آباد: جمع‌آوری داده‌ها، پردازش داده‌ها

References

1. Alikhah Asl, M., Moameri, M., Naseri, D., & Meftahi, Sh. (2021). Land suitability classification for development of Ziziphora tenuior using ANP Fuzzy at Ardabil province, Iran. *Journal of Rangeland*, 15(1), 156-167.
2. Amin Nayeri, B., & Peyvastehgar, Y. (2020). Pattern analysis using fuzzy VIKOR in locating educational facilities district Case Study: District 14 of Tehran Metropolis. *Applied Research of Geographic Sciences (geographical sciences)*, 20(56), 241-260. (In Persian). <https://doi.org/10.29252/jgs.20.56.241>
3. Anonymous. (2017). *Summary of the results of the agriculture statistics plan*. Tehran, Iran. (In Persian).
4. Ayyildiz, E., & Taskin, A. (2022). A novel spherical fuzzy AHP-VIKOR methodology to determine serving petrol station selection during COVID-19 lockdown: A pilot study for İstanbul. *Socio-Economic Planning Science*, 83, 101345. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2022.101345>
5. Babajani, A., Kalantari, K., Rezvanfar, A., & Shabanali Fami, H. (2009). Location Allocation of Horticultural Processing Industries in Kermanshah Province by Using Indexing Method and Geographical Information System (GIS). *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 40(1), 71-78. (In Persian).
6. Gholipour, P., Rahmati, S. H., & Mozaffari, M. M. (2021). Ranking of Indicators Effective on the Locating Industrial Estate with TOPSIS-VIKOR Techniques (Case Study: Qazvin Province). *Journal of Studies of Human Settlements Planning*, 16(3), 509-522. (In Persian).
7. Hwang, C. L. & Yoon, K. (1981). *Multiple attribute decision making— methods and applications: a state-of-the-art survey*. New York, Springer.
8. Ji, C. F., Ma, X. Zhu, J., & Wang, S. (2020). Fault Propagation Path Inference in a Complex Chemical Process Based on Time-delayed Mutual Information Analysis. *Computer Aided Chemical Engineering*, 48, 1165-1170. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823377-1.50195-6>
9. Khosravi, M., Raeisi, R., Almodaresi, S. A., & Esteqlal, A. (2020). Daily Market Location Using GIS and FUZZY Logic (Case Study: Sirjan). *Urban Social Geography*, 7,2, 113-128. (In Persian). <https://doi.org/10.22103/JUSG.2020.2022>
10. Keykha, E., Fakhire, A., Roohani, H., & Behmanesh, B. (2020). Land suitability classification for pit-seeding project using fuzzy multi-criteria decision making. *Journal of Rangeland*, 14(4), 657-672.
11. Mansouri, A., & Bagheri, A. (2015). Evaluating the Financial Performance and Ranking the Pharmaceutical Companies Listed on the Tehran Stock Exchange by Using Hybrid Approaches of Fuzzy Analytic Hierarchy Process and VIKOR. *Journal of Health Accounting*, 4(3), 86-107. (In Persian). <https://doi.org/10.30476/jha.2015.17126>
12. Mohammadi, M., & Sobhani, B. (2022). Location of water extraction systems from humidity using AHP/ Fuzzy in Sistan and Baluchestan province. *Water and Soil Science*, 32(2), 81-96. <https://doi.org/10.22034/ws.2021.41900.2382>
13. Motamed, M. K., & Kavooosi Kalashami, M. (2018). Evaluation of causal relationship between mechanization development and paddy production in Guilan province: Application of panel data and Granger-casual model. *Cereal Research*, 8(1), 1-13. (In Persian). <https://doi.org/10.22124/c.2018.8584.1337>
14. Oztaysi, B. (2014). A decision model for information technology selection using AHP integrated TOPSIS-Grey: The case of content management systems. *Knowledge Based Systems*, 70, 44-54. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2014.02.010>
15. Roy, B. (2004). *Multiple Criteria Decision Analysis: State of The Art Surveys*, Springer.
16. Safari, H., Faghih, A. R., & Fathi, M. R. (2012). Fuzzy multi-criteria decision making method for facility location selection. *African Journal of Business Management*, 6(1), 206-212. <https://doi.org/10.5897/AJBM11.1760>
17. Shahbandarzadeh, H., & Kabgani, M. (2021). Assessing Operational Efficiency of Banks via Quantitative Analysis of ATM Location Selection Criteria. *Journal of Productivity Management*, 15(1), 189-216. (In Persian). <https://doi.org/10.30495/qjopm.2021.524296.1265>
18. Shakouri, H., Nabaee, M., & Aliakbarisani, S. (2014). A quantitative discussion on the assessment of power supply technologies: DEA (data envelopment analysis) and SAW (simple additive weighting) as complementary methods for the "Grammar". *Energy*, 64, 640-647. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.10.022>
19. Shemshadi, A., Shirazi, H., Toreihi, M., & Tarokh, M. J. (2011). A fuzzy VIKOR method for supplier selection based on entropy measure for objective weighting. *Expert Systems with Applications*, 38(10), 12160-12167. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.03.027>
20. Wu, Y., Zhang, B., Xu, C., & Li, L. (2018). Site selection decision framework using fuzzy ANP-VIKOR for large commercial rooftop PV system based on sustainability perspective. *Sustainable Cities and Society*, 40, 454-470. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.04.024>
21. Zangeneh, M., & Akram, A. (2020). Developing Approaches for Locating and Creating Agricultural Service Centers using Location-Allocation Model. *Agricultural Mechanization and System Research*, 74, 185-202. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/erams.2020.126188.1309>

Research Article

Vol. 14, No. 4, 2024, p. 405-427

Comparison and Evaluation of Common Orchard Sprayers with Variable-rate Sprayers

R. Fathi¹, M. Ghasemi-Nejad Raeini^{2*}, S. Abdanan Mehdizadeh², M. Taki², M. Mardani Najafabadi³

1- PhD Student in Agricultural Mechanization, Department of Agricultural Machinery and Mechanization Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Rural Development, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran

2- Associate Professor, Department of Agricultural Machinery and Mechanization Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Rural Development, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran

3- Associate Professor, Department of Agricultural Economics, Faculty of Agricultural Engineering and Rural Development, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran

(*- Corresponding Author Email: ghasemi.n.m@asnrukh.ac.ir)

Received: 26 October 2023

Revised: 25 December 2023

Accepted: 30 December 2023

Available Online: 07 October 2024

How to cite this article:

Fathi, R., Ghasemi-Nejad Raeini, M., Abdanan Mehdizadeh, S., Taki, M., & Mardani Najafabadi, M. (2024). Comparison and Evaluation of Common Orchard Sprayers with Variable-rate Sprayers. *Journal of Agricultural Machinery*, 14(4), 405-427. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2023.84946.1198>

Introduction

Innovative technologies, such as smart sprayers, are pivotal catalysts for modernizing the agricultural sector and play an indispensable role in providing food for human consumption. Without the utilization of these technologies and the implementation of proper input management, it is predicted that environmental impacts will worsen in the future. Attaining sustainable production while implementing programs to ensure food security, presents a considerable challenge for researchers and policymakers worldwide. In this research, the performance of a fixed-rate orchard sprayer was evaluated. Employing various equipment, the sprayer was then upgraded to a variable-rate sprayer, and its performance was reevaluated and compared to the fixed-rate model.

Material and Methods

This research comprehensively evaluated a fixed-rate orchard sprayer and subsequently upgraded it to a variable-rate sprayer for further assessment. The primary components of the developed variable-rate sprayer consist of an ON-OFF solenoid valve, a digital camera for imaging purposes, an ultrasonic sensor, a flow meter, and a control circuit. Necessary modifications were implemented on a fixed-rate turbine sprayer. The development of the variable-rate sprayer was divided into two distinct phases. The initial phase involved determining the canopy volume and acquiring the necessary information pertaining to the spraying target, specifically the tree. The subsequent phase focused on decision-making and control of the spraying rate, thereby facilitating variable-rate application. Upon laboratory examination of the samples, spectroscopic results were obtained, and the total concentration of the pesticide solution was calculated across different sections of a one-hectare orange orchard. An investigation into the sedimentation of the pesticide solution was conducted across different treatments in two spraying modes, namely variable-rate and fixed-rate, at three distinct speeds: low (1.6 km h⁻¹), medium (3.2 km h⁻¹), and high (4.8 km h⁻¹) resulting in six treatments.

Results and Discussion



©2024 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.2023.84946.1198>

The comparative analysis of average pesticide deposition on trees revealed a significant difference between the two spraying modes: variable-rate and fixed-rate. All indicators demonstrate that the type of sprayer and the spraying speed significantly influence changes in pesticide deposition across different treatments. However, the interaction effect of the type of sprayer and the speed of spraying did not significantly impact the amount of pesticide deposition on the trees or the total consumption of pesticide per hectare. The results indicated that neither the type of sprayer, nor the speed of spraying, nor their interaction had a significant effect on the spraying quality index. Furthermore, the numerical median diameter and volume median diameter were not significantly different across the treatments.

The maximum pesticide consumption savings in the variable-rate spraying mode was 46%, achieved at a speed of 1.6 km h⁻¹. The maximum efficiency was 70% in the variable-rate spraying mode, occurring at a speed of 3.2 km h⁻¹. The lowest amount of pesticide deposition on the canopy of trees was observed in the variable-rate spraying method at the speed of 4.8 km h⁻¹ (1303 L ha⁻¹), and the highest amount of deposition occurred in the fixed-rate spraying at the speed of 1.6 km h⁻¹ (2121 L ha⁻¹). The highest amount of pesticide release in the air was also calculated in the fixed-rate spraying mode with a speed of km h⁻¹ (241 L ha⁻¹) and the lowest value was calculated in the variable-rate spraying mode with a speed of 3.2 km h⁻¹.

Conclusion

Emerging technologies, such as smart sprayers, play a crucial role in enhancing the productivity of the agricultural sector. If these technologies are not utilized, the challenges related to the sustainability of production will likely increase in the future. One of the critical operations in agricultural production is the spraying phase. In this research, a fixed-rate sprayer was upgraded to a variable-rate sprayer. Both sprayers were evaluated, and the results of this evaluation were used to compare the two spraying systems. The findings revealed that, due to real-time control of pesticide application based on canopy volume detection in the variable-rate sprayer, pesticide consumption was reduced by 46% at an optimal speed of 1.6 km h⁻¹, achieving 70% efficiency. In all studied treatments, both the type of sprayer and the speed of spraying significantly affected changes in pesticide deposition. However, the interaction between the type of sprayer and the speed of spraying did not significantly impact the amount of pesticide deposition on trees or total pesticide consumption per hectare. There was no significant difference in the coverage percentage of pesticide deposition on targets across different treatments, with the best spraying quality observed in variable-rate spraying at a speed of 4.8 km h⁻¹. By utilizing a variable-rate sprayer, costs associated with chemical pesticide consumption and spraying can be reduced, while also minimizing toxic emissions that contribute to environmental pollution. Future research should focus on developing a variable-rate system based on independent nozzles, allowing for real-time control of each nozzle's spraying.

Keywords: Energy, Environment, Sprayer, Variable rate technology

مقایسه و ارزیابی سم‌پاش‌های متداول باغی با سم‌پاش‌های مجهز به فناوری نرخ متغیر

رستم فتحی^۱، محمود قاسمی‌نژاد رائینی^{۲*}، سامان آبدانان مهدی‌زاده^۳، مرتضی تاکی^۴، مصطفی مردانی نجف‌آبادی^۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۰۹

چکیده

فن‌آوری‌های جدید مانند سم‌پاش‌های هوشمند، از مهم‌ترین عوامل تحول در بخش کشاورزی هستند. در این تحقیق یک سم‌پاش باغی نرخ ثابت به یک سم‌پاش باغی نرخ متغیر توسعه داده شد و مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. بررسی مقدار نشست سم در دو حالت سم‌پاشی نرخ متغیر و نرخ ثابت و در سه سرعت پیشروی کم (۱/۶)، متوسط (۳/۲) و زیاد (۴/۸) کیلومتر بر ساعت انجام شد. کم‌ترین مقدار نشست سم روی درختان به‌ترتیب در حالت سم‌پاشی نرخ متغیر در سرعت پیشروی ۴/۸ (۱۳۰۳ لیتر در هکتار) و بیش‌ترین مقدار نشست در حالت سم‌پاشی نرخ ثابت در سرعت پیشروی ۱/۶ کیلومتر بر ساعت (۲۱۲۱ لیتر در هکتار) به‌دست آمد. نتایج آزمون تجزیه واریانس برای مقدار نشست سم روی درختان، زمین، انتشار در هوا، کل مصرف سم در هکتار و کارایی پاشش نشان داد که مقدار این شاخص‌ها در دو حالت سم‌پاشی نرخ متغیر و نرخ ثابت دارای تفاوت معنی‌داری بود. در همه‌ی شاخص‌ها نوع سم‌پاش و سرعت پیشروی سم‌پاشی، اثر معنی‌داری بر تغییرات مقدار نشست سم در تیمارهای مختلف داشت. نتایج نشان داد که نوع سم‌پاش، سرعت پیشروی و اثر متقابل این دو عامل اثر معنی‌داری بر شاخص کیفیت پاشش نداشت. قطر میانه عددی و قطر میانه حجمی نیز در همه‌ی تیمارها تفاوت معنی‌داری نداشت. حداکثر مقدار صرفه‌جویی مصرف سم (۴۶ درصد) در حالت سم‌پاشی نرخ متغیر و در سرعت پیشروی ۱/۶ کیلومتر بر ساعت و بیش‌ترین مقدار کارایی پاشش (۷۰ درصد) در حالت سم‌پاشی نرخ متغیر و در سرعت پیشروی ۱/۶ کیلومتر بر ساعت به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: انرژی، سم‌پاش، فناوری نرخ متغیر، محیط‌زیست

مقدمه

محققان گزارش کرده‌اند که فن‌آوری‌های نوین نقش مهمی در افزایش بهره‌وری و توسعه‌ی بخش کشاورزی دارند و در صورت عدم دستیابی و استفاده از این فن‌آوری‌ها برای مدیریت صحیح نهاده‌ها، اثرات زیست‌محیطی در آینده بیش‌ازپیش افزایش می‌یابد (Springmann et al., 2018). به‌همین منظور در کشورهای توسعه‌یافته سامانه‌های تولید محصولات کشاورزی به دلیل استفاده از فن‌آوری‌های نوین بهبود پیدا کرده و تغییرات قابل‌توجهی در نحوه‌ی مصرف و جریان انرژی برای تولید محصولات مختلف ایجاد شده است (Baran, Lüle, & Gökdoğan, 2017). از طرفی دیگر

بحران‌های زیست‌محیطی و تخریب منابع، بر امنیت غذایی در سراسر جهان، تأثیر نامطلوب گذاشته است (Yadav et al., 2019). ازاین‌رو هم‌زمان با اجرای برنامه‌ها برای تأمین امنیت غذایی، دستیابی به پایداری تولید یک چالش بزرگ برای محققان و سیاست‌گذاران کشورها است (El Bilali, Callenius, Strassner, & Probst, 2019; Lindgren et al., 2018). بنابراین نیاز به درک جامعی برای مدیریت موضوعات زیست‌محیطی، انرژی و اقتصادی در همه‌ی بخش‌ها خصوصاً در تولید محصولات کشاورزی وجود دارد (Ciacci & Passarini, 2020). یکی از مراحل مهم در تولید محصولات کشاورزی، مرحله داشت و کاربرد سم‌پاش‌ها در این مرحله است. استفاده از سموم شیمیایی با کارایی بالا در تولید محصولات کشاورزی موضوعی اجتناب‌ناپذیر و مهم است (Ilica & Boz, 2018). در واقع سم‌پاشی به‌عنوان یک راه‌حل مشترک به‌منظور افزایش عملکرد و به‌دست آوردن محصولات با کیفیت بالاتر در زراعت و باغبانی استفاده می‌شود و یک بخش اساسی از عملیات کشاورزی است (Dou et al., 2018). در کشاورزی سنتی برای انجام سم‌پاشی از سم‌پاش‌های معمولی و دارای نرخ پاشش ثابت استفاده می‌شود (Asaei, Jafari, & Loghavi, 2019). استفاده از سم‌پاش‌های سنتی و دارای نرخ پاشش ثابت، سموم شیمیایی را بدون توجه به سطح سبز و تراکم

۱- دانشجوی دکترای مکانیزاسیون کشاورزی، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاثانی، خوزستان، ایران.

۲- دانشیار گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاثانی، خوزستان، ایران.

۳- دانشیار گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاثانی، خوزستان، ایران.

(*)- نویسنده مسئول: Email: ghasemi.n.m@asnrukh.ac.ir

<https://doi.org/10.22067/jam.2023.84946.1198>

مبتنی بر حس گر اولتراسونیک^۴ را توسعه داده و ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که نازل توربو^۵ در مقایسه با نازل مخروطی توخالی دارای عملکرد بهتری بود. استفاده از سمپاش با نازل توربو، منجر به پوشش ۴۷/۴۱٪ مناطق هدف شد. در پژوهشی دیگر یک سمپاش نرخ متغیر برای تنظیم خودکار خروجی محلول سم در زمان واقعی، با توجه به اندازه، شکل و تراکم شاخ و برگ درخت توسعه داده شد و کیفیت نشست قطرات سمپاشی مورد آزمایش قرار گرفت. پوشش محلول سم بیش از ۱۵٪ روی کاغذهای حساس به آب، نشست کافی سم روی مناطق هدف را نشان داد (Shen, Zhu, Liu, Chen, & Ozkan, 2017). در پژوهشی دیگر چن و همکاران (Chen, Wallhead, 2017) یک سمپاش هوشمند نرخ متغیر با هدایت لیزر را برای کاهش مصرف سموم توسعه دادند. نتایج نشان داد که مصرف سموم دفع‌آفات با استفاده از سمپاش نرخ متغیر، کاهش قابل‌ملاحظه‌ای داشت. در تحقیق دیگر با استفاده از سمپاش نرخ متغیر، کاهش مصرف سم در باغات انگور ۳۰٪ برآورد شد (Berenstein, Shahar, Shapiro, & Edan, 2010). لورنس و همکاران (Llorens, Gil, Llop, & Escolà, 2010) نیز با استفاده از روش سمپاشی نرخ متغیر، صرفه‌جویی در مصرف سموم دفع‌آفات را ۵۸٪ محاسبه نمودند و بیان کردند که در سمپاش نرخ متغیر در مقایسه با سمپاش باغی با دمنده هوا، کارایی پاشش بهتر بود. شن و همکاران (Shen et al., 2017) در پژوهشی یک سمپاش نرخ متغیر برای تنظیم خودکار خروجی محلول سم در زمان واقعی با توجه به اندازه، شکل، تراکم شاخ و برگ درخت را توسعه دادند. نتایج نشان داد که سمپاش نرخ متغیر ۱۲٪ تا ۴۳٪ از میزان محلول سم مورد استفاده توسط سمپاش نرخ ثابت را مصرف نمود. آسای و همکاران (Asaei et al., 2019) نیز یک سمپاش باغی مجهز به بینایی ماشین که مقدار سموم دفع‌آفات را بر اساس تاج درخت اعمال نمود، برای مدیریت سموم شیمیایی در باغات زیتون طراحی و ارزیابی کردند. کاهش مصرف سموم ۵۴٪ برآورد شد که در باغ‌های جوان‌تر و دارای فاصله بیش‌تر بین درختان، این مقدار می‌تواند افزایش یابد. در پژوهشی اوبرتی و همکاران (Oberti et al., 2016) تصویربرداری درختان را با استفاده از دوربین نصب‌شده در جلوی تراکتور در ارتفاع یک متری از سطح زمین و به‌صورت افقی انجام دادند. آن‌ها بیان کردند که سامانه بینایی بر اساس تصویربرداری از هدف می‌تواند از تصویر قابل‌مشاهده تا تصویر فراطیفی متفاوت باشد. این محققان برای تشخیص آلودگی کپک پودری روی تاک‌ها و سمپاشی نقطه‌ای، از تصویربرداری چندطیفی^۶ (RG NIR) استفاده کردند. هاگوار و

محصول در باغ به‌طور یکنواخت پخش می‌کند و درصد بالایی از مواد شیمیایی را به‌صورت رانش قطرات هدر داده و یا این‌که به علت پاشش زیاد، پس از سمپاشی مواد شیمیایی زیادی به‌صورت رسوب روی هدف باقی می‌ماند و در نتیجه هزینه‌های زیادی از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی به‌وجود می‌آید (Rodrigo, Oturan, & Oturan, 2014; Dou et al., 2018; Landers, 2008; Asaei et al., 2019). بنابراین می‌توان بیان نمود که کاربرد تکنیک‌های سنتی در تولید محصولات کشاورزی به‌طور فزاینده‌ای باعث ایجاد تناقض بین توسعه‌ی اقتصادی و حفاظت از محیط‌زیست می‌شود (Dou et al., 2018). این مسائل، ضرورت کنترل مصرف و پخش سموم شیمیایی در سمپاش‌های مرسوم را نشان می‌دهد (Kasner et al., 2018). تحقیقات نشان داده که امروزه با به‌کارگیری فن‌آوری‌های مناسب می‌توان میزان مصرف منابع مورد نیاز برای تولید محصولات کشاورزی از جمله سموم شیمیایی را بهینه نمود و با تطبیق بهترین روش‌ها، حداکثر بهره‌وری را به‌دست آورد (Taheri-Rad, Khojastehpour, Rohani, Khoramdel, & Nikkhah, 2017). کشاورزی دقیق^۱، یکی از فن‌آوری‌هایی است که از آن برای بهینه‌سازی کاربرد سموم شیمیایی استفاده شده است. این امر مستلزم استقرار تجهیزات مناسب، برای تخصیص بهینه نهاده‌ها است (Cobbenhagen, Antunes, van de Molengraft, & Heemels, 2021). از مهم‌ترین رویکردهای اصلی در کشاورزی دقیق، مدیریت خاص مکانی و فناوری نرخ متغیر است (Méndez-Vázquez, Lira-Noriega, Las-Covarrubias, & Cerdeira-Estrada, 2019). در واقع فن‌آوری‌های نرخ متغیر، یک روش موثر در این زمینه برای کاهش مصرف منابع و آلاینده‌های زیست‌محیطی و افزایش بهره‌وری هستند (Pimentel & Lehman, 1993).

در زمینه استفاده از فن‌آوری نرخ متغیر، از روش‌های مختلفی مانند استفاده از حسگرهای اولتراسونیک (Solanelles et al., 2006)، سنجش موقعیت درخت با استفاده از سامانه موقعیت‌یاب جهانی^۲ (Subramanian, Burks, & Arroyo, 2006) و اسکنرهای لیزری^۳ (Chen, Ozkan, Zhu, Derksen, & Krause, 2013) برای این منظور استفاده شده است. در پژوهشی توسط محققان یک سمپاش نرخ متغیر باغی برای باغات انگور توسعه داده شد و استفاده از این سمپاش به‌طور متوسط سبب ۲۱/۹ درصد صرفه‌جویی در مصرف سموم گردید (Gil, Llorens, Llop, Fàbregas, & Gallart, 2013). در تحقیقی دیگر تواری و همکاران (Tewari, Chandel, Nare, & Kumar, 2018) یک سمپاش باغی نرخ متغیر

4- Ultrasonic sensor
5- Turbo nozzle
6- Images Multispectral
7- Red-Green-Near Infrared

1- Precision farming
2- Global Positioning System (GPS)
3- Laser Scanner

همکاران (Hocevar et al., 2016) نیز در مورد کانویی درخت سیب نشان دادند که می‌توان به‌صورت عملی بینایی ماشین را برای شناخت کانویی درخت به‌کار برد. محققان بیان کرده‌اند علی‌رغم این که به دلیل تعدد عوامل موثر بر عملیات سم‌پاشی، تعیین مقدار پهنه‌ی سم مورد نیاز از نظر کارایی و اثربخشی با حداقل آلاینده‌ی‌های زیست‌محیطی بسیار دشوار است،

لیکن هرگونه صرفه‌جویی حاصل از کاربرد سم‌پاشی نرخ متغیر دارای اهمیت فراوانی است، زیرا استفاده‌ی بیش‌ازاندازه از سموم شیمیایی نه‌تنها برای محیط‌زیست، بلکه برای انسان‌ها نیز خطرناک است (Gil & Escolà, 2009; Carvalho, 2017; Mamane, Raherison, Tessier, Baldi, & Bouvier, 2015).

جدول ۱- جمع‌بندی برخی از شاخص‌های مطالعاتی در تحقیقات انجام‌شده

Table 1- Indicators utilized in the conducted research

عنوان مطالعه و نتایج Study title and results	عنوان مطالعه و نتایج Study title and results
در پژوهشی سیستم کنترل نازل اتوماتیک با حسگر اولتراسونیک برای سم‌پاش‌های باغی را در حالت ایستا ارزیابی شد. نتایج نشان داد که حسگر اولتراسونیک توانست با تشخیص کانویی، قطع و وصل شدن جریان سم‌پاشی را کنترل نماید. نتایج نشان داد که حسگر اولتراسونیک توانست اجسام را در فاصله ۵ متری با پایداری بالا تشخیص دهد (Zürey, Balci, & Sabanci, 2020).	تواری و همکاران (Tewari et al., 2018) کاربرد یک سامانه فناوری نرخ متغیر مبتنی بر حسگر اولتراسونیک برای سم‌پاشی در باغ‌ها را با دو نوع نازل توربو و مخروطی بررسی کردند. نتایج نشان داد که سم‌پاشی با استفاده از نازل توربو باعث پوشش ۴۷/۴۱ درصدی سم‌پاشی روی کانویی شد و صرفه‌جویی ۲۶ درصدی در مصرف سم را در پی داشت. همچنین فناوری پاشش مبتنی بر حسگر اولتراسونیک به‌خوبی توانست از سم‌پاشی در ناحیه بدون کانویی خودداری کند. در تحقیقی دیگر میزان نشست و انتشار سم در یک باغ مدرن بررسی گردید. نتایج نشان داد که رانش سم تا ۵۲ متر در جهت باد اتفاق افتاد که این مقدار ۱/۷ برابر بیشتر از مقدار استاندارد بود که توسط استاندارد حفاظت از محیط‌زیست ایالات متحده تعریف گردیده بود (Kasner et al., 2018).
اسکولا و همکاران (Escolà et al., 2013) نیز یک سم‌پاش باغی نرخ متغیر مبتنی بر حسگر لیدار را برای باغات انگور طراحی و ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که تغییر نرخ جریان سم پاشیده‌شده از طریق شیرهای نرخ متغیر الکترومغناطیسی با فرکانس بالا بر اندازه قطرات تولیدی تأثیر معنی‌داری نداشت. زمان و همکاران (Zaman et al., 2011) یک سم‌پاش نرخ متغیر را برای کنترل علف‌های هرز توسعه دادند. این سم‌پاش دارای سامانه کنترل نرخ متغیر شامل ۸ حسگر اولتراسونیک (یک حسگر در هر بخش سم‌پاش) بود. درصد پوشش سطح اهداف سم‌پاشی‌شده با پردازش تصویر بررسی شد. نتایج نشان داد که برای اهداف یکنواخت هیچ انحراف قابل توجهی وجود نداشت و سم‌پاش توانست علف‌های هرز را سم‌پاشی کند. درصد پوشش کاغذهای حساس به آب از ۱۰ درصد تا ۸۱ درصد متغیر بود. گارسرا و همکاران (Garcerá, Moltó, & Chueca, 2017) کارایی سم‌پاشی در باغات مرکبات را بررسی کرده و در این پژوهش نازل‌های مخروطی استاندارد (Teejet D3 DC35) و نازل‌های ونتوری (Albuz TVI 80 03) با هم مقایسه شدند. نتایج نشان داد که تنها حدود ۴۶ درصد از محلول سم بر روی درختان (هدف) نشست کرد. نازل‌های استاندارد دارای رانش بیشتر سم در هوا (۲۳٪) نسبت به نازل‌های ونتوری (۱۷٪) بودند، اما نشست مستقیم کمتری روی زمین (۲۲٪ در مقابل ۲۷٪) داشتند. در پژوهشی یک سامانه اندازه‌گیری تراکم کانویی بدون سرنشین برای پشتیبانی از سم‌پاشی دقیق در باغ‌های سیب به‌منظور اعمال دقیق آفت‌کش‌ها در باغات توسعه داده شد. این سامانه شامل یک حسگر لیدار، برد الکترونیک برای انتقال داده‌ها و یک کامپیوتر بود. آزمایش‌ها در دو باغ انجام شد (یکی با درختان سیب بزرگ و دیگری با درختان سیب کوچک‌تر). نتایج نشان داد که نقشه‌های تراکم کانویی می‌تواند تراکم بالا، متوسط و کم و همچنین مناطق بدون برگ بین درختان سیب را مشخص کند، که برای هدایت سیستم‌های مدیریت دقیق باید تشخیص داده شوند (Mahmud et al., 2021).	الگوهای سم‌پاشی در چهار نوع سم‌پاش تجاری مورد استفاده در تولید محصولات زراعی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که مقدار پاشش دو طرف سم‌پاش‌ها در همه سم‌پاش‌های مورد بررسی اختلاف معنی‌داری نداشت ($p < 0.05$) و تقارن و یکنواختی سم‌پاشی در هر چهار نوع سم‌پاش در محدوده بسیار بالا (۷۶-۱۰۰٪) و زیاد (۵۱-۷۵٪) بود (Rathnayake, Chandel, Schrader, Hoheisel, & Khot, 2021).
سهیلی‌فرد و همکاران (Soheilifard, Marzban, Raini, Taki, & van Zelm, 2020) ردپای شیمیایی آفت‌کش‌های مورد استفاده در باغ‌های مرکبات (نارنگی و لیمو) را بر اساس نشست روی هدف و تلفات خارج از هدف بررسی کردند. سناریوهای مختلف سم‌پاشی بر اساس دو نوع نازل مخروطی توخالی و تی‌جت و سه سطح فشار (۳۰، ۴۰ و ۵۰ بار) در دو باغ با فاصله ردیف‌های مختلف تعریف شد. نتایج نشان داد که تنها ۲۶ تا ۳۷ درصد از محلول سم روی هدف نشست کرد. انتشار سم در هوا نیز به‌ترتیب حدود ۱۷ و ۱۸ درصد برای نازل‌های مخروطی توخالی و تی‌جت گزارش شد.	شن و همکاران (Shen et al., 2017) نیز یک سم‌پاش باغی را با استفاده از سامانه هدایت دقیق لیزری توسعه دادند. دقت سم‌پاش برای شناسایی درختان با اندازه‌های مختلف و کنترل خروجی مقدار سم بر اساس ساختار درخت آزمایش شد. کیفیت نشست سم بین حالت‌های عملیاتی با نرخ متغیر و نرخ ثابت سم‌پاش نیز مقایسه شد. نتایج آزمایش‌ها توانایی سم‌پاش را برای اندازه‌گیری دقیق درختان مختلف و سپس کنترل خروجی مقدار سم از نازل‌ها به‌طور مستقل برای مطابقت با ساختار درخت را نشان داد. شباهت نمای کلی تصاویر مقایسه‌شده با دوربین دیجیتال و با حسگر لیزری برای سه درخت از ۸۱ تا ۸۹ درصد متغیر بود. سم‌پاش نرخ متغیر متناسب با اندازه و شکل درختان توانست ۱۲/۱ تا ۴۳/۳ درصد مقدار مصرف سمی که در حالت نرخ ثابت مصرف شد (۴۶۸ لیتر) را مصرف نماید.
بررسی اقتصادی دو نوع سامانه سم‌پاشی نرخ متغیر (نرخ متغیر مبتنی بر نقشه و نرخ متغیر مبتنی بر حسگر) را بررسی کردند. در این پژوهش یک چارچوب اقتصادی برای ارزیابی نرخ بازگشت سرمایه مورد نیاز برای هزینه سرمایه‌گذاری‌های در سم‌پاش نرخ متغیر برررسی شد. نتایج نشان داد که سیستم‌های نرخ متغیر مبتنی بر حسگر، هزینه‌های مالکیت بالایی دارند اما هزینه‌های سالانه تکرار‌شونده پایینی داشتند. در مقابل، سیستم‌های نرخ متغیر مبتنی بر نقشه، هزینه‌های مالکیت کمتری داشتند، اما دارای هزینه‌های سالانه بالاتری بودند. نتایج نشان داد که بر اساس یک سناریوی پایه، سیستم‌های نرخ متغیر با استفاده از حسگرهای NDIV با وضوح بالا و آن‌هایی که از تصاویر NDVI هوایی استفاده می‌کنند، در سطوح صرفه‌جویی نهاده ۱۱ درصد و یا بالاتر سودآور هستند (Mooney, Larson, Roberts, & English, 2009).	

مواد و روش‌ها

روش آماری و طیف‌سنجی نمونه‌ها

این پژوهش به منظور ارزیابی سم‌پاش (توربولایزر مدل توربینا اس.ای. ۸۰۰) به دو صورت نرخ متغیر و نرخ ثابت در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان و کشت و صنعت شهید رجایی شهرستان دزفول در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ انجام شد. آزمایش به صورت طرح فاکتوریل در قالب بلوک‌های کامل تصادفی و در سه تکرار انجام شد. فاکتور اول شامل نوع سم‌پاش در ۲ سطح (سم‌پاش نرخ متغیر و سم‌پاش نرخ ثابت) و فاکتور دوم سرعت پیشروی سم‌پاشی در ۳ سطح (کم برابر ۱/۶ کیلومتر بر ساعت، متوسط برابر ۳/۲ کیلومتر بر ساعت و زیاد برابر ۴/۸ کیلومتر بر ساعت) بود. جدول ۲ تیمارهای مورد بررسی در این پژوهش بیان شده است.

با توجه به مرور منابع مختلف مشاهده شد که اگرچه تحقیقات مختلفی در مورد سم‌پاش‌های نرخ ثابت و متغیر صورت گرفته است، اما این تحقیقات اغلب به جنبه‌های موردی و منفرد از سم‌پاش‌ها توجه نموده‌اند و به گفته‌ی دو و همکاران (Dou et al., 2018) زمینه‌های زیادی برای پیشرفت و نوآوری در این حوزه وجود دارد. توسعه، ارزیابی و مقایسه کاربرد فن‌آوری نرخ متغیر در سم‌پاشی باغات، اطلاعات جامعی در زمینه سم‌پاش‌های نرخ متغیر برای هرگونه تصمیم‌گیری ارائه می‌دهد. انجام این تحقیق که با هدف بهینه‌سازی مصرف سموم شیمیایی، کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی، کاهش هزینه‌ها و افزایش سودآوری تولید انجام شد، یک نوآوری موثر و کاربردی برای دستیابی به منافع اقتصادی و کشاورزی پایدار است. لذا هدف اصلی از این پژوهش توسعه و ارزیابی یک سم‌پاش توربینی باغی نرخ متغیر و مقایسه آن با نرخ ثابت بود. جدول ۱ جمع‌بندی تعدادی از مطالعات انجام‌شده در تحقیقات قبلی را نشان داده است.

جدول ۲- تیمارهای مورد بررسی در پژوهش حاضر

Table 2- Treatments investigated in the present research

عنوان Title	تیمار ۱ T 1	تیمار ۲ T 2	تیمار ۳ T 3	تیمار ۴ T 4	تیمار ۵ T 5	تیمار ۶ T 6
توضیحات Description	سم‌پاشی نرخ متغیر با سرعت پیشروی ۱/۶ کیلومتر بر ساعت VRT spraying with a speed of 1.6 km hr ⁻¹	سم‌پاشی نرخ متغیر با سرعت پیشروی ۳/۲ کیلومتر بر ساعت VRT spraying with a speed of 3.2 km hr ⁻¹	سم‌پاشی نرخ متغیر با سرعت پیشروی ۴/۸ کیلومتر بر ساعت VRT spraying with a speed of 4.8 km hr ⁻¹	سم‌پاشی نرخ ثابت با سرعت پیشروی ۱/۶ کیلومتر بر ساعت Fixed rate spraying with a speed of 1.6 km hr ⁻¹	سم‌پاشی نرخ ثابت با سرعت پیشروی ۳/۲ کیلومتر بر ساعت Fixed rate spraying with a speed of 3.2 km hr ⁻¹	سم‌پاشی نرخ ثابت با سرعت پیشروی ۴/۸ کیلومتر بر ساعت Fixed rate spraying with a speed of 4.8 km hr ⁻¹

طیف‌سنجی نوری، داده‌های جمع‌آوری شده توسط نرم‌افزار اکسل دسته‌بندی و با استفاده از نرم‌افزار SPSS^۱ تجزیه و تحلیل شدند. تغییرات لازم بر روی یک سم‌پاش توربینی نرخ ثابت که مشخصات آن در جدول ۳ بیان شده است، اعمال گردید.

اجزای اصلی سم‌پاش توسعه‌یافته موردنظر در این پژوهش از شیر برقی on و off، دوربین دیجیتالی برای تصویربرداری، حسگر اولتراسونیک، جریان‌سنج^۲ و مدار کنترلی تشکیل شد. به‌طوری کلی توسعه‌ی سم‌پاش نرخ متغیر از دو بخش تشکیل شد. مرحله اول تشخیص حجم کانوپی و به‌دست آوردن اطلاعات لازم از هدف (درخت) و مرحله دوم ارتباط و عملکرد اجزا در سم‌پاشی نرخ سم‌پاشی (اعمال نرخ متغیر) بود.

پس از توسعه سم‌پاش نرخ ثابت به نرخ متغیر و انجام آزمایش‌های میدانی با هر دو نوع سم‌پاش، پتری‌دیش‌ها که به‌منظور جمع‌آوری مقدار نشست سم روی زمین و کاغذهای فیلتری واتمن که به‌منظور جمع‌آوری مقدار نشست سم روی درخت و انتشار در هوا نصب شده بودند گردآوری شدند و به‌منظور ارزیابی شاخص‌های کمی، در آزمایشگاه محلول پاشیده شده، در ظروف طیف‌سنجی نوری شد. طیف‌سنجی نمونه‌ها به‌منظور تعیین مقدار نشست سم در واحد سطح انجام شد. در این کار نمونه‌ها (پتری‌دیش‌ها و کاغذهای فیلتری واتمن) با آب مقطر مورد شستشو قرار گرفتند و با استفاده از طیف‌سنج نوری غلظت ماده ردیاب مورد استفاده اندازه‌گیری شد (Pergher, 2001) به‌منظور انجام طیف‌سنجی نوری از دستگاه طیف‌سنج نوری مدل Biochrom Libra S22 UV-Vis استفاده شد. این دستگاه قابلیت نمایش طول موج‌های مختلف در غلظت‌های متفاوت و میزان غلظت‌های مختلف در طول موج ثابتی را دارا بود. پس از عملیات

1- Statistical Package for the Social Sciences (SPSS)

2- Flow meter

جدول ۳- مشخصات سمپاش مورد نظر برای توسعه و انجام آزمایشات

Table 3- Characteristics of the desired sprayer for development and testing

مدل Model	حداکثر شعاع پاشش Maximum spraying radius (meters)	حجم مخزن Tank volume (liters)	تعداد و نوع نازل Number and type of nozzles	نوع اتصال به تراکتور Type of connection to the tractor	دور پروانه Propeller speed (rpm)	فشار ماکزیمم Maximum pressure (bar)
توربولاینر (مدل توربینا اس.ای.۸۰۰) Turboliner (S.E.800 turbine model)	20	800	۱۰ نازل مخروطی 10 conical nozzles	PTO گرد سوار شونده mounted PTO	قابل تغییر Adjustable	35

تشخیص حجم کانوپی

برای مصرف بهینه‌ی محلول سم، سامانه‌ی تشخیص حجم کانوپی با استفاده از پردازش تصویر به کار گرفته شد تا حجم کانوپی درخت برای اعمال نرخ متغیر محلول سم، مبنای سمپاشی قرار گیرد. مهم‌ترین کاربرد حسگر اولتراسونیک^۱ نیز تشخیص حجم کانوپی و قطع جریان سمپاشی در فضاهای خالی بین درختان بود که در این فضاها به دلیل عدم وجود کانوپی، نیاز به سمپاشی نبود. برای اخذ تصاویر، از دوربین دیجیتال رنگی استفاده شد. برای تغییر نرخ خروجی از سمپاش متناسب با حجم کانوپی از شیر برقی نرخ متغیر استفاده شد. به همین منظور یک شیر فلکه‌ای معمولی (شکل ۱) تهیه و با تغییرات لازم به یک شیر برقی نرخ متغیر تبدیل گردید. با توجه به این که میزان باز و بسته شدن شیر فلکه‌ای موردنظر باید متناسب با سیگنال دریافتی از مدار الکترونیکی باشد، لذا از یک موتور پله‌ای برای باز و بسته کردن شیر فلکه‌ای استفاده شد. با استفاده از تجهیزات لازم، موتور پله‌ای به نحوی روی شیر فلکه‌ای نصب و یکپارچه گردید که امکان باز و بسته شدن شیر فلکه‌ای توسط موتور پله‌ای وجود داشته باشد. از نرم‌افزار متلب برای انجام بازسازی سه‌بعدی استفاده شد.

