

Field and Economic Evaluation of Spraying Drones Versus Boom Sprayers for Weed and Yellow Rust control in Wheat fields

M. Safaeinezhad¹, M. Ghasemi-Nejad-Raeini^{1*}, M. Taki¹

1- Department of Agricultural Machinery and Mechanization Engineering, 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)

<https://doi.org/10.22067/jam.2025.91236.1322>

Introduction

One of the key structural factors in agricultural mechanization is the selection of appropriate technology. Today, examining the effects of technology application and development on agricultural production remains of highly importance. Innovative technologies, such as spraying drones, play a critical role in advancing agriculture and ensuring food security. Without these technologies and proper input management, environmental impacts are likely to intensify. Achieving sustainable production and ensuring food security is a major challenge for researchers and global policymakers. This study evaluates and compares the performance of spraying drones and boom sprayers in controlling weeds and yellow rust disease in wheat fields. The aim of this study is to optimize pesticide use and achieve sustainable agriculture.

Materials and Methods

This research was conducted to evaluate the field performance and economic feasibility of using spraying drones compared to boom sprayers for controlling weeds and yellow rust disease in wheat fields. Experiments were carried out in regional Khorramabad, Iran, using a DJI Agras MG-1P spraying drone and a 400-liter 400B8 TF boom sprayer. The aim was to investigate the impact of modern technology, specifically spraying drones, compared to traditional methods, such as boom sprayers, for managing weeds and yellow rust disease. Additionally, the study assessed the profitability of these technologies. The experiments followed a randomized complete block design with three treatments: boom sprayer, spraying drone, and control. They were conducted in two separate, independent fields to examine treatment effects on weeds and yellow rust in wheat. For weeds control, 2-4-D herbicide was applied at 1.5 L ha⁻¹, and for yellow rust control, Tilt fungicide was used at 0.5 L ha⁻¹.

Results and Discussion

Results showed that the deposition rate of pesticides in boom sprayers (82.8%) was higher than with drone spraying (69.9%). Furthermore, the average dry weight of weeds in boom sprayer was 172 g m⁻², and in drone spraying, it was 163 g m⁻², which was not statistically significant. Additionally, the average weed density was 25 plants per square meter for boom sprayers and 29.3 plants per square meter for drone spraying, with no statistically significant difference. The average harvest index in weed control experiments was 44% for boom sprayer and 41% for drone spraying, which was statistically significant at the 1% level. The average severity of yellow rust infection in wheat fields was 30.7% for boom sprayer and 25.3% for drone spraying, which was not statistically significant at the 1% level, but both treatments were significantly different from the control (68.3%). The harvest index in yellow rust experiments was better in drone spraying (43.8%) compared to boom sprayer (41.9%). The total annual cost for drone owners in the studied region (2980.3 million rials) was higher than the total cost for boom sprayer owners (513.48 million rials). However, the benefit-cost ratio for drone owners (1.215) exceeded that of boom sprayer owners (1.030), demonstrating economic viability for both sprayers. Overall, drones are found to be more economical for spraying than boom sprayers due to their higher efficiency and profitability. The use of drones can significantly increase the efficiency and profitability of spraying operations.

Conclusion

The results of this study showed that both drone and boom sprayer were effective in reducing the dry weight of weeds, but there was no statistically significant difference between them. Weed density was higher with drone spraying, and the harvest index was better with drone spraying compared to boom sprayer. The costs of using drones were higher than boom sprayers, but despite the higher costs, drones are superior option for spraying due to their increased efficiency and profitability.

Keywords: Boom Sprayer, Cost-Benefit, Drone, Effectiveness, Spray Deposition

ارزیابی مزرعه‌ای و اقتصادی استفاده از پهیاد سم‌پاش در مقایسه با سم‌پاش بوم‌دار به‌منظور کنترل علف‌های هرز و بیماری زنگ زرد در مزارع گندم

مجتبی صفائی نژاد^۱، محمود قاسمی نژاد رائینی^{۱*}، مرتضی تاکی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۴

چکیده

یکی از عوامل ساختاری مهم در حوزه مکانیزاسیون کشاورزی، انتخاب فناوری مناسب است. امروزه بررسی اثرات استفاده از فناوری و توسعه تکنولوژی و مکانیزاسیون بر تولید بخش کشاورزی دارای اهمیت زیادی است. ارزیابی اثربخشی فناوری‌ها در تولید محصولات کشاورزی، با سنجش تأثیرات این فناوری‌ها و تحلیل منافع اقتصادی، ضروری است. در این راستا، اثرات استفاده از فناوری نوین (پهیاد در سم‌پاشی) در مقایسه با فناوری مرسوم (سم‌پاش بوم‌دار) برای کنترل علف‌های هرز و بیماری زنگ زرد گندم و همچنین بررسی سود و زیان این فناوری‌ها برای تولید گندم در شهرستان خرم‌آباد بررسی شد. آزمایش‌ها در قالب طرح آماری بلوک‌های کامل تصادفی با سه تیمار (دو تیمار سم‌پاش بوم‌دار و پهیاد در مقایسه با تیمار شاهد) اجرا شدند. این آزمایش‌ها برای بررسی اثرات تیمارها بر علف‌های هرز و زنگ زرد گندم و همچنین میزان نشست سم به هدف در دو مزرعه کاملاً جدا و مستقل انجام شد. برای ارزیابی اثرات سم‌پاش‌ها بر علف‌های هرز، از علف‌کش 2-4-D به میزان ۱/۵ لیتر در هکتار و برای ارزیابی اثرات زنگ زرد، از سم تیلت به میزان ۰/۵ لیتر در هکتار استفاده شد. نتایج نشان داد که میزان نشست سم در سم‌پاش بوم‌دار (۸۲/۸ درصد) بیشتر از میزان نشست در سم‌پاشی با پهیاد (۶۹/۹ درصد) بود. میانگین وزن ماده خشک علف‌های هرز در سم‌پاش بوم‌دار ۱۷۲ گرم بر مترمربع و در سم‌پاشی با پهیاد ۱۶۳ گرم بر مترمربع بود که از نظر آماری تفاوت معناداری نداشتند. همچنین، میانگین تراکم علف‌های هرز در سم‌پاش بوم‌دار ۲۵ عدد و در سم‌پاشی با پهیاد ۲۹/۳ عدد بود که از نظر آماری تفاوت معناداری نداشتند. میانگین شاخص برداشت در آزمایش‌های کنترل علف‌های هرز، در سم‌پاش بوم‌دار ۴۴ درصد و در سم‌پاشی با پهیاد ۴۱ درصد بود که از نظر آماری در سطح ۱ درصد تفاوت معناداری داشتند. میانگین شدت آلودگی به بیماری زنگ زرد در مزارع گندم در سم‌پاش بوم‌دار ۳۰/۷ درصد و در سم‌پاشی با پهیاد ۲۵/۳ درصد بود که از نظر آماری در سطح ۱ درصد تفاوت معناداری نداشتند، ولی نسبت به شاهد (۶۸/۳ درصد) هر دو تیمار تفاوت معناداری داشتند. شاخص برداشت در آزمایش‌های مربوط به بیماری زنگ زرد، در سم‌پاشی با پهیاد (۴۳/۸ درصد) وضعیت بهتری نسبت به سم‌پاش بوم‌دار (۴۱/۹ درصد) داشت. هزینه کل سالیانه مالکان پهیادسم‌پاش در این منطقه (۲۹۸۰/۳ میلیون ریال) بیشتر از هزینه کل سالیانه دارندگان سم‌پاش بوم‌دار (۵۱۳/۴۸ میلیون ریال) برآورد گردید. شاخص منفعت به هزینه در مالکان پهیادسم‌پاش (۱/۲۱۵) وضعیت بهتری نسبت به مالکان سم‌پاش بوم‌دار (۱/۰۳۰) داشت و نتایج نشان داد به‌کارگیری هر دو سم‌پاش اقتصادی است. در مجموع، پهیادسم‌پاش به دلیل کارایی و درآمدزایی بیشتر، گزینه اقتصادی‌تری برای سم‌پاشی نسبت به سم‌پاش بوم‌دار است. استفاده از پهیادها در سم‌پاشی می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی بهره‌وری و سودآوری عملیات سم‌پاشی را افزایش دهد.

واژه‌های کلیدی: اثربخشی، پهیاد، سم‌پاش بوم‌دار، منفعت به هزینه، نشست سم

مقدمه

آفت‌ها، بیماری‌های گیاهی و علف‌های هرز از چالش‌های اصلی در تولید محصولات کشاورزی به‌شمار می‌روند. بر اساس گزارش‌های سازمان خواروبار جهانی، این عوامل سالانه حدود ۳۰ درصد از محصولات کشاورزی را در سطح جهانی نابود می‌کنند (Jafar, Bibi, 2023).

همچنان‌که عنوان رایج‌ترین راهکار برای مقابله با این مشکلات استفاده می‌شود. تخمین زده می‌شود که حدود ۴۰ درصد از عملکرد محصولات کشاورزی تحت تأثیر سم‌پاشی قرار دارد (Khan et al., 2023). هزینه‌های مرتبط با سموم شیمیایی و وابستگی به آن‌ها برای

(*)- نویسنده مسئول: (Email: ghasemi.n.m@asnrukh.ac.ir
https://doi.org/10.22067/jam.2025.91236.1322

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

در بحث نشست سم به هدف، در پژوهشی میزان نشست محلول سم از هواپیماهای بدون سرنشین در محصولات برنج و مرکبات بررسی شد. نتایج نشان داد که شرایط محیطی، نوع مواد شیمیایی، خواص برگ‌ها و سیستم پاشش بر الگوی پاشش تأثیر دارند. همچنین، جریان هوای روتور پهپادها که ناشی از حرکت چرخشی تیغه‌ها است، باعث حرکت غیرقابل کنترل قطرات سم در همه جهات می‌شود. این وضعیت بر الگوی پاشش تأثیر گذاشته و منجر به تلفات آفت‌کش می‌شود (Zhang, Hewitt, Chen, Li, & Tang, 2016).

در تحقیقی به‌منظور "ارزیابی سیستم سم‌پاش هوشمند در تولید هلو" گزارش شد که سیستم سم‌پاش هوشمند در مقایسه با سم‌پاش‌های معمولی توانست حجم سم‌پاشی را تا ۴۷ درصد کاهش دهد. همچنین، پراکندگی سموم به‌طور متوسط ۴۰ درصد کمتر بود. این سیستم در کنترل آفات و بیماری‌ها به اندازه سم‌پاش‌های معمولی موثر بود، اما با مصرف کمتر سموم، بهره‌وری بیشتری داشت (Boatwright, Zhu, Clark, & Schnabel, 2020). همچنین اورک و همکاران (۲۰۲۱) به مطالعه "طراحی، ساخت و ارزیابی سامانه سم‌پاش خودکار به‌منظور تشخیص برخط علف‌هرز گیاه در مزارع چغندر قند" پرداختند و گزارش نمودند سیستم سم‌پاش خودکار با استفاده از فناوری بینایی ماشین توانست مصرف سموم را تا ۳۵٪ کاهش دهد. این سیستم با شناسایی دقیق علف‌های هرز و سم‌پاشی هدفمند، کارایی بالایی در کنترل علف‌های هرز داشت و مصرف سموم به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافت (Orak, Abdanan Mehdizadeh, Asoodar, & Elahifard, 2021). ظریف نشاط و همکاران، به مطالعه "ارزیابی کارایی سم‌پاش‌های پهپادی در کنترل آفات مزارع برنج" پرداختند و گزارش نمودند پهپادهای سم‌پاش توانستند مصرف سموم را کاهش دهند. این پهپادها با شناسایی دقیق نقاط آلوده، تنها همان نقاط را سم‌پاشی کردند که منجر به کاهش مصرف سموم و افزایش بهره‌وری در کنترل آفات شد. همچنین، کارایی سم‌پاشی بهبود یافت و پوشش سموم به‌طور یکنواخت‌تری انجام شد (Zarifneshat, Saeidirad, Safari, Motamed Alshriati, & Naseri, 2022).

پژوهش‌های پیشین نشان‌دهنده تلاش‌های قابل‌ملاحظه‌ای در راستای افزایش کارایی و کاهش مصرف سموم بوده است. این مطالعات به‌ویژه در ارزیابی اثرات فناوری‌ها بر کنترل آفات و بیماری‌ها و تجزیه و تحلیل اقتصادی آن‌ها موفق عمل کرده‌اند، با این حال هنوز کمبودهایی در بررسی اثرات بخشی این فناوری‌ها وجود دارد. هدف پژوهش حاضر، مطالعه مزرعه‌ای و اقتصادی استفاده از پهپاد سم‌پاش در مقایسه با روش‌های سنتی، با تأکید بر کنترل علف‌های هرز و بیماری زنگ زرد گندم است. این تحقیق به‌منظور پرکردن

بهبود تولید، چالشی اقتصادی برای کشاورزی به‌وجود آورده است (Khan et al., 2023).

امروزه یکی از مهم‌ترین مشکلات عملیات سم‌پاشی سنتی، توزیع یکنواخت سموم در تمامی نقاط مزرعه است که منجر به آسیب به محصولات کشاورزی، انسان‌ها، منابع و محیط‌زیست می‌شود. بدون استفاده از فناوری‌های نوین، نمی‌توان انتظار داشت که مصرف سموم بهینه و کارآمد باشد (Hamuda, Glavin, & Jones, 2016; Lu et al., 2023; Patil, Mailapalli, & Singh, 2024; Tillett, Haghe, Grundy, & Dedousis, 2008). با وجود این‌که ماهیت سیستم‌های تولید محصولات کشاورزی تغییرناپذیر است، اما می‌توان با به‌کارگیری بهترین روش‌ها برای تجزیه و تحلیل نهاده‌ها، به حداکثر بهره‌وری دست یافت. (Hercher-Pasteur, Loiseau, Sinfert, Hellas, 2020; Taheri-Rad, Khojastepour, Khoramdel, & Nikkha, 2017; Usigbe et al., 2024). مصرف غیربهینه عوامل و نهاده‌های تولید در کشاورزی پیامدهای ناگواری خواهد داشت و در صورت عدم دستیابی و استفاده از فناوری‌های نوین و اقدامات لازم برای مدیریت صحیح نهاده‌ها، اثرات زیست‌محیطی در آینده بیش از پیش افزایش می‌یابد (Baweja, Kumar, Kumar, 2020; Patil, & Mailapalli, 2020; Springmann et al., 2018).

هزینه‌های مربوط به به‌کارگیری مکانیزاسیون در کشاورزی، به‌ویژه برای کنترل و مبارزه با آفات و بیماری‌ها، یکی از عوامل هزینه‌زا برای کشاورزان است (Daum, 2023; Salcedo et al., 2019). دو و همکاران گزارش کردند که استفاده از تکنیک‌های سنتی در تولید محصولات کشاورزی به‌طور فزاینده‌ای باعث ایجاد تناقض بین توسعه اقتصادی و حفاظت از محیط‌زیست می‌شود (Dou et al., 2018).

استفاده از پهپادها (پرنده هدایت‌پذیر از دور) در زندگی بشر امروزی تقریباً مرسوم شده است. این فناوری در دهه اخیر رشد قابل‌توجهی داشته و کاربردهای متنوعی برای آن به‌وجود آمده است که بخش کشاورزی نیز از جمله آن‌ها است. پهپادها می‌توانند به‌عنوان بخشی از تجهیزات کشاورزی مورد استفاده قرار گیرند و در حال حاضر برای سم‌پاشی محصولات کشاورزی در دفع آفات به‌کار می‌روند (Berner & Chojnaki, 2017).

در پژوهشی به‌منظور بررسی عملکرد فنی و کارایی سم‌پاش‌های پشتی با مکانیزم‌های مختلف در کنترل تریپس پیاز در منطقه خسروشاه استان آذربایجان شرقی، نتایج نشان داد که بین تیمارهای مورد بررسی (سم‌پاش موتوری پشتی لانس‌دار، اتومایزر، میکرونر و الکتروستاتیک) اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد وجود داشت. در این میان، سم‌پاش میکرونر با میانگین ۵۶/۶۴ درصد تأثیر بر کنترل تریپس پیاز، بالاترین امتیاز را به خود اختصاص داد (Mozaffari, Gonbari, Yosefzadeh Taheri, & Soleymani, 2019).

مطالعه، از پهپاد سمپاش مدل DJI Agras MG-1P و سمپاش بوم‌دار ۴۰۰ لیتری سوارشونده مدل B8 TF400 شرکت درخشان استفاده شد (شکل ۱). بر اساس بررسی‌های به‌عمل‌آمده، سمپاش‌های بوم‌دار ۴۰۰ لیتری یکی از متداول‌ترین نوع سمپاش‌های پشت‌تراکتوری در بین کشاورزان منطقه می‌باشد. همچنین، پهپاد سمپاش مدل DJI Agras MG-1P نیز یکی دیگر از پهپادهای رایج در منطقه است که به این دلیل در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفتند. در شکل ۱ مشخصات این دو سمپاش آورده شده است. گرچه در سال‌های اخیر به دلیل تقاضای موجود، شرکت‌های دیگری به تولید و یا واردات پهپاد سمپاشی اقدام کرده‌اند، ولی پهپادهای شرکت DJI در این منطقه به دلیل سابقه بیشتر و فراوانی بیشتر استفاده شده‌اند.

خلأهای موجود در پژوهش‌های قبلی و ارائه راهکارهای نوآورانه و پایدار برای بهینه‌سازی بهره‌وری و سودآوری در کشاورزی انجام شده است و همچنین ابزارهای تحلیلی و تصمیم‌گیری بهتری را به کشاورزان ارائه می‌دهد تا آن‌ها بتوانند انتخاب‌های آگاهانه‌تری در استفاده از فناوری‌های نوین داشته باشند.