به منظور جلوگیری از عملکرد مداوم شیر برقی نرخ متغیر، یک شیر برقی on و off^۲ تهیه و در مسیر جریان سمپاشی بعد از شیر برقی نرخ متغیر قرار گرفت. عملکرد این شیر، وابسته به حسگر اولتراسونیک نصب شده بر روی پایه مخصوصی بود که بر روی بدنه سمپاش قرار داشت. در نرم‌افزار متلب، فاصله مشخصی (یک متر)

برای تشخیص کانوپی درختان توسط حسگر اولتراسونیک تعریف شد، به این معنی که چنانچه در فضای روبه‌روی حسگر اولتراسونیک به فاصله یک متر کانوپی وجود نداشت، جریان کل محلول خروجی توسط شیر برقی on و off قطع می‌گردید. به طور کلی نصب شیر برقی on و off به دو منظور انجام شد. اول این که مانع از کارکرد سامانه با تصویربرداری از درختان ردیف دوم شد و دوم این که به محض این که سمپاش وارد منطقه بدون کانوپی (فاصله بین دو درخت) گردید کل جریان سمپاشی توسط شیر برقی on و off قطع شد و این کار سبب گردید که نیازی به بسته شدن کامل شیر برقی نرخ متغیر نباشد. برای اجرای این عمل، حسگر اولتراسونیک فاصله‌ی بین درختان فقط تا شعاع یک متری را تشخیص داد. فاصله یک متری تعیین شده سبب شد که درختان موجود در ردیف بعد مبنای تصمیم‌گیری جریان نرخ متغیر قرار نگیرند. با تشخیص فاصله توسط حسگر اولتراسونیک، برد الکترونیک دستور قطع شیر برقی on و off را صادر نمود و جریان به طور آبی قطع شد.

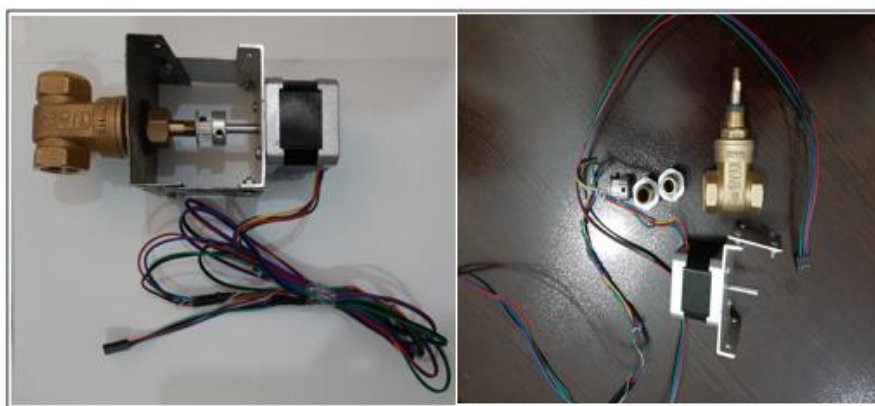
به منظور سنجش مقدار محلول مصرفی در عملیات سمپاشی نیز یک کنتور الکترونیکی سنجش جریان^۳ تهیه و در مسیر خروجی محلول بعد از شیر on و off قرار گرفت (شکل ۲ و ۳).

برای کنترل عملگرهای مورد استفاده، از یک برد الکترونیکی استفاده شد و با نصب نرم‌افزار آردینو بر روی رایانه، امکان تنظیم و کنترل عملگرهای مختلف توسط برد الکترونیکی فراهم گردید. تجهیزات مربوطه مانند شیر برقی نرخ متغیر، شیر on و off، کنتور دیجیتال سنجش مقدار محلول خروجی و حسگر التراسونیک هر کدام با سیم‌های رابط مخصوص خود به این برد متصل شدند. جریان الکتریسیته مورد نیاز برد الکترونیکی و همچنین لپ‌تاپ مورد استفاده، با استفاده از یک مبدل از طریق باتری تراکتور تامین شد. برد الکترونیکی مذکور روی یک پایه چوبی تعبیه شده بر روی سمپاش نصب شد (شکل ۴).

1- Ultrasonic distance measuring module. model: HY-SRF05. Static current: less than 2 mA. Detection distance: 3m-4m. High precision: up to 0.3 cm. Voltage: DC5V. made in China

2- Electric solenoid valve 12v 24V 220V. Operation mode: NC (normally closed). Inlet and outlet: hose barbs for 1/2" (outer diameter) hose. Medium temperature: 0-100°C. Usage: water and low viscosity fluids. Valve body material: brass. made in China.

3- YF-S201C Water flow sensor (flowmeter)



شکل ۱- نصب موتور پله‌ای روی شیر فلکه‌ای و تبدیل آن به شیر نرخ متغیر برقی

Fig.1. Installation of a stepper motor on a poppet valve for electric variable rate valve conversion



شکل ۳- کنتور الکترونیکی نصب‌شده در مسیر خروج محلول سم از سمپاش و کالیبراسیون آن
Fig.3. Electronic meter installed for the pesticide solution exit from the sprayer



شکل ۲- شیر برقی on و off

Fig.2. ON-OFF solenoid valve

آزمایش‌های کارگاهی و میدانی

پس از تهیه و نصب تجهیزات لازم، آزمایش سمپاش طی دو مرحله صورت گرفت. در مرحله اول عملکرد سمپاش در دو حالت نرخ ثابت و نرخ متغیر در محوطه کارگاه ماشین‌های کشاورزی دانشگاه و در حالت ایستاده (بدون حرکت سمپاش) انجام شد. در این مرحله وضعیت سامانه تشخیص درخت به‌منظور بررسی کارکرد قطع و وصل کردن جریان سمپاشی آزمایش شد. در این مرحله به‌منظور اطمینان از کارکرد برنامه نرم‌افزاری نوشته‌شده، یک شی خارجی در مقابل حسگر اولتراسونیک قرار گرفت و ارزیابی لازم صورت گرفت (حالت ایستا). پس از انجام آزمایش کارگاهی مرحله اول و اطمینان از صحت کارکرد سامانه، عملیات آزمایشی دوم روی درختان موجود در محوطه دانشگاه انجام و عملکرد دستگاه مورد بررسی نهایی قرار گرفت. در این مرحله نیز صحت عملکرد دستگاه سمپاش و سامانه نرخ متغیر در حین حرکت مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۵).

شکل ۶ نمای سامانه نرخ متغیر در این پژوهش را نشان داده است.

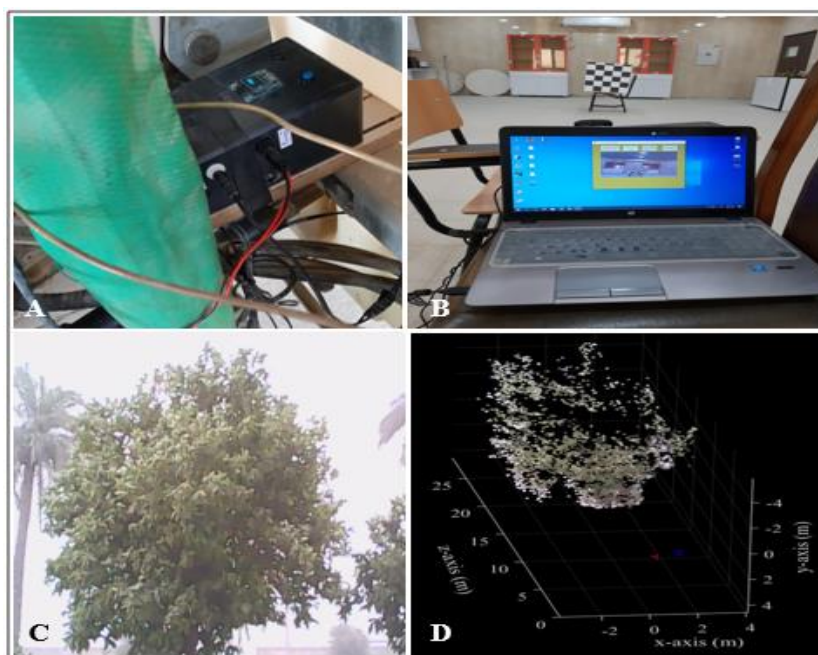
برای تصویربرداری و همچنین تشخیص فاصله بین درختان، از دوربین دیجیتال و حسگر اولتراسونیک استفاده شد. به همین به‌منظور با استفاده از تجهیزات مختلف، پایه‌هایی مناسب و قابل تنظیم تهیه گردید. برای تنظیم و کالیبراسیون دوربین دیجیتال از کادر مکعبی و همچنین تصویربرداری از درختان مرکبات در فواصل مختلف استفاده شد.

کنترل جریان سمپاشی و تشخیص کانوپی با دوربین و

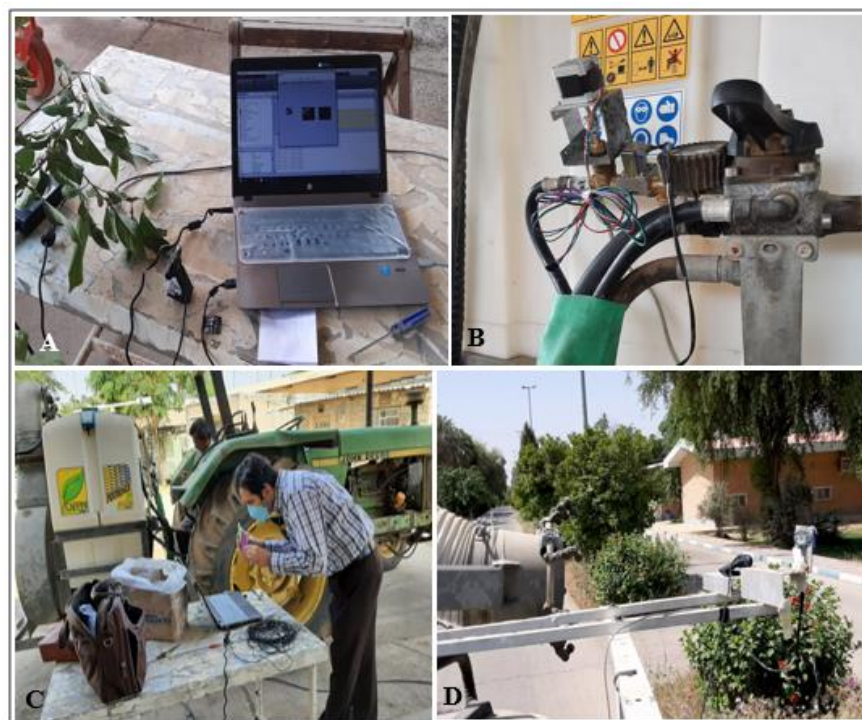
حسگر اولتراسونیک

کنترل‌کننده از نوع PWM^۱ و برنامه‌نویسی‌شده با نرم‌افزار متلب بود. با دریافت تصاویر آنلاین توسط دوربین و تجزیه و تحلیل آن‌ها توسط نرم‌افزار متلب، حجم درختان به‌صورت برخط محاسبه و هم‌زمان به برد الکترونیکی منتقل گردید. برد الکترونیکی یک ولتاژ متناسب با حجم کانوپی درخت به شیر برقی نرخ متغیر ارسال نمود که سبب تغییر در مقدار باز و بسته شدن شیر مذکور و نهایتاً تغییر جریان سم خروجی گردید.

1- Pulse Width Modulation (PWM)

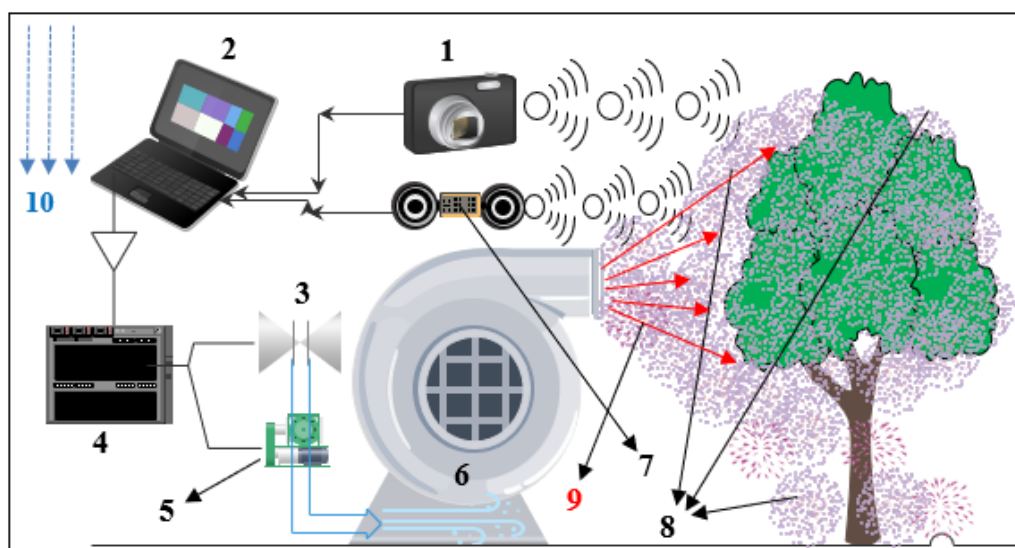


شکل ۴- A: نصب برد الکترونیک روی سمپاش، B: کالیبراسیون دوربین دیجیتال، C: تصویربرداری از درختان، D: برآورد حجم کانوپی
Fig.4. A: The electronic board installed on the sprayer, B: Digital camera calibration, C: Tree imaging, and D: Canopy volume estimation



شکل ۵- A: ارزیابی برنامه نرم‌افزاری تشخیص و محاسبه حجم کانوپی، B: نصب شیر برقی on و off و شیر برقی نرخ متغیر، C: آزمایش کارگاهی سمپاش نرخ متغیر، D: آزمایش میدانی سمپاش نرخ متغیر

Fig.5. A: Evaluation of the software program for canopy recognition and canopy volume calculation, B: Installation of the ON-OFF solenoid valve and the variable rate solenoid valve, C: Testing the variable rate sprayer in the workshop, and D: Testing the variable rate sprayer on the field



شکل ۶- نمای سامانه‌ی سم‌پاشی نرخ متغیر: ۱. دوربین، ۲. رایانه (پردازشگر داده‌ها)، ۳. شیر برقی on و off، ۴. برد الکترونیک، ۵. شیر برقی نرخ متغیر، ۶. سم‌پاش، ۷. حسگر اولتراسونیک، ۸. نقاط بادبردگی، ۹. جهت سم‌پاشی، ۱۰. جهت باد

Fig.6. An overview of the variable rate spraying system: 1. Camera, 2. Computer (data processing), 3. ON-OFF valve, 4. Electronic board, 5. Variable rate valve, 6. Sprayer, 7. Ultrasonic sensor, 8. Drift points, 9. Spraying direction, and 10. Wind direction

برای تعیین میزان سطح برگ درختان مورد بررسی در عملیات سم‌پاشی دو شاخص تراکم سطح برگ (LAD) و حجم کانوپی درخت با در نظر گرفتن مساحت دو رویه برگ اندازه‌گیری شدند (رابطه ۱):

$$S_T = 2 \times LAD \times V_T \quad (1)$$

در این رابطه:

LAD: تراکم سطح برگ (مترمربع برگ به‌ازای مترمکعب کانوپی)

V_T : میانگین حجم ظاهری کانوپی درخت (مترمکعب در هر درخت) می‌باشد.

به همین منظور یک مکعب با ابعاد $50 \times 50 \times 50$ تهیه و از نقاط مختلف درخت برگ‌هایی جدا و جمع‌آوری شده و وزن گردیدند. سپس با استفاده از نسبت وزن برگ در واحد حجم کانوپی سطح برگ درخت به‌دست آمد. برای به‌دست آوردن نسبت سطح برگ به وزن آن، تعداد ۱۰ برگ با استفاده از ترازوی دیجیتال وزن شده و با استفاده از نرم‌افزار متلب و پردازش تصویر سطح این برگ‌ها محاسبه شد. در نهایت با استفاده از دو نسبت به‌دست‌آمده یعنی وزن برگ‌ها (LW) در واحد حجم کانوپی^۵ (CV) (رابطه ۲) و سطح برگ‌ها به وزن آن‌ها (رابطه ۳)، تراکم سطح برگ^۶ محاسبه شد (شکل ۸).

عملیات میدانی و ارزیابی نهایی سم‌پاش موردنظر در باغات مرکبات کشت و صنعت شهید رجایی شهرستان دزفول انجام شد. همه‌ی آزمایش‌ها در دو حالت سم‌پاشی نرخ ثابت و نرخ متغیر و در سه سرعت پیشروی متفاوت (کم، متوسط و زیاد) ($1/6$ ، $3/2$ و $4/8$ کیلومتر بر ساعت) و با سه تکرار اجرا و شاخص‌های عملکردی سم‌پاشی اندازه‌گیری شد. پس از تنظیم سرعت پیشروی و سایر پارامترهای عملکردی مانند فشار و سرعت فن، عملیات سم‌پاشی اجرا شد. پارامترهای محیطی مانند سرعت باد، دما و رطوبت هوا حین انجام آزمایش‌ها اندازه‌گیری و ثبت گردید. به‌منظور اندازه‌گیری سرعت باد و دما از بادسنج و دماسنج^۱ (TAM 618، کشور چین) و برای اندازه‌گیری رطوبت از دستگاه رطوبت‌سنج^۲ (Precision Hair Hygromete، کشور آلمان) که رطوبت را در دامنه دمایی -35 تا $+65$ درجه سانتی‌گراد و در بازه صفر تا ۱۰۰ درصد نشان می‌دهد، استفاده شد (شکل ۷). اندازه‌گیری پارامترهای هواشناسی در روز سم‌پاشی نشان داد که سرعت باد $0/6$ معادل کیلومتر بر ساعت (جهت وزش باد: شرقی-غربی)، رطوبت نسبی $0/42$ و دمای هوا $40/5$ درجه سانتی‌گراد بود.

روش تعیین سطح برگ درختان مورد آزمایش

1- Wind speedometer model DT-618 made by CEM company. Made in China
2- Measuring range: 0%– 100% relative humidity. Temperature range: - 35°C to + 65°C. Reading accuracy: $\pm 5\%$. Diameter: 100mm. made in Germany

3- Tree Leaf Surface
4- Leaf weight
5- Canopy volume
6- Leaf Surface Density

$$LSD = \frac{LAD}{LW} \quad (۳)$$

در رابطه (۳) نیز، LAD: تراکم سطح برگ (مترمربع برگ به‌ازای مترمکعب کانوپی) و LW: وزن برگ‌ها (گرم به‌ازای برگ) بود.

$$TLS = \frac{LW}{CV} \quad (۲)$$

در رابطه (۲)، LW: وزن برگ‌ها (گرم به‌ازای برگ) و CV: حجم ظاهری کانوپی درخت (مترمکعب در هر درخت) بود.



شکل ۷- بادسنج، دماسنج و رطوبت‌سنج مورد استفاده در اندازه‌گیری پارامترهای هواشناسی

Fig.7. Anemometer, thermometer, and hygrometer used for measuring the meteorological parameters



شکل ۸- محاسبه سطح برگ با استفاده از پردازش تصویر

Fig.8. Leaf area calculated using image processing

این دو تصویر بعد از جداسازی تصویر درخت از پس‌زمینه در رابطه (۴) قرار داده شد و حجم گیاه به‌دست آمد.

$$V_T = \frac{1}{6} \times \pi \times d_{ac-r} \times d_{al-r} \quad (۴)$$

در این رابطه d_{ac-r} میانگین قطر کانوپی عمود بر ردیف، d_{al-r}

برای محاسبه حجم ظاهری درختان نیز کانوپی آن‌ها به‌صورت بیضی فرض گردید و حجم آن‌ها بر همین اساس با استفاده از رابطه (۴) محاسبه شد. برای این منظور یک تصویر در راستای عمود بر خط کاشت و یک تصویر هم در راستای خط کاشت اخذ شد و قطر متوسط

میانگین قطر کانویی در راستای ردیف درختان و h ارتفاع کانویی درخت است.

مقایسه و ارزیابی میزان پاشش و کارایی سم‌پاشی در دو حالت نرخ ثابت و نرخ متغیر

برای اندازه‌گیری میزان مصرف سم در واحد سطح، از مخلوط آب و رنگ تارترازین^۱ زرد رنگ جهت پاشش استفاده گردید. این رنگ نوعی رنگ خوراکی است که به میزان ۵-۶ گرم بر لیتر در آب حل می‌شود (Gil et al., 2013). به منظور بررسی میزان نشست سم در واحد سطح، محلول آب و تارترازین بر اساس مقادیر مشخص و تنظیم شده سم‌پاشی شد و میزان نشست محلول سم روی کانویی نقاط مختلف (بالا، وسط و پایین کانویی) مورد بررسی قرار گرفت. مقدار کارایی سم‌پاشی از طریق اندازه‌گیری نشست سم روی کانویی درخت به عنوان هدف و انتشار محلول سم به نقاط غیرهدف (خارج از کانویی) به دست آمد (Soheilifard et al., 2020). هدف از محاسبه‌ی مقدار کارایی، مقایسه عملکرد دو سامانه سم‌پاش نرخ ثابت و نرخ متغیر در استفاده بهینه از محلول سم بود. پس از اندازه‌گیری مقدار نشست سم در نقاط مختلف، تحلیل آماری به منظور مقایسه کارایی در دو نوع سم‌پاش نرخ ثابت و نرخ متغیر انجام شد. برای اندازه‌گیری مقدار نشست سم روی درخت، از کاغذهای فیلتری واتمن به عنوان جمع‌کننده استفاده شد. این کاغذها قبل از انجام عملیات سم‌پاشی با استفاده از ابزار لازم بر روی درخت نصب شدند. برای اندازه‌گیری نشست محلول سم روی زمین نیز از پتری‌دیش استفاده گردید. این پتری‌دیش‌ها به فاصله ده سانتی‌متری از هم در مسیر عمود بر جهت حرکت سم‌پاشی در زیر درخت و همچنین در فواصل کنار درخت بر روی زمین قرار گرفتند. علاوه بر پوشش عرضی پتری‌دیش‌ها در زیر و کنار درختان، آن‌ها تا فاصله ۳۲ متری از مسیر سم‌پاشی نیز بر روی زمین قرار گرفتند. برای اندازه‌گیری انتشارات محلول سم به هوا نیز از کاغذهای فیلتری واتمن با مساحت ۵۰/۲۴ سانتی‌متر مربع استفاده شد. این کاغذها بر روی تیرک‌های چوبی به ارتفاع ۵/۵ متر از سطح زمین و در فاصله بین درختان نصب شدند. همه‌ی پتری‌دیش‌ها و کاغذهای فیلتری واتمن کدگذاری شدند و پس از انجام عملیات سم‌پاشی برای انتقال به آزمایشگاه و انجام عملیات طیف‌سنجی جمع‌آوری شدند. پس از انجام عملیات سم‌پاشی، جمع‌کننده‌های مورد استفاده در آزمایشگاه با آب مقطر مورد شستشو قرار گرفتند و با استفاده از طیف‌سنج نوری، غلظت ماده ردیاب اندازه‌گیری شد (Pergher, 2001). به منظور انجام طیف‌سنجی از دستگاه طیف‌سنج نوری (Biochrom Libra S22 UV-Vis، کشور چین) استفاده گردید. در این روش غلظت ماده ردیاب بر اساس قرائت

دستگاه طیف‌سنج و روابط (۵) و (۶) محاسبه گردید (Garcera et al., 2017).

$$C_{\text{target}} = \frac{V_w \times A_w}{D_t \times f} \quad (5)$$

$$C = \frac{C_{\text{collector}}}{S} \quad (6)$$

در این روابط: C_{target} : مقدار نشست سم روی هدف بر حسب میکرولیتر در هر جمع‌کننده (پتری‌دیش)

A_w : قرائت دستگاه (بر حسب میکرولیتر در میلی‌لیتر آب)

V_w : حجم آب استفاده شده برای شستشوی پتری‌دیش (میلی‌لیتر)

D_t : غلظت ماده ردیاب در سم‌پاشی

f : درصد بازیابی ماده ردیاب مورد استفاده در سم‌پاشی

C : مقدار نشست سم در واحد سطح (بر حسب میکرولیتر بر سانتی‌متر مربع)

$C_{\text{collector}}$: مقدار نشست سم در هر جمع‌کننده (بر حسب میکرولیتر در جمع‌کننده)

K : مساحت هر پتری‌دیش یا جمع‌کننده (بر حسب سانتی‌متر مربع) بود.

مقایسه و ارزیابی کیفیت سم‌پاشی در دو حالت نرخ ثابت و نرخ متغیر

برای بررسی میزان یکنواختی پاشش، از شاخص کیفیت پاشش استفاده شد که بر اساس متوسط اندازه‌ی قطرات محاسبه گردید. اندازه‌ی متوسط قطرات به دو صورت قطر میانه عددی و قطر میانه حجمی بیان می‌گردد. قطر میانه عددی در واقع قطرات پخش شده را بر حسب تعداد به دو بخش مساوی تقسیم می‌کند، در حالی که قطر میانه حجمی، میزان محلول پاشیده شده را به دو بخش تقسیم می‌کند، به گونه‌ای که حجم کل تمام قطره‌های کوچک‌تر از میانه حجمی برابر با حجم کل تمام قطرات بزرگ‌تر از قطر میانه حجمی باشد (Shafii, 2008). سپس شاخص کیفیت را می‌توان از تقسیم قطر میانه حجمی بر قطر میانه عددی محاسبه نمود. هرچه عدد به دست آمده به عدد یک نزدیک‌تر باشد، پاشش دارای کیفیت بالاتری است. به عبارتی دیگر در بهترین شرایط، قطر میانه حجمی و قطر میانه عددی برابر است که البته در عمل رسیدن به آن غیرممکن است. شاخص کیفیت پاشش بر اساس رابطه (۷) محاسبه شد (Safari, Amirshaghghi, Loveymi, & Chagi, 2009).

$$SQI = \frac{VMD}{NMD} \quad (7)$$

در رابطه (۷)، SQI : شاخص کیفیت پاشش^۲، VMD : قطر میانه حجمی^۳ (میلی‌متر) و NMD : قطر میانه عددی^۴ (میلی‌متر) می‌باشد.

2- Spray Quality Index (SQI)

3- Volume Median Diameter (VMD)

4- Number Median Diameter (NMD)

1- Tartrazine



شکل ۹- دستگاه طیف‌سنج نوری مدل Biochrom Libra S22 UV-Vis

Fig.9. Biochrom Libra S22 UV-Vis optical spectrometer

نتایج و بحث

مقدار نشست محلول سم روی درختان در حالت‌های مختلف

سم‌پاشی

نتایج آزمون تجزیه واریانس مقدار نشست محلول سم روی درختان در یک هکتار در دو حالت سم‌پاشی نرخ متغیر و نرخ ثابت در جدول ۴ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که مقدار نشست محلول سم در دو حالت سم‌پاشی نرخ متغیر و نرخ ثابت با هم دارای

تفاوت معنی‌داری بود. با توجه به سطح معنی‌داری ($Sig < 0.05$)، نتیجه گرفته شد که بین میانگین مقدار نشست سم روی درختان در حالت‌های سم‌پاشی نرخ متغیر و نرخ ثابت و همچنین در سرعت‌های مختلف، تفاوت معنی‌داری وجود داشت. نتایج نشان داد که اثر متقابل نوع سم‌پاش و سرعت پیشروی سم‌پاشی تفاوت معنی‌داری بر مقدار نشست سم روی کانوپی نداشت.

جدول ۴- نتایج آزمون تجزیه واریانس مقدار نشست محلول سم روی درختان در حالت‌های مختلف سم‌پاشی

Table 4- ANOVA test results of pesticide solution deposition on trees in different spraying modes

منابع تغییرات Source of variation	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean square	F	P-value
سرعت پیشروی Speed	2	185547.556	7.418	.008**
نوع سم‌پاش Type of sprayer	1	117555.556	46.995	.001**
نوع سم‌پاش * سرعت پیشروی Speed * Type of sprayer	2	31920.889	1.276	.314 ^{ns}
خطا Error	12	25014.611		
ضریب تغییرات (CV) Coefficient of Variation (CV)	0.20			

** در سطح ۱ درصد معنی‌دار است، * در سطح ۵ درصد معنی‌دار است، ns: غیر معنی‌دار

ns: Not significant, *Significant at the probability level of 5%, **Significant at the probability level of 1%

سم رو درختان در یک هکتار باغ مرکبات (پرتقال) محاسبه شد. جدول ۵ نتایج بررسی مقدار نشست محلول سم روی کانوپی درختان در تیمارهای مختلف در دو حالت سم‌پاشی نرخ متغیر و نرخ ثابت و در سه سرعت پیشروی مختلف را نشان داده است.

پس از بررسی کاغذهای فیلتری واتمن در آزمایشگاه، نتایج طیف‌سنجی به‌دست آمد و با توجه به مساحت هر کاغذ فیلتری واتمن (۵۰/۲۴ سانتی‌مترمربع)، مقدار سطح برگ درخت، فضای اختصاصی هر درخت و تعداد درختان در یک هکتار، مقدار کل نشست محلول

جدول ۵- نتایج بررسی مقدار نشست محلول سم روی درختان در یک هکتار در حالت‌های مختلف سم‌پاشی**Table 5- The results of pesticide solution deposition on trees in different spraying modes**

عنوان Title	تیمار ۱ T 1	تیمار ۲ T 2	تیمار ۳ T 3	تیمار ۴ T 4	تیمار ۵ T 5	تیمار ۶ T 6
مقدار نشست روی یک کاغذ فیلتری واتمن Deposition on one Whatman filter paper (L)	0.00039	0.00036	0.00033	0.00054	0.00051	0.00042
مقدار سطح برگ یک درخت Leaf surface of one tree (cm ²)	960395	960395	960395	960395	960395	960395
مقدار کل نشست روی یک درخت Total deposition on one tree (liters per tree)	7.48	6.79	6.39	10.39	9.72	8.07
تعداد درختان در یک هکتار Number of trees in one hectare	204	204	204	204	204	204
مقدار نشست بر درختان یک هکتار Deposition on one hectare of trees (liters per hectare)	1527 ^a	1387 ^a	1303 ^b	2121 ^a	1983 ^a	1646 ^b

به‌دست آمد. همچنین درصد نشست قطرات سم بر سطح پشتی برگ در بخش بیرونی کانوپی بین مقدار ۱ و ۱۴ درصد متغیر بود (Soheilifard et al., 2020).

مقدار نشست محلول سم روی زمین در حالت‌های مختلف سم‌پاشی

نتایج آزمون تجزیه واریانس مقدار نشست سم روی زمین در حالت‌های مختلف سم‌پاشی نشان داد که نوع سم‌پاش و سرعت پیشروی اثر معنی‌داری بر مقدار نشست سم روی زمین داشتند، ولی اثر متقابل نوع سم‌پاش و سرعت پیشروی اثر معنی‌داری بر مقدار نشست سم روی زمین نداشت (جدول ۶).

با توجه به نتایج جدول فوق، کم‌ترین مقدار نشست سم (۱۳۰۳) لیتر در هکتار) روی کانوپی به‌ترتیب در حالت سم‌پاشی نرخ متغیر در سرعت پیشروی ۴/۸ کیلومتر بر ساعت و بیش‌ترین مقدار نشست در حالت سم‌پاشی نرخ ثابت در سرعت پیشروی ۱/۶ کیلومتر بر ساعت (۲۱۲۱ لیتر در هکتار) به‌دست آمد. در پژوهشی با تجزیه واریانس مربوط به اثر پارامترهای عملیاتی بر درصد نشست محلول سم در بخش داخلی کانوپی درخت، محققان گزارش کردند که اثرات سه‌گانه‌ی فشار، سرعت پیشروی سم‌پاش و نوع نازل بر مقدار نشست محلول سم معنی‌دار بود. این محققان گزارش کردند که بیش‌ترین مقدار نشست سم (۶۷ درصد) در فشار ۶۵۰ پی‌اس‌آی و سرعت پیشروی ۱ کیلومتر بر ساعت در نازل مخروطی توخالی و کم‌ترین میزان نشست سم (۱۲ درصد) در فشار ۴۵۰ پی‌اس‌آی و سرعت پیشروی ۱۰ کیلومتر بر ساعت برای نازل مخروطی توپر

جدول ۶- نتایج تجزیه واریانس مقدار نشست محلول سم روی زمین در یک هکتار در حالت‌های مختلف سم‌پاشی**Table 6- ANOVA test results of pesticide solution deposition on the ground per hectare in different spraying modes**

منابع تغییرات Source of variation	df	میانگین مربعات Mean square	F	P-value
سرعت پیشروی Speed	2	15438.389	5.070	.025**
نوع سم‌پاش Type of sprayer	1	5730240.889	1881.887	.001**
نوع سم‌پاش * سرعت پیشروی Speed * Type of sprayer	2	9641.722	3.166	.079 ^{ns}
خطا Error	12	3044.944		
ضریب تغییرات (CV) Coefficient of Variation (CV)	0.52			

** در سطح ۱ درصد معنی‌دار است، * در سطح ۵ درصد معنی‌دار است، ns: غیر معنی‌دار

ns: Not significant, **Significant at the probability level of 5%, **Significant at the probability level of 1%

در حالت‌های مختلف سم‌پاشی را نشان داده است. کم‌ترین مقدار نشست سم روی زمین در حالت سم‌پاشی نرخ متغیر و در سرعت پیشروی ۱/۶ کیلومتر بر ساعت (۵۴۶ لیتر بر هکتار) و بیش‌ترین

به‌منظور بررسی مقدار نشست محلول سم روی زمین، طیف‌سنجی گردآورنده‌های نصب‌شده در فضای زیر کانوپی و روی زمین انجام شد. شکل ۱۰ نتایج بررسی مقدار نشست سم روی زمین

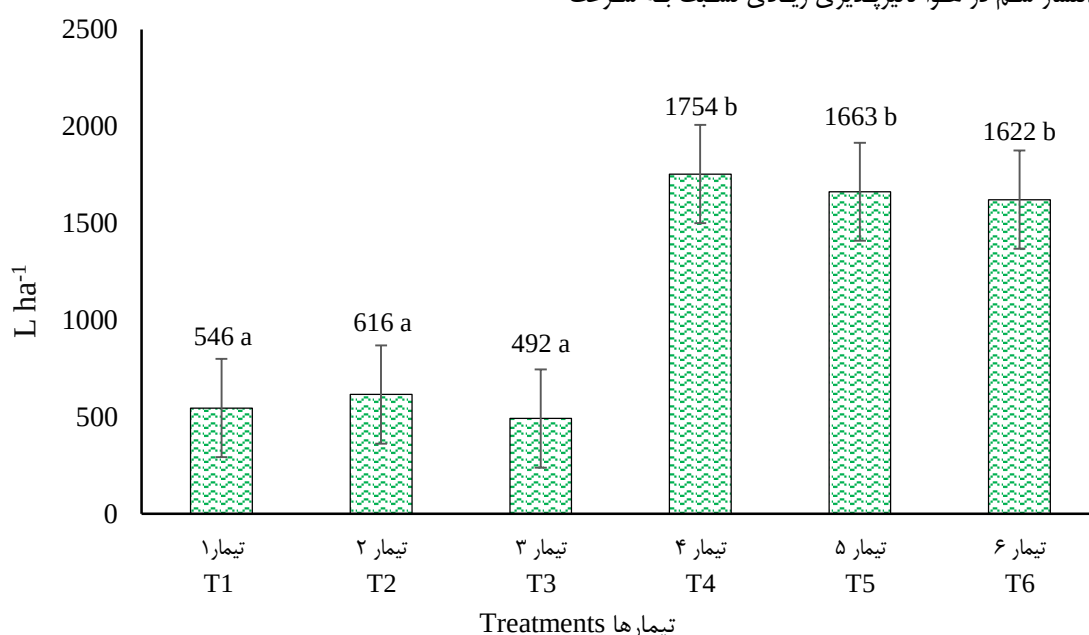
پیشروی و نوع سم‌پاش داشت زیرا با تغییر سرعت پیشروی و همچنین تغییر نوع سم‌پاش، مقدار انتشار در هوا تغییرات معنی‌داری را نشان داد.

بهزادی‌پور و همکاران (Behzadipour, Ghaseminejad, Raini, Asodar, Marzban, & Abdanan Mehdizadeh, 2017) در پژوهشی گزارش کردند که افزایش فشار و سرعت پیشروی سم‌پاش سبب کاهش نشست و افزایش مقدار بادرگسی سم می‌شود. نتایج نشان داد که با افزایش سرعت پیشروی، فشار هوا بر روی نازل‌ها بیشتر شد و این موضوع به ریزتر شدن اندازه قطرات کمک نمود و اثر افزایشی بر روی بادرگسی ذرات و اثر کاهش‌ی بر میزان نشست ذرات سم بر روی کانویی داشت.

مقدار در حالت سم‌پاشی نرخ ثابت و در سرعت پیشروی ۱/۶ کیلومتر بر ساعت (۱۷۵۴ لیتر بر هکتار) محاسبه شد.

مقدار انتشار محلول سم در هوا در حالت‌های مختلف سم‌پاشی

جدول ۷ نتایج آزمون تجزیه واریانس مقدار انتشار سم در هوا در حالت‌های مختلف سم‌پاشی را نشان داده است. نتایج آزمون تجزیه واریانس مقدار انتشار سم در هوا نشان داد که نوع سم‌پاش، سرعت پیشروی سم‌پاشی و اثر متقابل نوع سم‌پاش و سرعت پیشروی اثر معنی‌داری بر مقدار انتشار سم در هوا داشتند. این موضوع نشان داد که مقدار انتشار سم در هوا تاثیرپذیری زیادی نسبت به سرعت



شکل ۱۰- نتایج بررسی مقدار نشست محلول سم روی زمین در یک هکتار در حالت‌های مختلف سم‌پاشی
Fig.10. Pesticide solution deposition on the ground per hectare in different spraying modes

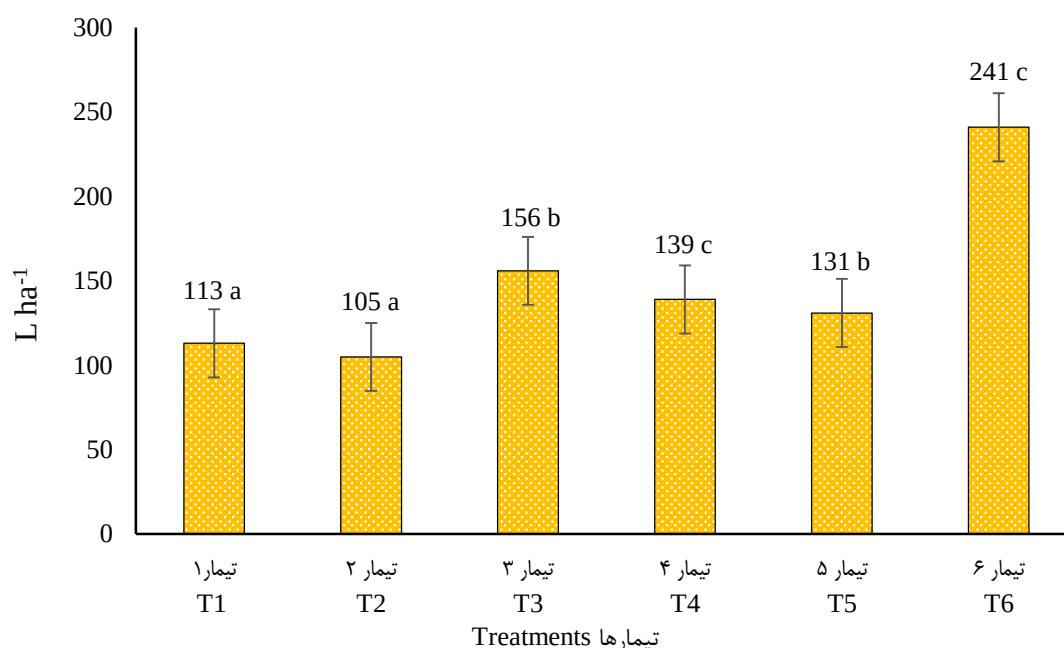
جدول ۷- نتایج تجزیه واریانس مقدار انتشار سم در هوا در یک هکتار در حالت‌های مختلف سم‌پاشی
Table 7- ANOVA test results for airborne pesticide release per hectare in different spraying modes

منابع تغییرات Source of variation	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean square	F	P-value
سرعت پیشروی Speed	2	4818.389	37.224	.001**
نوع سم‌پاش Type of sprayer	1	45702.722	353.068	.001**
نوع سم‌پاش * سرعت پیشروی Speed * Type of sprayer	2	1812.056	13.999	.001**
خطا Error	12	129.444		
ضریب تغییرات (CV) Coefficient of Variation	0.34			

** در سطح ۱ درصد معنی‌دار است، * در سطح ۵ درصد معنی‌دار است، ns: غیر معنی‌دار
ns: Not significant, *Significant at the probability level of 5%, **Significant at the probability level of 1%

در تغییر چرخه بادبردگی و افزایش آن و همچنین کاهش نشست سم روی درختان داشت. با توجه به این‌که در سرعت پیشروی بالاتر، فرصت کافی برای نشست سم روی درخت کمتر بود و از طرف جریان هوای اطراف درخت در سرعت پیشروی بالاتر دارای تغییر بیشتری بود، لذا مقدار انتشار سم در هوا در سرعت پیشروی بالاتر افزایش نشان داد. نتایج نشان داد که در سرعت پیشروی ۳/۲ کیلومتر بر ساعت، مقدار انتشار در هوا در کمترین حد خود بود.

شکل ۱۱ نتایج مقدار انتشار محلول سم در هوا (رانس سم) در حالت‌های مختلف سم‌پاشی را نشان داده است. نتایج نشان داد که کمترین مقدار انتشار سم در هوا در حالت سم‌پاشی نرخ متغیر و در سرعت پیشروی ۱/۶ کیلومتر بر ساعت (۱۱۳ لیتر بر هکتار) و بیشترین مقدار در حالت سم‌پاشی نرخ ثابت و در سرعت پیشروی ۴/۸ کیلومتر بر ساعت (۲۴۱ لیتر بر هکتار) اتفاق افتاد. در سم‌پاشی نرخ ثابت و در سرعت پیشروی ۴/۸ کیلومتر بر ساعت، سرعت پیشروی نقش موثری



شکل ۱۱- نتایج بررسی مقدار انتشار محلول سم در هوا در یک هکتار در حالت‌های مختلف سم‌پاشی

Fig.11. Airborne pesticide release per hectare in different spraying modes

معنی‌داری دارد، مطابقت داشت.

نتایج تحقیق خیری و همکاران (Khairy, Zaalouk, Rasmi, & Othman, 2020) نشان داد که با افزایش سرعت پیشروی سم‌پاشی، مقدار محلول سم مصرفی کاهش و با افزایش فشار سم‌پاشی برای انواع نازل‌ها در حالت استفاده و بدون استفاده از تکنیک بینایی ماشین نیز افزایش یافت. در حالت استفاده از تکنیک بینایی ماشین، در نازل نوع N4، فشار پاشش ۴۰۰ کیلوپاسکال و سرعت پیشروی ۰/۲۷ متر بر ثانیه، حداکثر درصد صرفه‌جویی محلول سم‌پاشی ۵۷/۵۷ درصد نسبت به حالت بدون استفاده از تکنیک بینایی ماشین بود. در حالت استفاده از تکنیک بینایی ماشین نسبت به حالت بدون بینایی و با نازل نوع N1، فشار پاشش ۲۵۰ کیلوپاسکال و سرعت پیشروی ۱/۱۲ متر بر ثانیه، حداقل درصد صرفه‌جویی در محلول سم‌پاشی ۴۷/۸۲ درصد گزارش شد.

مقدار مصرف کل محلول سم در هکتار در حالت‌های مختلف سم‌پاشی

جدول ۸ نتایج آزمون تجزیه واریانس مقدار کل مصرف سم در حالت‌های مختلف سم‌پاشی را نشان داده است. نتایج آزمون تجزیه واریانس برای مقدار نشست سم روی درختان، زمین، انتشار در هوا و کل مصرف سم در هکتار نشان داد که مقدار این شاخص‌ها در دو حالت سم‌پاشی نرخ متغیر و نرخ ثابت دارای تفاوت معنی‌داری بود. با توجه به سطح معنی‌داری ($Sig < 0.05$)، نتیجه گرفته شد که نوع سم‌پاشی و سرعت پیشروی بر مقدار کل مصرف سم اثر معنی‌داری داشتند ولی اثر متقابل نوع سم‌پاشی و سرعت پیشروی بر مقدار کل مصرف سم در هکتار معنی‌دار نبود. این نتایج با نتایج سهیلی‌فرد و همکاران (Soheilifard et al., 2020) که گزارش کردند سرعت پیشروی بر درصد نشست محلول سم اثر

جدول ۸- نتایج آزمون تجزیه واریانس مقدار کل مصرف سم در حالت‌های مختلف سم‌پاشی
Table 8- ANOVA test results for the total pesticide consumption in different spraying modes

منابع تغییرات Source of variation	df	میانگین مربعات Mean square	F	P-value
سرعت پیشروی Speed	2	274440.056	7.230	.009**
نوع سم‌پاش Type of sprayer	1	13629420.500	359.046	.001**
نوع سم‌پاش * سرعت پیشروی Speed * Type of sprayer	2	56405.167	1.486	.265ns
خطا Error	12	37960.111		
ضریب تغییرات (CV) Coefficient of Variation (CV)	0.32			

** در سطح ۱ درصد معنی‌دار است، * در سطح ۵ درصد معنی‌دار است، ns: غیر معنی‌دار

ns: Not significant, *Significant at the probability level of 5%, **Significant at the probability level of 1%

کونینگ‌هام و هاردن (Cunningham & Harden, 1998) نیز در تلاش برای کاهش مقدار حجم سم مصرفی در باغات مرکبات، مقدار نشست سموم روی کانوپی و همچنین مقدار هدررفت آن‌ها از سطح کانوپی را بررسی نمودند. این محققان مقدار محلول سم بهینه از جهت نشست روی هدف و میزان هدر رفت را برابر با ۲۰۰۰ لیتر در هکتار تعیین کردند، بدین صورت که با افزایش مقدار محلول سم مصرفی در هکتار، میزان هدر رفت سم افزایش می‌یابد و از درصد نشست سم روی برگ درخت کاسته می‌شود. همچنین در حالت بهینه، میزان نشست محلول سم روی هدف را ۰/۴۶ گزارش کردند. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که در ترکیب تیماری حالت نرخ متغیر و سرعت پیشروی ۴/۸ کیلومتر بر ساعت، کمترین میزان مصرف سم (۱۹۵۲ لیتر در هکتار) برای یک هکتار باغ مرکبات اتفاق افتاد. این در حالی است که در حالت سم‌پاشی نرخ ثابت در سرعت ۴/۸ کیلومتر بر ساعت، مقدار مصرف سم ۳۵۰۹ لیتر در هکتار بود.

جدول ۹ نتایج بررسی مقدار مصرف کل سم در هکتار و همچنین نشست روی درخت، زمین و انتشار در هوا در حالت‌های مختلف سم‌پاشی را نشان داده است. نتایج نشان داد که کمترین مقدار مصرف سم در حالت سم‌پاشی نرخ متغیر و در سرعت پیشروی ۱/۶ کیلومتر بر ساعت (۱۹۵۲ لیتر بر هکتار) و بیشترین مقدار مصرف سم در حالت سم‌پاشی نرخ ثابت در سرعت ۱/۶ کیلومتر بر ساعت (۴۰۱۴ لیتر بر هکتار) به‌دست آمد. بیشترین مقدار صرفه‌جویی ناشی از کاربرد فناوری نرخ متغیر در سم‌پاشی باغات، در سرعت پیشروی ۱/۶ کیلومتر بر ساعت (۴۶ درصد) محاسبه شد. میانگین مقدار نشست سم در همه تیمارها در حالت سم‌پاشی نرخ ثابت نسبت به نرخ متغیر بیشتر بود. در پژوهشی کارمان و همکاران (Carman, Iwata, & Gunther, 1977) مقدار نشست آفت‌کش‌ها را بر روی بخش‌های مختلف درختان و خاک بررسی کردند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، میزان نشست محلول سم روی کانوپی درخت، ۶۰ تا ۷۵ درصد تعیین شد.

جدول ۹- مقدار کل مصرف و درصد صرفه‌جویی سم در هکتار در حالت‌های مختلف سم‌پاشی
Table 9- The total amount of consumption and percentage of saving of pesticide per hectare in different modes of spraying

عنوان Title	تیمار ۱ T 1	تیمار ۲ T 2	تیمار ۳ T 3	تیمار ۴ T 4	تیمار ۵ T 5	تیمار ۶ T 6
جمع کل نشست روی درخت، زمین و انتشار در هوا Sum of total deposition on trees, ground, and air emissions (L ha ⁻¹)	2185	2107	1952	4014	3777	3509
کاهش مصرف نسبت به نرخ ثابت Reduction in consumption compared to fixed rate (liters)	1829	1670	1557			
درصد صرفه‌جویی Savings percentage	46	44	44			

مقدار کارایی مصرف سم در هکتار در حالت‌های مختلف

سم‌پاشی

جدول ۱۰ نتایج آزمون تجزیه واریانس درصد کارایی پاشش در حالت‌های مختلف سم‌پاشی را نشان داده است. نتایج نشان داد که نوع سم‌پاش، سرعت پیشروی و همچنین اثر متقابل نوع سم‌پاش و سرعت پیشروی اثر معنی‌داری بر کارایی پاشش داشت. بهزادی‌پور و همکاران (Behzadipour et al., 2017) در پژوهشی بیان کردند که با کاهش فشار سم‌پاشی از ۳۵ به ۱۰ با مقدار بادبردگی کاهش یافت. این محققان گزارش کردند که با کاهش فشار سم‌پاشی از ۳۵ به ۱۰ بار مقدار نشست سم از ۷۷/۴ لیتر بر هکتار به ۱۴۲/۳ لیتر بر هکتار افزایش یافت.

جدول ۱۱ نتایج بررسی مقدار کارایی در حالت‌های مختلف سم‌پاشی را نشان داده است. کمترین و بیشترین مقدار کارایی به ترتیب در حالت سم‌پاشی نرخ متغیر در سرعت پیشروی ۱/۶ کیلومتر بر ساعت (۰/۷۰) و سم‌پاشی نرخ ثابت با سرعت پیشروی ۴/۸ کیلومتر بر ساعت (۰/۴۷) به دست آمد. شن و همکاران (Shen et al., 2017) با توسعه یک سم‌پاش نرخ متغیر و دارای هدایت لیزری به منظور کنترل نرخ جریان محلول سم خروجی متناسب با اندازه، شکل و تراکم کانوپی در زمان واقعی گزارش کردند که سم‌پاشی نرخ متغیر توانست ۱۲/۱٪ تا ۴۳/۳٪ از مقدار سم مصرفی در حالت سم‌پاشی نرخ ثابت را مصرف کند و سبب صرفه‌جویی قابل توجهی در مصرف سم شود.

جدول ۱۰- نتایج آزمون تجزیه واریانس درصد کارایی سم‌پاشی در حالت‌های مختلف

Table 10- ANOVA test results of spraying efficiency percentage in different modes

منابع تغییرات Source of variation	df	میانگین مربعات Mean square	F	P-value
سرعت پیشروی Speed	2	.002	5.890	.017**
نوع سم‌پاش Type of sprayer	1	.138	403.735	.001**
نوع سم‌پاش * سرعت پیشروی Speed * Type of sprayer	2	.001	4.200	.041**
خطا Error	12	.000		
Coefficient of Variation (CV) ضریب تغییرات	0.16			

** در سطح ۱ درصد معنی‌دار است، * در سطح ۵ درصد معنی‌دار است، ns: غیر معنی‌دار

ns: Not significant, *Significant at the probability level of 5%, **Significant at the probability level of 1%

جدول ۱۱- مقدار کارایی سم‌پاشی در حالت‌های مختلف سم‌پاشی

Table 11- Spraying efficiency in different spraying modes

عنوان Title	تیمار ۱ T 1	تیمار ۲ T 2	تیمار ۳ T 3	تیمار ۴ T 4	تیمار ۵ T 5	تیمار ۶ T 6
مقدار کارایی مصرف سم در هکتار (درصد) The efficiency of the use of Pesticide per hectare (percentage)	70	66	67	53	52	47

نتایج مقایسه و ارزیابی کیفیت سم‌پاشی در دو حالت نرخ

ثابت و نرخ متغیر

جدول ۱۲ نتایج آزمون تجزیه واریانس مقدار کیفیت سم‌پاشی پاشش در حالت‌های مختلف سم‌پاشی را نشان داده است. با توجه به نتایج، سرعت پیشروی، نوع سم‌پاش و اثر متقابل این دو عامل اثر معنی‌داری بر شاخص کیفیت پاشش نداشت. نتایج نشان داد با توجه به ثابت بودن نوع نازل‌ها و همچنین فشار یکسان سم‌پاشی در تیمارهای مختلف، تغییر سرعت پیشروی سم‌پاشی اثر معنی‌داری بر کیفیت پاشش نداشت. همچنین با توجه به یکسان بودن نوع نازل‌های

سم‌پاشی، نوع سم‌پاش از نظر نرخ متغیر و نرخ ثابت بودن نیز عملاً اثر معنی‌داری بر کیفیت پاشش نداشت. ارزیابی دو پارامتر قطر میانه عددی و قطر میانه حجمی نیز نشان داد که بین تیمارهای مختلف اثر معنی‌داری از این نظر وجود نداشت. بهزادی‌پور و همکاران (Behzadipour et al., 2017) با ارزیابی سم‌پاش توربولایزر گزارش کردند که کاهش فشار سم‌پاشی باعث افزایش قطر و نیز افزایش حجم قطرات گردید که متناسب با افزایش حجم قطرات، افزایش قطر حجمی و قطر میانه عددی حاصل شد و به‌طور کلی با افزایش فشار سم‌پاشی، قطر قطرات و در نتیجه شاخص کیفیت پاشش کاهش

برای تخمین خصوصیات سمپاشی از کاغذهای حساس به آب استفاده شد. نتایج نشان داد که سمپاشی با استفاده از نازل توربو باعث پوشش ۴۷/۴۱ درصدی سمپاشی شد و ۱۷۱ قطره در سانتی‌متر مربع با ۲۶ درصد صرفه‌جویی در مصرف سم را در پی داشت. علاوه بر این نتایج نشان داد که میزان پوشش سم توسط نازل توربو بیشتر از نازل مخروطی بود. همچنین فناوری پاشش مبتنی بر حسگر اولتراسونیک به‌خوبی توانست از سمپاشی در ناحیه بدون کانوپی خودداری کند.

جدول ۱۳ نتایج آزمون تجزیه واریانس برای شاخص‌های قطر میانه عددی، قطر میانه حجمی و درصد پوشش را نشان داده است. نتایج نشان داد که شاخص درصد پوشش کاغذهای حساس به آب نیز در تیمارهای مختلف اثر معنی‌داری نداشت.

یافت. سهیلی‌فرد و همکاران (Soheilifard et al., 2020) نیز گزارش کردند که نوع نازل اثر معنی‌داری بر کیفیت سمپاشی نداشت و شاخص کیفیت پاشش در نازل‌های مخروطی توخالی و مخروطی توپر ۱/۶۳ به‌دست آمد. این محققان بیان کردند که اثر سه‌گانه‌ی نازل، فشار و سرعت پیشروی سمپاش بر قطر میانه حجمی نیز اثر معنی‌داری نداشت و تنها اثر اصلی فشار سمپاشی بر کیفیت سمپاشی معنی‌دار بود. اثرات نوع نازل و سرعت پیشروی سمپاش نیز معنی‌دار نبودند.

تواری و همکاران (Tewari et al., 2018) در پژوهشی کاربرد یک سامانه فناوری پاشش خودکار مبتنی بر حسگر اولتراسونیک برای سمپاشی در باغ‌ها را با دو نوع نازل توربو و مخروطی بررسی کردند.

جدول ۱۲- نتایج آزمون تجزیه واریانس کیفیت سمپاشی در حالت‌های مختلف

Table 12- ANOVA test results of spraying quality in different modes

منابع تغییرات Source of variation	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean square	F	P-value
سرعت پیشروی Speed	2	35.962	1.723	.220 ^{ns}
نوع سمپاش Type of sprayer	1	1.773	.085	.776 ^{ns}
نوع سمپاش * سرعت پیشروی Speed * Type of sprayer	2	4.168	.200	.822 ^{ns}
خطا Error	12	20.869		
ضریب تغییرات (CV) Coefficient of Variation (CV)	103.1			

** در سطح ۱ درصد معنی‌دار است، * در سطح ۵ درصد معنی‌دار است، ns: غیر معنی‌دار

ns: Not significant, *Significant at the probability level of 5%, **Significant at the probability level of 1%

به ۱۳/۵ کیلومتر بر ساعت، قطر میانه حجمی و قطر میانه عددی کاهش یافت و متناسب با افزایش سرعت پیشروی، فشار هوا روی نازل‌ها افزایش و سبب ریزتر شدن اندازه، قطر و حجم قطرات گردید ولی افزایش فشار سبب کاهش شاخص کیفیت پاشش گردید. کاهش قطر میانه عددی و قطر میانه حجمی می‌تواند پتانسیل بادبردگی سموم را افزایش دهد. بالسری و همکاران (Balsari, Marucco, & Tamagnone, 2014) نیز جریان هوای ایجادشده توسط سمپاش‌های توربینی را یکی از عوامل موثر بر میزان بادبردگی عنوان کردند. بنابراین نتایج این تحقیق با نتایج گزارش‌شده توسط دیگر محققان نیز مطابقت داشت و از آن‌جا که در پژوهش حاضر نوع نازل‌ها و فشار سمپاشی در تیمارهای مختلف یکسان بود، لذا سرعت پیشروی به‌تنهایی اثر معنی‌داری بر کیفیت پاشش و درصد پاشش نداشت. از طرفی تغییر نوع سمپاش از حالت نرخ ثابت به نرخ متغیر نیز فقط جریان سمپاشی بین فواصل درختان را قطع نمود و این امر (با توجه به ثابت بودن فشار سمپاشی و نوع نازل‌ها) اثری در تغییر کیفیت و درصد پاشش نداشت.

نتایج مقایسه میانگین شاخص کیفیت پاشش نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین تیمارها وجود نداشت. تیمار سوم یعنی سمپاشی با سمپاش نرخ متغیر در سرعت ۴/۸ کیلومتر بر ساعت، بهترین کیفیت پاشش را دارا بود. در سمپاشی با سرعت پیشروی ۱/۶ کیلومتر بر ساعت در هر دو حالت سمپاشی نرخ متغیر و نرخ ثابت، شاخص کیفیت پاشش بدترین شرایط را دارا بود. ناصری و همکاران (Naseri, Abbaspour Fard, Chaji, & Heydarzadeh, 2007) در پژوهشی اثر افزایش سرعت پیشروی را در سمپاش توربولاینر بررسی کردند و نتیجه گرفتند که با افزایش سرعت پیشروی در سه سطح ۲/۴۳، ۵/۲۰ و ۸/۱۲ کیلومتر بر ساعت، قطر میانه حجمی به‌ترتیب ۴/۰۵، ۱/۷۵ و ۰/۹۸ میلی‌متر و قطر میانه عددی به‌ترتیب ۱/۲۶، ۰/۲۲ و ۰/۱ میلی‌متر کاهش یافت. این محققان گزارش کردند که در سمپاش توربولاینر، بهترین شاخص کیفیت پاشش در سرعت پیشروی سمپاشی ۵/۲ کیلومتر بر ساعت اتفاق افتاد که با نتایج این تحقیق همخوانی دارد. بهزادی‌پور و همکاران (Behzadipour et al., 2017) نیز گزارش کردند که با افزایش سرعت پیشروی سمپاشی از ۹

جدول ۱۳ - نتایج آزمون تجزیه واریانس شاخص‌های قطر میانه عددی، قطر میانه حجمی و درصد پوشش در حالت‌های مختلف
Table 13- ANOVA test results of numerical mean diameter, volume mean diameter, and coverage percentage in different modes

منابع تغییرات		درجه	میانگین مربعات	F	P-value
Source of variation		df آزادی	Mean square		
سرعت پیشروی	قطر میانه عددی	2	58.783	1.259	.319 ^{ns}
	Number Median Diameter				
	قطر میانه حجمی	2	118.757	2.444	.129 ^{ns}
	Volume Median Diameter				
	درصد پوشش	2	7.404	.786	.478 ^{ns}
	Coverage percentage				
نوع سم پاش	قطر میانه عددی	1	68.992	1.477	.248 ^{ns}
	Number Median Diameter				
	قطر میانه حجمی	1	104.835	2.157	.168 ^{ns}
	Volume Median Diameter				
	درصد پوشش	1	8.736	.928	.355 ^{ns}
	Coverage percentage				
نوع سم پاش * سرعت پیشروی	قطر میانه عددی	2	152.718	3.270	.074 ^{ns}
	Number Median Diameter				
	قطر میانه حجمی	2	215.075	4.426	.036 ^{ns}
	Volume Median Diameter				
	درصد پوشش	2	20.334	2.159	.158 ^{ns}
	Coverage percentage				
خطا	قطر میانه عددی	12	46.706		
	Number Median Diameter				
	قطر میانه حجمی	12	48.598		
	Volume Median Diameter				
	درصد پوشش	12	9.418		
	Coverage percentage				
ضریب تغییرات	قطر میانه عددی	68.5%			
	Number Median Diameter				
	قطر میانه حجمی	59.9%			
	Volume Median Diameter				
	درصد پوشش	83.1%			
	Coverage percentage				

** در سطح ۱ درصد معنی‌دار است، * در سطح ۵ درصد معنی‌دار است، ns: غیر معنی‌دار

ns: Not significant, *Significant at the probability level of 5%, **Significant at the probability level of 1%

نتیجه‌گیری

کیلومتر بر ساعت)، صرفه‌جویی ۴۶ درصدی و کارایی ۷۰ درصدی سم‌پاشی را به همراه داشت. در همه‌ی تیمارهای مورد بررسی، نوع سم‌پاش و سرعت پیشروی سم‌پاشی اثر معنی‌داری بر تغییرات مقدار نشست سم داشتند ولی اثر متقابل نوع سم‌پاش و سرعت پیشروی سم‌پاشی اثر معنی‌داری بر مقدار نشست سم روی درختان و کل مصرف سم در هکتار نداشت. درصد پوشش محلول سم روی هدف در تیمارهای مختلف نیز تفاوت معنی‌داری نداشت و بهترین کیفیت پاشش در سم‌پاشی نرخ متغیر با سرعت پیشروی ۴/۸ کیلومتر بر ساعت اتفاق افتاد. با استفاده از سم‌پاش نرخ متغیر ضمن صرفه‌جویی در مصرف سموم شیمیایی و هزینه‌های سم‌پاشی، مقدار انتشار سموم که سبب آلودگی‌های زیست‌محیطی می‌شود نیز کاهش خواهد یافت. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده سامانه‌ی نرخ متغیر مبتنی بر

فن‌آوری‌های نوین نقش مهمی در افزایش بهره‌وری بخش کشاورزی دارند و در صورت عدم استفاده از این فن‌آوری‌ها چالش‌های مربوط به پایداری تولید در آینده بیش‌ازپیش افزایش می‌یابد. یکی از عملیات مهم در تولید محصولات کشاورزی، مرحله سم‌پاشی است. در این پژوهش یک سم‌پاش نرخ ثابت به نرخ متغیر توسعه داده شد و ارزیابی گردید. توسعه‌ی این سم‌پاش از نرخ ثابت به نرخ متغیر مبتنی بر پردازش تصویر، استفاده از حسگر اولتراسونیک و شیر برقی نرخ متغیر بود. نتایج ارزیابی و مقایسه این دو سم‌پاش نشان داد که سم‌پاش نرخ متغیر توانست با تشخیص حجم کانوپی در زمان واقعی مقدار پاشش سم را کنترل کند و در بهترین حالت (سرعت ۱/۶

مشارکت نویسندگان

رستم فتحی: جمع‌آوری داده‌ها، تحلیل آماری، پردازش آماری، استخراج و تهیه متن مقاله

محمود قاسمی‌نژاد راثینی: نظارت و مدیریت، مفهوم‌سازی، ویرایش

متن

سامان آبدانان مهدی‌زاده: خدمات نرم‌افزاری، ویرایش متن

مرتضی تاکی: خدمات نرم‌افزاری، مفهوم‌سازی، ویرایش متن

مصطفی مردانی نجف‌آبادی: ویرایش متن

نازل‌های مستقل توسعه داده شود تا بتوان پاشش لحظه‌ای در هر نازل را کنترل نمود.

سپاسگزاری

این مقاله بخشی از رساله دکتری گروه مهندسی مکانیزاسیون و ماشین‌های کشاورزی از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان می‌باشد. با تشکر از معاونت پژوهشی دانشگاه که حمایت مالی این پژوهش را بر عهده گرفت.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان این مقاله وجود ندارد.

References

- Asaei, H., Jafari, A., & Loghavi, M. (2019). Site-specific orchard sprayer equipped with machine vision for chemical usage management. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162, 431-439. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.04.040>
- Balsari, P., Marucco, P., & Tamagnone, M. (2007). A test bench for the classification of boom sprayers according to drift risk. *Crop Protection*, 26(10), 1482-1489. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2006.12.012>
- Baran, M. F., Lüle, F., & Gökdoğan, O. (2017). Energy input-output analysis of organic grape production: A case study from Adiyaman province. *Erwerbs-Obstbau*, 59(4), 275-279. <https://doi.org/10.1007/s10341-017-0322-1>
- Behzadipour, F., Ghaseminejad Raini, M., Asodar, M. A., Marzban, A., & Abdanan Mehdizadeh, S. (2017). Evaluation of technical factors of agricultural turbine spraying on spraying quality and droplet diameter by image processing. *Jurnal of Agricultural Machinery*, 7(1), 61-72. (in Persian). <https://doi.org/10.22067/jam.v7i1.48194>
- Berenstein, R., Shahar, O. B., Shapiro, A., & Edan, Y. (2010). Grape clusters and foliage detection algorithms for autonomous selective vineyard sprayer. *Intelligent Service Robotics*, 3, 233-243. <https://doi.org/10.1007/s11370-010-0078-z>
- Carman, G. E., Iwata, Y., & Gunther, F. A. (1977). Pesticide deposition on citrus orchard soil resulting from spray drift and runoff. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 18, 706-710.
- Carvalho, F. P. (2017). Pesticides, environment, and food safety. *Food and Energy Security*, 6(2), 48-60. <https://doi.org/10.1002/fes3.108>
- Chen, L., Wallhead, M., Reding, M., Horst, L., & Zhu, H. (2020). Control of insect pests and diseases in an Ohio fruit farm with a laser-guided intelligent sprayer. *HortTechnology*, 30(2), 168-175. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH04497-19>
- Chen, Y., Ozkan, H. E., Zhu, H., Derksen, R. C., & Krause, C. R. (2013). Spray deposition inside tree canopies from a newly developed variable-rate air-assisted sprayer. *Transactions of the ASABE*, 56(6), 1263-1272.
- Ciacchi, L., & Passarini, F. (2020). Life cycle assessment (LCA) of environmental and energy systems. *Energies*, 13(22), 5892. <https://doi.org/10.3390/en13225892>
- Cobbenhagen, A. T. J. R., Antunes, D. J., van de Molengraft, M. J. G., & Heemels, W. P. M. H. (2021). Opportunities for control engineering in arable precision agriculture. *Annual Reviews in Control*, 51, 47-55. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2021.01.001>
- Cunningham, G. P., & Harden, J. (1998). Reducing spray volumes applied to mature citrus trees. *Crop Protection*, 17(4), 289-292. [https://doi.org/10.1016/S0261-2194\(98\)00007-6](https://doi.org/10.1016/S0261-2194(98)00007-6)
- Dou, H., Zhang, C., Li, L., Hao, G., Ding, B., Gong, W., & Huang, P. (2018, September). Application of variable spray technology in agriculture. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 186, No. 5, p. 012007). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/186/5/012007>
- El Bilali, H., Callenius, C., Strassner, C., & Probst, L. (2019). Food and nutrition security and sustainability transitions in food systems. *Food and Energy Security*, 8(2), e00154. <https://doi.org/10.1002/fes3.154>
- Escolà, A., Rosell-Polo, J. R., Planas, S., Gil, E., Pomar, J., Camp, F., ... & Solanelles, F. (2013). Variable rate sprayer. Part 1—Orchard prototype: Design, implementation and validation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 95, 122-135. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.02.004>
- Garcera, C., Moltó, E., & Chueca, P. (2017). Spray pesticide applications in Mediterranean citrus orchards:

- Canopy deposition and off-target losses. *Science of the Total Environment*, 599, 1344-1362. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.029>
17. Gil, E., & Escolà, A. (2009). Design of a decision support method to determine volume rate for vineyard spraying. *Applied Engineering in Agriculture*, 25(2), 145-151. <https://doi.org/10.13031/2013.26323>
18. Gil, E., Llorens, J., Llop, J., Fàbregas, X., & Gallart, M. (2013). Use of a terrestrial LIDAR sensor for drift detection in vineyard spraying. *Sensors*, 13(1), 516-534. <https://doi.org/10.3390/s130100516>
19. Gil, E., Llorens, J., Llop, J., Fàbregas, X., Escolà, A., & Rosell-Polo, J. R. (2013). Variable rate sprayer. Part 2–Vineyard prototype: Design, implementation, and validation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 95, 136-150. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.02.010>
20. Ilica, A., & Boz, A. F. (2018). Design of a nozzle-height control system using a permanent magnet tubular linear synchronous motor. *Journal of Agricultural Sciences*, 24(3), 374-385. <https://doi.org/10.15832/ankutbd.456662>
21. Kasner, E. J., Fenske, R. A., Hoheisel, G. A., Galvin, K., Blanco, M. N., Seto, E. Y., & Yost, M. G. (2018). Spray drift from a conventional axial fan airblast sprayer in a modern orchard work environment. *Annals of Work Exposures and Health*, 62(9), 1134-1146. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxy082>
22. Khairy, M. F. A., Zaalouk, A. K., Rasmi, A. S., & Othman, Y. K. (2020). A prototype for spraying pesticide using vision technique. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, 37(3), 249-262. <https://doi.org/10.21608/mjae.2020.103153>
23. Landers, A. J. (2008). Innovative technologies for the precise application of pesticides in orchards and vineyards. *International Advances in Pesticide Application, Robinson College, Cambridge, UK, 9-11 January 2008*, 411-416.
24. Lindgren, E., Harris, F., Dangour, A. D., Gasparatos, A., Hiramatsu, M., Javadi, F., ... & Haines, A. (2018). Sustainable food systems—a health perspective. *Sustainability science*, 13, 1505-1517. <https://doi.org/10.1007/s11625-018-0586-x>
25. Llorens, J., Gil, E., Llop, J., & Escolà, A. (2010). Variable rate dosing in precision viticulture: Use of electronic devices to improve application efficiency. *Crop Protection*, 29(3), 239-248. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2009.12.022>
26. Mahmud, M. S., Zahid, A., He, L., Choi, D., Krawczyk, G., Zhu, H., & Heinemann, P. (2021). Development of a LiDAR-guided section-based tree canopy density measurement system for precision spray applications. *Computers and Electronics in Agriculture*, 182, 106053. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106053>
27. Mamane, A., Raherison, C., Tessier, J. F., Baldi, I., & Bouvier, G. (2015). Environmental exposure to pesticides and respiratory health. *European Respiratory Review*, 24(137), 462-473. <https://doi.org/10.1183/16000617.00006114>
28. Méndez-Vázquez, L. J., Lira-Noriega, A., Lasa-Covarrubias, R., & Cerdeira-Estrada, S. (2019). Delineation of site-specific management zones for pest control purposes: Exploring precision agriculture and species distribution modeling approaches. *Computers and Electronics in Agriculture*, 167, 105101. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105101>
29. Mooney, D. F., Larson, J. A., Roberts, R. K., & English, B. C. (2009). *Economics of the variable rate technology investment decision for agricultural sprayers* (No. 1369-2016-108610). <https://doi.org/10.22004/ag.econ.46860>
30. Naseri, M., Abbaspour Fard, M. H., Chaji, H., & Heydarzadeh, A. (2007). Analysis of the effect of nozzle orifice diameter, pump pressure and tractor forward speed on spraying uniformity in agricultural turbine sprayer (turboliner). The 5th National Congress of Agricultural Machines and Mechanization of Iran. Ferdasi University of Mashhad. P. 9. (in Persian).
31. Oberti, R., Marchi, M., Tirelli, P., Calcante, A., Iriti, M., Tona, E., ... & Ulbrich, H. (2016). Selective spraying of grapevines for disease control using a modular agricultural robot. *Biosystems Engineering*, 146, 203-215. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.12.004>
32. Pergher, G. (2001). Recovery rate of tracer dyes used for spray deposit assessment. *Transactions of the ASAE*, 44(4), 787. <https://doi.org/10.13031/2013.6240>
33. Pimentel, D., & Lehman, H. (Eds.). (1993). *The pesticide question: Environment, economics and ethics*. Springer Science & Business Media.
34. Rathnayake, A. P., Chandel, A. K., Schrader, M. J., Hoheisel, G. A., & Khot, L. R. (2021). Spray patterns and perceptive canopy interaction assessment of commercial airblast sprayers used in Pacific Northwest perennial specialty crop production. *Computers and Electronics in Agriculture*, 184, 106097. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106097>
35. Rodrigo, M. A., Oturan, N., & Oturan, M. A. (2014). Electrochemically assisted remediation of pesticides in soils and water: a review. *Chemical Reviews*, 114(17), 8720-8745. <https://doi.org/10.1021/cr500077e>
36. Safari, M., Amirshaghghi, F., Loveymi, N., & Chagi, H. (2009). Assessment of common sprayer used in wheat fields. *Karaj Agricultural Engineering Research Institute Publications*, 10(4), 1-12. (In Persian).
37. Shafii, A. 2008. Principles of agricultural machinery. Tehran University Publications. Third edition. 498 pages (in Persian).

- Farsi).
38. Shen, Y., Zhu, H., Liu, H., Chen, Y., & Ozkan, E. (2017). Development of a laser-guided, embedded-computer-controlled, air-assisted precision sprayer. *Transactions of the ASABE*, 60(6), 1827-1838. <https://doi.org/10.13031/trans.12455>
 39. Soheilifard, F., Marzban, A., Raini, M. G., Taki, M., & van Zelm, R. (2020). Chemical footprint of pesticides used in citrus orchards based on canopy deposition and off-target losses. *Science of the Total Environment*, 732, 139118. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139118>
 40. Solanelles, F., Escolà, A., Planas, S., Rosell, J. R., Camp, F., & Gràcia, F. (2006). An electronic control system for pesticide application proportional to the canopy width of tree crops. *Biosystems Engineering*, 95(4), 473-481. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.08.004>
 41. Springmann, M., Clark, M., Mason-D'Croz, D., Wiebe, K., BDIRSKY, B. L., Lassaletta, L., ... & Willett, W. (2018). Options for keeping the food system within environmental limits. *Nature*, 562(7728), 519-525. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0594-0>
 42. Subramanian, V., Burks, T. F., & Arroyo, A. A. (2006). Development of machine vision and laser radar based autonomous vehicle guidance systems for citrus grove navigation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 53(2), 130-143. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2006.06.001>
 43. Taheri-Rad, A., Khojastehpour, M., Rohani, A., Khoramdel, S., & Nikkhah, A. (2017). Energy flow modeling and predicting the yield of Iranian paddy cultivars using artificial neural networks. *Energy*, 135, 405-412. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.089>
 44. Tewari, V. K., Chandel, A. K., Nare, B., & Kumar, S. (2018). Sonar sensing predicated automatic spraying technology for orchards. *Current Science*, 115(6), 1115-1123.
 45. Yadav, G. S., Das, A., Lal, R., Babu, S., Datta, M., Meena, R. S., ... & Singh, R. (2019). Impact of no-till and mulching on soil carbon sequestration under rice (*Oryza sativa* L.)-rapeseed (*Brassica campestris* L. var. rapeseed) cropping system in hilly agro-ecosystem of the Eastern Himalayas, India. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 275, 81-92. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.02.001>
 46. Zaman, Q. U., Esau, T. J., Schumann, A. W., Percival, D. C., Chang, Y. K., Read, S. M., & Farooque, A. A. (2011). Development of prototype automated variable rate sprayer for real-time spot-application of agrochemicals in wild blueberry fields. *Computers and Electronics in Agriculture*, 76(2), 175-182. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.01.014>
 47. Zürey, Z., Balci, S., & Sabanci, K. (2020). Automatic nozzle control system with ultrasonic sensor for orchard sprayers. *European Journal of Technique (EJT)*, 10(2), 264-273. <https://doi.org/10.36222/ejt.715015>

Research Article

Vol. 14, No. 4, 2024, p. 429-443

Development and Comparison of Interrupt-Based and Analog-to-Digital Converter Algorithms for Seed Counting in Precision Planters

A. Ghaffarnezhad¹, H. Navid^{1*}, H. Karimi²

1- Biosystems Engineering Department, University of Tabriz, Tabriz, Iran

2- Agricultural Engineering Research Department, Kerman Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Kerman, Iran

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

Received: 10 December 2023

Revised: 27 January 2024

Accepted: 19 February 2024

Available Online: 19 November 2024

How to cite this article:Ghaffarnezhad, A., Navid, H., & Karimi, H. (2024). Development and Comparison of Interrupt-Based and Analog-to-Digital Converter Algorithms for Seed Counting in Precision Planters. *Journal of Agricultural Machinery*, 14(4), 429-443. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2024.85803.1210>

Introduction

Improving field operations through precise spot planting rates depends on the accurate functioning of seed flow sensors within the working rows. Despite the availability of these sensors in the market, achieving measurement precision remains a challenge in their optimal design. Seed flow sensors can be categorized into two primary types: optical and non-optical. Among these, optical sensors—particularly infrared sensors—are gaining popularity among researchers due to their distinct advantages, including simple circuit design, cost-effectiveness, and a strong correlation with seed flow. However, the accuracy of these sensors tends to diminish over time due to dust accumulation from planting operations and the effects of sunlight. In response to these challenges, researchers are actively exploring various solutions, employing diverse approaches such as the development of different algorithms and the utilization of alternative hardware configurations. Each research initiative aims to address specific challenges associated with these sensors, with the overarching goal of facilitating effective commercialization, optimizing resource use, and minimizing waste.

Materials and Methods

Two distinct algorithms, utilizing analog-to-digital converter and interrupt-based methodologies, were meticulously developed and thoroughly evaluated to determine the more effective method for monitoring. Correspondingly, unique circuits were engineered for each algorithm.

To enhance the sensitivity of the sensor while simplifying the circuit's complexity and dimensions, the lm324 Op-Amp was used in the interrupt-based sensor circuit. Adjusting sensitivity was made feasible through a multi-turn potentiometer, enabling precise adjustment of the external interrupt within the microcontroller. On the other hand, the analog-to-digital converter-based circuit, without relying on the LM324 chip, provided a more straightforward and quieter configuration.

The intricate nature of construction mandated the design of circuits using Altium Designer 17 software, which was then printed onto circuit boards. Both developed circuits featured the deployment of the STM32F103C8T6 microcontroller, renowned for its robust capabilities and cost efficiency.

In the interrupt-based algorithm's development, the microcontroller's external interrupt was used, selecting its sensitivity to detect both rising and falling edges. This strategic configuration ensured comprehensive scanning of all receivers by the analog-to-digital converter upon any interruption in the infrared sensors. Given the singular passage of seeds in precision seeding, each pass was counted as a single seed.

At the start of the planting operation and upon reaching the end of each planting row, the microcontroller employed a micro-switch to sample the output of the infrared sensor, which were then used to execute further calculations based on those samples. Throughout the planting process, the microcontroller continuously



©2024 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.2024.85803.1210>

performed sensor scanning and promptly converted the sensor outputs into binary values based on defined thresholds. Then, it counted the seeds based on the predetermined counting thresholds for the number of passes.

The efficacy of these developed algorithms and sensors underwent rigorous testing encompassing hybrid corn seeds, popcorn, soybean, and mung bean. The evaluation was conducted on an 11-meter-long conveyor belt platform, tested at three different speeds: 4, 7, and 10 km h⁻¹, through five distinct iterations. This comprehensive evaluation ensured the robustness and reliability of the algorithms across diverse seed types and varying operational conditions.

Results and Discussion

Test results indicate that interrupt-based sensors demonstrate impressive seed counting capabilities; however, they may encounter issues such as susceptibility to dust and the need for manual recalibrations. Moreover, these sensors exhibited acceptable performance across various crops, including corn and soybeans. Nonetheless, variations in seed characteristics could affect counting accuracy. Additionally, simultaneous seed passage through the sensor under certain conditions posed challenges, diminishing the sensor's precision. On the other hand, sensors employing analog-to-digital algorithms showed promising performance. They offer enhanced adjustability compared to their interrupt-based counterparts, showcasing adaptability to diverse conditions. In summary, each sensor type has its strengths and weaknesses. Sensors that utilize analog-to-digital converter algorithms may offer superior performance in varied scenarios due to their advanced features and adaptable configurations.

Conclusion

This study developed and tested two seed counting algorithms: one based on interruption and the other utilizing an analog-to-digital converter. Both algorithms effectively counted seeds larger in diameter than the distance between adjacent LEDs with remarkable accuracy. However, due to their reliance on infrared optical components, both were susceptible to dust generated during planting operations. The algorithm utilizing the analog-to-digital converter demonstrated a notable advantage. Its ability to adjust the threshold either at the start of planting or at the end of each crop row provided a distinct edge over the interruption-based algorithm. Consequently, the analog-to-digital converter-based algorithm was selected as the superior choice for this research.

Acknowledgment

The authors express appreciation for the financial support provided by the University of Tabriz.