مواد و روش‌ها

این تحقیق به منظور ارزیابی اثربخشی دو نوع سمپاش (پهپاد و سمپاش بوم‌دار) در مبارزه با علف‌های هرز و بیماری زنگ زرد در مزرعه گندم رقم هشت‌رود و همچنین ارزیابی اقتصادی این دو مدل سمپاش، آزمایش‌های این تحقیق در شهرستان خرم‌آباد اجرا شد. برای

مشخصات پهپاد

Specifications of the spraying drone

مارک و مدل: DJI Agras MG-1P

Brand and Model: DJI Agras MG-1P

تعداد موتور: ۶ عدد

The number of motors: 6

مداومت پروازی: ۲۰ دقیقه

Flight time: 20 Min

ظرفیت مخزن: ۱۰ لیتر

Tank volume: 10 Liter

عرض پاشش: ۵ متر

Spray width: 5 meters

دوربین FPV (دید لحظه‌ای): ۱ عدد

Number of FPV cameras: 1

تعداد LED: ۲ عدد جهت پرواز در شب

Number of LED: 2

نوع نازل و تعداد: ۴ عدد، تی‌جت

Number and type of nozzles: 4 TeeJet

حداکثر ظرفیت اسپری: نیم لیتر در دقیقه

Maximum spray capacity: 0.5 L Min⁻¹

مشخصات سمپاش بوم‌دار

Specifications of the boom sprayer

مارک و مدل: B8 TF400

Brand and Model: B8 TF400

ظرفیت مخزن: ۴۰۰ لیتر

Tank volume: 400 Liter

جنس مخزن: پلی‌اتیلن

Material of the tank: Polyethylene

مدل پمپ: راتون ۸۰

Pump model: Raton 80

عرض پاشش: ۱۶ متر

Spraying width: 16 meters

نوع نازل: پاشش خطی (تی‌جت)

Nozzle type: Flat fan (TeeJet)

سیستم انتقال قدرت

Power train system: PTO

نوع فشارشکن: سه شیر دستی

Pressure relief valve: Manual, three valves



شکل ۱- مشخصات فنی دو سمپاش (سمپاش بومدار و پهپاد)

Fig.1. Technical specifications of the two sprayers (boom sprayer and drone sprayer)

بررسی مزرعه‌ای دو سمپاش
برای بررسی اثربخشی دو نوع سمپاش (پهپاد و سمپاش بومدار) در مبارزه با علف‌های هرز در مزرعه گندم رقم هشت‌رود در شهرستان خرم‌آباد، آزمایشی در قالب طرح آماری بلوک‌های کامل تصادفی با سه تیمار و سه تکرار اجرا شد. تیمارها شامل سمپاش بومدار، پهپاد و شاهد بودند. از علف‌کش 2-4-D به مقدار ۱/۵ لیتر در هکتار برای مبارزه با علف‌های هرز و سم تیلت به مقدار نیم لیتر در هکتار برای کنترل بیماری زنگ زرد گندم استفاده شد. تیمارها به صورت تصادفی در مزرعه آزمایشی انتخاب شدند. هم‌چنین میزان نشست سم بر روی گیاه با آزمایش‌های طیف‌سنجی بررسی شد. برای تعیین تراکم علف‌های هرز از کوادرات به مساحت یک مترمربع استفاده شد و تعداد علف‌های هرز موجود در هر کوادرات به عنوان تراکم علف‌های هرز در نظر گرفته شد. سپس بعد از ۲۱ روز تعداد علف‌های هرز شمارش و پس از کف‌بردن، آن‌ها را در کیسه قرار داده و جهت تعیین وزن تر و خشک به آزمایشگاه انتقال یافتند. وزن اندام هوایی علف‌های هرز موجود در یک مترمربع از هر واحد آزمایشی بعد از برداشت اندام‌های هوایی آن‌ها در نظر گرفته شد (Alipour, Karimmojeni, Zali, Razmjoo, & Jafari, 2022). شاخص برداشت با استفاده از تقسیم عملکرد دلنه به عملکرد بیولوژیک تعیین شد. برای این کار عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک برای هر واحد آزمایشی مشخص شد و پس از آن جهت تعیین وزن خشک در داخل آون با دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت قرار گرفتند (Porker, Straight, & Hunt, 2020). جهت ارزیابی بیماری قارچی زنگ زرد گندم نیز یک آزمایش مجزا در یک مزرعه مستقل و در قالب طرح آماری بلوک‌های کامل تصادفی در سه تیمار و سه تکرار اجرا گردید. ارزیابی چشمی نمره‌دهی بعد از ۱۰ روز در بازه صفر تا ۱۰۰ بر اساس شاخص استاندارد EWRC انجام گرفت. زمان سم‌پاشی با بازدیدهای مرتب روزانه و شروع شیوع آفت تعیین و اجرا شد (Dear, Sandral, Spencer, Khan, & Higgins, 2003).

روش اندازه‌گیری میزان نشست سم
قبل از انجام آزمایش‌های مربوط به پخش علف‌کش، آزمایشی جهت ارزیابی میزان نشست سم روی گیاه با استفاده از مخلوط آب و رنگ تارترازین^۲ زرد رنگ (با فرمول شیمیایی:

C16H9N4NA3O9S2) طراحی و اجرا گردید. این رنگ، نوعی رنگ خوراکی است که به میزان ۵ تا ۶ گرم بر لیتر در آب حل می‌شود (Gil, Gallart, Llorens, & Balsari, 2013). به منظور بررسی میزان نشست سم در واحد سطح، محلول آب و تارترازین بر اساس مقادیر مشخص و تنظیم‌شده سم‌پاشی اجرا شد و میزان نشست محلول سم روی گیاه (نقاط هدف و غیرهدف) مورد بررسی قرار گرفت. پس از انجام عملیات سم‌پاشی، جمع‌کننده‌هایی (پتری‌دیش) استفاده شد. آزمایش‌های طیف‌سنجی نوری میزان نشست پس از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه مورد ارزیابی قرار گرفتند. در ادامه، نمونه‌ها (جمع‌کننده‌ها) با آب مقطر شستشو داده شدند و با استفاده از دستگاه طیف‌سنج نوری، غلظت ماده ردیاب اندازه‌گیری شد (Pergher & Petris, 2001). به منظور انجام طیف‌سنجی نوری از دستگاه اسپکتروفتومتری مدل Biochrom Libra S22 UV-Vis که در شکل ۲ آورده شده است استفاده شد. این دستگاه قابلیت نمایش طول موج‌های مختلف در غلظت‌های متفاوت و میزان غلظت‌های مختلف در طول موج ثلثی را دارد (BehzadiPour, Ghasemi Nejad Raeini, Asoodar, Marzban, & Abdanan Mehdizadeh, 2017; Fathi, Ghasemi-Nejad Raeini, Abdanan Mehdizadeh, Taki, & Mardani Najafabadi, 2024; Soheilifard, Marzban, Raini, Taki, & van Zelm, 2020). در این روش، غلظت ماده ردیاب بر اساس قرائت دستگاه طیف‌سنج و روابط (۱) و (۲) محاسبه شد (Garcerá, Moltó, & Chueca, 2017).

$$C_{\text{target}} = \frac{V_w \times A_w}{D_t \times f} \quad (1)$$

$$C = \frac{C_{\text{collector}}}{S} \quad (2)$$

در این روابط، C_{target} : مقدار نشست سم در ناحیه مشخص (هدف) بر حسب میکرولیتر در هر جمع‌کننده (پتری‌دیش)
 A_w : قرائت دستگاه (بر حسب میکرولیتر در میلی‌لیتر آب)
 V_w : حجم آب استفاده‌شده برای شستشوی پتری‌دیش (میلی‌لیتر)
 D_t : غلظت ماده ردیاب در سم‌پاشی (بی‌بعد)
 f : درصد بازایی 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)

S: مساحت هر پتری دیش یا جمع‌کننده (بر حسب سانتی‌متر مربع) است.



شکل ۲- نمایی از دستگاه طیف‌سنج نوری جهت اندازه‌گیری طول موج‌های به‌منظور تعیین غلظت ماده ردیاب
Fig. 2. A view of the optical spectrometer used for measuring wavelengths to determine the concentration of the tracer substance

(Eivazi, & Shir Alizadeh, 2020).

شاخص برداشت^۱

شاخص برداشت به نسبت عملکرد دانه به کل ماده خشک تولیدشده اطلاق می‌شود. این شاخص به‌عنوان یکی از معیارهای مهم کارایی در ارزیابی عملکرد گیاهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. شاخص برداشت نشان‌دهنده توانایی گیاه در تبدیل ماده خشک تولیدشده به محصول نهایی قابل‌برداشت بوده و به‌طور مستقیم بازتاب‌دهنده بهره‌وری گیاه در تخصیص منابع به بخش‌های اقتصادی و اصلی آن است (Ghaseminejad Raeini et al., 2014; Shabani & Sepaskhah, 2019).

$$HI = \left(\frac{GY}{BY} \right) \times 100 \quad (3)$$

در این رابطه، GY عملکرد دانه و BY عملکرد بیولوژیک است.

درصد بوته‌های آلوده^۲ و شدت آلودگی^۳ به زنگ زرد

درصد بوته‌های آلوده نشان‌دهنده نسبت بوته‌های آلوده به کل بوته‌ها در یک مزرعه است، در حالی که شدت آلودگی میزان یا درجه آلودگی هر بوته را مشخص می‌کند و معمولاً به‌صورت درصدی از سطح بوته که به بیماری آلوده شده است، بیان می‌شود. برای اندازه‌گیری درصد بوته‌های آلوده، ده روز پس از عملیات سم‌پاشی، تعداد بوته‌های آلوده در هر مترمربع شمارش شد و این مقدار نسبت به کل بوته‌های موجود در همان مساحت محاسبه گردید. همچنین، شدت آلودگی به‌صورت چشمی و تقریبی بر اساس درصد سطح آلوده هر بوته در مساحت مورد نظر تخمین زده شد (Rezaei Moradali, 2020).