Keywords: Flow detection, Precision planter monitoring, Seed counting algorithm, Seed flow sensor

توسعه و مقایسه دو الگوریتم مبتنی بر وقفه و مبدل آنالوگ به دیجیتال برای شمارش بذور در ردیف‌کارها

علی غفاریزاد^{۱*}، حسین نوید^۱، هادی کریمی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۳۰

چکیده

امروزه برای اطمینان از کارکرد صحیح کارنده‌ها، سامانه‌های پایش روی آن‌ها نصب می‌شوند و می‌توانند اطلاعات برخطی را در اختیار اپراتور قرار دهند تا در صورت بروز هرگونه مشکل عملیات را متوقف و نسبت به رفع آن‌ها اقدام نماید. قسمت اصلی سامانه پایش کارنده‌ها، حسگر جریان دانه می‌باشد که روی لوله سقوط نصب می‌گردد. نسخه ساده این حسگرها تنها عبور بذر را تشخیص می‌دهند. اما اندازه‌گیری نرخ جریان دانه با توجه به شرایط کاری کارنده‌ها به‌ویژه کارنده‌های مکانیکی با چالش‌های جدی مواجه می‌باشد. در این تحقیق حسگر و الگوریتم منحصر به فرد و نوآورانه‌ای برای شمارش بذرهای عبوری توسعه داده شدند. یک ردیف هفت‌تایی از فرستنده‌های مادون قرمز و نیز یک ردیف هفت‌تایی از گیرنده‌های مادون قرمز در مقابل آن، وظیفه تشخیص بذر را بر عهده داشتند. برای ارزیابی آزمایشگاهی حسگر و الگوریتم مربوطه، عملکرد دو روش دریافت سیگنال در میکروکنترلر بر اساس وقفه و مبدل آنالوگ به دیجیتال روی سکوی تسمه نقاله با چهار بذر ذرت کراس، ذرت پاپ‌کرن، سویا و ماش در سه سرعت ۴، ۷ و ۱۰ کیلومتر بر ساعت و در پنج تکرار مورد آزمون قرار گرفت. هر دو الگوریتم مورد آزمون نتایج قابل قبولی را در شمارش بذور مورد آزمون از خود نشان دادند اما الگوریتم مبتنی بر مبدل آنالوگ به دیجیتال به دلیل امکانات بیش‌تر و امکان تنظیم سطح آستانه در ابتدای عملیات کشت و انتهای هر ردیف و مقاومت بالاتر آن در مقابل گرد و غبار، عملکرد بهتری از خود نشان داد هرچند که الگوریتم روش دوم دارای دقت و سرعت بالایی بود.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم شمارش بذر، پایش ردیف‌کار، تشخیص جریان، حسگر جریان بذر

مقدمه

برای دستیابی به عملکرد مطلوب محصول، لازم است بذور به میزان بهینه و به‌شکل یکنواخت در مزرعه کاشته شوند. پایش عملکرد کارنده‌ها در حین کاشت باعث می‌شود تا هرگونه اختلال در کارکرد بخش‌های مختلف آن، به‌موقع تشخیص داده شده و نسبت به رفع آن‌ها اقدام شود. این امر از هرگونه نکاشت که به‌طور معمول به‌خاطر گرفتگی لوله سقوط، خالی شدن مخزن بذر و غیره در مزارع اتفاق می‌افتد جلوگیری می‌نماید. همچنین این سامانه می‌تواند با اندازه‌گیری نرخ کاشت نقطه‌ای امکان مدیریت بهینه عملیات‌های بعدی در مزرعه

را ممکن سازد.

حسگرهای بسیاری در سامانه‌های پایش کشت و کارنده‌ها برای سنجش وضعیت لوله سقوط مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بر این اساس می‌توان این حسگرها را به دو گونه کلی نوری و غیرنوری طبقه‌بندی نمود. از جمله حسگرهای غیرنوری می‌توان به حسگرهای خازنی که برای سنجش جریان بذر در مورد استفاده قرار گرفته‌اند اشاره نمود. باکمن، حسگری خازنی برای پایش کارنده‌ها توسعه داد که با عبور بذر از آن ظرفیت خازن تغییر می‌کرد و بذور عبوری تشخیص داده می‌شدند. در این مطالعه برای جلوگیری از اثرگذاری اغتشاشات محیطی بدنه فلزی حسگر به ولتاژ زمین متصل شده بود (Bachman, 1988). از دیگر حسگرهای خازنی توسعه داده شده می‌توان به تحقیق انجام گرفته توسط تقی‌زاد و همکاران برای تشخیص فاصله کاشت قلمه‌های نیشکر اشاره نمود (Taghinezhad, Alimardani, & Jafary, 2013). حسگرهای فراصوت نیز در بعضی از تحقیقات مورد استفاده قرار گرفته‌اند که به‌دلیل اثرپذیری از اغتشاشات توصیه

۱- گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲- بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمان، ایران

(Email: navid@tabrizu.ac.ir)

(*) نویسنده مسئول:

<https://doi.org/10.22067/jam.2024.85803.1210>

از مقابل حسگر پرتوی ارسالی به سمت گیرنده بازتاب داده می‌شد و بذور عبوری شمارش می‌شدند (Kumar & Raheman, 2018; Raheman & Kumar, 2015).

محققان یک حسگر مادون قرمز برای شمارش جریان دانه با استفاده از خطی‌سازی جریان با دو صفحه مایل توسعه دادند. در این تحقیق برای از بین بردن هم‌پوشانی بذور لوله سقوط به ۱۱ قسمت مختلف تقسیم شد و در هر قسمت از یک گیرنده و فرستنده مادون قرمز قرار داده شد که امکان گرفتگی لوله سقوط را افزایش می‌داد (Liu, Hu, Zhao, Pan, Lakhari, & Wang, 2019). لی و همکاران در مطالعه‌ای دیگر یک حسگر جریان بذر برای ردیف‌کاری بذور ریز توسعه دادند که به دلیل کاهش قطر لوله سقوط تنها از یک جفت گیرنده و فرستنده مادون قرمز در این حسگر استفاده شده بود (Liu, Hu, Zhao, Pan, Lakhari et al., 2019). گروهی از محققان با انتخاب حسگر مادون قرمز برای تولید حسگر تجاری مادون قرمز برای استفاده در خطی‌کارها و چینش زیگزاگ ده جفت گیرنده و فرستنده مادون قرمز اقدام به توسعه حسگر پایش جریان لوله سقوط کارنده‌ها کردند. آن‌ها با جمع‌آوری داده‌های حسگرهای مختلف به وسیله یک واحد کنترل و ارسال آن‌ها به نمایشگر موجود در کابین راننده، یک سامانه پایش عملکرد کارنده‌ها را توسعه دادند (Besharati, Navid, Karimi, Behfar, & Eskandari, 2019; Karimi, Navid, Besharati, & Eskandari, 2019). فتحی‌پور و همکاران مقاومت حسگر توسعه داده شده توسط محققان پیشین را در مقابل گرد و غبار حاصل از عملیات کاشت را به صورت نرم‌افزاری و سخت‌افزاری با کاربرد شیشه منحنی در مقابل حسگر بهبود بخشیدند (Fathipour, Navid, Karimi, Ghaffarnejad, & Wang, 2023).

گورک و همکاران یک سیستم آزمایشگاهی با یک جفت گیرنده و فرستنده متصل به لوله سقوط برای تشخیص گرفتگی توسعه دادند. این دو حسگر در مقابل هم قرار گرفته بودند و در صورت بروز گرفتگی نور ساطع شده از فرستنده به گیرنده نمی‌رسید و حسگر گرفتگی را تشخیص می‌داد (Ghorke & Yadav, 2022). گروهی از محققان نیز حسگرهای پایش لوله سقوط برای شمارش مقدار بذور عبوری توسعه دادند (Chen, Zhang, Pan, Du, & Ji, 2022; Jiang et al., 2021; Xie et al., 2021; Zhang et al., 2023). غفارنژاد و همکاران یک حسگر مادون قرمز شمارش جریان بذر با هفت جفت گیرنده و فرستنده و چینش خطی آن‌ها برای ردیف‌کارها با استفاده از تشخیص شکل بذر عبوری توسعه دادند (Ghaffarnejad, Navid, & Karimi, 2022).

همان‌گونه که ذکر شد تا کنون تحقیقات بسیاری در مورد سنجش جریان بذر در خطی‌کارها و ردیف‌کارها صورت گرفته است و هر یک از تحقیقات صورت گرفته سعی در مرتفع‌سازی مشکلی از

نمی‌شوند و تنها به صورت آزمایشگاهی کاربرد دارند (Karimi, Navid, & Mahmoudi, 2015).

از حسگرهای نوری می‌توان به حسگرهای فیبرنوری، مقاومت نوری، سلول خورشیدی و مادون قرمز اشاره نمود. مهم‌ترین عیب اکثر حسگرهای نوری اثرپذیری از نور خورشید و تحت تاثیر قرارگیری از گرد و خاک حاصل از عملیات کاشت و بذور است که باعث گرفتگی این حسگرها و اشتباه در سنجش جریان بذر می‌شود. مدار حسگر سلول خورشیدی توسط بل (Bell, 1979) توسعه داده شد و شرکت جاندر نیز حسگری بر این اساس تولید کرده است. این حسگر از یک حسگر سلول خورشیدی و یک منبع نوری تشکیل شده است. سایه بذور عبور مانع از رسیدن نور به حسگر سلول خورشیدی شده و یک پالس ایجاد می‌شود به این ترتیب، می‌توان بذور عبوری را تشخیص داد. محققین حسگر سنجش جریان بذر بر پایه حسگر فیبر نوری توسعه دادند. از مزیت‌های حسگر فیبر نوری می‌توان به پایش سراسری لوله سقوط و عدم تاثیرپذیری از نور خورشید اشاره نمود. این حسگر به دلیل هزینه‌های آن برای استفاده مزرعه‌ای و صنعتی مناسب نمی‌باشد (Al-Mallahi & Kataoka, 2013, 2016). از دیگر حسگرهای نوری به حسگر مقاومت نوری اشاره نمود. این حسگر نیز مانند سایر حسگرهای نوری با عبور بذر و ایجاد سایه روی مقاومت نوری بذور عبوری را تشخیص می‌دهد (Karimi, Navid, Besharati, Behfar, & Eskandari, 2017).

مورد اقبال‌ترین حسگر برای پایش عملیات کاشت حسگر نوری مادون قرمز است که دلیل این امر مدار راه‌انداز ساده، ارزان بودن و پایداری و همبستگی بالای خروجی آن با جریان عبوری می‌باشد (Karimi et al., 2017). فرند جزو اولین کسانی بود که از این حسگر برای پایش جریان در کارنده‌ها استفاده نمود. این حسگر از هفت فرستنده و دو گیرنده مادون قرمز با آرایش خطی تشکیل شده بود که با عبور جریان از مقابل حسگر، بذور عبوری را شمارش می‌نمود (Friend, 1987). محققین با استفاده زیگزاگ از این حسگر توانستند تمامی لوله سقوط را اسکن کرده و مشکل عدم پایش قسمت‌هایی از لوله سقوط را مرتفع نمایند (Kocher, Lan, Chen, & Smith, 1998). همچنین محققین با چینش نود درجه‌ای گیرنده و فرستنده نسبت به هم توانست بذور عبوری را شمارش کند. در این تحقیق به منظور حداقل‌سازی انعکاس پرتوهای مادون قرمز از مواد جاذب در دیواره حسگر استفاده نمودند (El Attar, 2010). فو و همکاران نیز با چینش مدور گیرنده و فرستنده توانستند تا حدودی مشکل هم‌پوشانی بذور را مرتفع سازند (Fu et al., 2012). محققین با استفاده از گیرنده TSOP که فقط طول موج خاصی از نور خورشید را دریافت می‌کند توانستند اثرگذاری نور خورشید را روی حسگر مادون قرمز تا حدود زیادی از بین ببرند. در این مطالعه از دو فرستنده مادون قرمز و یک گیرنده TSOP در کنار هم استفاده شد. با عبور بذر

گرفت که در ادامه توضیح داده می‌شود.

توسعه سخت‌افزار

الف: سخت‌افزار الگوریتم مبتنی بر وقفه

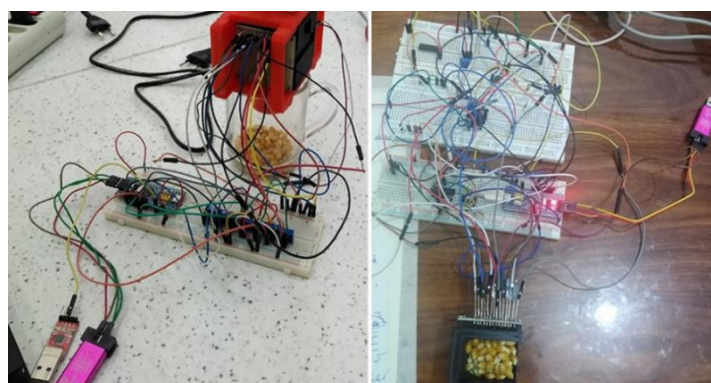
در این مطالعه از حسگر مادون قرمز با قطر سه میلی‌متر، ولتاژ کاری $1/4 - 1/2$ ولت، حداکثر جریان ۱۰۰ میلی‌آمپر و طول موج ۹۴۰ نانومتر استفاده شد. ولتاژ خروجی حسگر مادون قرمز بر اساس کاهش در مقدار نور دریافتی به‌وسیله گیرنده، افزایش یا کاهش می‌یابد. در حالت عادی سایه بذری عبوری، باید تمامی سطح گیرنده مایون قرمز را بپوشاند تا وقفه خارجی در میکروکنترلر رخ دهد. اگر سایه بذری در حال عبور تمامی سطح گیرنده را نپوشاند، وقفه رخ نمی‌دهد. برای رفع این مشکل استفاده از یک تقویت‌کننده الزامی می‌باشد. با تکیه بر تحقیقات انجام‌گرفته، برای مرتفع‌سازی این مشکل از تقویت‌کننده LM324 استفاده شد. مزیت LM324 وجود چهار تقویت‌کننده در آن می‌باشد که پیچیدگی مدار حسگر کاهش می‌یابد.

مشکلات موجود در این حسگرها برای تجاری‌سازی این حسگرها و استفاده بهینه از منابع و جلوگیری از هدررفت منابع داشته‌اند. در تعدادی از تحقیقات بیان شده فقط بر روی تشخیص وجود جریان بذری و گرفتگی لوله سقوط و در تعدادی از تحقیقات نیز تنها بر روی تشخیص مقدار جریان بذری تمرکز شده است. در این تحقیق سعی می‌گردد یک حسگر مادون قرمز جریان بذری با الگوریتمی ابتکاری برای ردیف‌کاری توسعه داده شود تا علاوه بر تشخیص وجود جریان بذری و گرفتگی لوله سقوط، بذری عبوری را با دقت بالا شمارش نموده و در مقابل گرد و غبار حاصل از بذری و عملیات کاشت نیز مقاوم باشد تا گامی در امنیت غذایی این مرز و بوم و جلوگیری از اتلاف منابع ملی برداشته شود.

مواد و روش‌ها

توسعه حسگر

حسگر در دو بخش سخت‌افزاری و نرم‌افزاری برای دو الگوریتم مبتنی بر وقفه و مبتنی بر مبدل آنالوگ به دیجیتال مورد توسعه قرار

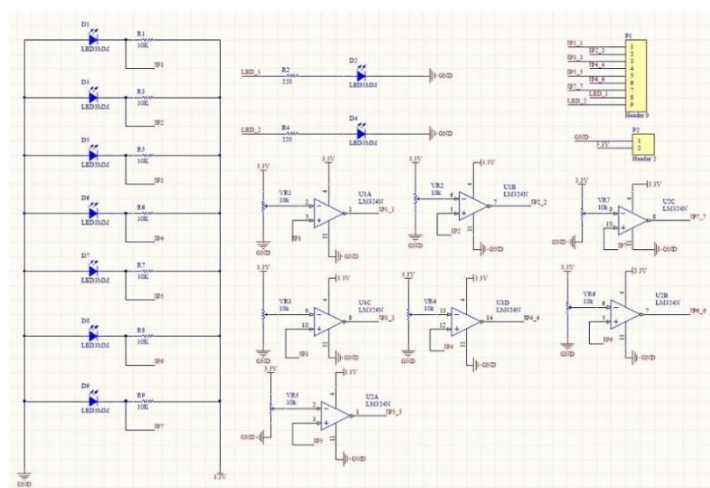


شکل ۱- مدار طراحی‌شده برای وقفه با یک مولتی‌ترن (سمت راست)، مدار طراحی‌شده برای وقفه با هفت مولتی‌ترن (سمت چپ)
Fig.1. Circuit designed for interrupt-based algorithm with one multi-turn (right) and seven multi-turns (left)

یک از گیرنده‌ها بود. اما معایب این روش افزایش هزینه‌ها، پیچیدگی تولید و افزایش ابعاد مدار بود. هر یک از مدارات پیشنهادی توسط محقق ساخته شده و مورد ارزیابی قرار گرفت. در شکل ۱ نمایشی از این مدارات نمایش داده شده است.

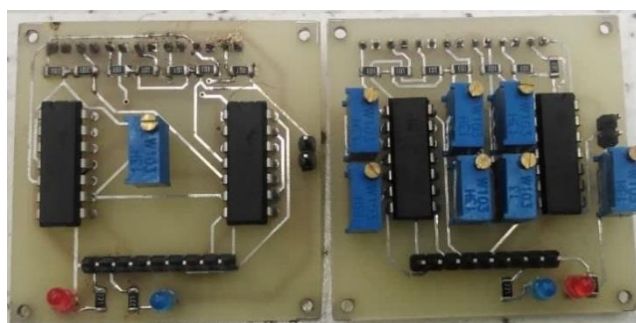
پس از تایید کارکرد مدار محقق ساخته، به این دلیل که مدار ساخته‌شده خیلی پیچیده بود و توانایی آزمون روی سکو وجود نداشت، مدارات پیشنهادی در نرم‌افزار آلتیوم دیزاینر ۱۷/۲ طراحی و چاپ شد (شکل ۲ و شکل ۳).

همچنین برای تعیین حساسیت وقفه، استفاده از حداقل یک مولتی‌ترن برای این کار ضروری بود. مولتی‌ترن می‌توانست به دو صورت به کار برده شود. یکی از این حالات، استفاده از یک مولتی‌ترن برای تمامی گیرنده‌ها بود که در این صورت با تنظیم حساسیت به‌وسیله مولتی‌ترن حساسیت برای تمامی گیرنده‌ها به یک صورت تنظیم می‌گردید. مزیت استفاده از این حالت کاهش پیچیدگی مدار، امکان کاهش ابعاد مدار و همچنین هزینه‌ها بود. اما عیب استفاده از این حالت این بود که با تنظیم حساسیت تمامی گیرنده‌ها به صورت یک‌جا، حساسیت تعدادی از گیرنده‌ها زیاد و حساسیت تعدادی نیز کم می‌شد. حالت دیگر استفاده از یک مولتی‌ترن برای هر گیرنده بود. مزیت این روش امکان تنظیم جداگانه حساسیت برای هر



شکل ۲- طرحواره مدار وقفه با هفت مولتی ترن و بدون میکروکنترلر

Fig.2. Interrupt circuit diagram with seven multi-turns and without microcontroller



شکل ۳- مدار وقفه با هفت مولتی ترن (سمت راست) و با یک مولتی ترن (سمت چپ)

Fig.3. Interrupt circuit with seven multi-turns (right side) and with one multi-turn (left side)

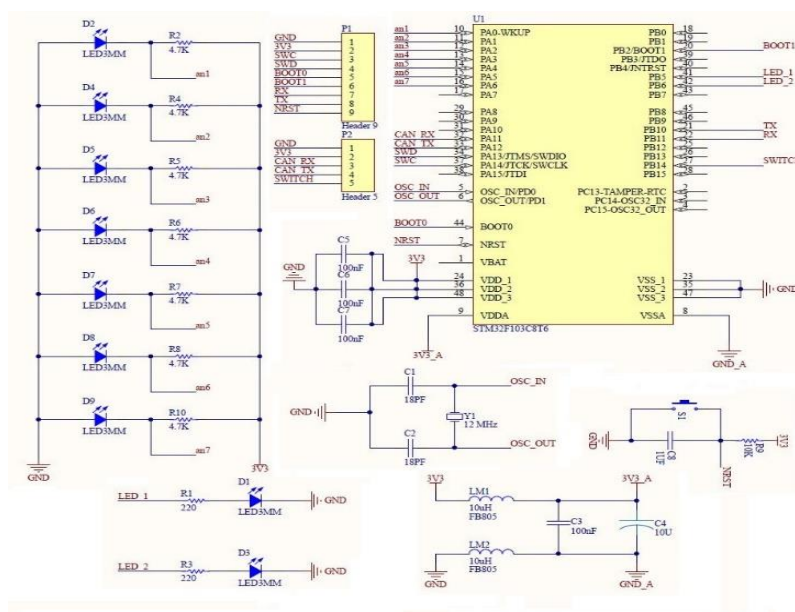
میکروکنترلر

میکروکنترلر استفاده شده در سامانه پایش ردیف کارها میکروکنترلر STM32F103C8T6 با معماری آرم و ساخت شرکت STMicroelectronics می باشد. این میکروکنترلر یک میکروکنترلر ۳۲ بیتی است که ترکیبی از عملکرد بسیار قوی و ولتاژ کاری پایین را به ارمغان می آورد. سری STM32F1 جزء میکروکنترلرهای میان رده اما در عین حال دارای قدرت پردازشی زیاد خانواده STM32 می باشند که دارای پردازنده Cortex-M3 می باشند. محبوب ترین میکروکنترلر از این خانواده میکروکنترلر STM32F103C8T6 می باشد. فرکانس کاری بالا، ۳ درگاه UART، پشتیبانی از کن باس، و رزولوشن بسیار بالا در مبدل آنالوگ به دیجیتال و قیمت بسیار مناسب این میکروکنترلر را به انتخابی مناسب برای حسگر پایش جریان بذر و واحد جمع آوری و ارسال، مبدل می کند. در برد طراحی شده برای حسگر پایش جریان از پکیج LQFP48 این میکروکنترلر استفاده شد.

ب: سخت افزار الگوریتم مبتنی بر مبدل آنالوگ به دیجیتال

مدارات الگوریتم های مبتنی بر مبدل آنالوگ به دیجیتال ساده تر و خلوت تر از مدارات الگوریتم مبتنی بر وقفه بودند، زیرا دو عنصر تقویت کننده و مولتی ترن از آن حذف شده بودند. توسعه مدارات بر اساس هفت گیرنده و فرستنده مادون قرمز که با آرایش خطی برای تحت پوشش قرار دادن کل سطح مقطع لوله در کنار هم قرار گرفته بودند، انجام شد. شماتیک مدار مربوط به الگوریتم مبتنی بر مبدل آنالوگ به دیجیتال در شکل ۴ قابل مشاهده می باشد.

برای به حداکثر رساندن نور فرستنده های مادون قرمز از مقاومت ۱۰۰ اهم استفاده شد. برای افزایش مقاومت حسگر در مقابل گرفتگی در مقابل سخت افزار توسعه داده شده برای هر دو نوع الگوریتم مبتنی بر وقفه و مبدل آنالوگ به دیجیتال از شیشه منحنی با قطر انحنای ۱۸ میلی متر استفاده شد (Fathipour et al., 2023). شکل ۵ نمایی از حسگر جریان بذر ساخته شده برای الگوریتم مبتنی بر مبدل آنالوگ به دیجیتال را نمایش می دهد.



شکل ۴- طرحواره مدار گیرنده مبتنی بر مبدل آنالوگ به دیجیتال
Fig.4. Schematic of receiver circuit based on analog to digital converter



شکل ۵- نمونه اولیه حسگر جریان بذر برای الگوریتم مبتنی بر مبدل آنالوگ به دیجیتال
Fig.5. Prototype seed flow sensor for analog-to-digital converter based algorithm

با دقت در آرایه مورد نظر می‌توان مشاهده نمود که تعداد وقفه رخ داده به‌وسیله عبور یک بذر به اندازه بذر و نحوه عبور آن از مقابل حسگر بستگی دارد و چون در ردیف‌کاری، بذور با فاصله از یک‌دیگر از مقابل حسگر عبور می‌کنند می‌توان با شمارش یک‌ها و کالیبره کردن آن برای هر بذر، بذور عبوری را شمارش نمود. شکل ۷ نمودار جریان الگوریتم وقفه توسعه‌داده‌شده را نشان می‌دهد.

برنامه‌نویسی الگوریتم‌های پیشنهادی در نرم‌افزار keil uvision ۵.۲۵.۰ صورت گرفت. برای این کار ابتدا تنظیمات لازم برای بخش‌های مورد نظر در نرم‌افزار stm32cubeMX 4.۲۵.۱ و توابع HAL نسخه ۱٫۶٫۱ انجام شد. سپس کدهای لازم تولید شده و در نرم‌افزار Keil μVision ۵.۲۵.۲.۰ ادامه برنامه‌نویسی انجام گردید. بارگذاری برنامه نوشته‌شده در میکروکنترلر انتخابی توسط پروگرامر ST LINK V2 انجام گرفت. همچنین برای چاپ داده‌ها در کامپیوتر از یک مبدل USB به سریال CP2102 بهره گرفته شد (شکل ۸).

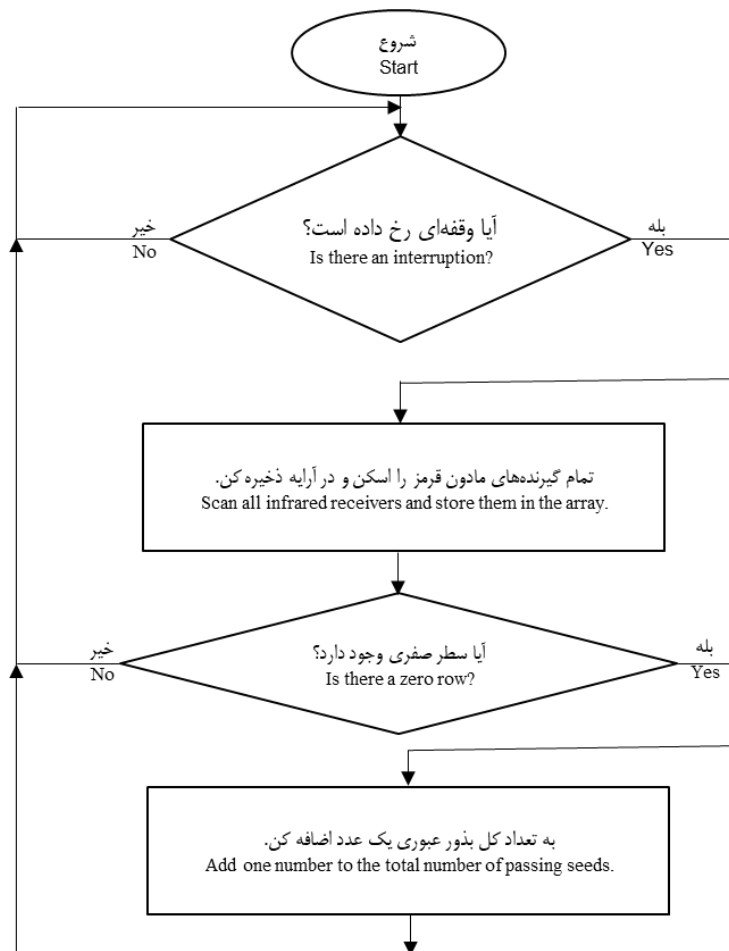
توسعه الگوریتم مبتنی بر وقفه خارجی

وقفه یکی از قابلیت‌های مهم میکروکنترلرها است. وقفه می‌تواند به‌صورت داخلی یا خارجی باشد. وقفه خارجی در میکروکنترلرهای شرکت ST به سه حالت لبه بالا رونده، لبه پایین رونده یا هر دو لبه بالا رونده و پایین رونده است. وقتی بذری از مقابل حسگر عبور می‌کند، باعث کاهش نور دریافتی به‌وسیله حسگر مادون قرمز می‌شوند و وقفه رخ می‌دهد. اگر وقفه هم بر روی لبه بالا رونده و هم لبه پایین رونده تنظیم شود، در میکروکنترلر، هم وقتی سایه بذری بر روی یک گیرنده مادون قرمز افتاد، وقفه رخ می‌دهد و هم زمانی که سایه آن از روی گیرنده برداشته شد. به این ترتیب کوچک‌ترین حرکتی در مقابل حسگر قابل شناسایی خواهد بود و چون از طریق وقفه این عمل رخ می‌دهد، هیچ حرکتی از دست نخواهد رفت. حال اگر هر بار که وقفه رخ داد وضعیت پین‌های دیگر وقفه نیز خوانده شده و در داخل یک آرایه ذخیره شود، به‌سان این است که مقطع عرضی از لوله سقوط در طول زمان اسکن می‌شود. در شکل ۶ این آرایه مشاهده می‌گردد.

0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0
 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0
 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0
 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0
 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0
 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0
 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0
 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0
 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0

شکل ۶- آرایه ذخیره شده بعد از عبور بذرها از مقابل حسگر

Fig.6. The stored array after the seeds passes through the sensor arrays



شکل ۷- نمودار جریان الگوریتم مبتنی بر وقفه

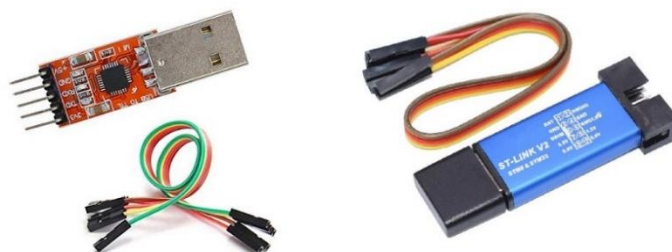
Fig.7. Flow chart of interrupt-based algorithm

نور مادون قرمز دریافتی توسط گیرنده، ولتاژ خروجی آن تغییر کرده و در میکروکنترلر با توجه به چند بیتی بودن مبدل آنالوگ به دیجیتال آن، از صفر تا یک مقدار مشخص تغییر می کند. بر اساس توضیحات ارائه شده و با الهام از الگوریتم توسعه داده شده

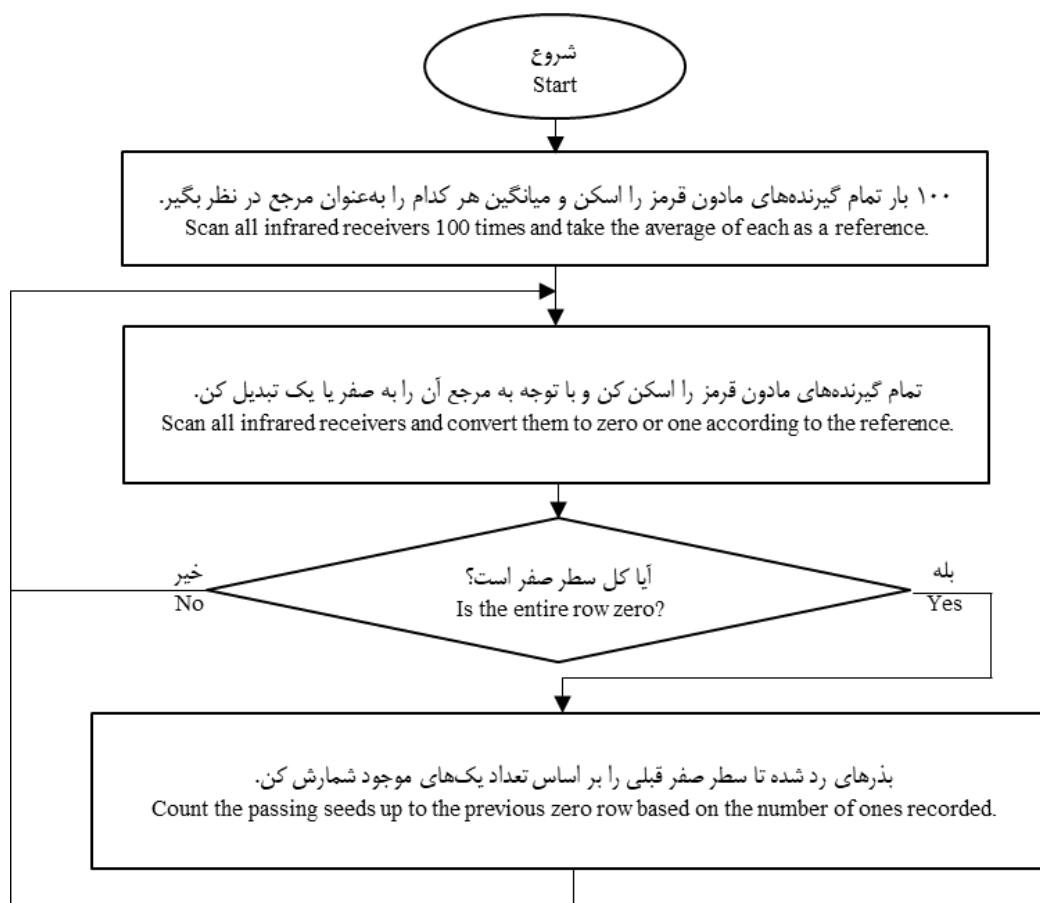
توسعه الگوریتم مبتنی بر مبدل آنالوگ به دیجیتال
 مبدل آنالوگ به دیجیتال یکی از پرکاربردترین واحدهای میکروکنترلرها است که برای راه اندازی اکثر حسگرها به کار می رود. یکی از این حسگرها، حسگر مادون قرمز است که با توجه به مقدار

تاثیر گرد و خاک موجود بر روی شیشه به حداقل می‌رسد و حسگر با نادیده گرفتن اثر گرد و غبار بر روی شیشه به کار خود ادامه داده و از حساسیت آن کاسته نمی‌شود. این نوع نمونه‌برداری نسبت به نمونه‌برداری فقط در ابتدای کار دارای مقاومت بیش‌تری نسبت به گرد و خاک است و تا حدود زیادی می‌تواند مانع از گرفتگی حسگر شود.

برای وقفه الگوریتمی بر اساس مبدل آنالوگ به دیجیتال توسعه داده شد. نمودار جریان این الگوریتم در شکل ۹ قابل مشاهده است. همچنین یک پایه میکروکنترلر به عنوان پایه وقفه خارجی تعریف شد تا در هنگام فشردن کلید در انتهای ردیف کاشت، حسگر متوجه عدم جریان بذر شده و شروع به نمونه‌گیری مجدد نموده و محاسبات بعدی خود را بر اساس نمونه اخیر انجام دهد. به این ترتیب



شکل ۸- پروگرامر ST Link V2 (راست) و مبدل USB به سریال CP2102 (چپ)
Fig.8. ST Link V2 programmer (right) and USB to CP2102 serial converter (left)

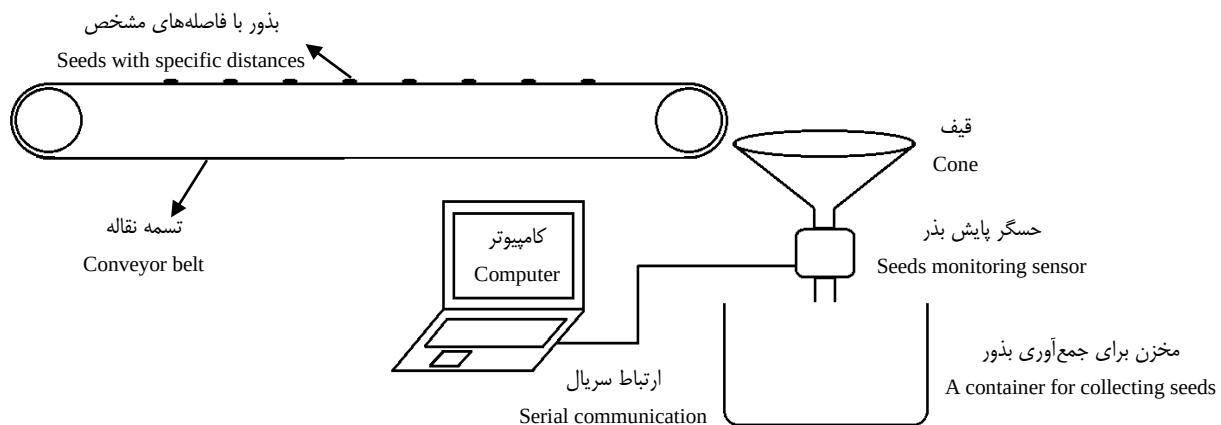


شکل ۹- نمودار جریان الگوریتم مبتنی بر مبدل آنالوگ به دیجیتال
Fig.9. Flow chart of analog-to-digital converter based algorithm

سکوی آزمون

به منظور توسعه و آزمایش الگوریتم حسگر از سکوی تسمه نقاله بهره گرفته شد، که در این سکو از یک تسمه نقاله بی انتها به طول ۱۱ متر، مستقر در آزمایشگاه کشاورزی دقیق دانشگاه تبریز استفاده شده است. این تسمه نقاله توسط الکتروموتور ۰/۳۷ کیلووات ساخت شرکت موتوژن تبریز، توسط یک VFD، به کار می افتاد. برای ارزیابی حسگر روی یک سه پایه در انتهای تسمه نقاله قرار داده شد. به منظور جمع آوری بذور از یک قیف مقوایی استفاده گردید تا تمامی بذور از

مقابل حسگر عبور کنند. طرحواره تسمه نقاله و نحوه قرارگیری حسگر در شکل ۱۰ قابل مشاهده است. حسگر توسعه داده شده برای ردیف کاری به وسیله ۱۰۰ عدد از هر بذر مورد آزمون، در سه سرعت ۴ کیلومتر بر ساعت (سرعت پیش روی کم)، ۷ کیلومتر بر ساعت (سرعت پیش روی متوسط) و ۱۰ کیلومتر بر ساعت (سرعت پیش روی زیاد) و در ۵ تکرار بر روی تسمه نقاله مورد آزمایش قرار گرفت. برای ارزیابی دقت شمارش حسگر، مقدار شمارش شده توسط حسگر به مقدار واقعی بذور تقسیم شد و به صورت دقت گزارش شد.



شکل ۱۰- طرحواره تسمه نقاله استفاده شده برای ارزیابی حسگرهای توسعه داده شده

Fig.10. Conveyor belt diagram used to evaluate the developed sensors

مواد آزمایشی

هدف این تحقیق توسعه حسگر شمارش بذور برای ردیف کارها بود. به همین دلیل برای ارزیابی، بذرهایی در نظر گرفته شد که محدوده وسیعی از اندازه و شکل بذوری که به صورت ردیفی کاشته می شوند را در برگیرد. لذا بذر ذرت کراس (که هم قابلیت کاشت

به صورت علوفه ای و هم به صورت دانه ای را دارد)، ذرت پاپ کرن، ماش و سویا در آزمایش ها استفاده شدند تا عملکرد الگوریتم و حسگر توسعه داده شده تحت اشکال و اندازه های مختلف بذور مورد آزمون قرار گیرد.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی بذور مورد استفاده برای توسعه و ارزیابی حسگر پایش جریان بذور

Table 2- Physical characteristics of seeds used for development and evaluation of flow monitoring sensor

بذر Seed	جرم هزاردانه Mass of 1,000 seeds (g)	ضریب کروییت Sphericity factor	قطر هندسی Geometric diameter (mm)
ذرت کراس Hybrid corn	338.87	0.79	7.77
ذرت پاپ کرن Popcorn	183.71	0.72	6.27
سویا Soybeans	170.19	0.86	6.30
ماش Mung beans	67.29	0.81	4.26

نتایج و بحث

آزمایش‌های ارزیابی حسگر مبتنی بر وقفه بر روی تسمه‌نقاله در سه سرعت کاشت و پنج تکرار برای ذرت کراس، ذرت پاپ‌کرن، سویا و ماش انجام شد. مقادیر به‌دست‌آمده به‌صورت دقت در جدول ۲ مشاهده می‌گردد که از تقسیم مقدار شمارش‌شده توسط حسگر بر مقدار واقعی به‌دست آمده‌اند.

مشخصات فیزیکی این بذور در جدول ۱ مشاهده می‌شود. برای اندازه‌گیری قطر هندسی بذور مورد استفاده، تعداد صد عدد از هر بذور انتخاب و با یک عدد کولیس دیجیتالی ابعاد آن‌ها در سه جهت متعامد اندازه‌گیری شد. میانگین قطر هندسی صد بذور قطر هندسی بذور مورد اندازه‌گیری در نظر گرفته شد. برای اندازه‌گیری جرم هزارانه بذور مورد استفاده نیز تعداد هزار عدد بذور به‌صورت دستی شمارش و با استفاده از ترازوی دیجیتالی با دقت یک صدم، جرم آن اندازه‌گیری شد.