علف‌های هرز مزارع

به‌منظور فراهم‌سازی شرایط یکسان برای آزمایش، عملیات آماده‌سازی زمین و کشت گندم در هر دو مزرعه به‌صورت مشابه برنامه‌ریزی و اجرا شد. این مزارع از نظر ترکیب فلور علف‌های هرز (تراکم و تنوع) تا حد بسیار زیادی یکسان بودند و برای اطمینان از این یکنواختی، ارزیابی‌های اولیه‌ای نیز انجام گرفت. در ادامه، علف‌کش در مرحله پنجه‌زنی، یعنی زمانی که تمامی علف‌های هرز به‌طور کامل ظاهر شده بودند، اعمال شد و اثرگذاری آن پس از سه هفته مورد ارزیابی قرار گرفت. برای اندازه‌گیری تعداد علف‌های هرز، از چارچوب‌های مربعی استفاده شد و تعداد علف‌های هرز در هر نقطه شمارش گردید. سپس میانگین تعداد علف‌های هرز در هر مترمربع محاسبه شد. برای ارزیابی وزن ماده خشک، نمونه‌های علف‌های هرز جمع‌آوری شده و در دمای حدود ۷۰ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت خشک شدند (Ghaseminejad Raeini et al., 2014).

بررسی و ارزیابی اقتصادی دو سم‌پاش

یکی از اهداف اصلی در کشاورزی، سودآوری است. باید تا حد امکان نرخ بهره‌وری و نهایتاً سودآوری در تولید را افزایش داد (Eskouinejad, 2020). در این تحقیق جهت ارزیابی اقتصادی دو سم‌پاش از دو شاخص اقتصادی، نسبت منفعت به هزینه (B/C) و شاخص کل هزینه به‌شرح ذیل استفاده شد.

3- Infection severity

1- Harvest index

2- Percentage of infected plants

در این تحقیق هزینه‌های متغیر شامل هزینه سموم، کود شیمیایی و حیوانی، نیروی انسانی، ماشین، الکتریسیته، سوخت، بذر، مورد نیاز برای سیستم کشت گندم در نظر گرفته شد. میزان استهلاک، هزینه سرویس و نگهداری، هزینه تعمیرات، و عمر ماشین‌ها بر اساس استاندارد ASAE D497.7 و منابع معتبر لحاظ شد (Almasi, Kiani, & Louimi, 2014; ASAE, 2011). هزینه‌های متغیر شامل هزینه سوخت، هزینه نیروی انسانی و سایر هزینه‌ها بر اساس نرخ رایج در کشور و عرف منطقه در نظر گرفته شد. سایر اطلاعات مورد نیاز شامل ظرفیت مزرعه‌ای ماشین‌ها و سرعت پیشروی از منابع مختلف (اندازه‌گیری در مزرعه و پرسشنامه) استخراج گردید و در محاسبات به کار گرفته شد.

نتایج و بحث

بررسی اثر نوع سمپاش بر پارامترهای فنی میزان نشست سم در سمپاشی

جدول ۱ تجزیه واریانس، اثر نوع سمپاش بر میزان نشست سمپاشی را نشان می‌دهد. این جدول نشان می‌دهد که اثر نوع سمپاش بر این شاخص در سطح یک درصد معنی‌دار است. این بدین معناست که سمپاشی بوم‌دار در مقایسه با سمپاشی با پهنپاش، میزان نشست بالاتری از خود نشان می‌دهد. مطالعات مشابه نشان داده‌اند که نوع سمپاش و سرعت پیشروی آن تأثیر قابل توجهی بر کیفیت سمپاشی دارند. به عنوان مثال، در تحقیقی که به مقایسه سمپاش‌های نرخ ثابت و نرخ متغیر پرداخته شد، نتایج نشان دادند که سمپاش‌های نرخ متغیر در سرعت‌های پیشروی مختلف، میزان نشست سم و کارایی پاشش بهتری دارند. همچنین، استفاده از افشانک‌های کمک هوا در سمپاش‌های بوم‌دار باعث کاهش بادبردگی و افزایش یکنواختی پاشش شده است (Fathi et al., 2024).

شاخص B/C (نسبت منفعت به هزینه)^۱

شاخص نسبت منفعت به هزینه یکی از مهم‌ترین شاخص‌های اقتصادی برای ارزیابی طرح‌ها است. این شاخص از تقسیم ارزش فعلی منافعی که سامانه بر ارزش فعلی هزینه‌های آن به دست می‌آید. شاخص نسبت منفعت به هزینه از رابطه (۴) محاسبه می‌شود (Eskouinejad, 2020).

$$B/C = \frac{\text{ضررها} - \text{منافع}}{\text{هزینه‌ها (مخارج)}} \quad (4)$$

با در نظر گرفتن ارزش زمانی پول و انتخاب یکی از دو روش ارزش فعلی یا یکنواخت سالیانه^۲ می‌توان رابطه (۵) را نوشت.

$$B/C = \frac{\text{ارزش فعلی منافع}}{\text{ارزش فعلی مخارج}} = \frac{PW_B}{PW_C} \quad (5)$$

چنانچه $B/C \geq 1$ باشد طرح اقتصادی است و اگر $B/C < 1$ باشد طرح غیراقتصادی خواهد بود.

همچنین با بررسی به عمل آمده در سال ۱۴۰۲ در منطقه (مصاحبه و اطلاعات پرسشنامه‌ای) مشخص گردید که به طور میانگین میزان استفاده از پهنپاش (کارکرد در سال) در این منطقه سالانه ۶۱۵ هکتار و دستمزد هر هکتار سمپاشی با پهنپاش به طور متوسط ۵/۸۹ میلیون ریال می‌باشد و در مقابل استفاده سالانه از سمپاش بوم‌دار ۱۳۵/۵ هکتار و نرخ اجاره بها با این نوع سمپاشی ۳/۹ میلیون ریال می‌باشد.

شاخص کل هزینه

هزینه کل از مجموع هزینه ثابت و متغیر به دست می‌آید. در این پژوهش هزینه برحسب میلیون ریال محاسبه شد. هزینه‌ی کل از مجموع هزینه‌های ثابت و متغیر به دست آمد (Ying & Tsai, 2017).

جدول ۱- تجزیه واریانس اثر نوع سمپاش بر میزان نشست سم در سمپاشی

Table 1- Analysis of variance (ANOVA) for the effect of sprayer type on pesticide deposition amount in spraying

پارامترها Parameters	منابع تغییرات Source of variation	مجموع مربعات Sum of squares	میانگین مربعات Mean square	F	Sig.
میزان نشست Deposition amount	بین گروهی Between Groups	748.845	748.845	128.321	0.000**
	درون گروهی Within Groups	93.371	5.836		
	کل Total	842.216			

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

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

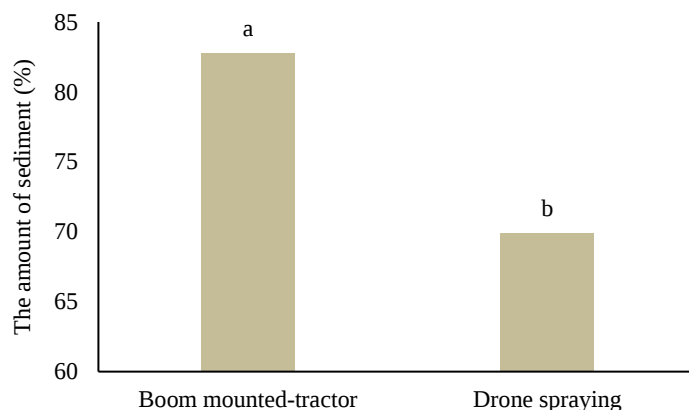
Equivalent Uniform Annual Cost (EUAC)

1- Benefit–Cost Ratio

2 - Equivalent Uniform Annual Benefit (EUAB) or

دارند. این نتایج با مطالعات سعید ظریف‌نشاط و همکاران (۲۰۲۲) هم‌خوانی دارد که نشان می‌دهد پهپاد سمپاش دارای بیشترین میزان بادبردگی و در نتیجه کمترین میزان نشست قطرات سم در مقایسه با سمپاش‌های بوم‌دارمی باشد (Zarifneshat et al., 2022).

شکل ۳ اثر نوع سمپاش (سمپاش بوم‌دار و پهپاد) بر شاخص میزان نشست را نشان می‌دهد. میانگین میزان نشست در حالت سمپاش بوم‌دار برابر با ۸۲/۷ درصد و در حالت سمپاشی با پهپاد برابر با ۶۹/۹ درصد به‌دست آمد که از نظر آماری تفاوت معنی‌داری با هم



شکل ۳- اثر نوع سمپاش بر پارامترهای فنی سمپاشی: نمودار میزان نشست

Fig. 3. Effect of sprayer type on technical spraying parameters: settlement rate diagram

گندم در هر دو سمپاش نسبت به شاهد در سطح یک درصد معنی‌دار شدند. با توجه به معنی‌دار شدن اثر سمپاشی بر وزن خشک علف‌های هرز، شاخص برداشت در این دو تیمار سمپاشی نسبت به شاهد مقدار بالاتری به خود اختصاص دادند.