جدول ۲- دقت الگوریتم مبتنی بر وقفه برای بذور مورد آزمون بر روی تسمه نقاله

Table 2- Accuracy of interrupt-based algorithm for test seeds on conveyor belt

نوع بذر Seed type	سرعت Speed (km.h ⁻¹)	دقت - Precision					میانگین Mean
		تکرار ۱ Repeat 1	تکرار ۲ Repeat 2	تکرار ۳ Repeat 3	تکرار ۴ Repeat 4	تکرار ۵ Repeat 5	
ذرت پاپ‌کرن Popcorn	4	0.99	0.98	1	0.99	0.99	0.99
	7	1	0.99	0.99	0.98	1	0.992
	10	0.99	1	0.99	0.99	0.97	0.988
ذرت کراس Hybrid corn	4	0.99	0.98	1	0.99	0.99	0.99
	7	0.99	1	0.99	0.99	0.97	0.988
	10	0.99	0.99	0.97	0.98	1	0.986
ماش Mung beans	4	0.96	0.98	0.99	0.97	0.98	0.976
	7	0.99	0.95	0.96	0.96	0.99	0.97
	10	0.95	0.97	0.95	0.98	0.94	0.958
سویا Soybeans	4	1	0.98	0.99	0.98	1	0.99
	7	0.99	1	0.99	0.99	0.97	0.988
	10	0.99	0.98	0.97	0.99	0.98	0.982

می‌ماند. در صورتی که دقت‌های ارائه‌شده در جدول ۲، مطلبی مغایر با این دیدگاه را نشان می‌دهند. موردی که در آزمایش‌ها توسط محقق مشاهده شد این بود که بذوری که از روی تسمه‌نقاله با سرعت روی قیف تعبیه‌شده برای جمع‌آوری بذور سقوط می‌کردند، در قسمت‌های مختلفی فرود می‌آمدند. این امر باعث عبور چندین بذور به‌صورت هم‌زمان از مقابل حسگر می‌گردید که باعث هم‌پوشانی بذور شده و به این ترتیب بعضی از بذرها از دید حسگر پنهان می‌ماندند. همچنین ممکن است بذور عبوری با هم‌پوشانی جزئی با یکدیگر و به‌صورت هم‌زمان از مقابل حسگر رد شوند. در این صورت حسگر با توجه الگوریتم تعریف‌شده شکل سایه بذور عبوری را تشخیص می‌دهد ولی بذور عبوری را کمتر شمارش می‌کند، مثلاً دو بذور عبوری را یک بذور یا سه بذور عبوری را دو بذور تشخیص می‌دهد و دقت حسگر در تشخیص بذور عبوری کاهش می‌یابد.

وقفه، ابزاری بسیار کارآمد برای تشخیص عبور بذور از مقابل حسگر است و کوچک‌ترین حرکات را به‌وسیله آن می‌توان پایش

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، دقت‌های اندازه‌گیری‌شده برای الگوریتم مبتنی بر وقفه بسیار بالا بوده و با توجه به نتایج محققان دیگر (Liu, Hu, Zhao, Pan, Lakhiar *et al.*, 2019; Xie *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2023) قابل قبول هستند. در نگاه اول ملاحظه می‌شود که دقت شمارش بذور ماش نسبت به بذور دیگر کمتر است. این امر می‌تواند به قطر هندسی بذور ماش مربوط شود. قطر هندسی بذور ماش ۴/۲۶ میلی‌متر می‌باشد که از حداقل فاصله مرکز به مرکز گیرنده‌های مادون قرمز (۴/۵ میلی‌متر) کمتر است. بنابراین ممکن است تعدادی از بذور ماش هنگام عبور از مقابل حسگر، یا از بین پرتوهای مادون قرمز عبور کرده و یا پرتو مادون قرمز را به مقدار جزئی قطع کنند که باعث عدم تشخیص این بذور توسط حسگر توسعه داده می‌شود.

به این دلیل که حسگر بر پایه وقفه توسعه‌ده‌شده بود و چون قطر هندسی تمامی بذور مورد آزمون به‌جز بذور ماش از فاصله بین گیرنده‌های مادون قرمز بیش‌تر بود، نباید بذری از دید حسگر پنهان

شکل ۱۱ نمونه‌ای از خروجی حسگر مبتنی بر وقفه در حالت گرفتگی را نمایش می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در صورت گرفتگی حسگر، همان‌طور که می‌توان انتظار داشت تمام گیرنده‌ها مسدود نمی‌شوند و فقط تعدادی از آن‌ها به‌خاطر گرد و خاک یا هر عامل خارجی دیگر گرفته می‌شوند. در صورت رخ دادن چنین اتفاقی حسگر همچنان قادر به شناسایی بذور عبوری است ولی به‌دلیل عدم وجود سطر صفر که لازمه شمارش است از کار شمارش باز مانده و به‌طور کلی کار حسگر مختل می‌شود.

0, 0, 0	1	0, 0, 0
0, 1, 0	1	0, 0, 0
0, 0, 0	1	0, 0, 0
1, 0, 0	1	0, 0, 0
1, 1, 0	1	0, 0, 0
1, 0, 0	1	0, 0, 0
0, 0, 0	1	0, 0, 0
0, 0, 0	1	0, 1, 0
0, 0, 0	1	0, 0, 0
0, 0, 1	1	0, 0, 0
0, 0, 0	1	0, 0, 0
0, 1, 0	1	0, 0, 0
0, 0, 0	1	0, 0, 0

شکل ۱۱- خروجی حسگر وقفه در صورت گرفتگی
Fig.11. Interrupt sensor output in case of blockage

بررسی نتایج الگوریتم مبتنی بر مبدل آنالوگ به دیجیتال
نتایج آزمایش‌های ارزیابی الگوریتم مبتنی بر مبدل آنالوگ به دیجیتال برای ذرت کراس، ذرت پاپ‌کرن، سویا و ماش در جدول ۳ آورده شده‌اند. این الگوریتم نیز در سه نرخ و پنج تکرار برای هر بذور مورد آزمون قرار گرفت.
دقت‌های به‌دست‌آمده برای این الگوریتم در بذور مورد آزمون حاکی از کارکرد قابل قبول این الگوریتم برای ردیف‌کاری می‌باشد. با دقت مختصر در داده‌ها می‌توان مشاهده نمود که با افزایش سرعت کاشت، دقت‌های به‌دست‌آمده برای بذور با مقداری کاهش روبه‌رو بوده است. دلیل این امر با توجه به توضیحات ارائه‌شده در قسمت قبل می‌تواند اشکال در واحد جمع‌آوری بذور در زیر تسمه‌نقاله باشد که امری اجتناب‌ناپذیر بود. با سقوط چندین بذور به‌صورت هم‌زمان این اشکال به‌وجود می‌آید، در صورتی که در شرایط واقعی به‌ندرت چنین شرایطی پیش خواهد آمد.

نمود. با این حال مشکل اساسی وقفه، تأثیرپذیری آن از گرد و غبار حاصل از بذور و عملیات کاشت است. این مشکل وقتی جدی‌تر می‌گردد که تنظیم حساسیت وقفه به‌صورت سخت‌افزاری صورت می‌گیرد و در صورت تأثیرپذیری هر یک از حسگرها به‌وسیله غبار، اپراتور بایستی عملیات کاشت را متوقف کرده، قسمت داخلی حسگر را از پوسته خارج کرده و حساسیت وقفه را کاهش دهد. این کار علاوه بر پرزحمت و زمان‌بر بودن، کاری تخصصی بوده و تمامی افراد مهارت لازم برای این کار را ندارند.

در حسگر توسعه‌داده‌شده توسط کروسو و همکاران که یک حسگر بذور تجاری بر مبنای وقفه است نیز مشکل گرد و خاک وجود دارد و در صورت وجود غبار بیش از حد در مقابل حسگر، چراغی مبنی بر نیاز به تمیزکاری حسگر به‌صورت دستی، روشن می‌گردد و اپراتور باید عملیات کاشت را متوقف کرده و حسگر را تمیز نماید. البته این حسگر در مقابل غبار تقویت شده است و در صورت وجود غبار در مقابل گیرنده‌ها، نور فرستنده‌ها تقویت می‌شود به این ترتیب حسگر تا حدودی در مقابل غبار از خود مقاومت نشان می‌دهد (Körösi, Csatári, Erdei, & Silye, 2020).

راه‌حل دیگری برای تنظیم حساسیت خودکار وقفه نیز وجود دارد و آن هم استفاده از تراشه‌هایی مانند MCP4131 است که یک پتانسیومتر با ارتباط SPI است که می‌توان با استفاده از میکروکنترلر و به‌صورت خودکار مقاومت آن را تغییر داد. ولی عیب استفاده از این روش این بود که تراشه مورد اشاره، قیمتی معادل با قیمت میکروکنترلر مورد استفاده داشت و استفاده از آن علاوه بر افزایش ابعاد و پیچیدگی مدارات حسگر، باعث افزایش بسیار زیاد هزینه‌ها نیز می‌شد.

جدول ۳- نتایج آزمون الگوریتم مبتنی بر مبدل آنالوگ به دیجیتال

Table 3- Test results of the analog to digital converter based algorithm

نوع بذر Seed type	سرعت Speed (km.h ⁻¹)	دقت - Precision					میانگین Mean
		تکرار ۱ Repeat 1	تکرار ۲ Repeat 2	تکرار ۳ Repeat 3	تکرار ۴ Repeat 4	تکرار ۵ Repeat 5	
ذرت پاپ کورن Popcorn	4	1	0.99	0.99	1	0.98	0.992
	7	0.98	0.96	0.99	0.95	1	0.976
	10	0.94	0.97	0.95	0.93	0.96	0.95
ذرت کراس Hybrid corn	4	0.96	1	1	0.99	0.99	0.988
	7	0.98	0.97	0.96	0.98	1	0.978
	10	0.96	0.95	0.99	0.94	0.93	0.954
ماش Mung beans	4	0.99	0.99	0.98	0.97	0.98	0.982
	7	0.97	0.98	0.97	0.96	0.98	0.972
	10	0.94	0.95	0.93	0.94	0.96	0.944
سویا Soybeans	4	0.99	1	0.99	1	0.99	0.994
	7	0.99	0.98	0.98	0.97	0.99	0.982
	10	0.97	0.97	0.99	0.99	0.98	0.98

کوچک‌تر یا مساوی ۱۰ بود حسگر تعداد بذر عبوری را یک شمارش می‌نمود، اگر تعداد یک‌های تولیدشده بزرگ‌تر از ۱۰ و کوچک‌تر یا مساوی ۱۵ می‌بود، حسگر تعداد بذر عبوری را ۲ عدد شمارش می‌نمود و اگر تعداد یک‌های تولیدشده بزرگ‌تر از ۱۵ عدد بود حسگر به بذور شمرده شده ۳ عدد اضافه می‌کرد.

آستانه‌های تعریف‌شده برای بذور مورد آزمون در جدول ۴ قابل مشاهده است. به این ترتیب که حسگر هنگام عبور بذر با توجه به سایه بذر عبوری، یک‌های ایجادشده در اثر عبور بذر مورد آزمون را شمارش می‌نمود و با توجه به تعداد آن‌ها بذور عبوری را شمارش می‌نمود. به عنوان مثال در بذر سویا اگر تعداد یک‌های تولیدشده

جدول ۴- آستانه تعریف‌شده برای شمارش بذور در الگوریتم مبتنی بر مبدل آنالوگ به دیجیتال

Table 4- Defined threshold for seed counting in analog-to-digital converter based algorithm

عبور Pass	ذرت کراس Hybrid corn	ذرت پاپ کورن Popcorn	سویا Soybean	ماش Mung beans
عبور تکی Single pass	15	9	10	4
عبور دوگانه Double pass	18	13	15	7

گرفتند. هر دو الگوریتم با دقت بسیار بالا بذور عبوری با قطر هندسی بیش‌تر از فاصله بین دو ال‌ای‌دی مجاور را شمارش نمودند. هر دو الگوریتم به علت استفاده از المان‌های نوری مادون قرمز تحت تاثیر غبار حاصل از عملیات کاشت قرار می‌گیرند ولی الگوریتم مبتنی بر مبدل آنالوگ به دیجیتال به دلیل امکان تغییر حد آستانه در ابتدای عملیات کاشت یا در انتهای هر ردیف کشت برتری قابل توجهی نسبت به الگوریتم مبتنی بر وقفه دارد و به عنوان الگوریتم برتر شناخته شد.

گرچه دقت‌های شمارش تا حد زیادی در دو الگوریتم مشابه هم بوده و حتی در بعضی از موارد ممکن است الگوریتم مبتنی بر وقفه عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم مبتنی بر مبدل دیجیتال داشته باشد اما الگوریتم مبتنی بر مبدل دیجیتال به آنالوگ به دلیل امکانات بهتر و توانایی تغییر متغیرهایی نظیر حد آستانه که در الگوریتم مبتنی بر وقفه به صورت سخت‌افزاری تنظیم می‌شود برتری قابل توجهی نسبت به الگوریتم مبتنی بر وقفه دارد.

سپاسگزاری

بدین وسیله نویسندگان از حمایت مالی دانشگاه تبریز قدردانی می‌نمایند.

نتیجه گیری

در این تحقیق دو الگوریتم مبتنی بر وقفه و مبدل آنالوگ به دیجیتال برای شمارش بذور در ردیف کاری توسعه و مورد آزمون قرار

مشارکت نویسندگان

متن

هادی کریمی: مشاوره فنی، روش شناسی، مفهوم سازی

علی غفارتژاد: مفهوم سازی، روش شناسی، جمع آوری داده، پردازش داده، خدمات نرم افزاری، اعتبار سنجی، استخراج متن
حسین نوید: نظارت و مدیریت، مفهوم سازی، روش شناسی، ویرایش

References

1. Al-Mallahi, A., & Kataoka, T. (2013). Estimation of mass flow of seeds using fibre sensor and multiple linear regression modelling. *Computers and Electronics in Agriculture*, 99, 116-122. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.09.005>
2. Al-Mallahi, A., & Kataoka, T. (2016). Application of fibre sensor in grain drill to estimate seed flow under field operational conditions. *Computers and Electronics in Agriculture*, 121, 412-419. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.01.006>
3. Bachman, W. J. (1988). Capacitive-type seed sensor for a planter monitor. In: Google Patents.
4. Bell, D. M. (1979). Optical seed sensor for a seed planter monitor. In: Google Patents.
5. Besharati, B., Navid, H., Karimi, H., Behfar, H., & Eskandari, I. (2019). Development of an infrared seed-sensing system to estimate flow rates based on physical properties of seeds. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162, 874-881. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.05.041>
6. Chen, J., Zhang, H., Pan, F., Du, M., & Ji, C. (2022). Control system of a motor-driven precision no-tillage maize planter based on the CANopen protocol. *Agriculture*, 12(7), 932. <https://doi.org/10.3390/agriculture12070932>
7. El Attar, M. (2010). Seeds Counting Device Based on Light Reflectance Optoelectronic Field Detection. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, 27(1), 362-371. <https://doi.org/10.21608/mjae.2010.107177>
8. Fathipour, A., Navid, H., Karimi, H., Ghaffarnejad, A., & Wang, N. (2023). An approach to compensation of dust effects on seed flow sensors. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 25(1), 43-58.
9. Friend, K. D. (1987). Article or seed counter. In: Google Patents.
10. Fu, W., Meng, Z., Wu, G., Dong, J., Mei, H., & Zhao, C. (2012). Study on monitoring system of wheat sowing. *International Society of Precision Agriculture*, 1-10.
11. Ghaffarnejad, A., Navid, H., & Karimi, H. (2022). A new algorithm for detecting and measuring seed flow in the seed drills. Paper presented at the 14th National Congress of Mechanical Engineering of Biosystems and Mechanization of Iran, Kermanshah, Iran.
12. Ghorke, R., & Yadav, B. (2022). Development of sensor system for detection of choking of the boot of maize planter.
13. Jiang, M., Liu, C., Du, X., Huang, R., Dai, L., & Yuan, H. (2021). Research on continuous granular material flow detection method and sensor. *Measurement*, 182, 109773. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109773>
14. Karimi, H., Navid, H., Besharati, B., Behfar, H., & Eskandari, I. (2017). A practical approach to comparative design of non-contact sensing techniques for seed flow rate detection. *Computers and Electronics in Agriculture*, 142, 165-172. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.08.027>
15. Karimi, H., Navid, H., Besharati, B., & Eskandari, I. (2019). Assessing an infrared-based seed drill monitoring system under field operating conditions. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162, 543-551. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.04.045>
16. Karimi, H., Navid, H., & Mahmoudi, A. (2015). Online laboratory evaluation of seeding-machine application by an acoustic technique. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 13(1), e0202-e0202. <https://doi.org/10.5424/sjar/2015131-6050>
17. Kocher, M. F., Lan, Y., Chen, C., & Smith, J. A. (1998). Opto-electronic sensor system for rapid evaluation of planter seed spacing uniformity. *Transactions of the ASAE*, 41(1), 237-245. <https://doi.org/10.13031/1013.17143>
18. Körösi, G., Csátori, T., Erdei, C., & Silye, J. (2020). Seed counting sensor and method for detecting blockage of a seed conveying pipe. In: Google Patents.
19. Kumar, R., & Raheman, H. (2018). Detection of flow of seeds in the seed delivery tube and choking of boot of a seed drill. *Computers and Electronics in Agriculture*, 153, 266-277. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.08.035>
20. Liu, W., Hu, J., Zhao, X., Pan, H., Lakhari, I. A., & Wang, W. (2019). Development and experimental analysis of an intelligent sensor for monitoring seed flow rate based on a seed flow reconstruction technique. *Computers and Electronics in Agriculture*, 164, 104899. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104899>
21. Liu, W., Hu, J., Zhao, X., Pan, H., Lakhari, I. A., Wang, W., & Zhao, J. (2019). Development and experimental analysis of a seeding quantity sensor for the precision seeding of small seeds. *Sensors*, 19(23), 5191. <https://doi.org/10.3390/s19235191>
22. Raheman, H., & Kumar, R. (2015). An embedded system for detecting seed flow in the delivery tube of a seed drill. Paper presented at the Proceedings of International Conference on Advances in Chemical, Biological & Environmental Engineering (ACBEE). <https://doi.org/10.17758/ur.ue0315202>

23. Taghinezhad, J., Alimardani, R., & Jafary, A. (2013). Design a capacitive sensor for rapid monitoring of seed rate of sugarcane planter. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 15(4), 23-29.
24. Xie, C., Zhang, D., Yang, L., Cui, T., He, X., & Du, Z. (2021). Precision seeding parameter monitoring system based on laser sensor and wireless serial port communication. *Computers and Electronics in Agriculture*, 190, 106429. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106429>
25. Zhang, J., Hou, Y., Ji, W., Zheng, P., Yan, S., Hou, S., & Cai, C. (2023). Evaluation of a Real-Time Monitoring and Management System of Soybean Precision Seed Metering Devices. *Agronomy*, 13(2), 541. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020541>

Research Article

Vol. 14, No. 4, 2024, p. 445-458

Development and Optimization of a Novel Deep Learning Model for Diagnosis of Quince Leaf Diseases

A. Naderi Beni¹, H. Bagherpour^{2*}, J. Amiri Parian²

1- PhD Student, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

2- Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

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

Received: 10 May 2024

Revised: 22 June 2024

Accepted: 29 June 2024

Available Online: 04 November 2024

How to cite this article:

Naderi Beni, A., Bagherpour, H., & Amiri Parian, J. (2024). Development and Optimization of a Novel Deep Learning Model for Diagnosis of Quince Leaf Diseases. *Journal of Agricultural Machinery*, 14(4), 445-458. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2024.88013.1248>

Introduction

Detection of tree leaf diseases plays a crucial role in the horticultural field. These diseases can originate from viruses, bacteria, fungi, and other pathogens. If proper attention is not given, these diseases can drastically affect trees, reducing both the quality and quantity of yields. Due to the importance of quince in Iran's export market, its diseases can cause significant economic losses to the country. Therefore, if leaf diseases can be automatically identified, appropriate actions can be taken in advance to mitigate these losses. Traditionally, the identification and detection of tree diseases rely on experts' naked-eye observations. However, the physical condition of the expert such as eyesight, fatigue, and work pressure can affect their decision-making capability. Today, deep convolutional neural networks (DCNNs), a novel approach to image classification, have become the most crucial detection method. DCNNs improve detection or classification accuracy by developing machine-learning models with many hidden layers to extract optimal features. This approach has significantly enhanced the classification and identification of diseases affecting plants and trees. This study employs a novel CNN algorithm alongside two pre-trained models to effectively identify and classify various types of quince diseases.

Materials and Methods

Images of healthy and diseased leaves were acquired from several databases. The majority of these images were sourced from the Agricultural Research Center of Isfahan Province in Iran, supplemented by contributions from researchers who had previously studied in this field. Other supporting datasets were obtained from internet sources. This study incorporated a total of 1,600 images, which included 390 images of fire blight, 384 images of leaf blight, 406 images of powdery mildew, and 420 images of healthy leaves. Of all the images obtained, 70%, 20%, and 10% were randomly selected for the network's training, validation, and testing, respectively. Image flipping, rotation, and zooming were applied to augment the training dataset. In this research, a proposed convolutional neural network (CNN) combined with image processing was developed to classify quince leaf diseases into four distinct classes. Three CNN models, including Inception-ResNet-v2, ResNet-101, and our proposed CNN model, were investigated, and their performances were compared using essential indices including precision, sensitivity, F1-score, and accuracy. To optimize the models' performance, the impact of dropout with a 50% probability and the number of neurons in the hidden layers were examined. Our proposed CNN model consists of an architecture with four convolutional layers, with 224×224 RGB images as input to the first layer, which has 16 filters, followed by additional convolutional layers with 32, 64, and 128 filters



©2024 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.2024.88013.1248>

respectively. Activation functions of ReLU combined with max-pooling were used at each convolutional layer, and Softmax activation was applied in the last layer of the neural network to convert the output into a probability distribution.

Results and Discussion

Three confusion matrices based on the test dataset were constructed for all the CNN models to compare and evaluate the performance of the classifiers. The indices obtained from the confusion matrices indicated that Inception-ResNet-v2 and ResNet-101 achieved accuracies of 79% and 72%, respectively. While all models exhibited promising efficiency in classifying leaf diseases, the proposed shallow CNN model stood out with an impressive accuracy of 91%, marking it as the most effective solution. The comprehensive results indicate that the optimized CNN model, featuring four convolutional layers, one hidden layer with 64 neurons, and a dropout rate of 0.5, outperformed the transfer learning models.

Conclusion

The findings of this study demonstrate that our developed proposed CNN model provides a high-performance solution for the rapid identification of quince leaf diseases. It excels in real-time detection and monitoring, achieving remarkable accuracy. Notably, it can identify fire blight and powdery mildew with a precision exceeding 95%.

Keywords: Confusion matrix, Convolutional neural network, Fire blight, Leaf blight, Powdery mildew

توسعه و بهینه‌سازی الگوریتم ویژه یادگیری عمیق در تشخیص بیماری‌های مختلف برگی درخت

به

امین نادری بنی^{۱*}، حسین باقرپور^{۲*}، جعفر امیری پریان^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۰۹

چکیده

بیماری‌های درخت به یکی از نگرانی‌های عمده باغداران می‌باشد و شناسایی آن‌ها در پایش درختان ضروری است چرا که زیان‌های اقتصادی قابل توجهی وارد می‌کند. از این رو، تشخیص به‌موقع و موثر بیماری‌های برگی درختان به نقش مهمی در جلوگیری از این ضرر اقتصادی دارد. بیشتر علائم بیماری این درخت در برگ ظاهر می‌شود و تشخیص آن‌ها نیاز به متخصصان خبره داشته و از طرفی زمان‌بر بوده و هزینه آزمایشگاهی بالایی دارد. اصلی‌ترین بیماری‌های این محصول شامل آتشک، زخم برگ و سفیدک پودری است. با پیشرفت الگوریتم‌های هوش مصنوعی، شبکه‌های عصبی مختلفی برای طبقه‌بندی معرفی شده‌اند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به شبکه‌های عصبی پیچشی (کانولوشنی) اشاره کرد. هدف اصلی این مطالعه بهینه‌سازی و تنظیم پارامترهای اصلی این شبکه‌ها به منظور افزایش دقت تشخیص بیماری‌های برگی درخت به می‌باشد. در این مطالعه در رویکرد اول با استفاده از یادگیری انتقالی، دو الگوریتم مهم Inception-ResNet-v2 و ResNet-101 و در رویکرد دوم یک الگوریتم بهینه‌شده پیشنهادی برای طبقه‌بندی بیماری‌ها استفاده شد. نتایج مدل‌ها نشان داد که حذف تصادفی باعث اصلاح دقت بعضی مدل‌ها گردید و بیشترین عملکرد با ۶۴ نورون در لایه مخفی حاصل گردید. مدل پیشنهادی دقت بالاتری نسبت به روش انتقالی داشت. با بررسی نتایج کلی، مدل پیشنهادی با چهار لایه پیچشی در بلوک کانولوشنی، یک لایه مخفی در بلوک شبکه عصبی و ضرب دراپ‌اوت ۰/۵ بیشترین عملکرد را ارائه داد.

واژه‌های کلیدی: بیماری آتشک، زخم برگ، سفیدک پودری، شبکه عصبی پیچشی، ماتریس اغتشاش

مقدمه

جهان قرار دارند (FAO, 2021). میوه به، سرشار از مواد مغذی بوده و دارای کالری بسیار پایینی است. این میوه حاوی فیبر، پروتئین، آهن، مس، کربوهیدرات، منیزیم، پتاسیم، ویتامین B6، ویتامین B1 یا تیامین و ویتامین C است. بنابراین، میوه به دارای ارزش غذایی بالا و تامین‌کننده بسیاری از ویتامین‌ها، املاح و فیبر مورد نیاز بدن انسان‌ها است و توجه به پرورش و تولید این محصول بسیار حائز اهمیت است (Al-Zughbi & Krayem, 2022).

یکی از مشکلات تولید میوه به، وجود بیماری‌های برگی و عدم تشخیص به‌موقع آن‌ها است. بیماری‌های برگی اغلب در مقیاس زیاد در درختان رخ می‌دهد و می‌تواند باعث کاهش عملکرد و کیفیت محصول شوند و در نتیجه زیان‌های اقتصادی قابل توجهی به باغداران وارد می‌کنند. از این رو، تشخیص به‌موقع و موثر بیماری‌های برگی درختان نقش مهمی در جلوگیری از این ضرر اقتصادی دارد (Saygili, Aysan, Mirik, & Sahin, 2004; Sujatha, Chatterjee, Jhanjhi, & Brohi, 2021; Joshi, Kaushik,

درخت به^۲ از خانواده Rosaceae و از جنس Cydonia است که تنها یک گونه با نام Vulgaris دارد و بومی ایران و ترکمنستان می‌باشد. براساس آمارنامه سازمان خوار و بار جهانی در سال ۲۰۲۱ میلادی، از مقدار ۶۹۷۷۶۲ تن محصول تولیدی میوه به در سرتاسر دنیا حدود ۶۹/۹ درصد آن در قاره آسیا است که به‌ترتیب کشورهای ترکیه، چین، ازبکستان، ایران و مراکش در رتبه‌های اول تا پنجم

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

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

(*)- نویسنده مسئول: (Email: h.bagherpour@basu.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2024.88013.1248>

3- Quince

با بررسی منابع علمی تحقیقات زیادی در زمینه تشخیص بیماری گیاهان و درختان انجام گرفته است. میراندا و همکاران (Miranda, Gerardo, & Tanguilig, 2014) برای تشخیص، استخراج و تخمین تراکم آفات در مزارع برنج از تکنیک‌های مختلف پردازش تصویر و سامانه خودکار استفاده کردند. حسین و همکاران (Hossain, Mou, Hasan, Chakraborty, & Razzak, 2018) سامانه‌ای برای پردازش تصویر ارائه کردند که در آن از الگوریتم طبقه‌بندی کننده ماشین بردار پشتیبان (SVM^۴) برای شناسایی برگ‌های بیمار از سالم و طبقه‌بندی آن‌ها استفاده کردند. کین و همکاران (Qin et al., 2016) یک راه‌حل عملی برای دسته‌بندی تصاویر و تشخیص بیماری برگ یونجه پیشنهاد دادند. در این تحقیق به کمک الگوریتم SVM چهار بیماری برگ یونجه با دقت متوسط ۷۴/۹۴ درصد شناسایی و طبقه‌بندی شدند. روت و همکاران (Rothe & Kshirsagar, 2015) یک سیستم تشخیص الگو برای شناسایی و طبقه‌بندی سه بیماری برگ پنبه ارائه کردند. با استفاده از مجموعه داده‌های گرفته‌شده از تصاویر طبیعی، یک مدل کانتور فعال برای تقسیم‌بندی تصویر استفاده شد و مومنت‌های هیو^۵ به‌عنوان ویژگی‌هایی مناسب برای آموزش یک سیستم استنتاج عصبی فازی تطبیقی استخراج شدند و میانگین دقت سیستم تشخیصی ۸۵ درصد گزارش گردید. اسلام و همکاران (Islam, Dinh, Wahid, & Bhowmik, 2017) با استفاده از رویکرد پردازش تصویر و یادگیری ماشین، تشخیص خودکار بیماری‌های گیاه سیب‌زمینی را با بهره‌گیری از پایگاه تصاویر "Plant Village" بررسی کردند و با استفاده از مدل SVM و با تعداد بیش از ۳۰۰ تصویر، طبقه‌بندی بیماری را با دقت متوسط ۹۵٪ گزارش کردند. گوپتا (Gupta, 2017) یک مدل SVM-CS اصلاح‌شده را با استفاده از مجموعه داده‌های حاوی برگ‌های مبتلا به بیماری‌های قارچی، باکتریایی و به همراه تصاویر برگ سالم، برای شناسایی بخش سالم و بیمار پیشنهاد کردند. توسعه اخیر فناوری‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری در حوزه کامپیوتر و تشخیص تصویر، منجر به استفاده گسترده از شبکه‌های CNN در یادگیری عمیق برای طبقه‌بندی خودکار تصاویر و تشخیص بیماری‌های گیاهی شده است (Chen, Liu, & GAO, 2019). لو و همکاران (Lu, Yi, Zeng, Liu, & Zhang, 2017) یک رویکرد شناسایی جدید برای بیماری‌های برنج بر اساس شبکه‌های عصبی کانولوشن لایه عمیق^۶ (DCNN) ارائه کردند. با استفاده از مجموعه داده متشکل از ۵۰۰ تصویر طبیعی از برگ‌ها و ساقه‌های بیمار و سالم برنج، چندین شبکه CNN برای شناسایی ۱۰ بیماری رایج برنج بررسی و مقایسه شدند.

(Dutta, Srivastava, & Choudhary, 2021). از مهم‌ترین رایج‌ترین بیماری‌های برگی درخت به می‌توان به مواردی مانند بیماری آتشک^۱، بیماری زخم برگ^۲ و بیماری سفیدک پودری^۳ اشاره نمود. بیماری آتشک باعث سوختگی برگ، میوه، شکوفه، و شاخه‌ها می‌گردد. بیماری‌های زخم برگ که اغلب ناشی از قارچ می‌باشند، به شکل لکه‌های نامنظم قهوه‌ای روی برگ ظاهر می‌گردد و بیماری سفیدک پودری نیز باعث ایجاد لکه‌های سفید روی برگ‌های جوان می‌شود و به تدریج گسترش می‌یابد و کل برگ را می‌پوشانند (Harteveld, Akinsanmi, & Drenth, 2013; Bradshaw, Braun, Götze, & Jurick, 2022).

در روش بصری، تشخیص آفات و بیماری‌ها در مزارع و باغات با ارزیابی فرد متخصص، علائم در برگ یا میوه شناسایی می‌شود. این ارزیابی را می‌توان با روش‌های میکروسکوپی یا بیولوژی مولکولی تایید کرد. تشخیص زودهنگام نیز با به دام انداختن اسپور قارچی هوا توسط تله‌های حجمی یا غیرفعال و شناسایی و تعیین میزان ریزش بیش از حد و زودرس برگ انجام می‌گردد. البته این عملیات خود نیازمند تخصصی است که بتواند از طریق ارزیابی ظاهری یا انجام آزمایش عملیات شناسایی را انجام دهد که در نتیجه می‌تواند زمان‌بر و هزینه‌بر باشد (Ali, Bachik, Muhadi, Yusof, & Gomes, 2019). استفاده از ماشین بینایی می‌تواند در تشخیص بیماری‌های برگی درختان و گیاهان مفید باشد؛ چرا که دارای دقت و سرعت بالا و هزینه پایین می‌باشد (Hosainpour, Kheiralipour, Nadimi, & Paliwal, 2022; Kheiralipour, Nadimi, & Paliwal, 2022; Farokhzad, Modares Motlagh, Ahmadi Moghaddam, Jalali Honarmand, & Kheiralipour, 2024).

در پژوهش‌های مرتبط با ماشین بینایی، عملیات تشخیص ویژگی به دو دسته اصلی تقسیم می‌شود: در روش اول استخراج ویژگی‌ها توسط افراد متخصص در حوزه پردازش تصویر انجام می‌شود و در روش دوم به کمک شبکه‌های پیچشی (کانولوشنی) لایه عمیق. هرچند در حالت اول، ویژگی‌های به‌دست‌آمده بر اساس تجربه تا حدودی خاصیت سادگی دارند، با این حال آن‌ها ممکن است توانایی استخراج معنایی یا مفهومی و تمایز ویژگی‌ها را در یک محیط در حال تغییر نداشته باشند و از طرفی قابلیت تعمیم‌پذیری خوبی ندارند (Chen, Dewi, Huang, & Caraka, 2020; Dawod & Dobre, 2022). مدل‌های یادگیری عمیق مشکل استخراج ویژگی‌های دستی را حل کرده‌اند و به‌طور گسترده در کاربردهای مختلف شناسایی بیماری‌های محصول استفاده می‌شوند و قابلیت تعمیم‌پذیری بالاتری دارند (Jiang, Lu, Chen, CAI, & Li, 2020; Lu, Zeng, Liu, & Zhang, 2021).

4- Support vector machine

5- Hu's moments

6- Deep Convolutional neural network

1- Fire Blight

2- Leaf Blight

3- Powdery Mildew

است که بتواند با معماری کم‌حجم با شبکه‌های حجیم از پیش آموزش دیده‌شده رقابت کرده یا حتی بهتر عمل کند. هدف سوم این مطالعه تنظیم یا اصلاح هایپرپارامترهای اصلی شبکه‌های لایه عمیق و رسیدن به یک مدل بهینه است. در این مطالعه سعی گردید که اثر هایپرپارامترهای هر دو بلوک کانولوشنی و بلوک دسته‌بندی مورد بررسی قرار گیرند.

مواد و روش‌ها

جمع‌آوری تصاویر

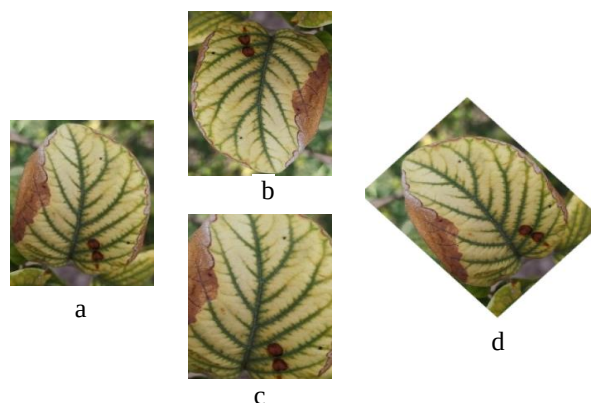
در این مطالعه، اکثر تصاویر بیماری‌های برگ‌ی درخت به از فضای باز و بدون کنترل دقیق شرایط محیطی از مرکز تحقیقات کشاورزی استان اصفهان تهیه شد. سپس تصویر مربوط به برگ‌های بیمار توسط نرم‌افزار فتوشاپ (Adobe Photoshop 2023) برش داده شدند و در پوشه‌های مربوط به هر بیماری ذخیره گردید. تصویربرداری توسط دوربین تلفن همراه شیائومی مدل رد می نوت ۱۱ پرو با وضوح‌پذیری ۹ مگاپیکسل انجام شد و به‌منظور کاهش حجم و امکان استفاده آن‌ها در شبکه‌های لایه عمیق، با پردازش اولیه، همه تصاویر به وضوح 224×224 تبدیل شدند. در این پژوهش سه گروه بیماری برگ‌ی رایج درخت به شامل بیماری آتشک، بیماری زخم برگ و بیماری سفیدک پودری مورد مطالعه قرار گرفتند. در کل ۱۶۰۰ تصویر برگ‌ی درخت به شامل ۳۹۰ بیماری آتشک، ۳۸۴ بیماری زخم برگ، ۴۰۶ برگ بیماری سفیدک پودری و ۴۲۰ تصویر برگ سالم تهیه شد. در شکل ۱ نمونه‌هایی از برگ‌های بیمار و برگ سالم درخت به نشان داده شده است. از آن‌جاکه شبکه‌های لایه عمیق در فرآیند آموزش به تصاویر زیادی نیاز دارند، علاوه بر داده‌هایی که از مرکز تحقیقات کشاورزی استان اصفهان به‌دست آمد، تعدادی نیز از طریق فضای اینترنت (Moore, 2022; David, 2023) و برخی از محققان استان‌های دیگر که قبلاً در پژوهش‌های مرتبط با این محصول کار کرده بودند، تهیه شد و سپس به کمک عملیات چرخش ۴۵ درجه، آینه افقی - عمودی و بزرگ‌نمایی، بازسازی تصاویر مجموعه آموزشی انجام گرفت (شکل ۲). البته این عملیات بازسازی برای داده‌های آزمون انجام نگرفت. در جدول ۱ نیز تعداد تصاویر آموزش، اعتبارسنجی و آزمون مربوط به هر بیماری آورده شده است. برای پیدا کردن الگوریتم و عمومیت دادن آن به شرایط مختلف، در این پژوهش سعی شد بخشی از بیماری‌های موجود روی درخت در شرایط واقعی تصویربرداری شوند و سپس با برش آن‌ها، در آموزش و تست شبکه به‌کار برده شدند.

مدل پیشنهادی آن‌ها توانست با میانگین صحت $95/48\%$ ، تفکیک بیماری‌ها را انجام دهد. کاواساکی و همکاران (Kawasaki, Uga, Kagiwada, & Iyatomi, 2015) یک سیستم جدید تشخیص بیماری برگ خیار براساس شبکه‌های عصبی کانولوشن ارائه کردند. مدل پیشنهادی CNN آن‌ها توانست با متوسط صحت $94/9\%$ ، طبقه‌بندی خیارها را به دو کلاس بیمار و سالم انجام دهد. اسلادوویچ و همکاران (Sladojevic, Arsenovic, Anderla, Culibrk, & Stefanovic, 2016) یک رویکرد جدید مبتنی بر شبکه‌های پیچیده عمیق برای تشخیص بیماری‌های گیاهی پیشنهاد کردند. با تفکیک برگ‌های گیاه از محیط اطراف، ۱۳ نوع رایج بیماری‌های گیاهی توسط مدل پیشنهادی مبتنی بر CNN شناسایی شدند. نتایج تجربی نشان داد که مدل پیشنهادی مبتنی بر CNN می‌تواند عملکرد خوبی در تشخیص بیماری‌ها داشته باشد و متوسط دقت و حساسیت بالایی گزارش شد. موهانتی و همکاران (Mohanty, Hughes, & Salathé, 2016) یک مدل مبتنی بر CNN برای شناسایی ۱۴ گونه محصول توسعه دادند. با استفاده از مجموعه داده عمومی از 54306 تصویر از برگ‌های گیاهان بیمار و سالم، مدل پیشنهادی آموزش داده شد و دقت $99/35$ درصد به‌دست آمد. جیانگ و همکاران (Jiang et al., 2020) از CNN برای استخراج ویژگی‌های تصویر بیماری برگ برنج و طبقه‌بندی و پیش‌بینی بیماری‌های آن استفاده کردند. تیان و همکاران (Tian et al., 2019) سیستمی بر اساس YOLOv3 طراحی کرد که می‌توانست میوه سیب رسیده را در هنگام برداشت به‌صورت لحظه‌ای شناسایی و تشخیص دهد. سان و همکاران (Sun et al., 2022) از شبکه یادگیری عمیق YOLO-v4 برای شناسایی تاج‌های درختان ارائه کردند. دای و فن (Dai & Fan, 2022) برای تشخیص بیماری برگ محصول کشاورزی از YOLOv5 استفاده کردند. این مطالعات نشان می‌دهد که شبکه‌های عصبی کانولوشن به‌طور گسترده‌ای در زمینه تشخیص بیماری‌های گیاهی استفاده شده است و نتایج خوبی هم گزارش شده است.