جدول ۲ تجزیه واریانس، اثر تیمار نوع سمپاش در مبارزه با علف‌های هرز در مزارع گندم را نشان می‌دهد. این جدول نشان داد که اثر این تیمارها بر تراکم (تعداد) علف‌های هرز در مزرعه معنی‌دار نشد اما وزن ماده خشک علف‌های هرز و شاخص برداشت مزرعه

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر دو تیمار سمپاشی بوم‌دار و پهپاد سمپاش نسبت به تیمار شاهد، جهت کنترل علف‌های هرز در مزرعه گندم

Table 2- Analysis of Variance (ANOVA) of the effects of boom and drone spraying treatments compared to the control treatment on weed control in wheat fields

پارامترها Parameters	منابع تغییرات Source of variation	مجموع مربعات Sum of squares	میانگین مربعات Mean square	F	Sig.
تعداد علف‌های هرز Number of weeds	بین گروهی Between groups	324.22	162.11	4.17	0.073 ^{ns}
	درون گروهی Within groups	233.33	38.89		
	کل Total	557.55			
وزن ماده خشک علف‌های هرز Dry matter weight of weeds	بین گروهی Between groups	97068.22	48538.11	23.99	0.001 ^{**}
	درون گروهی Within groups	12135.33	2022.55		
	کل Total	109203.55			
شاخص برداشت Harvest Index	بین گروهی Between groups	40.93	20.46	11.26	0.009 ^{**}
	درون گروهی Within groups	10.9	1.81		

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

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

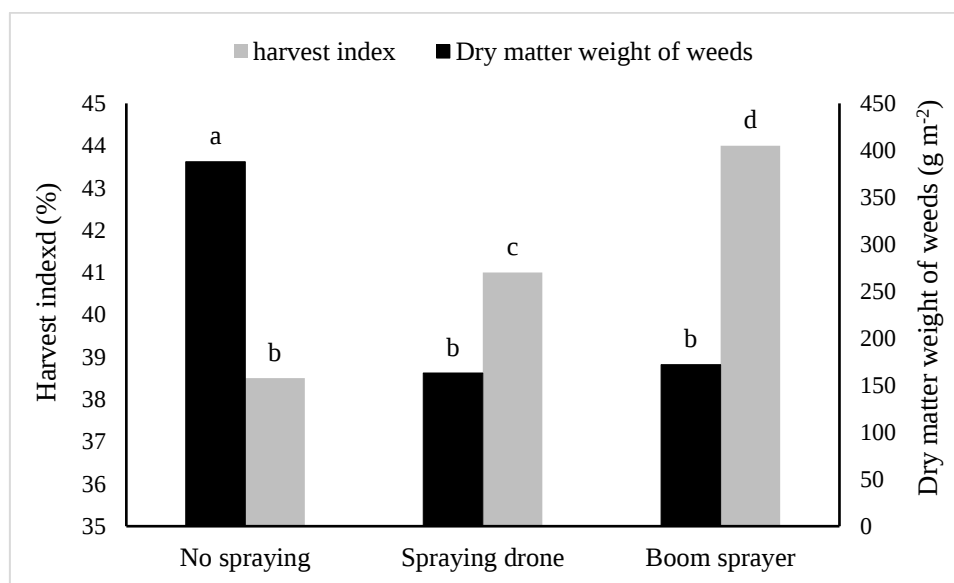
میانگین تراکم علف‌های هرز در سمپاش بوم‌دار ۲۵ و در سمپاشی با پهپاد سمپاش ۲۹/۳ به‌دست آمد.

این یافته‌ها بیانگر آن است که هر دو روش سمپاشی در کنترل علف‌های هرز کارآمد بوده‌اند. با این حال، سمپاش بوم‌دار به دلیل حجم بیشتر پخش در مزرعه و پوشش کامل‌تر علف‌های هرز، به نظر می‌رسد که اثربخشی آن زودتر و مدت طولانی‌تری بوده است. این امر سبب شده است که رقابت علف‌های هرز با گندم زودتر کنترل گردد و شاخص برداشت مطلوب‌تری در سمپاش بوم‌دار حاصل شود.

نتایج این پژوهش با یافته‌های ظریف‌نشاط و همکاران که عملکرد پهپاد سمپاش را در مقایسه با سمپاش بوم‌دار تراکتوری و سمپاش توربینی بررسی کرده بودند، هم‌خوانی دارد. آن‌ها نیز اثربخشی مشابهی برای هر دو روش گزارش کرده‌اند (Zarifneshat et al., 2022).

شکل ۴ تأثیر نوع سمپاش (سمپاش بوم‌دار و پهپاد) را بر وزن ماده خشک علف‌های هرز و شاخص برداشت در مقایسه با تیمار شاهد نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که وزن ماده خشک علف‌های هرز در هر دو روش سمپاشی به‌طور معناداری کمتر از تیمار شاهد است. میانگین وزن ماده خشک علف‌های هرز در سمپاش بوم‌دار برابر با ۱۷۲ گرم بر مترمربع و در سمپاشی با پهپاد سمپاش برابر با ۱۶۳ گرم بر مترمربع بوده و از نظر آماری تفاوت معناداری نداشته‌اند.

علاوه بر این، شاخص برداشت نیز در هر دو روش سمپاشی نسبت به تیمار شاهد بهبود یافته است. میانگین شاخص برداشت در سمپاش بوم‌دار ۴۴ و در سمپاشی با پهپاد سمپاش ۴۱ بوده است که از نظر آماری تفاوت معناداری را نشان داده‌اند. همچنین، تراکم علف‌های هرز در این دو روش سمپاشی تفاوت معناداری نداشت؛ به‌طوری‌که



شکل ۴- اثر روش‌های سمپاشی نسبت به شاهد بر شاخص برداشت و وزن خشک علف‌های هرز در مزرعه گندم

Fig. 4. Effect of spraying methods compared to control on harvest index and dry weight of weeds in wheat fields

سمپاش نسبت به شاهد در سطح یک درصد معنی‌دار شدند. با توجه به معنی‌دار شدن اثر سمپاشی بر بیماری زنگ زرد گندم، شاخص برداشت در این دو تیمار نسبت به شاهد مقدار بالاتری به خود اختصاص دادند.

جدول ۳ تجزیه واریانس، اثر نوع سمپاش در مبارزه با بیماری زنگ زرد گندم را نشان می‌دهد. نتایج این جدول نشان داد که درصد بوته‌های آلوده بیماری زنگ زرد غیرمعنی‌دار اما شاخص‌های شدت آلودگی بیماری زنگ زرد، و شاخص برداشت مزرعه گندم در دو نوع

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر دو تیمار سمپاشی بوم‌دار و پهپاد نسبت به شاهد، جهت مبارزه با بیماری زنگ زرد گندم

Table 3- Analysis of Variance (ANOVA) of the effects of boom and drone spraying treatments compared

to control on yellow rust disease in wheat fields

پارامترها Parameters	منابع تغییرات Source of variation	مجموع مربعات Sum of squares	میانگین مربعات Mean square	F	Sig.
درصد بوته‌های آلوده Infected plants percentage	بین گروهی Between groups	1.56	0.78	0.101	0.905 ^{ns}
	درون گروهی Within groups	46	7.67		
	کل Total	47.56			
شدت آلودگی Infection severity	بین گروهی Between groups	3296.22	1648.11	69.63	0.000**
	درون گروهی Within groups	142	23.66		
	کل Total	3438.22			
شاخص برداشت Harvest Index	بین گروهی Between groups	88.14	44.07	101.71	0.000**
	درون گروهی Within groups	2.6	0.43		
	کل Total	90.7			

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

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

جلوگیری کامل از آن. این یافته‌ها نشان می‌دهند که سم تیلیت می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مؤثر در مدیریت بیماری زنگ زرد استفاده شود، اما برای جلوگیری کامل از آلودگی، زمان‌بندی مناسب سم‌پاشی و استفاده از روش‌های پیش‌گیرانه دیگر ضروری است. میانگین شاخص برداشت در هر دو روش سم‌پاشی نسبت به تیمار شاهد بهتر بود. این میزان در سم‌پاش بوم‌دار برابر با ۴۰/۷ و در سم‌پاشی با پهباد برابر با ۴۳/۸ به‌دست آمد که از نظر آماری تفاوت معناداری دارند. بیماری زنگ زرد تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد گندم دارد و عامل آن *Puccinia striiformis f. sp. tritici* یکی از مخرب‌ترین بیماری‌های گندم نان در سطح جهانی به‌شمار می‌رود. این بیماری به‌عنوان تهدیدی دائمی برای تولید گندم در بسیاری از کشورهای آسیای مرکزی و غربی شناخته می‌شود (Safavi, 2019).

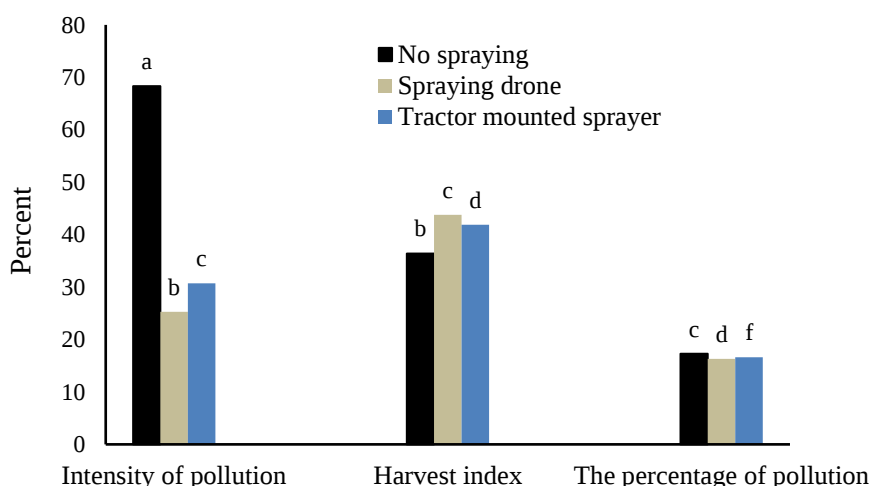
نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهند که نوع سم‌پاش (بوم‌دار و پهباد) در کنترل بیماری زنگ زرد مؤثر بوده و در نهایت موجب بهبود شاخص برداشت در مزارع سم‌پاشی‌شده نسبت به مزارع شاهد گردیده است. این یافته‌ها با نتایج سایر مطالعات موجود هم‌راستا هستند (Safavi, 2019). همچنین، نتایج این مطالعه با نتایج مطالعات لوست فیهو و همکاران و سوبرامانیان و همکاران هم‌خوانی دارد. این مطالعات بیان می‌کنند که به‌کارگیری فناوری‌های نوین، به‌ویژه استفاده از

شکل ۵، اثر نوع سم‌پاش (سم‌پاش بوم‌دار و پهباد) بر سه شاخص شدت آلودگی بیماری زنگ زرد، درصد بوته‌های آلوده به این بیماری و شاخص برداشت مزرعه گندم را نسبت به تیمار شاهد نشان می‌دهد. مطابق با این شکل، میانگین شدت آلودگی بیماری زنگ زرد در سم‌پاش بوم‌دار و سم‌پاشی با پهباد نسبت به تیمار شاهد بیشتر است. این میانگین در حالت سم‌پاش بوم‌دار برابر با ۳۰/۷ درصد و در سم‌پاشی با پهباد برابر با ۲۵/۳ درصد به‌دست آمد که از نظر آماری تفاوت معناداری دارند. همچنین، میانگین درصد بوته‌های آلوده به بیماری زنگ زرد در سم‌پاش بوم‌دار و پهباد به‌ترتیب ۱۶/۶۷ و ۱۶/۳ به‌دست آمد که از نظر آماری تفاوت معناداری ندارند.

نتایج تحقیق نشان می‌دهند که استفاده از سم تیلیت به‌عنوان یک قارچ‌کش مؤثر در کنترل بیماری زنگ زرد (*Puccinia striiformis*) در هر دو روش سم‌پاشی (سم‌پاش بوم‌دار و پهباد سم‌پاش) از گسترش قارچ جلوگیری کرده است. همچنین، مزارع سم‌پاشی‌شده نسبت به مزارع شاهد آلودگی کمتری به این قارچ داشتند که این کاهش آلودگی به دلیل اثربخشی این سم در مهار گسترش قارچ بوده است. با این حال، به نظر می‌رسد که تمامی بوته‌ها قبل از انجام سم‌پاشی به‌صورت نهان به بیماری زنگ زرد آلوده شده بودند. بنابراین، نقش سم‌پاشی، بیشتر در کاهش سرعت گسترش و شدت آلودگی بوده است تا

و اثر باد ایجادشده توسط روتورهای پهپاد باشد. در سمپاشی با پهپاد، نفوذ محلول سم به تمام قسمت‌های گیاه به دلیل باد ایجادشده توسط روتورها کنترل آلودگی بهتری نشان داد، که با نتایج مطالعات قبلی هم‌خوانی دارد (Iost Filho, Heldens, Kong & Lango, 2020; Subramanian, Pazhanivelan, Srinivasan, Santhi & Sathiah, 2021).

پهپاد، می‌تواند به بهبود کارایی کنترل آفات، کاهش استفاده از مواد شیمیایی و نهایتاً کمک به مدیریت بهتر آفات و بیماری‌ها منجر شود. بر اساس نتایج این تحقیق، گرچه از نظر مبارزه با بیماری زنگ زرد در دو روش سمپاشی تفاوتی مشاهده نشد، اما در شاخص برداشت، استفاده از پهپاد نسبت به سمپاش بوم‌دار عملکرد بهتری داشت که به نظر می‌رسد این تفاوت به دلیل نفوذ بهتر محلول سم به داخل مزرعه



شکل ۵- اثر روش‌های سمپاشی نسبت به شاهد بر درصد بوته‌های آلوده، شدت آلودگی و شاخص برداشت در مبارزه با بیماری زنگ زرد گندم
Fig.5. Effect of spraying methods compared to control on the percentage of infected plants, infection intensity, and harvest index in controlling yellow rust disease in wheat fields

متغیر به‌دست آمده است. مجموع هزینه‌های ثابت و متغیر استفاده از پهپاد و تجهیزات جانبی سالانه ۲۹۸۰/۳ میلیون ریال و مجموع هزینه‌های استفاده از سمپاش بوم‌دار ۵۱۳/۴۸ میلیون ریال محاسبه شد.

ارزیابی شاخص‌های اقتصادی

هزینه کل سمپاشی (هزینه سالیانه)

در جدول ۴ کل هزینه‌های سالیانه استفاده از دو نوع سمپاش شامل هزینه‌های اولیه (سرمایه اولیه) و همچنین هزینه‌های ثابت و

جدول ۴- کل هزینه‌های سالیانه مالکیت سمپاشی مزرعه گندم با کاربرد دو نوع سمپاش پهپاد و مرسوم

Table 4- Total annual costs of wheat field spraying using drone and conventional sprayers

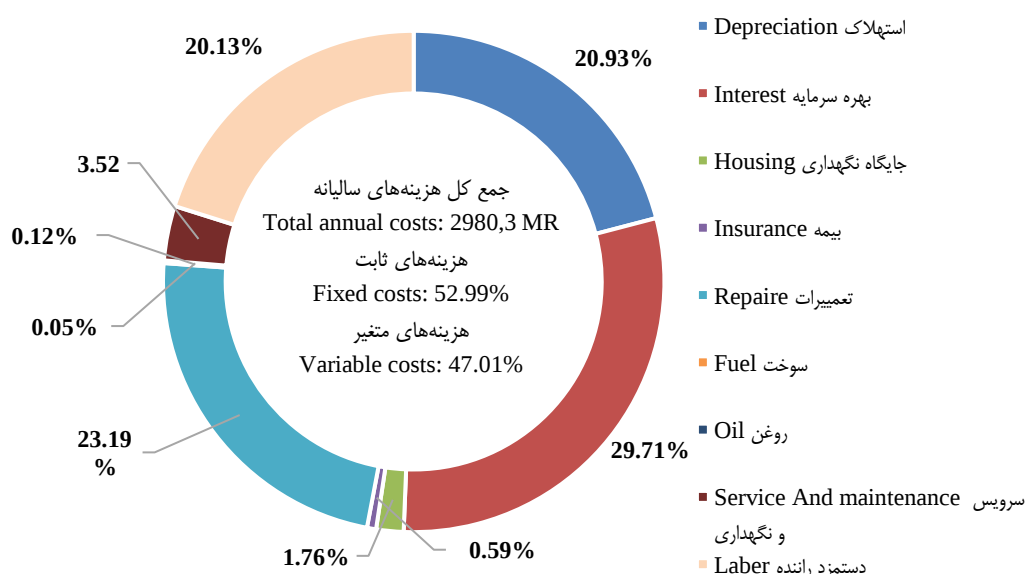
هزینه‌ها Costs	نوع هزینه Cost type	پهپاد سمپاش Drone sprayer (Million rials per year)		سمپاش بوم‌دار Boom sprayer (Million rials per year)		سمپاش بوم‌دار Boom sprayer
		پهپاد Drone	ژنراتور Generator	تراکتور (کل عملیات‌ها) Tractor (total costs)	تراکتور (سهام هزینه‌ای عملیات سمپاشی: ۱۳/۴٪ از کل عملیات‌ها است) Tractor (Cost share of spraying operations: 13.4% of total operations)	
هزینه اولیه Initial cost	سرمایه اولیه Initial capital	6700	300	6000	897.8	700
	جمع Sum		7000		1597.8	

هزینه‌های ثابت	استهلاک	603	20.7	415	55.61	63
Fixed costs	Depreciation					
	بهره سرمایه	847.55	37.95	795	101.7	88.55
	Interest					
	جایگاه نگهداری					
	ماشین	50.25	2.25	45	6.03	5.25
	Housing					
	بیمه	16.75	0.75	15	2.01	1.75
	Insurance					
	جمع هزینه‌های ثابت	1517.55	61.65		165.35	158.55
	Total Fixed costs		1579.2		323.9	
	تعمیرات	670	21	420	56.28	49
	Repaire					
	سوخت	0	3.6	1.8	0.24	0
	Fuel					
	روغن	0	1.5	9	1.2	0
	Oil					
هزینه‌های متغیر	سرویس و نگهداری	100.5	4.5	90	12.06	10.5
Variable costs	Service and maintenance					
	دستمزد راننده	600	0	450	60.3	0
	Labor					
	جمع هزینه‌های متغیر	1370.5	30.6		130.08	59.5
	Total Variable costs		1401.1		189.58	
	جمع کل هزینه‌های سالیانه	2888.05	92.25		295.43	218.05
	Total annual costs		2980.3 (MR yr ⁻¹)		513.48 (MR yr ⁻¹)	
			4.846 (MR ha ⁻¹)		3.789 (MR ha ⁻¹)	