با توجه به سابقه پژوهش، هرچند تحقیقات مختلفی در زمینه تشخیص بیماری‌های مختلف سایر محصولات زراعی و باغی انجام گرفته است، ولی در زمینه به‌کارگیری هوش مصنوعی بر پایه شبکه عصبی کانولوشنی به‌منظور تشخیص بیماری‌های مرسوم درخت به تاکنون هیچ تحقیقی یافت نگردید. از طرفی، برای این که بتوان دقت شبکه را بالا برد، لازم است آن شبکه مطابق با داده‌ها یا تصاویر مرتبط با برگ‌های درخت به خوبی آموزش ببیند و تمامی پارامترها شبکه بر اساس برگ این درخت تنظیم گردند. لذا هدف اول این پژوهش، به‌کارگیری چندین شبکه عصبی کانولوشنی از پیش آموزش دیده‌شده برای تشخیص بیماری‌های مختلف درخت به است. هدف دوم توسعه یک مدل یادگیری عمیق پیشنهادی با ساختار جدید



شکل ۱- نمونه بیماری‌های مختلف برگ درخت به، (a) بیماری سفیدک پودری (b) بیماری آتشک، (c) بیماری لکه برگ و (d) برگ سالم
Fig.1. Sample images of Quince leaf diseases (a) Powdery Mildew, (b) Fire Blight, (c) Leaf Blight, and (d) Healthy Leaf



شکل ۲- بازسازی تصاویر، (a) تصویر اصلی، (b) بازسازی توسط عملیات آینه کردن افقی و عمودی، (c) بزرگ‌نمایی و (d) چرخش ۴۵ درجه
Fig.2. Augmentation of (a) original image using (b) horizontal and vertical flips, (c) zoom in, and (d) 45-degree rotation

جدول ۱- تقسیم‌بندی داده‌ها به نسبت ۸:۱:۱ جهت آموزش، اعتبارسنجی و آزمون داده‌ها در شبکه‌های CNN

Table 1- Number of train, validation, and test data sets for training of CNN networks

بیماری برگ Leaf diseases	تعداد کل تصاویر Total number of images	تعداد تصاویر آموزشی بعد از بازسازی Number of training images after augmentation	تعداد تصاویر ارزیابی Number of validation images after augmentation	تعداد تصاویر آزمون Number of test images
بیماری سفیدک پودری Powdery Mildew	390	1248	156	39
بیماری زخم برگ Leaf Blight	384	1229	154	39
بیماری آتشک Fire Blight	406	1299	164	40
برگ سالم Healthy Leaf	420	1344	168	42

شبکه‌های عصبی کانولوشن

در این پژوهش به منظور بررسی دقیق قابلیت شبکه پیشنهادی و توسعه الگوریتم مناسب در تشخیص بیماری‌ها مختلف از دو روش

استفاده شد. در روش اول با استفاده از روش یادگیری انتقالی^۱، قابلیت دو مدل مشهور Inception-ResNet-v2 و ResNet-101 در تشخیص ویژگی‌ها به منظور دسته‌بندی بیماری‌های درخت به در چهار

گرایان^۳ رخ دهد؛ که این مشکل را با اضافه کردن اتصالات میانبر^۴ یا اتصالات اضافی^۵ حل کردند و امکان عمیق‌تر کردن شبکه‌ها امکان‌پذیر شد. در نتیجه شبکه‌ی ResNet معرفی شد تا این مشکل محوشدگی گرایان را حل کند. از طرفی برخلاف شبکه‌های ساده کانولوشنی، در شبکه Inception به دلیل بهره‌گیری از فیلترهای با ابعاد مختلف بر ورودی داده، امکان ایجاد نقشه ویژگی‌های و دقیق‌تر وجود دارد. لذا شبکه عصبی Inception-ResNet-v2 به دلیل داشتن مزیت هر دو شبکه ResNet و Inception توانایی بالایی را در تشخیص ویژگی‌ها از خود نشان داده است (Szegedy et al., 2016).

مدل پیشنهادی

مدل شبکه عصبی پیشنهادی دارای معماری ویژه‌ای است که برای امکان مقایسه آن با سایر شبکه‌های بررسی شده فوق، سعی شد اندازه تصویر ورودی RGB با اندازه ثابت 224×224 در نظر گرفته شود. در این مدل، لایه کانولوشن ۱ با ۱۶ فیلتر و به دنبال آن سه لایه کانولوشن دیگر با فیلترهای ۳۲، ۶۴ و ۱۲۸ استفاده شدند. برای کاهش ابعاد تصویر، بعد از هر لایه کانولوشن یک لایه ادغام حداکثری اضافه گردید در انتهای آخرین لایه ادغام یک لایه فلتن^۶ یک‌بعدی به‌عنوان ورودی بلوک طبقه‌بند قرار داده شد. در بلوک دسته‌بندی جهت جلوگیری از افزایش تعداد پارامترها از یک لایه پنهان استفاده شد و برای رسیدن به جواب بهینه، اثر تعداد نورون‌های ۳۲، ۶۴ و ۱۲۸ بر عملکرد نهایی مدل بررسی شد. همچنین در این بلوک اثر روش حذف تصادفی^۷ بر عملکرد مدل‌ها بررسی گردید. در لایه میانی بلوک دسته‌بندی و در تمامی لایه‌های کانولوشن از تابع فعال‌ساز ReLU استفاده شد و در لایه آخر نیز از چهار نورون و با تابع فعال‌ساز softmax استفاده گردید. در شکل ۴ معماری شبکه پیشنهادی برای دسته‌بندی بیمارهای مختلف درخت به نشان داده شده است. در هنگام آموزش شبکه، نرخ یادگیری از نوع کاهشی پله‌ای^۸ با نرخ اولیه ۰/۰۱، تکانه ۰/۹ و تابع تابع بهینه‌ساز Adam استفاده شد.

طبقه مختلف بررسی گردید. این مدل‌های انتقالی در مقایسه با مدل‌های دیگر قابلیت خوبی از خود نشان داده‌اند و از محبوبیت بالایی برخوردار هستند (He, Zhang, Ren, & Sun, 2016). ساختار کلی و نحوه استفاده از مدل‌های یادگیری انتقالی در شکل ۳ نشان داده شده است. در روش دوم یک مدل پیشنهادی یادگیری عمیق برای آموزش داده‌ها و مدل‌سازی استفاده گردید. در مدل پیشنهادی، به‌منظور بهینه‌سازی مدل، اثر هایپرپارامترهای مهم مانند تعداد لایه‌های کانولوشن و ادغام، تعداد فیلترها یا کرنل‌ها، تعداد لایه‌های شبکه عصبی و نورون‌های آن‌ها، اثر حذف تصادفی بررسی و تحلیل گردید. عملیات پیش‌پردازش تصاویر در محیط نرم‌افزار متلب انجام و کدهای شبکه عصبی کانولوشن نیز در محیط نرم‌افزار پایتون نوشته شد. برای امکان دسترسی به تصاویر، ابتدا داده‌ها به محیط گوگل درایو منتقل گردید. آموزش همه مدل‌ها از پیش آموزش‌دیده‌شده CNN و مدل پیشنهادی در محیط Colab^۱ با استفاده از نرم‌افزار Python 3.6 و کتابخانه Keras انجام شد.

مدل ResNet-101

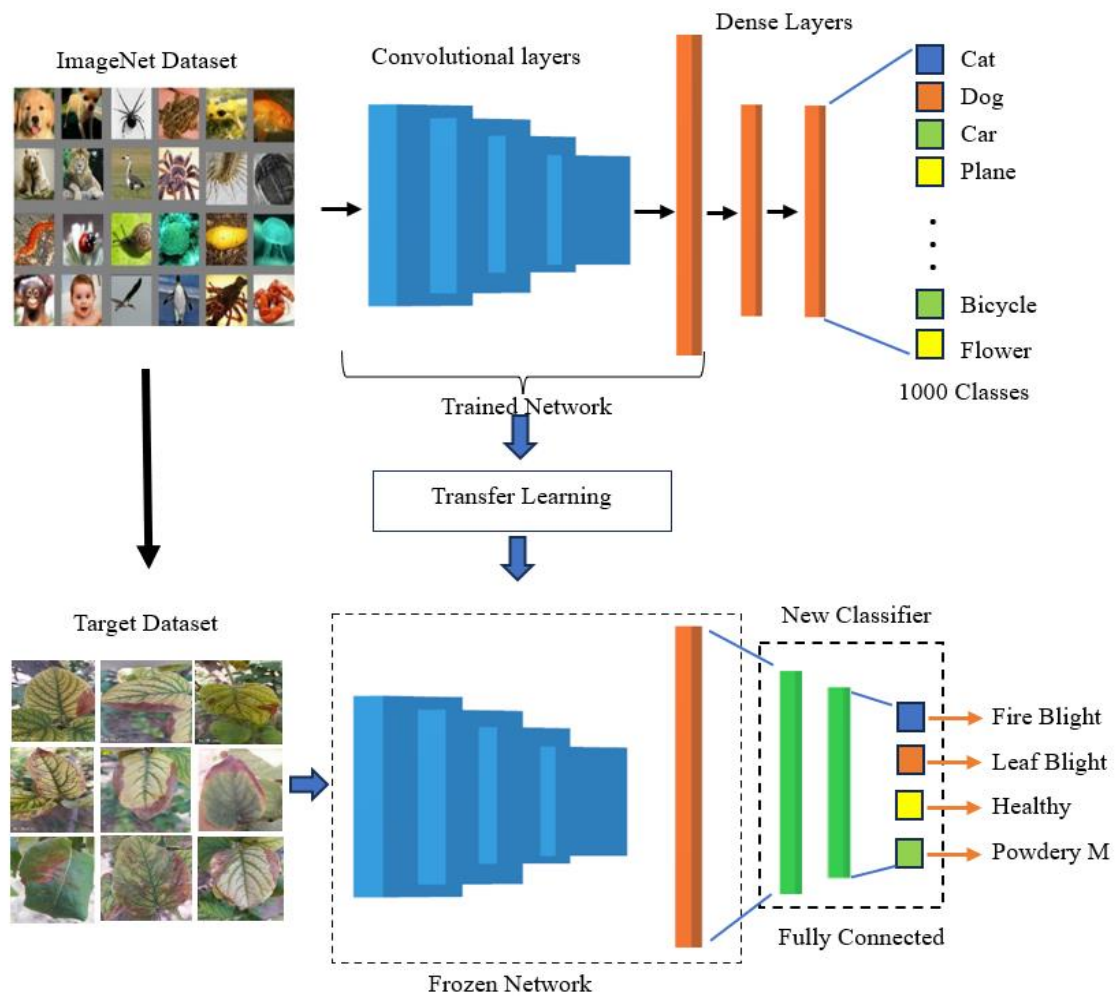
ResNet-101 یک معماری شبکه عصبی پیچشی عمیق است که بخشی از خانواده ResNet (شبکه‌های باقی‌مانده) می‌باشد و از طریق یادگیری باقی‌مانده، رویکردی نوآورانه در مدل‌های یادگیری عمیق ارائه کرده است. این شبکه مشکل ناپدید شدن گرایان‌ها در شبکه‌های بسیار عمیق را با استفاده از اتصالات باقی‌مانده حل می‌کند. این اتصالات باعث می‌شوند اطلاعات به طور مستقیم به لایه‌های بعدی منتقل شوند و امکان ساخت شبکه‌های بسیار عمیق‌تر فراهم شود. این مدل دارای ۱۰۱ لایه پیچشی است که به آن عمق لازم برای شناسایی الگوهای بسیار پیچیده را می‌دهد. عملکرد ResNet-101 در وظایف پیچیده، به‌ویژه در طبقه‌بندی تصویر و تشخیص اشیا، عملکرد خوبی دارد. این مدل تأثیر زیادی در پیشرفت‌های بینایی کامپیوتری داشت و در کاربردهایی که نیاز به دقت بالا مانند تصویربرداری پزشکی و رانندگی خودکار، به طور گسترده‌ای استفاده می‌شود (Zhang, Ren, & Sun, 2016).

مدل Inception-ResNet-v2

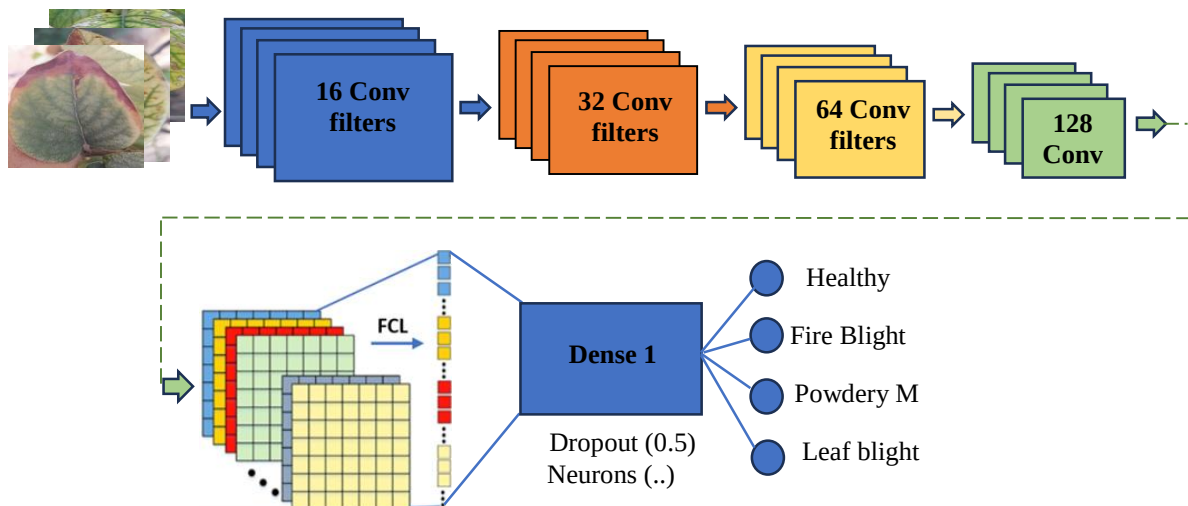
شبکه‌های لایه عمیق معمولی ساده مانند AlexNet، ZFNet و VGGNet، بدون داشتن هیچ‌گونه اتصال میان‌بر، اغلب لایه‌های کانولوشنی و سپس لایه‌های کاملاً متصل^۲ برای طبقه‌بندی دارند. در این شبکه‌ها با افزایش تعداد لایه‌ها می‌تواند مشکل محوشدگی

3- Vanishing gradient
4- Skip connections
5- Residual connections
6- Flatten
7- Dropout
8- Step_decay

1- Google colaboratory
2- Fully connected



شکل ۳- ساختار کلی و فرآیند آموزش شبکه‌های از پیش آموزش دیده‌شده در دسته‌بندی بیماری‌های مختلف برگ‌ی درخت به **Fig.3.** Overall structure and processing of pre-trained networks for classification of Quince leaf diseases



شکل ۴- معماری شبکه عصبی پیشنهادی برای طبقه‌بندی بیماری‌های مختلف برگ‌ی درخت به **Fig.4.** Proposed Convolutional neural network architecture for classification of Quince leaf diseases

شاخص‌های ارزیابی مدل‌ها

برای امکان مقایسه و ارزیابی عملکرد مدل‌های مختلف از معیارهای ویژه‌ای همچون دقت (رابطه ۱)، صحت (رابطه ۲)، حساسیت (رابطه ۳) و شاخص F_1 -score (رابطه ۴) استفاده می‌شود. این معیارها را می‌توان از جدول درهم‌ریختگی استخراج کرد (Vidyarthi et al., 2021).

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (۱)$$

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (۲)$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (۳)$$

$$F1 - \text{score} = \frac{2\text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (۴)$$

در این رابطه‌ها، TP یا مثبت صحیح، نمونه‌هایی هستند که به درستی در کلاس سالم طبقه‌بندی شده‌اند. FP یا مثبت کاذب نمونه‌هایی هستند که به اشتباه به عنوان کلاس سالم طبقه‌بندی شده‌اند. TN یا منفی صحیح، نمونه‌هایی هستند که به درستی ناسالم تشخیص داده شده‌اند. FN یا منفی کاذب نمونه‌هایی هستند که به اشتباه ناسالم طبقه‌بندی شده‌اند.

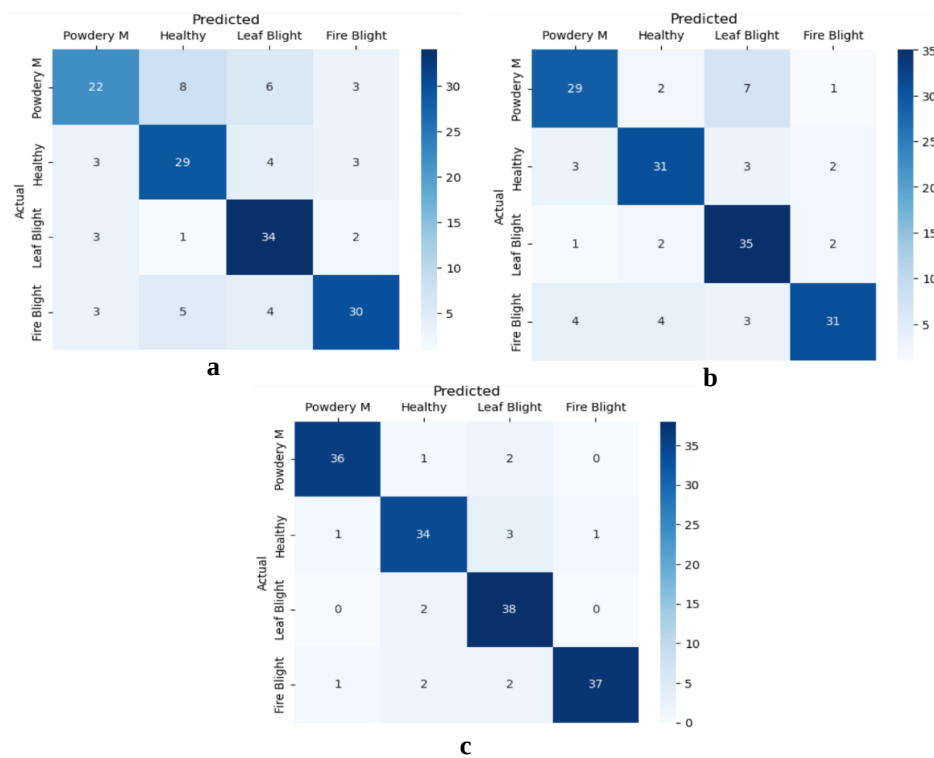
نتایج و بحث

در شکل ۵ ماتریس‌های اغتشاش مربوط به سه مدل مختلف بررسی شده Inception-ResNet-v2، ResNet-101 و مدل پیشنهادی برای داده‌های تست نشان داده شده است. از طریق داده‌های این ماتریس‌ها، شاخص‌های دقت، صحت، حساسیت و F_1 -score استخراج و محاسبه گردید. نتایج اولیه این ماتریس نشان می‌دهد که مدل‌های از پیش آموزش‌دیده شده Inception-ResNet-v2 و ResNet-101 به دلیل این که پارامترهای آن‌ها در تشخیص بیماری‌ها درختان به شکل اختصاصی استخراج نشده‌اند، لذا دقت خیلی خوبی در تشخیص از خود نشان ندادند. در بعضی از کارهای طبقه‌بندی مشابه که از وزن فریزشده شبکه‌های از پیش آموزش‌دیده شده استفاده کرده بودند، نتایج مشابهی گزارش شده است. به عنوان مثال در طبقه‌بندی بیماری گیاهان زراعی (Tiwari, Joshi, & Dutta, 2021)، دسته‌بندی میوه فندق (Shojaeian et al., 2023) شبکه پیشنهادی آن‌ها نتایج بهتری نسبت به شبکه‌های از پیش آموزش‌دیده نشان دادند. البته در بعضی از تحقیقات دیگر اختلاف زیادی بین مدل‌های پیشنهادی و از پیش آموزش‌دیده مشاهده نگردید که دلیل آن را می‌توان به شباهت داده‌ها یا تصاویر ورودی شبکه‌های فریزشده و شبکه‌های پیشنهادی ارتباط داد

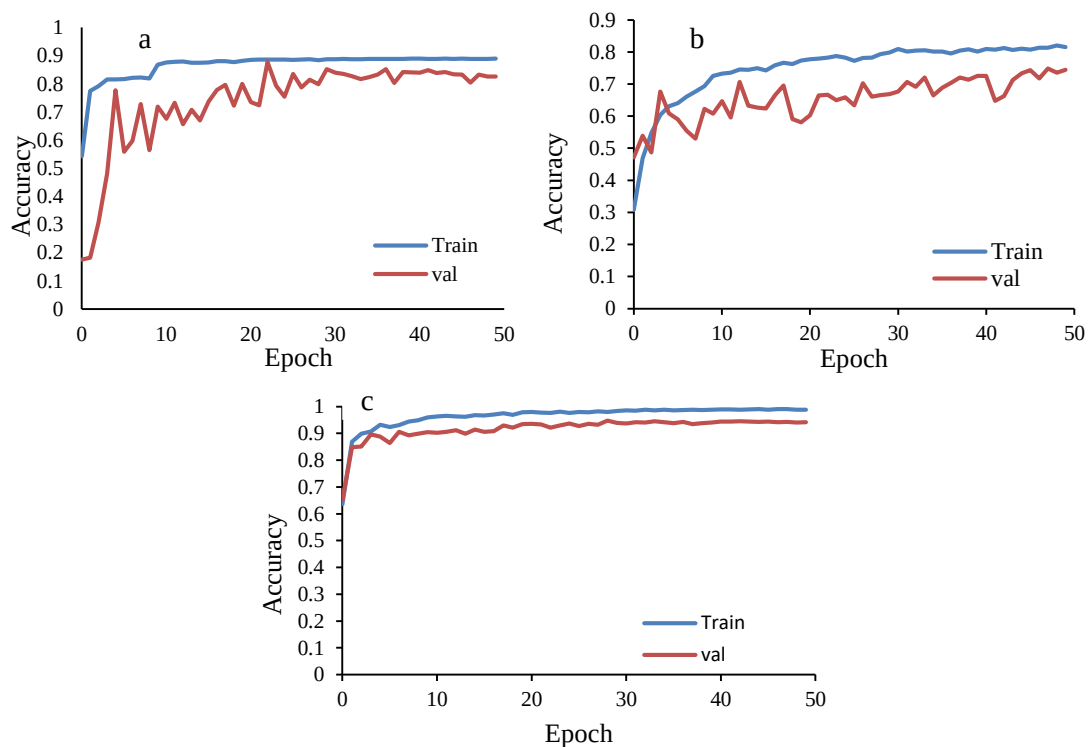
(Vidyarthi, Singh, Xiao, & Tiwari, 2021). در مقایسه مدل‌های مختلف، از میان ۱۶۰ نمونه تست، مدل‌های ResNet-101، Inception-ResNet-v2 به ترتیب تعداد ۴۵ و ۳۴ نمونه بیماری را به اشتباه طبقه‌بندی کرده‌اند، در حالی که مدل پیشنهادی تنها ۱۵ نمونه را به اشتباه به عنوان کلاس دیگر در نظر گرفته است.

روند تغییرات نمودار دقت مدل‌های مختلف برای داده‌های آموزش و ارزیابی در شکل ۶ نشان داده شده است. همچنان که نمودارها نشان می‌دهد، با توجه به این که در هر سه نمودار بعد از گذشت ۴۰ دوره آموزشی، دقت مجموعه داده‌های آموزش و ارزیابی به مقدار ثابتی همگرا شده است، این نشان از کافی بودن آموزش مدل‌ها می‌باشد. از طرفی همگرا بودن نمودارها به نحوی نشان از کافی بودن تعداد داده‌ها هم دارد. در نتیجه تعداد دوره آموزش ۵۰ برای بررسی توانایی مدل‌ها کفایت می‌کند. همچنین روند آموزش نمودار ارزیابی نشان می‌دهد که در هیچ کدام از مدل‌ها بیش‌برازش^۱ اتفاق نیفتاده است. دقت مدل‌های Inception-ResNet-101 و ResNet-v2 و مدل پیشنهادی برای داده‌های آموزش به ترتیب برابر با ۰/۸۱، ۰/۸۸ و ۰/۹۸ به دست آمد و برای تصاویر ارزیابی نیز به ترتیب برابر با ۰/۷۵، ۰/۸۲ و ۰/۹۴ حاصل شد.

از آنجایی که یکی از چالش‌های اصلی در آموزش شبکه‌های عصبی لایه عمیق وجود سرریز یا بیش‌برازش می‌باشد، با اجرای عملیات حذف تصادفی این مشکل قابل‌رفع می‌باشد. لذا در این تحقیق به منظور بهبود عملکرد شبکه‌ها، اثر حذف تصادفی به اندازه ۰/۵ بر عملکرد هر سه شبکه بررسی شد. نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که اعمال ضریب حذف تصادفی در اصلاح عملکرد بعضی مدل‌ها تاثیرگذار بوده و باعث افزایش قابل‌توجهی در دقت مدل‌های Inception-ResNet-v2 و پیشنهادی شده است. هرچند در مدل ResNet-101 این عامل تاثیر چندانی در اصلاح عملکرد مدل نداشته است. در کل با اضافه کردن لایه حذف تصادفی، دقت مدل‌های Inception-ResNet-v2 و پیشنهادی به ترتیب ۲/۵٪ و ۳/۲٪ افزایش یافت، ولی دقت مدل ResNet-101 به اندازه ۲/۶٪ کاهش پیدا کرد. با بررسی نتایج دیگران، استفاده از عملیات حذف تصادفی در شبکه‌های با عمق کم توصیه شده است و دلیل اثرگذاری بهتر این عملیات در شبکه پیشنهادی این مطالعه می‌تواند به دلیل عمق کم آن در مقایسه با دو شبکه از پیش آموزش‌دیده باشد (Baldi & Sadowski, 2014; Mianjy, Arora, & Vidal, 2018).



شکل ۵- ماتریس اغتشاش مدل‌های (a) ResNet-101، (b) Inception-ResNet-v2 و (c) شبکه پیشنهادی برای داده آزمون
Fig.5. Confusion matrix of (a) ResNet-101, (b) Inception-ResNet-v2, and (c) Proposed networks for test data set



شکل ۶- نمودار دقت داده‌های آموزش و ارزیابی مدل‌های (a) ResNet-101، (b) Inception-ResNet-v2 و (c) مدل پیشنهادی
Fig. 6. Accuracy plot for training and validation dataset for (a) ResNet-101, (b) Inception-ResNet-v2 and (c) Proposed networks

در بررسی اثر تعداد نورون در لایه مخفی بر دقت شبکه‌ها، سه سطح نورون با مقادیر ۳۲، ۶۴ و ۱۲۸ نورون در لایه مخفی بررسی گردید. همچنان که نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد، در هر سه شبکه با افزایش خیلی زیاد نورون‌ها دقت مدل‌ها کاهش پیدا کرد و اصلاح خاصی در خروجی مدل‌ها حاصل نگردید. از طرفی با کم کردن تعداد

نورون در شبکه پیشنهادی دقت افت پیدا کرد. در حالی که در دو شبکه دیگر Inception-ResNet-v2 و ResNet-101 دقت تغییری خاصی نکرد. لذا با توجه به روند تغییرات، برای این دو شبکه تعداد نورون ۳۲ و برای شبکه پیشنهادی ۶۴ نورون پیشنهاد گردید.

جدول ۲- اثر عامل حذف تصادفی و تعداد نورون‌های لایه مخفی بر دقت داده‌های ارزیابی مدل‌های مختلف CNN

Table 2- Effect of dropout value and the number of hidden neurons on the validation accuracy of CNN ($lr=Step_decay$ and batch size= 64)

CNN	Neurons	Dropout	Accuracy (%)
ResNet-101	32	-	0.75
	64	-	0.75
	64	0.5	0.73
	128	-	0.72
Inception-ResNet-v2	32	0.5	0.80
	64	-	0.80
	64	0.5	0.82
	128	0.5	0.77
Proposed Model	32	0.5	0.92
	64	-	0.91
	64	0.5	0.94
	128	0.5	0.89

شده و بیماری‌ها حاصل گردید. در حالی که در مدل‌های از پیش آموزش دیده شده به دلیل این که از ساختار فریز شده بلوک کانولوشنی استفاده شد، تفاوت در نوع تصاویر یا ویژگی‌های موجود در آن‌ها، دقت مناسبی حاصل نشد.

در بررسی تحقیقات مشابه، در پژوهشی که از شبکه عصبی لایه عمیق برای تمایز بیماری‌های برگ‌ی انگور استفاده شد، در تمایز بیماری کنه تار عنکبوتی^۱ از سفیدک درونی^۲، تار عنکبوتی از سالم و همچنین سالم از سفیدک درونی به ترتیب دقت‌های ۸۹، ۹۲ و ۸۹ درصد برای داده‌های تست حاصل شد (Gutiérrez et al., 2021). هرچند دقت مدل آن‌ها بیشتر از دقت مدل‌های از پیش آموزش دیده شده پژوهش حاضر بود ولی دقت مدل پیشنهادی پژوهش حاضر نشان از قابلیت بالای مدل پیشنهادی این تحقیق دارد. البته تعداد کلاس‌های آن‌ها کمتر از پژوهش حاضر است. در پژوهش مشابه دیگری که از شبکه‌های از پیش آموزش دیده شده ResNet-101، ResNet-50، Inception v3، GoogLeNet، AlexNet و SqueezeNet به منظور تشخیص زردی برگ گیاه انگور استفاده شد، در اکثر این مدل‌ها نتایج رضایت‌بخشی حاصل شد و بهترین دقت مربوط به شبکه‌های ResNet بود که توانستند با دقت بالای ۹۸٪، تمایز بیماری زردی برگ‌ی را از سالم تشخیص دهند. البته کم بودن تعداد کلاس‌های بررسی شده آن‌ها و تمایز خیلی زیاد بین دو

با بهره‌گیری از از ماتریس‌های اغتشاش حاصل از شکل ۵، پارامترهای مختلف عملکرد مدل‌ها محاسبه و در جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج حاصل از این جدول نشان می‌دهد که مدل‌های Inception-ResNet-v2 و ResNet-101 در طبقه‌بندی کلاس‌های مختلف بیماری‌ها عملکرد نسبتاً ضعیفی دارند و دلیل آن را می‌توان به وزن‌های فریز شده شبکه‌های از پیش آموزش دیده شده اشاره کرد که قبلاً این وزن‌ها توسط ۱۰۰۰ کلاس مختلف تصاویر پایگاه داده Imagenet ایجاد شده بودند. اختلاف خیلی زیاد کلاس‌های این پایگاه با کلاس‌های بیماری‌های فعلی می‌تواند یکی از دلایل کم شدن دقت این شبکه‌ها باشد. با توجه به این که شاخص F1-Score ملاک خوبی برای بررسی توانایی مدل‌ها در دسته‌بندی بیماری‌ها است، نتایج نشان از قابلیت بالای همه مدل‌ها در تشخیص بیماری زخم برگ‌ی دارد. از طرفی رفتارهای یکسان مدل‌ها در تشخیص بیماری‌ها نشان می‌دهد که همه مدل‌ها برای تشخیص کلاس‌ها از ویژگی‌های یکسانی استفاده می‌کنند و این تشابه رفتاری مدل‌ها نشان از عملکرد صحیح مدل‌ها در عملیات دسته‌بندی است. نتیجه کلی مدل‌ها نشان می‌دهد مدل پیشنهادی با معماری ویژه کم عمق توانست به خوبی بیماری‌ها را با دقت بالایی از هم تفکیک دهد. از آنجایی که در مدل پیشنهادی، آموزش مدل کانولوشنی با تعداد تصاویر زیاد و مستقیماً توسط تصاویر بیماری برگ‌ها انجام شد لذا وزن‌های مدل کانولوشنی دقیقاً مطابق با ویژگی‌های حاصل از تصاویر برگ‌ها به دست آمده است و نگاشت خوبی بین ویژگی‌های استخراج

1- Spider mite

2- Downy mildew

کلاس سالم و زردی برگ می‌تواند یکی از مهم‌ترین دلایل بالا بودن دقت پژوهش آن‌ها نسبت به پژوهش حاضر باشد (Cruz et al., 2019). در پژوهشی با هدف تشخیص تار عنکبوتی برگ‌های کتان که از طریق یادگیری انتقالی با نرخ یادگیری دو مرحله‌ای از ۰/۰۱ تا ۰/۰۰۱ و بر اساس مدل MobileNetV1 آموزش داده شد، مدل یادگیری عمیق توانست با دقت ۹۲/۲۹٪ برای مجموعه آموزشی و ۹۱/۸۸٪ برای مجموعه آزمون این بیماری را تشخیص دهد (Yang, Luo, Wang, Chen, & Wu, 2019). در تحقیق مشابه دیگر که برای تشخیص و دسته‌بندی ۱۷ رقم مختلف فندق انجام شد (Taner,

۲۰۱۹)، مدل پیشنهادی دقت بیشتری (۹۸/۶٪) نسبت به روش یادگیری انتقالی مانند Inception-v3، VGG-19 و resnet-50 داشت. هرچند در بررسی نتایج تحقیقات مشابه، به دلیل کم بودن تعداد کلاس‌های بررسی‌شده بیماری، دقت و یا صحت بالاتری نسبت به تحقیق حاضر گزارش شده است، ولی مقایسه نتایج نشان داد که مدل‌های آموزش داده‌شده در پژوهش حاضر مخصوصاً مدل پیشنهادی قابلیت بالایی در تشخیص و دسته‌بندی بیماری‌ها دارد.

جدول ۳- مقایسه پارامترهای ارزیابی شبکه پیشنهادی با شبکه‌های از پیش آموزش‌دیده ResNet-101 و Inception-ResNet-V2 با استفاده از داده‌های آزمون

Table 3- Comparing indices parameters of proposed network with pre-trained ResNet-101 and Inception-ResNet-v2 networks using test dataset

CNN	Class	Precision	Recall	F1-score	Accuracy
ResNet-101	Fire blight	0.71	0.56	0.63	0.72
	Leaf blight	0.67	0.74	0.71	
	Healthy	0.71	0.85	0.77	
	Powdery M	0.79	0.71	0.75	
Inception-ResNet-v2	Fire blight	0.78	0.74	0.76	0.79
	Leaf blight	0.79	0.79	0.79	
	Healthy	0.73	0.88	0.80	
	Powdery M	0.86	0.74	0.79	
Proposed Model	Fire blight	0.95	0.92	0.94	0.91
	Leaf blight	0.87	0.87	0.87	
	Healthy	0.84	0.95	0.89	
	Powdery M	0.97	0.88	0.93	

نتیجه‌گیری

یادگیری انتقالی و توسعه الگوریتم پیشنهادی ویژه CNN برای درخت به استفاده شد، هرچند در بعضی از تحقیقات مشابه، روش یادگیری انتقالی نتایج بهتری را در طبقه‌بندی نشان داده‌اند ولی در این پژوهش مدل‌های از پیش آموزش‌دیده نتایج رضایت‌بخشی نشان ندادند. دلیل این نتیجه ضعیف را می‌توان به شباهت بالای ویژگی‌ها یا مناسب نبودن وزن‌های بلوک کانولوشنی آن‌ها ربط داد. البته در مقابل، شبکه پیشنهادی توانست نتیجه خیلی‌خوبی در طبقه‌بندی بیماری‌ها نشان دهد و این نتیجه خوب می‌تواند به دلیل یادگیری دقیق وزن‌های هر دو بلوک کانولوشنی واحد طبقه‌بندی باشد. نتایج کلی نشان داد که الگوریتم پیشنهادی ارائه‌شده در این تحقیق می‌تواند به‌عنوان یک نرم‌افزار در تشخیص بیماری‌های درخت به و قابل استفاده در نرم‌افزارهای موبایل، به شکل بلادرنگ در باغات و مزارع به کار گرفته شود.

مشارکت نویسندگان

امین نادری بنی: جمع‌آوری داده‌ها، پردازش داده‌ها، شبیه‌سازی عددی/کامپیوتری، استخراج و تهیه متن اولیه

از آنجایی که تشخیص و کنترل به‌موقع بیماری‌های مزارع و باغ‌ها برای کشاورزان از اهمیت فراوانی برخوردار است، مطالعه حاضر برای اولین بار به‌منظور ارائه مدل ویژه یادگیری عمیق برای تشخیص بیماری‌های مختلف برگ درخت به انجام گردید. در این مطالعه با بهره‌گیری از تکنیک‌های پردازش تصویر، روش‌های بازسازی یا تقویت داده‌ها و همچنین الگوریتم‌های یادگیری عمیق مانند CNN امکان دستیابی به مدل مناسب برای طبقه‌بندی تصاویر بیماری‌های مختلف به در چهار کلاس مختلف فراهم گردید. هرچند تفکیک بیماری‌های مختلف برگ‌ها بر اساس ویژگی‌های رنگی یا بافتی به روش الگوریتم‌های کلاسیک پردازش تصویر هم امکان‌پذیر است ولی به دلیل تشابه زیاد ویژگی‌های ایجاد شده توسط بیماری‌های مختلف، استخراج ویژگی‌ها خاص و طراحی الگوریتم‌های کلاسیک پردازش تصویر نیازمند پیچیدگی بالایی است و در عین حال تعمیم‌پذیری خیلی خوبی هم ندارند. لذا در این مطالعه سعی گردید روش‌های نوین شناسایی الگو که دارای دقت بالا بوده و برای شناسایی الگوهای پیچیده مناسب می‌باشند، استفاده شود. در این پژوهش از دو رویکرد

حسین باقرپور: نظارت و مدیریت، مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، تحلیل
جعفر امیری پریان: روش‌شناسی، مشاوره فنی، خدمات نرم‌افزاری،
آمار، اعتبارسنجی، شبیه‌سازی عددی/کامپیوتری، ویرایش متن
ویرایش متن

References

1. Ali, M. M., Bachik, N. A., Muhadi, N., Yusof, T. N. T., & Gomes, C. (2019). Non-destructive techniques of detecting plant diseases: A review. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 108, 101426. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2019.101426>
2. Al-Zughbi, I., & Krayem, M. (2022). Quince fruit *Cydonia oblonga* Mill nutritional composition, antioxidative properties, health benefits and consumers preferences towards some industrial quince products: A review. *Food Chemistry*, 393, 133362. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133362>
3. Baldi, P., & Sadowski, P. (2014). The dropout learning algorithm. *Artificial Intelligence*, 210, 78-122.
4. Bradshaw, M., Braun, U., Götz, M., & Jurick, W. (2022). Phylogeny and taxonomy of powdery mildew caused by Erysiphe species on Lupinus hosts. *Mycologia*, 114(1), 76-88. <https://doi.org/10.1080/00275514.2021.1973287>
5. Chen, J., Liu, Q., & Gao, L. (2019). Visual tea leaf disease recognition using a convolutional neural network model. *Symmetry*, 11, 343. <https://doi.org/10.3390/sym11030343>
6. Chen, R. C., Dewi, C., Huang, S. W., & Caraka, R. E. (2020). Selecting critical features for data classification based on machine learning methods. *Journal of Big Data* 7, 52. <https://doi.org/10.1186/s40537-020-00327-4>
7. Cruz, A., Ampatzidis, Y., Pierro, R., Materazzi, A., Panattoni, A., De Bellis, L., & Luvisi, A. (2019). Detection of grapevine yellows symptoms in *Vitis vinifera* L. with artificial intelligence. *Computers and Electronics in Agriculture*, 157, 63-76. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.028>
8. Dai, G., & Fan, J. (2022). An industrial-grade solution for crop disease image detection tasks. *Frontiers in Plant Science*, 13, 921057. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.921057>
9. David, M. (2023). Quince tree for the UK gardener. Retrieved March 28, 2024, from <https://gardenfocused.co.uk/fruitarticles/quince.php>
10. Dawod, R. G., & Dobre, C. (2022). Upper and lower leaf side detection with machine learning methods. *Sensors*, 22, 2696. <https://doi.org/10.3390/s22072696>
11. FAO. (2021). Crops production data. Retrieved from <http://www.fao.org/faostat>
12. Farokhzad, S., Modaress Motlagh, A., Ahmadi Moghaddam, P., Jalali Honarmand, S., & Kheiralipour, K. (2024). A machine learning system to identify progress level of dry rot disease in potato tuber based on digital thermal image processing. *Scientific Reports*, 14(1), 1995. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-50948-x>
13. Gupta, T. (2017). Plant leaf disease analysis using image-processing technique with modified SVM-CS classifier. *International Journal of Engineering & Management Technology*, 5, 11-17.
14. Gutiérrez, S., Hernández, I., Ceballos, S., Barrio, I., Díez-Navajas, A. M., & Tardaguila, J. (2021). Deep learning for the differentiation of downy mildew and spider mite in grapevine under field conditions. *Computers and Electronics in Agriculture*, 182, 105991. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.105991>
15. Harteveld, D. O. C., Akinsanmi, O. A., & Drenth, A. (2013). Multiple Alternaria species groups are associated with leaf blotch and fruit spot diseases of apple in Australia. *Plant Pathology*, 62(2), 289-297. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2012.02637.x>
16. He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). Deep residual learning for image recognition. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 770-778).
17. Hosainpour, A., Kheiralipour, K., Nadimi, M., & Paliwal, J. (2022). Quality assessment of dried white mulberry (*Morus alba* L.) using machine vision. *Horticulturae*, 8(11), 1011. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8111011>
18. Hossain, S., Mou, R. M., Hasan, M. M., Chakraborty, S., & Razzak, M. A. (2018). Recognition and detection of tea leaf's diseases using support vector machine. In *Proceedings of the 2018 IEEE 14th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications (CSPA)*, Penang, Malaysia. <https://doi.org/10.1109/CSPA.2018.8368703>
19. Islam, M., Dinh, A., Wahid, K., & Bhowmik, P. (2017). Detection of potato diseases using image segmentation and multiclass support vector machine. In *Proceedings of the 30th IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Windsor, ON, Canada, pp. 1-4. <https://doi.org/10.1109/CCECE.2017.7946594>
20. Jiang, F., Lu, Y., Chen, Y., Cai, D., & Li, G. (2020). Image recognition of four rice leaf diseases based on deep learning and support vector machine. *Computers and Electronics in Agriculture*, 179. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105824>
21. Joshi, R. C., Kaushik, M., Dutta, M. K., Srivastava, A., & Choudhary, N. (2021). VirLeafNet: automatic analysis and viral disease diagnosis using deep-learning in Vigna mungo plant. *Ecological Informatics*. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2020.101197>
22. Kawasaki, Y., Uga, H., Kagiwada, S., & Iyatomi, H. (2015). Basic study of automated diagnosis of viral plant diseases using convolutional neural networks. In *Proceedings of the 12th International Symposium on Visual*

- Computing, Las Vegas, NV, USA*, pp. 638-645. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2017.06.023>
23. Kheiralipour, K., Nadimi, M., & Paliwal, J. (2022). Development of an intelligent imaging system for ripeness determination of wild pistachios. *Sensors*, 22(19), 7134. <https://doi.org/10.3390/s22197134>
 24. Lu, Y., Yi, S., Zeng, N., Liu, Y., & Zhang, Y. (2017). Identification of Rice diseases using deep convolutional neural networks. *Neuro Computing*, 267, 378-384. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2017.06.023>
 25. Mianjy, P., Arora, R., & Vidal, R. (2018), July. On the implicit bias of dropout. In *International conference on machine learning* (pp. 3540-3548). PMLR.
 26. Miranda, J. L., Gerardo, B. D., & Tanguilig, B. T. (2014). Pest detection and extraction using image processing techniques. *International Journal of Computer and Communication Engineering*, 3, 189. <https://doi.org/10.7763/IJCCE.2014.V3.317>
 27. Mohanty, S. P., Hughes, D. P., & Salathé, M. (2016). Using deep learning for image-based plant disease detection. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1419. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01419>
 28. Moore, J. (2022). Quince tree disease – Quince leaf blight. Retrieved April 1, 2024, from <https://www.pyracantha.co.uk/quince-tree-disease-quince-leaf-blight>.
 29. Qin, F., Liu, D. X., Sun, B. D., Ruan, L., Ma, Z., & Wang, H. (2016). Identification of alfalfa leaf diseases using image recognition technology. *PLoS ONE*, 11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168274>.
 30. Rothe, P., & Kshirsagar, R. V. (2015). Cotton leaf disease identification using pattern recognition techniques. In *Proceedings of the 2015 International Conference on Pervasive Computing, Pune, India*, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/PERVASIVE.2015.7086983>
 31. Saygili, H., Aysan, Y., Mirik, M., & Sahin, F. (2004), July. Severe outbreak of fire blight on quince in Turkey. In *X International Workshop on Fire Blight*, 704, 51-54. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.704.4>
 32. Shojaeian, A., Bagherpour, H., Bagherpour, R., Parian, J. A., Fatehi, F., & Taghinezhad, E. (2023). The Potential Application of Innovative Methods in Neural Networks for Surface Crack Recognition of Unshelled Hazelnut. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2023. <https://doi.org/10.1155/2023/2177724>
 33. Sladojevic, S., Arsenovic, M., Anderla, A., Culibrk, D., & Stefanovic, D. (2016). Deep neural networks-based recognition of plant diseases by leaf image classification. *Computational Intelligence and Neuroscience*, <https://doi.org/10.1155/2016/3289801>
 34. Sujatha, R., Chatterjee, J. M., Jhanjhi, N. Z., & Brohi, S. N. (2021). Performance of deep learning vs machine learning in plant leaf disease detection. *Microprocess. Microsyst.* <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2020.103615>
 35. Sun, C., Huang, C., Zhang, H., Chen, B., An, F., Wang, L., & Yun, T. (2022). Individual tree crown segmentation and crown width extraction from a heightmap derived from aerial laser scanning data using a deep learning framework. *Frontiers in Plant Science*, 13, 914-974. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.914974>
 36. Szegedy, C., Vanhoucke, V., Ioffe, S., Shlens, J., & Wojna, Z. (2016). Rethinking the inception architecture for computer vision. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 2818-2826).
 37. Taner, A., Öztekin, Y. B., & Duran, H. (2021). Performance analysis of deep learning CNN models for variety classification in hazelnut. *Sustainability*, 13(12), 6527. <https://doi.org/10.3390/su13126527>
 38. Tian, Y., Yang, G., Wang, Z., Wang, H., Li, E., & Liang, Z. (2019). Apple detection during different growth stages in orchards using the improved YOLO-V3 model. *Computers and Electronics in Agriculture*, 157, 417-426. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.01.012>
 39. Tiwari, V., Joshi, R. C., & Dutta, M. K. (2021). Dense convolutional neural networks based multiclass plant disease detection and classification using leaf images. *Ecological Informatics*, 63, 101289. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101289>
 40. Vidyarthi, S. K., Singh, S. K., Xiao, H. W., & Tiwari, R. (2021). Deep learnt grading of almond kernels. *Journal of Food Process Engineering*, 44(4), p.e13662.
 41. Yang, L., Luo, J., Wang, Z., Chen, Y., & Wu, C. (2019). Research on recognition for cotton spider mites' damage level based on deep learning. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 12(6), 129. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20191206.4816>

Research Article

Vol. 14, No. 4, 2024, p. 459-474

Design, Construction, and Evaluation of an Automatic Feeder Control System for Sugarcane Billet Planters

B. Abbasian¹, M. E. Khorasani Ferdavani^{2*}, H. Zaki Dizaji³

1- M.Sc. in Mechanic of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Department of Biosystems Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

2- Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

3- Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

(*- Corresponding Author Email: e.khorasani@scu.ac.ir)

Received: 29 May 2024

Revised: 23 June 2024

Accepted: 07 July 2024

Available Online: 04 November 2024

How to cite this article:

Abbasian, B., Khorasani Ferdavani, M. E., & Zaki Dizaji, H. (2024). Design, Construction, and Evaluation of an Automatic Feeder Control System for Sugarcane Billet Planters. *Journal of Agricultural Machinery*, 14(4), 459-474. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2024.88301.1254>

Introduction

This study investigated the development and evaluation of an automatic feeder control system for sugarcane planters. The primary objective was to address limitations in existing machines and enhance their performance by introducing precise control of cane feeding.