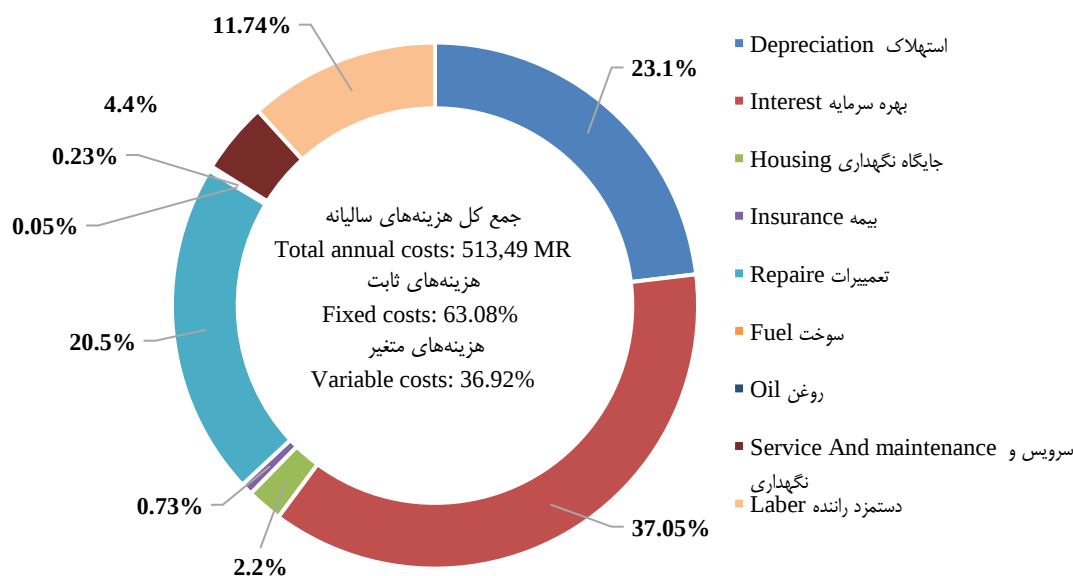
شکل ۶ نمودار درصد هزینه‌های ثلث و متغیر سالیانه در سمپاشی با پهپاد را نشان می‌دهد. هزینه‌های ثابت در این روش برابر با ۱۵۷۹/۲ میلیون ریال (۵۲/۹۹ درصد از هزینه کل) و هزینه‌های متغیر برابر با ۱۴۰۱/۱ میلیون ریال (۴۷/۰۱ درصد از هزینه کل) است. بیشترین سهم هزینه در این نوع سمپاشی مربوط به بهره سرمایه، معادل ۱۹۰/۲۵ میلیون ریال (۳۷/۰۵ درصد از هزینه کل)، و در رتبه دوم، هزینه استهلاک با ۱۱۸/۶۱ میلیون ریال (۲۳/۱ درصد از هزینه کل) است. این داده‌ها نشان‌دهنده سهم بالاتر هزینه‌های ثابت نسبت به متغیر در سمپاش بوم‌دار است. به‌طور کلی، تحلیل داده‌ها بیانگر آن است که سمپاشی با پهپاد به دلیل هزینه‌های بالای تعمیرات و بهره سرمایه، هزینه‌های سالیانه و هکتاری بیشتری در مقایسه با سمپاشی بوم‌دار به خود اختصاص می‌دهد.

در مقابل، هزینه‌های ثابت در سمپاش بوم‌دار معادل ۳۲۳/۹ میلیون ریال (۶۳/۰۸ درصد از هزینه کل) و هزینه‌های متغیر برابر با ۱۵۷۹/۲ میلیون ریال (۵۲/۹۹ درصد از هزینه کل) و هزینه‌های متغیر برابر با ۱۴۰۱/۱ میلیون ریال (۴۷/۰۱ درصد از هزینه کل) است. بیشترین سهم هزینه در این نوع سمپاشی مربوط به بهره سرمایه، معادل ۸۸۵/۵ میلیون ریال (۲۹/۷۱ درصد از هزینه کل) است و در رتبه دوم، هزینه تعمیرات با میزان ۶۹۱ میلیون ریال (۲۳/۱۹ درصد از هزینه کل) قرار دارد. افزایش هزینه تعمیرات عمدتاً به دلیل هزینه تعویض باتری است.

در مقابل، هزینه‌های ثابت در سمپاش بوم‌دار معادل ۳۲۳/۹ میلیون ریال (۶۳/۰۸ درصد از هزینه کل) و هزینه‌های متغیر برابر با



شکل ۶- درصد هزینه‌های ثابت و متغیر سالیانه در سم‌پاشی با پهپاد
Fig. 6. The annual fixed and variable costs percentage in drone spraying



شکل ۷- درصد هزینه‌های ثابت و متغیر سالیانه در سم‌پاشی بوم‌دار
Fig. 7. The annual fixed and variable costs percentage in boom spraying

نسبت منافع به هزینه

جدول ۵ خلاصه اطلاعات هزینه‌ها و درآمدها و همچنین شاخص منفعت به هزینه در دو سم‌پاش بوم‌دار و پهپاد را نشان می‌دهد. مطابق این جدول، میزان کارکرد پهپاد ۴/۵ برابر بیشتر از سم‌پاش بوم‌دار است (البته ۱۳/۴ درصد از کارکرد تراکتور در سال به عملیات سم‌پاشی اختصاص می‌یابد و ۸۶/۶ درصد از کارکرد تراکتور مربوط به سایر

عملیات‌ها است) و همچنین متوسط دستمزد سم‌پاشی با پهپاد ۱/۵ برابر سم‌پاش بوم‌دار می‌باشد. میانگین درآمد سالانه در به‌کارگیری و مالکیت پهپاد در منطقه ۳۶۲۲/۳۵ میلیون ریال و برای سم‌پاش بوم‌دار ۵۲۹/۱۲ میلیون ریال به‌دست آمد. میانگین هزینه سالیانه به‌کارگیری و مالکیت پهپاد (۲۹۸۰/۳) میلیون ریال) بیشتر از سم‌پاش بوم‌دار (۵۱۳/۴۸) میلیون ریال) است. شاخص منفعت به هزینه این جدول

هستند. استقبال بیشتر کشاورزان از فناوری پهپاد، قابلیت کارکرد پهپاد در شرایط نامطلوب رطوبتی مزرعه، عدم لهیدگی محصول در زمان استفاده از دلایل اصلی این منفعت بیشتر است. بنابراین، استفاده از پهپادها می‌تواند به‌طور قابل توجهی بهره‌وری و سودآوری عملیات سم‌پاشی را افزایش دهد.

نشان داد که به‌کارگیری هر دو سم‌پاش در منطقه بر اساس میانگین کارکرد سالیانه اقتصادی است، زیرا این شاخص در هر دو سم‌پاش بیشتر از ۱ به‌دست آمد. شاخص منفعت به هزینه در پهپاد (۱/۲۱۵) بهتر از سم‌پاش بوم‌دار (۱/۰۳) شد. درمجموع نتایج نشان می‌دهد که پهپادها، با وجود هزینه‌های بالاتر، به دلیل کارایی و درآمدزایی بیشتر، گزینه‌های اقتصادی‌تر برای سم‌پاشی در مقایسه با سم‌پاش‌های بوم‌دار

جدول ۵- خلاصه میانگین اطلاعات کارگرد، دستمزد و شاخص منفعت به هزینه در سم‌پاش‌ها

Table 5- Summary of Average Labor Information, Wages, and Benefit-Cost Ratio in Sprayers

نوع سم‌پاش Type of sprayer	میانگین کارکرد سالانه Average annual operation (ha)	میانگین دستمزد Average salary (MR ha ⁻¹)	میانگین درآمد Average income (MR yr ⁻¹)	میانگین هزینه Average cost (MR yr ⁻¹)	شاخص منفعت به هزینه Benefit-cost index
پهپاد Drone	615	5.89	3622.35	2980.3	1.215
سم‌پاش بوم‌دار Boom sprayer	135.5	3.905	529.12	513.48	1.030