Materials and Methods

The automatic feeder control system was equipped with three types of sensors, including a Load Cell Sensor that directly measures the weight of sugarcane on the feeder table. This feature provides a real-time assessment of cane availability. The Hydraulic Oil Pressure Sensor monitored the pressure within the hydraulic system that drives the feeder mechanism. Variations in pressure served as an indirect measure of the force applied to the cane during the feeding process. The Ultrasonic Distance Sensor employed ultrasonic waves to estimate the distance between the sensor and the sugarcane pile. Nevertheless, some limitations concerning accuracy and response time were identified. A microcontroller served as the central processing unit, receiving sensor data and generating control signals to regulate the feeder mechanism. This allowed for automation and eliminated the need for a manual operator. The performance of the automatic feeder control system was evaluated against a manual control method operated by a human.

Results and Discussion

The evaluation focused on three key aspects: cane spillage, planting quality, and control stability. Cane Spillage: the amount of sugarcane inadvertently dropped during the planting process. Automatic control methods using a load cell and hydraulic oil pressure sensor reduced spillage similarly to manual control, averaging approximately 8.8 t ha⁻¹. The ultrasonic sensor resulted in significantly lower spillage, achieving 7.4 t ha⁻¹. However, its limited accuracy and responsiveness led to undesirable gaps between the planted canes. Planting Quality: The implementation of automatic control techniques utilizing load cells and hydraulic oil pressure sensors successfully ensured uniform spacing between planted canes, achieving results comparable to traditional manual methods. Due to its shortcomings, the ultrasonic sensor created gaps between the planted canes, undermining the overall quality of the planting process. Control Stability: The method utilizing hydraulic oil pressure sensors exhibited limitations in maintaining consistent control under varying operational conditions.



©2024 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.2024.88301.1254>

This stemmed from temperature-dependent changes in oil viscosity, which affected the pressure readings and ultimately the control signal. Based on the evaluation results, the load cell control method emerged as the most favorable option for automatic feeder control. It delivered performance that matches manual control in terms of cane spillage reduction and planting quality, all while eliminating the need for an operator. The hydraulic oil pressure sensor method, although effective in some aspects, presented challenges due to oil viscosity variations. The ultrasonic sensor showed promise for reducing spillage; however, it ultimately fell short due to its inability to accurately and swiftly detect the availability of cane, resulting in gaps between planted canes. A separate assessment was carried out to compare manual cultivation with an automatic control method based on weight measurements using a load cell. This evaluation revealed significant differences ($p < 0.01$) in billet weight, the number of billets utilized, and one-sided gaps between the two methods. However, no significant difference was observed in terms of two-sided gaps.

Conclusion

This study successfully designed and implemented an automatic feeder control system for sugarcane planters. The load cell control method emerged as the most effective solution, successfully eliminating the need for operators while ensuring high standards of planting quality and efficiency. Additional research could explore advancements in sensor technology and control algorithms to further enhance the performance of automatic feeder control systems.

Acknowledgment

The authors would like to express their gratitude to the Managing Director of Farabi Agro-Industrial Company and its staff, as well as the technical staff of Poya Sazan Sabz Avane Company, who cooperated in the preparation and evaluation stages of the system. Vice Chancellor for Research and Technology of Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran: financial support under the special research grant number SCU.AA98.505.

Keywords: Hydraulic oil pressure sensor, Load cell, Metering feeder automation, Sugarcane planter, Ultrasonic distance sensor

مقاله پژوهشی

جلد ۱۴، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۳، ص ۴۷۴-۴۵۹

طراحی، ساخت و ارزیابی سامانه کنترل خودکار تغذیه موزع دستگاه قلمه کار نیشکر

بنیامین عباسیان^۱، محمد اسماعیل خراسانی فردوانی^{۲*}، حسن ذکی دیزجی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۱۷

چکیده

در این پژوهش، یک سامانه کنترل خودکار تغذیه موزع کارنده نیشکر با هدف بهبود عملکرد دستگاه کارنده خودکار قلمه نیشکر، طراحی و ساخته شد. از سه نوع حسگر (نیروسنج، فشار روغن و فاصله سنج فراصوت) به همراه میکروکنترلر برای پردازش اطلاعات و تولید سیگنال فرمان تغذیه قلمه به سامانه محرک هیدروموتور زنجیر تغذیه استفاده شد. طبق نتایج، روش کنترل وزنی و کنترل با حسگر فشار روغن نتایجی مشابه تیمار کنترل دستی داشتند. حسگر فراصوت به دلیل عدم تشخیص صحیح و به موقع وضعیت قلمه در دسترس موزع در سطح احتمال ۱ درصد با دیگر روش‌های کنترل تفاوت معناداری داشت و باعث کاهش ریزش قلمه از ۸/۸ برای سه روش اول به ۷/۴ تن در هکتار و ایجاد فاصله بین قلمه‌های کشت شده گردید که نامطلوب بود. در همه روش‌های کنترل به جز حسگر فراصوت، فاصله نکاشت مشاهده نشد. در روش کنترل با فشار، با وجود نتایج مشابه با کنترل دستی و کنترل وزنی، به دلیل تغییرات ویسکوزیته روغن با دما، نتایج کنترلی در طولانی مدت از پایداری مناسب برخوردار نبود. طبق نتایج، کنترل وزنی به عنوان گزینه برتر برای کنترل و حذف نیروی انسانی با حفظ کیفیت و راندمان کاشت با دستگاه کارنده خودکار توصیه می‌گردد. طی ارزیابی دیگر بین مقادیر مصرف وزنی قلمه مصرفی، تعداد قلمه مصرفی و فاصله نکاشت طولی در دو روش کشت دستی و کنترل خودکار وزنی، تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد مشاهده شد. ولی بین مقادیر فاصله نکاشت جانبی در دو روش تفاوت معنی‌داری دیده نشد.

واژه‌های کلیدی: اتوماسیون تغذیه موزع، حسگر فشار روغن هیدرولیک، فاصله‌سنج فراصوت، ماشین کارنده نیشکر، نیروسنج

مقدمه

هرساله در کشت و صنعت‌های نیشکر، چند هزار هکتار مزرعه نیشکر به روش‌های متعدد کشت می‌شود. نیشکر گیاهی چندساله است که در طی این دوره هر سال برداشت می‌شود. به عبارت دیگر هرساله تمامی عملیات زراعی شامل تهیه زمین و کاشت در بخشی از مزارع کشت و صنعت‌ها انجام می‌پذیرد. کاشت نیشکر به سه روش دستی، نیمه‌مکانیزه و مکانیزه انجام می‌شود. در روش دستی، کاشت توسط نیروی انسانی و با دو روش کاشت قلمه و کاشت کل ساقه

انجام می‌شود. در روش نیمه‌مکانیزه از ماشین‌های تمام ساقه‌کار و برنده کارنده برای بخشی از مراحل کاشت استفاده می‌شود. در روش مکانیزه، کاشت به طور کامل توسط ماشین‌های قلمه‌کار ریزشی و تمام ساقه‌کار انجام می‌شود. ماشین‌های کاشت نیز بر اساس طول قلمه به سه دسته تک بندکار، قلمه‌کار و تمام ساقه‌کار تقسیم می‌شوند. اولین قلمه‌کار استفاده‌شده در مزارع نیشکر خوزستان یک مدل ریزشی است که نمونه اصلی آن توسط شرکت آستافت ساخته‌شده و در ماشین‌سازی تبریز مونتاژ گردیده است (Mohammadi, Almasi, & Sheikh Davoodi, 2002; Almasi, Bakhoda & Sahebi, 2006). خراسانی و همکاران (Alimaradni & Omid, 2009) یک سامانه سنجش عملکرد نیشکر مبتنی بر اندازه‌گیری برخط وزن قلمه‌های عبوری از روی بالابر برای نصب روی ماشین برداشت نیشکر آستافت^۱ ۷۰۰۰ توسعه دادند. در این سامانه از یک صفحه توزین که در بخش دوم و کف بالابر نصب شده بود استفاده شد. مستوفی و مینایی (Mostofi Sarkari &

- ۱- دانش‌آموخته ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
 - ۲- استادیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
 - ۳- دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
- (*)- نویسنده مسئول
(Email: e.khorasani@scu.ac.ir)

 <https://doi.org/10.22067/jam.2024.88301.1254>

فضای نکاشت زیاد و کیفیت ساخت پایین که مدام موجب توقف دستگاه می‌گردید، از طرف مدیریت کشت و صنعت‌ها به‌عنوان دلایل عدم استقبال و کنار گذاشته شدن این دستگاه ذکر شده است. دو نوع موزع دقیق کار طراحی، ساخته و در سطح آزمایشگاهی آزمایش شدند (Soleimani Varposhti, Zaki Dizaji, & Sheikh Davoodi, 2019) اما هیچ‌کدام به مرحله تولید صنعتی نرسیده است. هان و همکاران (Han, Wen, Liu, & Wu, 2019) یک قلمه‌کار نیشکر طراحی و ارزیابی نمود. مطالعات متعددی برای معرفی روش کاشت نیشکر مناسب برای شرایط خوزستان انجام گرفته است (Mansouri et al., 2019). وانگ و همکاران (Wang, Liu, Ou, & Zou, 2022) یک دستگاه تک‌بند کار قلمه نیشکر را توسعه داد و پارامترهای بهینه عملکرد دستگاه را ارزیابی نمود. همچنین به‌صورت آزمایشگاهی تأثیر سرعت دورانی، زاویه زنجیر نوار دندانه‌دار و تعداد پیاله‌ها بر یکنواختی کاشت ارزیابی شد. برونسون و همکاران (Bronson, French, Conley, & Barnes, 2020) از فناوری حسگر فراصوت جهت تشخیص ارتفاع بوته‌های کتان استفاده کردند. وانگ و زو (Wang, Liu, Ou, & Zou, 2022) همچنین طی تحقیقی دیگر سامانه طراحی شده را شبیه‌سازی نمود. الواکیل و همکاران (Elwakeel et al., 2023) یک مکانیزم کنترل نرخ متغیر و یک سامانه پایشگر هوشمند مبتنی بر فناوری اینترنت اشیاء برای نشاکار دقیق نیشکر طراحی و پارامترهای موثر در عملکرد سامانه را مورد ارزیابی قرار دادند.

طی بررسی‌های انجام‌شده هنگام ارزیابی ماشین قلمه‌کار خودکار نیشکر A-4000، با توجه به کنترل مقدار ریزش قلمه از مخزن اولیه به ثانویه توسط اپراتور، در مواردی خطای انسانی (ناشی از عدم تمرکز اپراتور، خستگی، عدم تعهد کافی و غیره) باعث عملکرد نامناسب و نکاشت می‌شد. این نتایج ضرورت ساخت سامانه کنترل خودکار موزع این دستگاه را ایجاد نمود. با توجه به آن‌چه گفته شد، خودکار کردن تغذیه قلمه به مخزن ثانویه جهت حفظ ارتفاع قلمه‌های نی در این مخزن در دستور کار قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

ماشین کاشت قلمه نیشکر

جدیدترین ماشین کارنده نیشکر ساخته‌شده در ایران، کارنده خودکار نیشکر مدل A-4000 ساخت شرکت پویاسازان صنعت سبز آوان است که عملیات کاشت را کاملاً مکانیزه انجام می‌دهد. این ماشین مطابق شکل ۱ شامل مخزن نی، موزع و مخزن ثانویه، لوله سقوط، کود ریز، شیاربازکن، دیسک‌های پوشاننده، صفحات شکل‌دهنده پشته و چرخ تثبیت خاک است.

ترتیب عملکرد دستگاه به این صورت است که قلمه‌ها از مخزن

(Minaei, 2010) عملکرد دستگاه گیر جریان پیوسته جرمی برای ماشین‌های برداشت محصولات غده‌ای جهت کاربرد در کشاورزی دقیق را مورد ارزیابی قرار دادند. دو سامانه اندازه‌گیر جرمی مورد ارزیابی عبارت بودند از مبدل‌های یکسر درگیر متصل به مکانیزم تسمه نقاله و نیروسنج نگهدارنده وزن کل نقاله تغذیه و محصول. رضوی و همکاران (Razavi, Kardani & Namjoo, 2013) سامانه کنترل هوشمند بالابرنده مخزن اولیه نی در یک قلمه‌کار نیشکر را طراحی، اجرا و ارزیابی نمودند. قلمه‌کار مورد بررسی نمونه مشابه‌سازی شده از دستگاه قلمه کار شرکت آستافت استرالیا بود. آن‌ها در واقع یک سامانه کنترل هوشمند هیدرولیکتریکی، به‌منظور جایگزینی اپراتور ارائه کردند که بر اساس میزان وزن قلمه‌ریخته‌شده به درون مخزن ثانویه عمل کرده و منجر به صدور فرمان برای بلند شدن و توقف پله‌ای مخزن اولیه می‌گردد به‌طوری‌که همواره وزن معینی از قلمه درون مخزن ثانویه موجود باشد. تقی نژاد و همکاران (Taghinezhad, Alimardani & Jafary, 2013) مکانیزمی برای دستگاه موزع قلمه‌کار نیشکر طراحی و با نرم‌افزار کتیا^۱ مدل‌سازی نمود. ایشان از تحلیل سلسله‌مراتبی برای انتخاب بهترین ترکیب پارامترهای موثر استفاده نمودند. در مقیاس آزمایشگاهی نمونه اولیه از موزع دقیق کار قلمه تک ردیفه ابداعی پاپولین^۲ ساخته شده است (Khani, Razavi, & Hemat, 2006; Bozorgi, 2014). همچنین مطالعات متعددی برای اصلاح موزع (Taghinezhad, Alimardani & Jafary, 2014; Saengprachatanarug, Wongpichet, Ueno, & Taira, 2016) انجام شد. نامجو و همکاران (Razavi, & Khani, 2015) یک موزع چرخ زنجیری با پیاله‌های افقی را به‌صورت آزمایشگاهی توسعه و مورد ارزیابی قرار دادند. در این طرح یک چرخ زنجیر بی‌انتها، قلمه‌های نی را به‌صورت افقی از مخزن برداشته و در طول مسیر با عبور در زاویه منفی باعث حذف قلمه‌های اضافه می‌گردد. طبق نتایج گزارش‌شده بهترین عملکرد این موزع در سرعت پیشروی ۳/۵ کیلومتر بر ساعت و زاویه ۲۵ درجه موزع به‌دست آمد. یک مدل آزمایشگاهی موزع با ترتیب ریزش نردبانی (عرضی) قلمه نیز توسط اکبرنیا (Akbarnia, 2017) پیشنهاد شد. انتخاب روش و ماشین کاشت به عواملی مانند نوع و اندازه قلمه، شرایط زمین و در دسترس بودن منابع بستگی دارد (Mansouri, 2019). مکانیزه کردن مرحله کاشت قلمه نیشکر موضوع اصلی این تحقیق است. یکی از معضلات کشت و صنعت‌های نیشکر در استان خوزستان نبود ماشین کاشت مناسب بوده است. با توجه به بررسی‌های عباسیان و همکاران (Abbasiyan, Khorasani Ferdavani, & Zaki, 2019) مصرف بالای قلمه، الگوی ریزش غیریکنواخت،

1- CATIA

2- Pupolin, 1976

مخزن ثانویه همواره باید در یک سطح مشخص پر از قلمه حفظ شود تا عملکرد موزع در بهترین حالت صورت پذیرد، در غیر این صورت فضای نکاشت در مزرعه به وجود می آید. در صورت عملکرد درست و دقیق نیروی انسانی دستگاه به خوبی عمل می کند ولی در طولانی مدت حفظ کیفیت نظارت انسانی خصوصا در اثر خستگی غیرممکن بوده و احتمال خطا و نقص در عملکرد تغذیه قلمه به قسمت موزع ناگزیر است. در ادامه موزع به صورت کاملاً خودکار مقدار قلمه مورد نظر را از مخزن ثانویه برداشته و به لوله سقوط انتقال می دهد. به موازات این عمل قسمت های دیگر دستگاه فعال بوده و عمل باز کردن شیار و کود ریزی انجام می شود. در ادامه قلمه هایی که در لوله سقوط ریخته شده، درون شیار و روی کود ریخته می شود و دیسک های پوشاننده روی قلمه ها را می پوشانند. سپس چرخ تثبیت بر روی خاک کشت شده حرکت کرده و دو صفحه پشته را به فرم مطلوب شکل دهی می کنند.

نی (مخزن اولیه) با ظرفیتی حدود ۳ تا ۱۰ تن، به مخزن ثانویه در مجاورت موزع انتقال داده می شود. کف مخزن اولیه دارای سامانه نقاله زنجیری در کف است تا قلمه ها را به مخزن ثانویه تحویل دهد. انتقال قلمه ها از مخزن اولیه به مخزن ثانویه به صورت دستی توسط اپراتور نشسته در بالای دستگاه و با توان هیدرولیک انجام می گیرد. با شروع فصل کشت، که مقارن با اوج گرمای تابستان در استان خوزستان می باشد، اپراتور در معرض نور مستقیم آفتاب و گرد و غبار قرار گرفته و از طرفی باید همواره سر پا بوده و نظارت دقیق بر میزان پر و تخلیه شدن مخزن ثانویه داشته باشد، که این عامل علاوه بر عوارض جسمی از جمله کمر درد و خطرات جانی به هنگام حرکت دستگاه و عدم ایمنی، کیفیت کشت را نیز به هنگام تغذیه مخزن ثانویه تحت تاثیر قرار می دهد، به طوری که گاهی ممکن است که مخزن ثانویه مدتی کوتاه تغذیه نشده و خالی از قلمه شود و یا به صورت انبوه، از قلمه انباشته گردد. از آنجایی که موزع به طور مداوم از مخزن ثانویه تغذیه می شود،



1. Cane Hopper
2. Distributor and Secondary Hopper
3. Drop Chute
4. Fertilizer Applicator
5. Furrow Opener
6. Covering Discs
7. Ridge Forming Blades
8. Soil Stabilizing Wheels

شکل ۱- کارنده خودکار نیشکر مدل A-4000 و اجزای آن

Fig.1. A-4000 sugarcane billet planter and its components

طراحی سامانه کنترل خودکار

اجزای سامانه کنترل خودکار تغذیه طراحی شده عبارتند از حسگری که میزان نی در دسترس موزع را تشخیص دهد. واحد کنترل برای پردازش اطلاعات خروجی از حسگر و دادن فرمان به عملگرها، عملگرهای هیدرولیکی جهت حصول بهترین کنترل خودکار تغذیه موزع و مدار کنترل الکترونیکی. در این پژوهش، سه روش برای اندازه‌گیری حجم قلمه در مخزن ثانویه با استفاده از حسگرهای مختلف (فاصله‌سنج فراصوت، نیروسنج و مبدل فشار روغن) بررسی و پیاده‌سازی شد. برای هر روش، مدارهای الکترونیکی طراحی و ساخته شد و موقعیت قرارگیری حسگرها برای انجام آزمایش‌ها تعیین گردید. در ادامه به شرح و بررسی عملکرد هر سامانه پرداخته شده است.

حسگر وزن

برای اندازه‌گیری وزن قلمه در مخزن ثانویه، از یک حسگر نیروسنج S شکل مدل زمیک^۱ با ظرفیت ۱۰۰ کیلوگرم و حساسیت ۲ میلی‌ولت/ولت ساخت کشور ویتنام استفاده شد. این حسگر در مکانیزمی مطابق شکل ۲ جایگزین درپوش کف مخزن ثانویه گردید. وزن قلمه‌ها به صفحه متحرک و سپس به نیروسنج وارد می‌شد. این نیرو به‌طور مستقیم در مخزن ثانویه اندازه‌گیری و پس از واسنجی در میکروکنترلر به‌عنوان معیاری از وزن توده قلمه در الگوریتم کنترل استفاده شد.

با کاهش حجم قلمه موجود در مخزن ثانویه به کمتر از ۳۰ درصد (۱۸ کیلوگرم PV_1)، پرتشدگی موزع کاهش پیدا می‌کرد. مطابق نمودار روند نمای سامانه (شکل ۵) این مقدار به‌عنوان حد پایین فعال شدن سامانه هیدرولیک در نظر گرفته شد. حد بالا نیز روی ۹۰ درصد (معادل ۵۰ کیلوگرم PV_2) تنظیم شد.

حسگر فاصله سنج فراصوت

در این سامانه از حسگر فراصوت برای اندازه‌گیری ارتفاع سطح نی در مخزن ثانویه استفاده شد. اطلاعات ارتفاع به میکروکنترلر ارسال و با توجه به ارتفاع از پیش تعریف شده قلمه‌ها در مخزن، فرمان توقف یا حرکت به هیدروموتور نقاله کف مخزن اولیه صادر می‌شد. مطابق شکل ۲ حسگر در بالای مخزن به نحوی نصب شد که توده نی در مخزن ثانویه در میدان دید آن قرار گیرد. فاصله حسگر تا کف مخزن ثانویه بدون قلمه سه متر بود و ارتفاع سطح توده قلمه‌ها با کم کردن این فاصله از فاصله حسگر تا سطح توده

قلمه‌ها محاسبه شد. در این روش کنترل، حد پایین و حد بالا مطابق نمودار روند نمای سامانه کنترل (شکل ۵) به ترتیب $PV_1=40$ و ۸۰ $PV_2=$ سانتی‌متر از کف مخزن تعیین شد. مطابق شکل ۶ اجزای سامانه، مدار و قطعات الکترونیکی به‌کاررفته در سامانه مبتنی بر حسگر فراصوت مشابه سامانه مبتنی بر حسگر وزن بود و تنها در نوع حسگر و مبدل آنالوگ به دیجیتال و برنامه‌نویسی میکروکنترلر با یکدیگر تفاوت داشت. به این منظور از یک حسگر فراصوت مدل SRF05 ساخت کشور چین با برد مفید ۴ متر، دقت یک سانتی‌متر و خروجی دیجیتال استفاده شد.

حسگر فشارسنج هیدرولیک

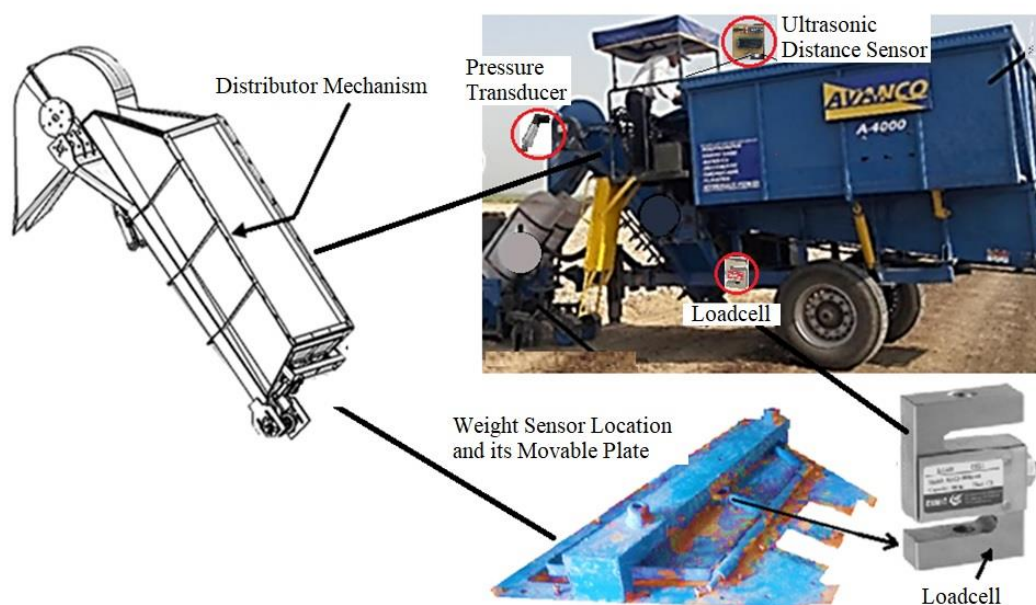
این حسگر بر اساس تغییرات فشار روغن ورودی به هیدروموتور، سطح قلمه‌ها در مخزن ثانویه را اندازه‌گیری می‌نمود. توان مصرفی هیدروموتور در شرایط پر و خالی بودن مخزن ثانویه متفاوت است. مدار هیدرولیک سامانه و موقعیت قرارگیری حسگر در شکل ۳ نمایش داده شده است. به این منظور از یک حسگر فشار پیزورزیستو^۲ صفر تا ۱۶۰ بار مدل هاگلر^۳ ساخت کشور آلمان با خروجی دو سیم ۴ تا ۲۰ میلی‌آمپر و حداکثر خطای ۰/۵ درصد در رنج کامل استفاده شد.

مبدل فشار هیدرولیک در حالت ۳۰ درصد پر بودن مخزن ثانویه، ۵۸ بار (PV_1) و در حالت ۹۰ درصد پر بودن، ۷۱ بار (PV_2) را نشان می‌داد. این اعداد به ترتیب به‌عنوان حد پایین و بالای تصمیم‌گیری در کنترلر استفاده شد. مطابق شکل ۶ اجزای سامانه و مدار و قطعات الکترونیکی به‌کاررفته در سامانه مبتنی بر مبدل فشار هیدرولیک مشابه سامانه‌ی مبتنی بر حسگر وزن بوده و تنها در نوع حسگر و مبدل آنالوگ به دیجیتال و حدود تصمیم‌گیری در برنامه نوشته‌شده در میکروکنترلر تفاوت داشت.

به‌منظور مدیریت و تصمیم‌سازی لحظه‌ای از نتایج، برای هر کدام از حسگرها یک مدار میکروکنترلر برای پردازش و ارسال داده‌ها به کنترلر اصلی طراحی و ساخته شد. کار هر سه مدار کنترلی ارسال سیگنال فرمان به هیدروموتور بخش مخزن اولیه متناسب با سیگنال حسگر مربوطه بود به نحوی که با حرکت دادن زنجیر کف مخزن اولیه، نی کافی به مخزن ثانویه ارسال شده و در دسترس موزع قرار گیرد. نمای بالا از موزع این کارنده در شکل ۴ نشان داده شده است.

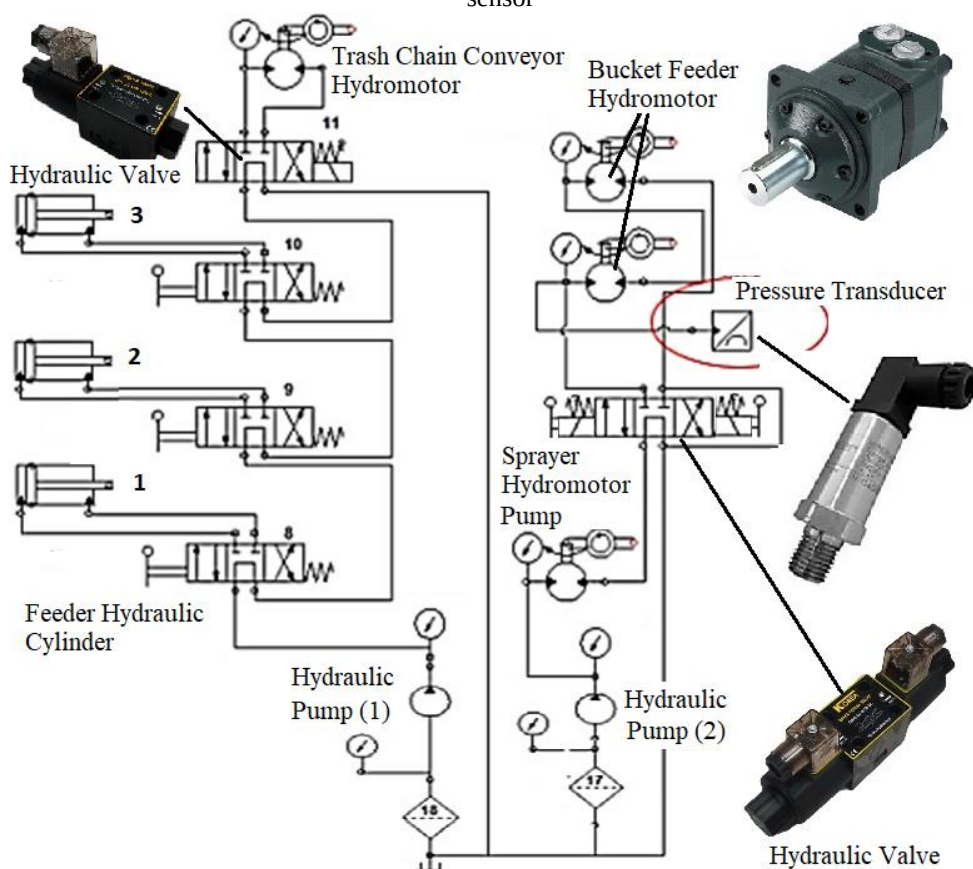
2- Piezoresistive Pressure Sensor
3- Hogler- HOTH0160FGCK

1- ZEMIC-H3-100kg



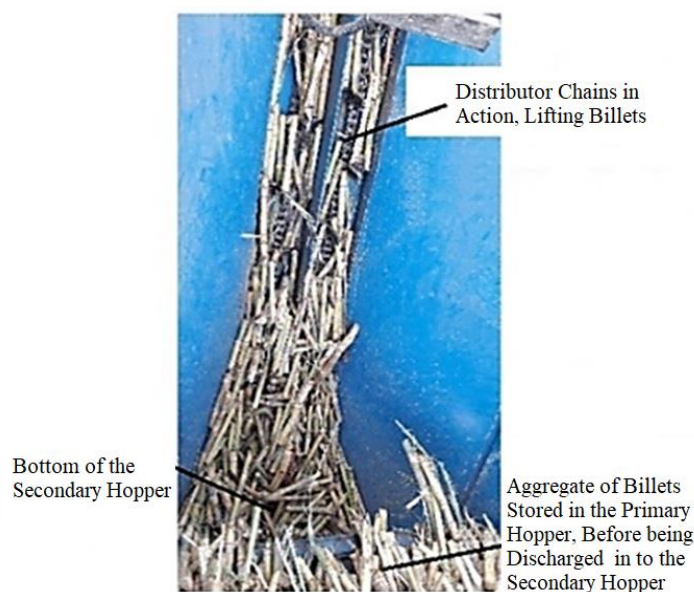
شکل ۲- مکانیزم موزع و محل قرارگیری حسگرهای نیروسنج و صفحه متحرک آن، فاصله سنج فراصوت و مبدل فشار

Fig.2. Distributor mechanism with weight sensor location and its movable plate, ultrasonic distance sensor, and pressure sensor



شکل ۳- مدار هیدرولیک کارنده و محل نصب مبدل فشار سامانه‌ی تغذیه قلمه

Fig.3. Planter hydraulic circuit and pressure sensor location of billet feeder



شکل ۴- موزع کارنده در حال کار از نمای بالا

Fig.4. Top-down perspective of the harvester distributor in operation

همچنین با میانگین‌گیری متحرک روی داده‌های دریافتی به صورت دیجیتالی، داده‌های نیرو، فاصله یا فشار دریافتی پایدار شده و برای تصمیم‌گیری در چرخه کنترل استفاده شد. در هر یک از روش‌های کنترل، یک حد پایین و یک حد بالا متناسب با حداقل و حداکثر حجم توده قلمه نی در مخزن ثانویه برای داده دریافتی از حسگرها در برنامه در نظر گرفته شد. این پارامتر مطابق شکل ۵ به ترتیب PV_1 و PV_2 هستند. با توجه به فاصله زمانی مورد نیاز برای نمونه‌گیری و میانگین‌گیری بعدی برای پایداری بیشتر، زمان پاسخ سامانه به تغییر پارامتر مورد اندازه‌گیری و بروز شدن فیدبک سامانه به یک ثانیه قابل کاهش بود.

نحوه ارزیابی

برای حصول بهترین عملکرد دستگاه کارنده، ابتدا هر یک از سه نوع حسگر فراصوت، حسگر فشارسنج هیدرولیک روغن، حسگر وزن به طور جداگانه روی کارنده نصب و دستگاه عملیات کشت را انجام داد. سپس زمین کاشته شده مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای مورد اندازه‌گیری در هر روش، مقدار فواصل نکاشت طولی^۳ (روی ردیف) و جانبی^۴ (بین ردیف‌ها)، تعداد نی مصرفی به ازای هر ۱۰ متر طول کاشت و وزن نی مصرفی در هکتار بود که از مهم‌ترین عوامل در افزایش یا کاهش راندمان یک کارنده نیشکر می‌باشند. در پایان پس از مقایسه نتایج با حالت دستی، بهترین نوع حسگر انتخاب شد.

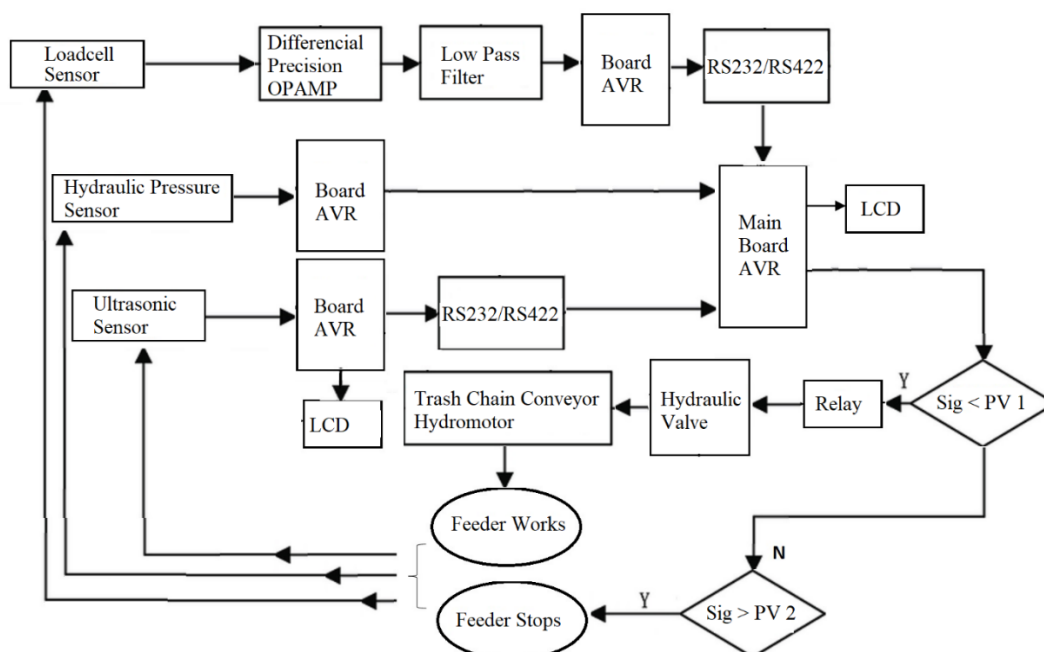
دیگر اجزای این سامانه عبارت بود از یک نمایشگر کاراکتری جهت نمایش وزن نی و مخزن، شیر برقی هیدرولیک سه‌حالت^۱ برای فرمان دادن به هیدروموتور زنجیر کف مخزن اولیه، رله برای به راه‌اندازی شیر برقی، مبدل آنالوگ به دیجیتال برای تبدیل داده‌های حسگر وزن به سیگنال‌های دیجیتال و میکروکنترلر ای وی آر مگا ۱۶^۲. مطابق شکل ۳ سامانه هیدرولیکی شامل دو پمپ هیدرولیک، دو هیدروموتور سری برای به حرکت در آوردن زنجیر موزع پیاله‌ای، یک هیدروموتور برای راه‌اندازی کودریز یا سمپاش، یک هیدروموتور برای راه‌اندازی چرخ زنجیر کف مخزن اولیه و سه جک برای کمک به تخلیه قلمه‌های نی از مخزن اولیه روی زنجیر مرکزی می‌باشد. در شکل ۵ نمودار روند نمای نحوه پردازش سیگنال و چگونگی تصمیم‌گیری و ارسال دستور به عملگر هیدروموتور زنجیر نقاله کف مخزن و در شکل ۶ اجزای سخت‌افزاری، حسگرها و مدارات پردازش و انتقال سیگنال بخش‌های مختلف سامانه کنترل خودکار نشان داده شده است. برای انتقال داده‌های حسگرهای نیروسنج و فراصوت به برد اصلی به دلیل نویز محیط و فاصله محل نصب حسگرها تا برد کنترلر از مبدل سریال با پروتکل RS422 استفاده شد. به منظور حذف نویز ناشی از ارتعاشات ماشین روی سیگنال نیروسنج یک مدار فیلتر پایین‌گذر از نوع باترورس بعد از مدار تقویت‌کننده تفاضلی دقیق استفاده شد.

3- One-Sided Gap

4- Two-Sided Gap

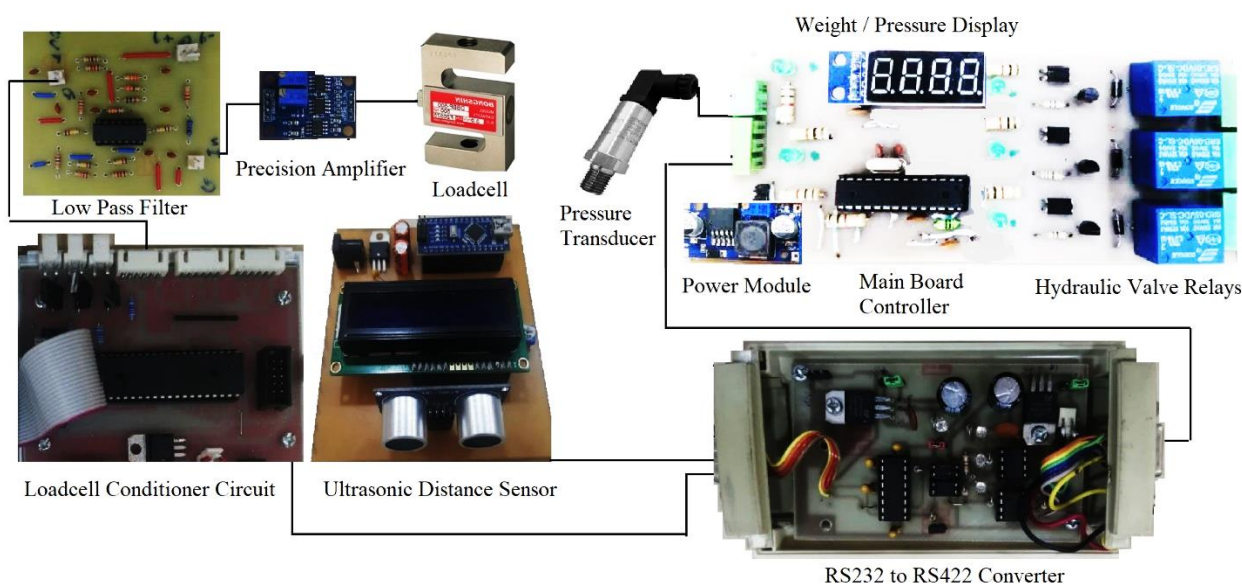
1- Korea Hydrohalic valve

2- AVR Microcontroller Mega16



شکل ۵- نمودار روند نمای عملکرد سامانه کنترل خودکار تغذیه موزع قلمه کار نیشکر

Fig.5. Flow diagram of the automatic feeder control system for sugarcane billet planter



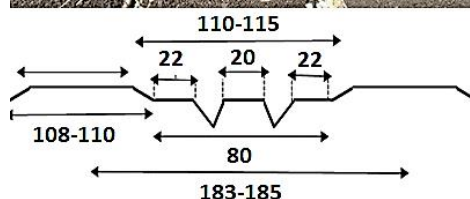
شکل ۶- اجزای سخت‌افزاری سامانه کنترل خودکار (مدارهای کنترل، حسگرهای وزن، فراصوت و فشار) و نحوه ارتباط آن‌ها

Fig.6. Automatic control system parts (control, weight, ultrasonic, and pressure circuit) and their connections

نزدیک‌ترین قلمه در دو ردیف مجاور بوده و نشان‌دهنده میزان هم‌پوشانی یا فاصله بین دو ردیف کشت مجاور می‌باشد. برای اندازه‌گیری در هر آزمایش، در طول ۱۰ متر مجموع فاصله‌های نکاشت طولی و جانبی به‌عنوان شاخص ثبت شد (شکل ۷). سپس کلیه قلمه‌های ریخته‌شده در ۱۰ متر جمع‌آوری، شمارش و وزن شدند تا مصرف وزنی نی در هر هکتار محاسبه شود.

فاصله نکاشت طولی، جانبی و مصرف نی

فاصله نکاشت طولی، فاصله بین لبه یک قلمه تا لبه نزدیک‌ترین قلمه دیگر در همان ردیف است. به عبارت دیگر، این معیار نشان‌دهنده میزان هم‌پوشانی یا فاصله بین دو قلمه مجاور در یک ردیف است. فاصله نکاشت جانبی، فاصله بین لبه یک قلمه تا لبه



شکل ۷- ابعاد جوی و پشته (سانتی‌متر) و نحوه اندازه‌گیری مصرف وزنی ریزش قلمه و فواصل نکاشت

Fig.7. Dimensions of the furrow and ridge (cm) and the method for measuring tonnage and gap

حسگر فراصوت غیرقابل قبول تشخیص داده شد و به دلیل عدم امکان تکرار آن آزمایش‌ها برای برآورد داده‌های از دست‌رفته و انجام تحلیل آماری ناگزیر از طرح کاملاً تصادفی نامتعادل در نرم‌افزار سس ۳، ۱، ۳^{۲۹} استفاده شد. همچنین از رویه جی ال ام^۳ با محاسبه مجموع مربعات نوع سوم (مربوط به تفاوت بین کمترین میانگین مربعات^۴)، برای تجزیه طرح استفاده شد. از آن‌جا که طبق نتایج این آزمایش، به‌غیر از تیمار حسگر فراصوت، به دلیل هم‌پوشانی بالای قلمه‌ها در باقی تیمارها، پارامترهای نکاشت طولی و جانبی هر دو صفر بود. آزمایش سوم طی کشت حدود ۵۰ هکتار در دو مزرعه کشت و صنعت فارابی انجام شد. در این آزمایش‌ها مقادیر مصرف وزنی و تعداد قلمه، فواصل نکاشت طولی و جانبی در کشت دستی با کشت ماشینی (کنترل دستی و کنترل خودکار وزنی) مقایسه شد. تحلیل نتایج این آزمایش با نرم‌افزار مینی‌تب^۵ انجام شد. طراحی مکانیزم لولایی و صفحه متحرک نیروسنج مطابق شکل ۲ با نرم‌افزار کتیا و طراحی مدارهای الکترونیکی با نرم‌افزار پروتئوس^۶ و آلتیوم^۷ انجام شد. همچنین برنامه‌نویسی‌های انجام‌شده برای کنترلرها با زبان سی در محیط

ارزیابی‌های انجام شده را می‌توان به سه بخش تقسیم نمود. در بخش اول، پس از طراحی و ساخت هر یک از سامانه‌ها، جهت تنظیم پارامترهای کنترلی و کالیبراسیون به‌صورت آزمایشگاهی ارزیابی عملکردی انجام شد. دو بخش بعدی شامل دو آزمایش مزرعه‌ای برای مقایسه عملکرد سامانه در حین کار بود که در ادامه شرح داده می‌شود. در ارزیابی مزرعه‌ای اول جهت انجام آزمایش‌ها از طرح کاملاً تصادفی استفاده شد. تیمارهای مورد بررسی شامل نوع حسگر در چهار سطح (حسگر فراصوت، حسگر فشارسنج هیدرولیک روغن، حسگر وزن و کنترل دستی سامانه تغذیه خودکار توسط اپراتور به‌عنوان تیمار شاهد) بود. این آزمایش‌ها در مزرعه تحقیقاتی شرکت پویاسازان صنعت سبز آوان در وسعت دو هکتار انجام شد. در هر سطح ۳۰ تکرار در نظر گرفته شد. در این آزمایش مصرف وزنی نی در هکتار با مقادیر مصرفی توسط تیمار شاهد مقایسه و برای انتخاب بهترین حسگر جهت کنترل خودکار تغذیه موزع استفاده شد. طبق نتایج گزارش‌شده توسط شرکت سازنده دستگاه، مناسب‌ترین سرعت پیشروی جهت انجام کشت مکانیزه نیشکر، ۶ کیلومتر بر ساعت ثابت در نظر گرفته شد. لذا کلیه آزمایش‌ها با این سرعت پیشروی انجام شد. همچنین واریته سی پی ۱۶۹ به‌عنوان واریته غالب در کشت و صنعت‌های نیشکر انتخاب شد. بعد از انجام آزمایش‌ها به دلیل برخی مشکلات اجرایی نتایج برخی از آزمایش‌های انجام‌شده روی تیمار

2- SAS 9.1.3

3- The GLM (general linear models) Procedure

4- SS3

5- Minitab ® 21.3

6- Proteus v 8.13

7- Altium Designer® 17.0.11

نرم‌افزار کدویژن^۱ انجام شد.

نتایج و بحث

پس از اطمینان از عملکرد مناسب آزمایشگاهی سامانه‌های کنترل موزع قلمه‌کار خودکار نیشکر، این سامانه‌ها به نوبت بر روی ماشین قلمه‌کار نصب و ارزیابی شد. به‌منظور طراحی بهینه و بالا بردن راندمان کمی و کیفی دستگاه، پارامتر مصرف وزنی و تعداد ریزش قلمه به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تجزیه واریانس مربوط به اثر استفاده از کنترل دستی، کنترل با حسگر وزن، حسگر فراصوت و فشار روغن در سامانه کنترل خودکار بر مقدار مصرف وزنی و تعداد ریزش قلمه در جدول ۱ نشان داده شده است. مطابق نتایج، روش کنترل دستی با روش کنترل با حسگر وزن و حسگر فشار روغن اختلاف معناداری نداشت ولی هر سه روش ذکر شده با روش کنترل با حسگر فراصوت تفاوت معناداری در سطح احتمال ۱٪ نشان دادند. این تفاوت عمدتاً به دلیل تخلخل زیاد توده قلمه داخل مخزن ثانویه، آلودگی محیطی اطراف مخزن و حسگر فراصوت و پل زدن توده قلمه‌ها قبل از ریزش به مخزن ثانویه رخ می‌داد.

مطابق نتایج مقایسه میانگین شکل ۸، بیشترین میزان ریزش قلمه مربوط به کنترل با حسگر وزن با مقدار ۸۹۰۰ کیلوگرم در هکتار و کمترین ریزش قلمه مصرفی با مقدار ۷۴۰۰ کیلوگرم در هکتار مربوط به کنترل با حسگر فراصوت مشاهده شد. در زمان انتخاب نوع حسگر برای پایش حجم نی در مخزن ثانویه دستگاه کارنده، این فرض اولیه مطرح بود که احتمالاً به دلیل تخلخل زیاد و توده ناهمگن قلمه‌های نی در مخزن دقت حسگر فراصوت کمتر خواهد بود. با توجه به مرور منابع و گزارشاتی که استفاده از حسگر فاصله‌سنج فراصوت را برای پایش ارتفاع بوته‌های نیشکر و در مواردی برای پایش مزارع ذرت استفاده کرده بودند و همچنین هزینه و نیاز به کمترین تغییر ساختاری در کارنده نسبت به دو حسگر دیگر باعث شد که حسگر فراصوت انتخاب شود. حتی طی ارزیابی‌های اولیه با وجود خطای ناشی از تخلخل توده، برآورد ارتفاع نی و در نتیجه حجم موجود نی در مخزن ثانویه امیدوارکننده بود. مشکل اصلی که باعث کاهش چشمگیر دقت با حسگر فراصوت گردید به دلیل درهم‌تنیدگی توده قلمه‌های نی بود که در برخی موارد کل توده قلمه با حرکت زنجیر کف مخزن و با وجود پیشروی به سمت مخزن ثانویه ریزش نمی‌کرد و باعث می‌شد که یک دیواره عمودی از نی‌ها قبل از ریزش تا جلوی میدان دید حسگر فراصوت پیش رفته و بدون این که عملاً قلمه‌ها در مخزن ثانویه ریزش کند کنترلر با حسگر فراصوت به غلط فرمان

توقف حرکت می‌داد و باعث خالی ماندن مخزن ثانویه و در نتیجه خالی ماندن پیاله‌های موزع می‌شد که در نهایت باعث نکاشت می‌گردید. این مشکل در دو نوع حسگر وزنی و فشار وجود نداشت.

نتایج مقایسه میانگین مقدار ریزش قلمه مطابق نمودار شکل ۸ نشان داد که اختلاف بین روش‌های کنترل با حسگر وزنی، حسگر فشار روغن هیدرولیک و تیمار کنترل دستی معنی‌دار نبود. حسگر فراصوت به دلیل عدم تشخیص صحیح و به‌موقع وضعیت قلمه در دسترس موزع در سطح احتمال ۱ درصد با دیگر روش‌های کنترل تفاوت معناداری داشت و منجر به کاهش ریزش قلمه از میانگین حدود ۸/۷ تن در هکتار برای سه روش دیگر به ۷/۴ تن در هکتار و ایجاد فاصله بین قلمه‌های کشت شده گردید که نامطلوب بود. در آزمایش اول و در همه روش‌های کنترل به‌جز حسگر فراصوت، نتایج بررسی‌ها نشان‌دهنده عدم وجود گپ^۲ و فاصله خالی بین قلمه‌ها در شیارهای کشت شده با این کارنده بود و هیچ‌گونه گپ قابل اندازه‌گیری در خطوط کشت مشاهده نشد. در روش کنترل با حسگر فشار روغن با وجود نتایج مشابه با کنترل دستی و کنترل با حسگر وزنی، به دلیل تغییرات ویسکوزیته روغن با دما در طول کار دستگاه و در شرایط کاری متفاوت، نتایج کنترلی از پایداری مناسب برخوردار نبود. طبق نتایج کنترل وزنی به‌عنوان بهترین گزینه برای کنترل و حذف اپراتور با حفظ کیفیت و راندمان عملکرد دستگاه کارنده خودکار توصیه می‌شود.

در شرایط استاندارد و با در نظر گرفتن هم‌پوشانی مناسب قلمه‌ها (یک سوم هم‌پوشانی) و طول استاندارد قلمه (۵۰ سانتی‌متر) مقدار طول قلمه لازم و مناسب در ۱۰ متر در هر ردیف برابر با ۱۳/۵ متر و تعداد آن‌ها ۲۸ - ۳۰ عدد خواهد بود. با توجه به استفاده دستگاه از قلمه‌های حدود ۲۵ سانتی‌متری تهیه‌شده توسط هاروستر نیشکر^۳، تعداد قلمه مورد نیاز در ۱۰ متر با هم‌پوشانی مناسب برای هر ردیف حدود ۶۳ عدد می‌باشد که با توجه به مصرف زیاد قلمه توسط دستگاه این میزان در حال حاضر برای هر ردیف حدود ۱۰۰ عدد قلمه به‌دست آمد. به‌منظور ارزیابی مقدار ریزش قلمه، قلمه‌های کاشته‌شده از زیر خاک خارج شدند و طول و تعداد آن‌ها در هر ردیف کشت اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری‌ها به گونه‌ای بود که موقع جابه‌جایی خاک از روی قلمه‌ها، موقعیت آن‌ها تغییر نکند و بتوان فاصله بین قلمه‌ها و نحوه هم‌پوشانی و فاصله‌های احتمالی (گپ) بین قلمه‌ها را اندازه‌گیری نمود. درخصوص میزان فاصله نکاشت یک و جانبی، نتایج نشان داد که در جوی‌های کشت شده با این کارنده فاصله خالی بین قلمه‌ها وجود نداشته و هیچ‌گونه فاصله قابل اندازه‌گیری در خطوط کشت مشاهده نشد.

2- Gap

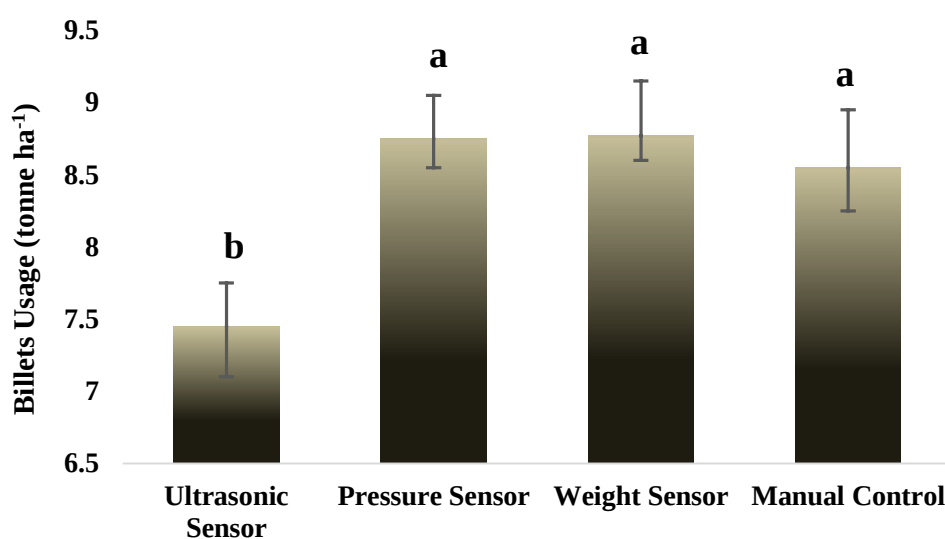
3- Sugarcane Harvester

1- CodeVisionAVR V3.34

جدول ۱- تجزیه واریانس نامتعادل تأثیر روش‌های تشخیص توده قلمه بر کارایی سامانه تغذیه قلمه کار نیشکر**Table 1-** Analysis of Variance (Unbalanced ANOVA) for the Effect of Billets Pile Detection Methods on the Performance of Sugarcane Billet Feeder System

منبع واریانس Source	درجه آزادی DF	مجموع مربعات Adj SS	میانگین مربعات Adj MS	آماره F F-Value
تیمار Treatment	3	18.4215	6.1405	3.87**
خطا Error	104	165.2083	1.5885	
کل Total	107	183.6299		

** means a significant effect within a 99% confidence interval

**شکل ۸- مقایسه میانگین مصرف قلمه (tonne ha^{-1}) با کنترل دستی، حسگر وزن، حسگر فراصوت و مبدل فشار روغن****Fig.8.** Comparison of Billets usage (tone ha^{-1}) for manual, weight, ultrasonic, and oil pressure sensor control

قلمه کار خودکار، بین روش‌های کنترل با حسگر وزنی و روش کنترل دستی تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد ولی در کشت دستی، مصرف وزنی قلمه به‌طور معنی‌داری کمتر و حدود ۸۹ درصد کشت ماشینی بود. با این حال به دلیل تنظیمات انجام‌شده روی کارنده از جمله تنظیم شیب بالابر زنجیر موزع، کاهش سرعت زنجیر موزع به نسبت سرعت ثابت پیشروی کارنده در مزرعه و استفاده از سامانه کنترل خودکار مصرف قلمه در کشت ماشینی نسبت به ارزیابی قبلی که توسط مدیریت مطالعات کاربردی کشت و صنعت فارابی در سال ۱۳۹۷ انجام شده بود کمتر بود.

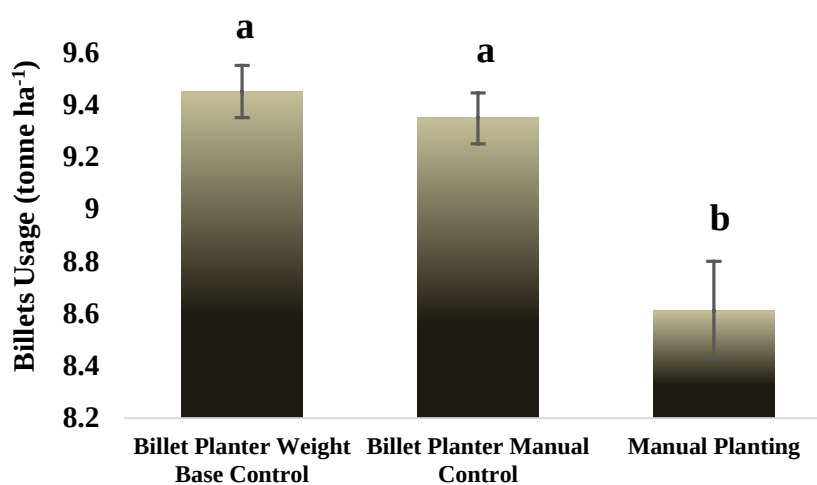
با توجه به نتایج آزمایش دوم، آزمایش سوم برنامه‌ریزی و در دو مزرعه زیرمجموعه کشت و صنعت فارابی اجرا شد. طی این آزمایش در حدود ۵۰ هکتار از مزارع، دو روش کشت دستی و کشت ماشینی (با دو شیوه کنترل دستی و کنترل با حسگر وزن) مقایسه شدند. در هر دو روش کشت، قلمه‌ها توسط ماشین برداشت نیشکر با طول تقریبی ۲۲ تا ۲۵ سانتی‌متر تهیه شده بود. در جدول ۲ به‌طور نمونه نتایج تجزیه واریانس یک‌طرفه برای مصرف وزنی قلمه آورده شده است. هر سه روش کشت در سطح احتمال ۱ درصد تفاوت معنی‌داری نشان دادند. برای سه آزمایش دیگر هم تجزیه واریانس انجام شد. ولی برای اختصار، نتایج تنها به‌صورت نمودارهای مقایسه میانگین ارائه شد. مطابق نتایج مقایسه میانگین نمودار شکل ۹ در کشت با کارنده

جدول ۲- تجزیه واریانس مصرف وزنی قلمه (kg ha^{-1}) برای کشت دستی و ماشین قلمه کار (در دو حالت کنترل دستی خودکار مبتنی بر وزن)

Table 2- Analysis of Variance (ANOVA) for billets usage (kg ha^{-1}) for manual planting and planter (manual and weight-based automatic control)

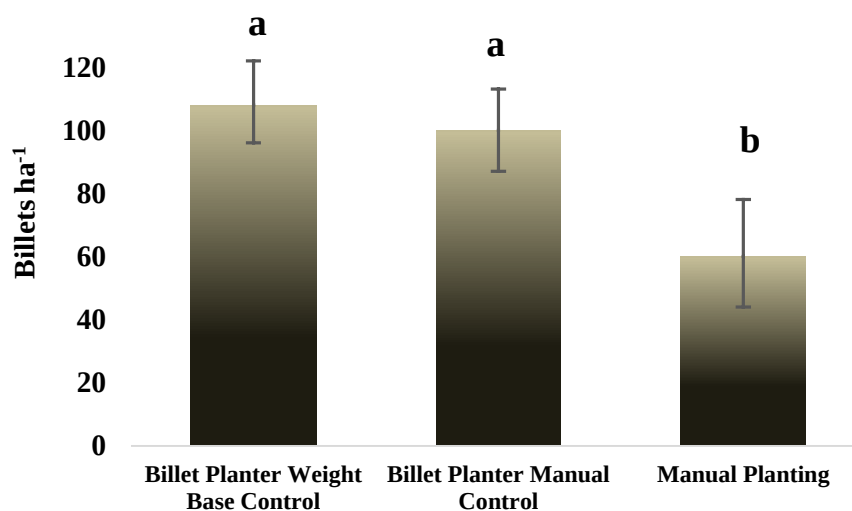
منبع واریانس Source	درجه آزادی DF	مجموع مربعات تصحیح شده Adj SS	میانگین مربعات تصحیح شده Adj MS	آماره F F-Value
تیمار Treatment	2	4949339	2474669	603.76**
خطا Error	36	147556	4099	
کل Total	38	5096894		

** means a significant effect within a 99% confidence interval



شکل ۹- مقایسه مصرف قلمه (tone ha^{-1}) برای کشت دستی و ماشین قلمه کار با دو نوع کنترل

Fig.9. Comparison of Billets usage (tone ha^{-1}) for manual planting and Billets Planter (with two types of control)

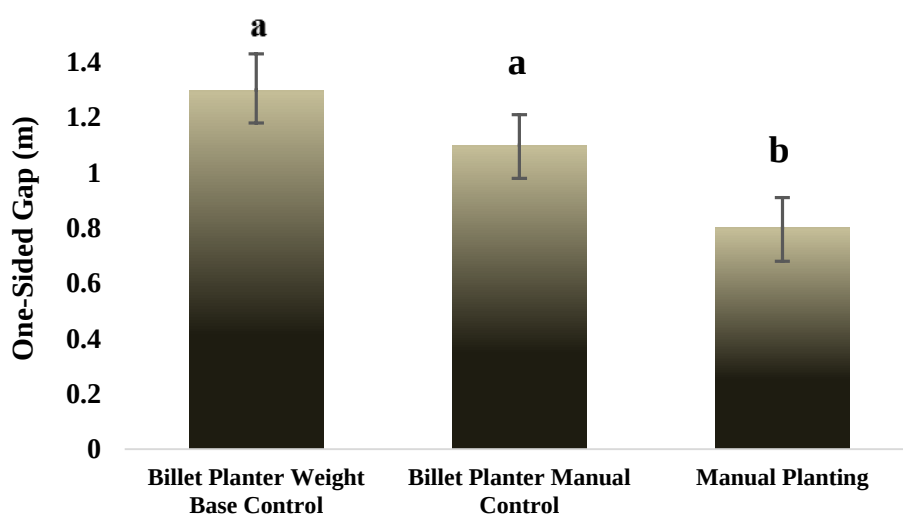


شکل ۱۰- مقایسه تعداد قلمه مصرفی برای دو نوع کشت دستی و قلمه کار با دو نوع کنترل

Fig.10. Comparison of billets per hectare for manual planting and Billets Planter (with two types of control)

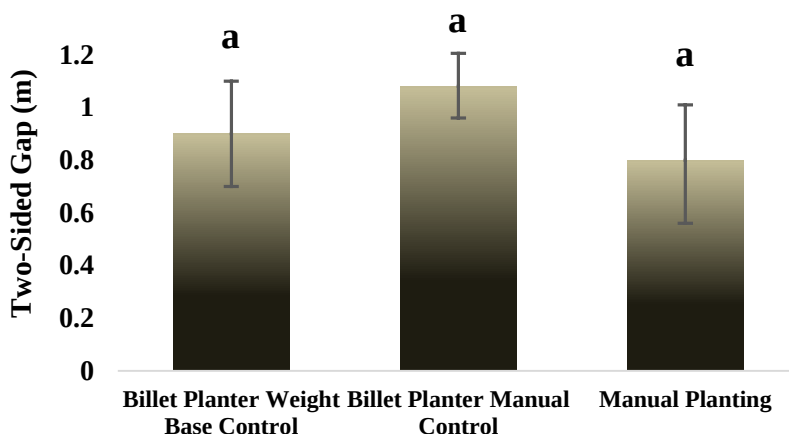
نتایج تجزیه واریانس نشان‌دهنده عدم وجود تفاوت معنی‌دار بین تیمارها برای فاصله نکاشت جانبی بود. مطابق نمودار شکل ۱۲ فاصله نکاشت جانبی در کشت دستی ۰/۸ متر به‌ازای هر ۱۰ متر طول کاشت برآورد شد. برای کشت با ماشین کارنده به‌ترتیب برای کنترل خودکار وزنی و کنترل دستی این مقدار ۱/۱ و ۰/۹ متر به‌دست آمد. در بین روش‌های کنترل دستی و کنترل خودکار وزنی نیز اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. این نتایج با نتایج تحقیقات قبلی که توسط مدیریت مطالعات کاربردی کشت و صنعت فارابی انجام شده هم‌خوانی داشت (Anonymous, 2018).

طبق نمودار شکل ۱۰، نتایج مقایسه میانگین تعداد قلمه‌های مصرفی در هر ۱۰ متر طول کاشت برای روش‌های کنترل با حسگر وزنی و کنترل دستی در کارنده‌ی قلمه‌کار خودکار تفاوت معنی‌داری نشان نداد. به‌طور مشابه، تعداد قلمه‌های مصرفی در کاشت دستی به‌طرز معنی‌داری کمتر و حدود ۴۳ درصد کاشت ماشینی بود. مطابق نمودار شکل ۱۱ فاصله نکاشت طولی در کشت دستی ۰/۸ متر به‌ازای هر ۱۰ متر طول کاشت برآورد شد. در حالی‌که برای کشت با ماشین کارنده این مقدار به حدود ۱/۲ متر افزایش یافت. در بین روش‌های کنترل دستی و کنترل خودکار وزنی اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد.



شکل ۱۱- مقایسه فاصله نکاشت طولی برای دو نوع کشت دستی و قلمه‌کار با دو نوع کنترل

Fig.11. Comparison of One-Sided Gap for manual planting and Billets Planter (with two types of control)



شکل ۱۲- مقایسه فاصله نکاشت جانبی برای دو نوع کشت دستی و قلمه‌کار با دو نوع کنترل

Fig.12. Comparison of Two-Sided Gap for manual planting and Billets Planter (with two types of control)

نتیجه گیری

در این پژوهش، سامانه کنترل خودکار تغذیه موزع قلمه کار نیشکر بر مبنای حسگر وزنی تعبیه شده در کف مخزن موزع طراحی و ساخته شد. نتایج نشان دهنده عملکرد صحیح سامانه از نظر مکانیکی و الکترونیکی بود. با نصب این سامانه مخزن ثانویه دستگاه همواره در سطح مشخصی از قلمه های نیشکر پر بوده که نشان دهنده عملکرد صحیح این سامانه بود. عملکرد این سامانه با کنترل دستی برابری می کرد که در نتیجه امکان حذف اپراتور را فراهم می آورد. حذف اپراتور منجر به صرفه جویی در هزینه های کارگری و تمام شده دستگاه به دلیل حذف اتاقک و سامانه تهویه مطبوع مورد نیاز برای استقرار اپراتور می شود. علاوه بر این، با حذف خطاهای ناشی از سهل انگاری و خستگی نیروی انسانی در کشت های طولانی، راندمان کاشت افزایش می یابد. از میان دو حسگر دیگر مورد استفاده، حسگر فشار روغن هیدرولیک محرک موزع نیز عملکرد مناسبی داشت، اما برای استفاده طولانی مدت، لازم است تا تغییرات فشار ناشی از تغییر دمای روغن با کمک یک حسگر دما به صورت برخط جبران شود. با وجود این که طبق نتایج، کاشت دستی از نظر مصرف قلمه و پارامترهای کیفی کاشت دارای مزیت است، سرعت بالای کاشت کارنده خودکار، به خصوص در شرایط محدودیت زمانی برای مدیریت مزارع، از اهمیت

بالایی برخوردار است. علاوه بر این، می توان با مجهز نمودن ناوگان دستگاه های قلمه کار به حسگرهای پایش، هوشمند نمودن و پایش برخط مرکزی، بر مزیت نسبی استفاده از کارنده ها افزود.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز بابت حمایت مالی از این پژوهش در قالب اعتبار ویژه پژوهشی به شماره پیگیری SCU.AA98.505 قدردانی می نمایند. همچنین از مدیر عامل محترم شرکت کشت و صنعت فارابی و پرسنل آن مجموعه و همچنین پرسنل فنی شرکت پویا سازان صنعت سبز آوان که در مراحل آماده سازی و ارزیابی های سامانه همکاری داشتند تشکر می نمایند.

مشارکت نویسندگان

بنیامین عباسیان: ساخت سامانه و انجام ارزیابی های میدانی و جمع آوری داده ها
محمد اسماعیل خراسانی فردوانی: نظارت و راهنمایی، مفهوم سازی، تحلیل آماری، استخراج و تهیه متن اولیه، ویرایش متن
حسن ذکی دیزجی: مشاوره فنی و ویرایش متن

References

1. Abbasiyan, B., Khorasani Ferdavani, M. E., & Zaki Dizaji, H. (2019). *Design and construction process of a sugarcane Billet planter suitable for sugarcane industries in Khuzestan province*. 12th National Conference on Biosystems Engineering and Mechanization. Ahvaz, Iran. (pp. 45-52). (in Persian).
2. Akbarnia, A. (2017). Design and fabrication of an experimental model of a seeding unit with widthwise sugarcane scions seeding for use in sugarcane planter. *Journal of Agricultural Machinery*, 7(1), 312-321. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.v7i1.45290>
3. Almasi, M., Bakhoda, H., & Sahebi, Y. (2006). *Design and construction of a sugarcane distributor and single-bud billet Planter*. 04th National Conference on Agricultural Machinery Engineering and Mechanization, Tabriz, Iran (pp. 21-27) (in Persian with English abstract).
4. Anonymous. (2018). Final report on cultivation with the new planter in Hakim Farabi Sugarcane Agro-Industries (quality and economic review). Applied research, Sugarcane & By Products Development Company. (in Persian).
5. Bozorgi, A. (2014). *Design, Construction, and evaluation of a Billet feeder system for sugarcane billet planter*. Master's thesis, Isfahan University of Technology. Department of Biosystems Engineering. (in Persian with English abstract).
6. Bronson, K., French, A., Conley, M., & Barnes, E. (2020). Use of an ultrasonic sensor for plant height estimation in irrigated cotton. *Agronomy Journal*, 113. <https://doi.org/10.1002/agj2.20552>
7. Elwakeel, A. E., Mazrou, Y. S. A., Eissa, A. S., Okasha, A. M., Elmetwalli, A. H., Makhlof, A. H., ..., & Elsayed, S. (2023). Design and Validation of a Variable-Rate Control Metering Mechanism and Smart Monitoring System for a High-Precision Sugarcane Transplanter. *Agriculture*, 13(12), 2218. <https://doi.org/10.3390/agriculture13122218>
8. Han, J., Wen, S., Liu, Q. T., & Wu, J. Y. (2019). Design and test of pre-cutting type sugarcane planter. *Journal of South China Agricultural University*, 40(4), 109-118.
9. Khani, M., Razavi, J., & Hemat, A. (2006). *Design, Construction and evaluation of distributor for sugarcane Billet planter with overlapped pattern*. Master's thesis, Isfahan University of Technology. (in Persian with English abstract).
10. Khorasani Ferdavani, M. E., Alimaradni, R., & Omid, M. (2009). *Design, Construction and Evaluation of Sugarcane Yield Monitoring System*. Doctoral dissertation, University of Tehran. Department of Agricultural Machinery Engineering. (in Persian with English abstract).
11. Mansouri, N., Zaki Dizaji, H., Sheikh Davoodi, M. J., & Asakare, A. (2019). Review and comparison of different

- methods of sugarcane stem planting under Khuzestan conditions. *Agricultural Systems and Mechanization Research*, 20(72), 73-90. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/erams.2018.114606.1207>
12. Mohammadi, A., Almasi, M., & Sheikh Davoodi, M. J. (2002). *Construction and testing of a sugarcane single-bander distributor*. Master's thesis, Shahid Chamran University of Ahvaz. (in Persian with English abstract).
13. Mostofi Sarkari, M., & Minaei, S. (2010). Performance evaluation of a continuous mass flow meter for harvesting machines of food products for use in precision agriculture. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 2(2), 141-150.
14. Namjoo, M., Razavi, J., & Khani, A. (2015). Fabrication and Evaluation of a Metering Device for a Sugarcane Billet Planter. *Yuzuncu Yıl University Journal of Agricultural Sciences*, 25(1), 1-12. <https://doi.org/10.29133/yyutbd.236386>
15. Razavi, S. J., Kardani, M., & Namjoo, M. (2013). *Design, Development and evaluation of an Autonomous system for a sugarcane billet planter Hopper Lifting*. 8th National Congress of Agricultural Machinery Engineering and Mechanization, Mashhad, Iran. (in Persian with English abstract).
16. Saengprachatanarug, K., Wongpichet, S., Ueno, M., & Taira, E. (2016). Comparative Discharge and Precision Index of a Sugar Cane Billet Planter. *Applied Engineering in Agriculture*, 32, 561-567. <https://doi.org/10.13031/aea.32.11073>
17. Soleimani Varposhti, I., Zaki Dizaji, H., & Sheikh Davoodi, M. J. (2019). Evaluation of precision metering device for Sugarcane billet planting machines. *Journal of Researches in Mechanics of Agricultural Machinery*, 8(2), 1-10. (in Persian with English abstract). https://jrmam.sku.ac.ir/article_10115.html?lang=en
18. Taghinezhad, J., Alimardani, R., & Jafari, A. (2013). Optimization cane traction output from hopper in full-automatic sugarcane planters by using response surface modeling and analytical hierarchy process. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 15, 138-147.
19. Taghinezhad, J., Alimardani, R., & Jafari, A. (2014). Development and evaluation of three metering device models for sugarcane setts. *Tarım Bilimleri Dergisi*. https://doi.org/10.1501/Tarimbil_0000001276
20. Wang, Meimei & Liu, Qingting & Ou, Yinggang & Zou, Xiaoping. (2021). Experimental Study of the Seed-Filling Uniformity of Sugarcane Single-Bud Billet Planter. *Sugar Tech*. 23. <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00947-3>
21. Wang, M., Liu, Q., Ou, Y., & Zou, X. (2022). Numerical simulation and verification of seed-filling performance of single-bud billet sugarcane seed-metering device based on EDEM. *Agriculture*, 12(7), 983. <https://doi.org/10.3390/agriculture12070983>
22. Wang, M., Liu, Q., Yinggang, O., & Zou, X. (2022). Experimental Study of the Planting Uniformity of Sugarcane. *Agriculture*, 12. <https://doi.org/10.3390/agriculture12070908>

Contents

Research Articles

- Synergistic Effect of Atmospheric Pressure Cold Plasma and Hydrogen Peroxide as an Efficient Approach for the Control of Citrus Postharvest Green Mold** 355
E. Barzanouni, H. Sadrnia, F. Sohbatzadeh, S. Khodavaisy
- Economic Evaluation of the Environmental Impacts of Juice Production: A Case Study of Pomegranate Juice** 367
L. Behrooznia, M. Khojastehpour, H. Hosseinzadeh-Bandbafha
- Development of Rice Seedling Bank Location Method using Fuzzy-VIKOR-TOPSIS Hybrid Approach** 389
M. Zangeneh, M. Rouhi Farajabad
- Comparison and Evaluation of Common Orchard Sprayers with Variable-rate Sprayers** 405
R. Fathi, M. Ghasemi-Nejad Raeini, S. Abdanan Mehdizadeh, M. Taki, M. Mardani Najafabadi
- Development and Comparison of Interrupt-Based and Analog-to-Digital Converter Algorithms for Seed Counting in Precision Planters** 429
A. Ghaffarnezhad, H. Navid, H. Karimi
- Development and Optimization of a Novel Deep Learning Model for Diagnosis of Quince Leaf Diseases** 445
A. Naderi Beni, H. Bagherpour, J. Amiri Parian
- Design, Construction, and Evaluation of an Automatic Feeder Control System for Sugarcane Billet Planters** 459
B. Abbasian, M. E. Khorasani Ferdavani, H. Zaki Dizaji

Journal of Agricultural Machinery

Vol. 14

No. 4

2024

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

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

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

Editorial Board:

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

Publisher: Ferdowsi University of Mashhad

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

P.O. BOX: 91775-1163

Fax: +98-05138787430

E-Mail: jame@um.ac.ir

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



Ferdowsi University
of Mashhad

Vol. 14

No. 4

2024

Journal of Agricultural Machinery



Iranian Society of
Mechanical Engineers
(ISME)

ISSN: 2228-6829

Contents

Research Articles

Synergistic Effect of Atmospheric Pressure Cold Plasma and Hydrogen Peroxide as an Efficient Approach for the Control of Citrus Postharvest Green Mold355
E. Barzanouni, H. Sadrmia, F. Sohbatzadeh, S. Khodavaisy

Economic Evaluation of the Environmental Impacts of Juice Production: A Case Study of Pomegranate Juice367
L. Behrooznia, M. Khojastehpour, H. Hosseinzadeh-Bandbafha

Development of Rice Seedling Bank Location Method using Fuzzy-VIKOR-TOPSIS Hybrid Approach.....389
M. Zangeneh, M. Rouhi Farajabad

Comparison and Evaluation of Common Orchard Sprayers with Variable-rate Sprayers405
R. Fathi, M. Ghasemi-Nejad Raeini, S. Abdanan Mehdizadeh, M. Taki, M. Mardani Najafabadi

Development and Comparison of Interrupt-Based and Analog-to-Digital Converter Algorithms for Seed Counting in Precision Planters.....429
A. Ghaffarnezhad, H. Navid, H. Karimi

Development and Optimization of a Novel Deep Learning Model for Diagnosis of Quince Leaf Diseases445
A. Naderi Beni, H. Bagherpour, J. Amiri Parian

Design, Construction, and Evaluation of an Automatic Feeder Control System for Sugarcane Billet Planters.....459
B. Abbasian, M. E. Khorasani Ferdavani, H. Zaki Dizaji