نامطلوب رطوبتی مزرعه، عدم لهیدگی محصول در زمان استفاده و دستمزد بالاتر به‌کارگیری پهپاد از دلایل اصلی این منفعت بیشتر است. بنابراین، استفاده از پهپادها می‌تواند به‌طور قابل توجهی بهره‌وری و سودآوری عملیات سم‌پاشی را افزایش دهد.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان می‌دهد که سم‌پاش بوم‌دار به دلیل میزان نشست سم بالاتر نسبت به سم‌پاشی با پهپاد کارایی بیشتری دارد. میانگین تراکم علف‌های هرز در سم‌پاش بوم‌دار ۲۵ عدد و در سم‌پاشی با پهپاد ۲۹/۳ بود که از نظر آماری تفاوت معناداری داشت. میانگین شاخص برداشت در سم‌پاش بوم‌دار ۴۴ و در سم‌پاشی با پهپاد ۴۱ بود که تفاوت آماری معناداری داشت. شاخص‌های شدت آلودگی، درصد بوته‌های آلوده و شاخص برداشت در دو نوع سم‌پاش نسبت به شاهد در سطح یک درصد معنی‌دار شدند. میانگین شدت آلودگی در سم‌پاش بوم‌دار ۳۰/۷ درصد و در پهپاد ۲۵/۳ درصد بود. شاخص برداشت مزارع سم‌پاشی شده با پهپاد (۴۳/۸) بهتر از سم‌پاش بوم‌دار (۴۱/۹) بود که تفاوت آماری معناداری داشت. همچنین درصد میزان نشست سم در سم‌پاش بوم‌دار بهتر از سم‌پاشی با پهپاد بود. مجموع هزینه‌های ثابت و متغیر استفاده از پهپاد و تجهیزات جانبی سالانه آن ۲۹۸۰/۳ میلیون ریال در سال و برای سم‌پاش بوم‌دار ۵۱۳/۴۸ میلیون ریال در سال محاسبه شد. شاخص منفعت به هزینه در پهپاد (۱/۲۱۵) بهتر از سم‌پاش بوم‌دار (۱/۰۳۰) بود. در مجموع با توجه به شاخص منفعت به هزینه، نتایج نشان می‌دهد که پهپادها، با وجود هزینه‌های بالاتر، به دلیل کارایی و درآمدزایی بیشتر، گزینه‌های اقتصادی‌تری برای سم‌پاشی در مقایسه با سم‌پاش‌های بوم‌دار در این منطقه و احتمالاً در ایران هستند. استقبال بیشتر کشاورزان از فناوری پهپاد، قابلیت کارکرد پهپاد در شرایط

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. هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد.

مشارکت نویسندگان

مجتبی صفائی نژاد: جمع‌آوری داده‌ها، خدمات نرم‌افزاری، استخراج و تهیه متن اولیه
 محمود قاسمی نژاد رائینی: نظارت و مدیریت، مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، پردازش داده‌ها، ویرایش متن، تحلیل آماری، مشاوره فنی و تحلیل آماری
 مرتضی تاجی: نظارت و مدیریت، مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، ویرایش متن و مشاوره فنی

References

- Alipour, A., Karimmojeni, H., Zali, A. G., Razmjoo, J., & Jafari, Z. (2022). Weed management in *Allium hirtifolium* L. production by herbicides application. *Industrial Crops and Products*, 177, 114407.

- <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114407>
2. Almasi, M., Kiani, S., & Louimi, N. (2014). *Fundamentals of agricultural mechanization*. Gofteman Andisheh moaserPress
 3. American Society of Agricultural Engineers. (2011). ASAE D497.7: Agricultural machinery management data. St. Joseph, MI: ASAE. Retrieved from: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=36431>
 4. Baweja, P., Kumar, S., & Kumar, G. (2020). Fertilizers and Pesticides: Their Impact on Soil Health and Environment. In *Soil Health* (pp. 265-285). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44364-1_15
 5. BehzadiPour, F., Ghasemi Nejad Raeini, M., Asoodar, M. A., Marzban, A., & Abdanan Mehdizadeh, S. (2017). Regression study of technical factors of drift and droplet diameter in spraying using laboratory and software methods. *Iranian Journal of Biosystems Engineering* (pp. 101-109). <https://doi.org/10.22059/ijbse.2017.61565>
 6. Berner, B., & Chojnacki, J. (2017). Influence of the air stream produced by the drone on the sedimentation of the liquid sprayed that contains entomopathogenic nematodes. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 3, 1-8.
 7. Boatwright, H., Zhu, H., Clark, A., & Schnabel, G. (2020). Evaluation of the Intelligent Sprayer System in peach production. *Plant Disease*, 104(12), 3207-3212. <https://doi.org/10.1094/PDIS-04-20-0696-RE>
 8. Daum, T. (2023). Mechanization and sustainable agri-food system transformation in the Global South. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 43,16. <https://doi.org/10.1007/s13593-023-00868-x>
 9. Dear, B. S., Sandral, G. A., Spencer, D., Khan, M. R. I., & Higgins, T. J. V. (2003). The tolerance of three transgenic subterranean clover (*Trifolium subterraneum* L.) lines with the bxn gene to herbicides containing bromoxynil. *Australian Journal of Agricultural Research*, 54(3), 203-210. <https://doi.org/10.1071/AR02134>
 10. Dou, H., Zhang, C., Li, L., Hao, G., Ding, B., Gong, W., & Huang, P. (2018). Application of variable spray technology in agriculture. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 186(5), 012007. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/186/5/012007>
 11. Eskouinejad, M. M. (2020). Engineering Economics (Economic Evaluation of Industrial Projects).
 12. 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(2), 123-135. (in Persian). <https://doi.org/10.22067/jam.2023.84946.1198>
 13. Garcerá, 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>
 14. Ghaseminejad Raeini, M., Sheikh Davoodi, M., Almasi, M., Bahrami, H., Zand, E., & Alamisaieid, K. (2014). Effects of tillage, fertilization and weed control methods on corn yield in the northern part of Khuzestan. *World Applied Sciences Journal*, 20(4), 502-511. https://agrieng.scu.ac.ir/article_10475.html?lang=en
 15. Gil, E., Gallart, M., Llorens, J., & Balsari, P. (2013). Ground deposition and airborne spray drift assessment in vineyard and orchard: The influence of environmental variables and sprayer settings. *Sustainability*, 9(5), 728. <https://doi.org/10.3390/su9050728>
 16. Hamuda, E., Glavin, M., & Jones, E. (2016). A survey of image processing techniques for plant extraction and segmentation in the field. *Computers and Electronics in Agriculture*, 125, 184-199. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.04.024>
 17. Hercher-Pasteur, J., Loiseau, E., Sinfort, C., & Helias, A. (2020). Energetic assessment of the agricultural production system. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 40, 29. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00627-2>
 18. Iost Filho, F. H., Heldens, W. B., Kong, Z., & de Lange, E. S. (2020). Drones: Innovative technology for use in precision pest management. *Journal of Economic Entomology*, 113(1), 1-7. <https://doi.org/10.1093/jee/toz268>
 19. Jafar, A., Bibi, N., Naqvi, R. A., Sadeghi-Niaraki, A., & Jeong, D. (2024). Revolutionizing agriculture with artificial intelligence: Plant disease detection methods, applications, and their limitations. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1356260. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1356260>
 20. Khan, B. A., Nadeem, M. A., Nawaz, H., Amin, M. M., Abbasi, G. H., Nadeem, M., Ali, M., Ameen, M., Javaid, M. M., Maqbool, R., Ikram, M., & Ayub, M. A. (2023). Pesticides: Impacts on agriculture productivity, environment, and management strategies. In T. Aftab (Ed.), *Emerging contaminants and plants* (pp. 109-134). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22269-6_5
 21. Lu, X., Campos, J., Salas, B., Fabregas, F. X., Zhu, H., & Gil, E. (2023). Advanced spraying systems to improve pesticide saving and reduce spray drift for apple orchards. *Precision Agriculture*, 24(3), 567-582. <https://doi.org/10.1007/s11119-023-10007-x>
 22. Mansfield, B., Werner, M., Berndt, C., Shattuck, A., Galt, R., Williams, B., Argüelles, L., Barri, F. R., Ishii, M., Kunin, J., Lapegna, P., Romero, A., Caicedo, A., Abhigya, Castro-Vargas, M. S., Marquez, E., Ojeda, D., Ramirez, F., & Tittor, A. (2023). A new critical social science research agenda on pesticides. *Agriculture and Human Values*, 41, 395-412. <https://doi.org/10.1007/s10460-023-10492-w>
 23. Mozaffari Gonbari, M., Yosefzadeh Taheri, M. R., & Soleymani, J. (2019). Investigation of technical performance and efficiency of different backpack sprayers on onion thrips control. *Agricultural Mechanization Journal*, 4(2), 121-

132. https://jam.tabrizu.ac.ir/article_9589.html?lang=en
24. Orak, H., Abdanan Mehdizadeh, S., Asoodar, M. A., & Elahifard, E. (2021). Design, construction, and evaluation of an automatic sprayer system for online weed-plant detection in sugar beet fields. <https://doi.org/10.22092/jsb.2022.355302.1298>
25. Patil, A. S., & Mailapalli, D. R. (2020). Fertilizers and pesticides: Their impact on soil health and environment. In *Sustainable Agriculture* (pp. 345-367). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44364-1_15
26. Patil, A. S., Mailapalli, D. R., & Singh, P. K. (2024). Drone technology reshaping agriculture: A meta-review and bibliometric analysis on fertilizer and pesticide deployment. *Journal of Biosystems Engineering*, 24(3), 567-582. <https://doi.org/10.1007/s42853-024-00240-1>
27. Pergher, G., & Petris, R. (2001). The effect of air flow rate on spray deposition in a Guyot-trained vineyard. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 78(3), 335-345.
28. Porker, K., Straight, M., & Hunt, J. R. (2020). Evaluation of G× E× M interactions to increase harvest index and yield of early sown wheat. *Frontiers in Plant Science*, 11, 994. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00994>
29. Rezaei Moradali, M., Eivazi, A. R., & Shir Alizadeh, S. (2020). Effect of yellow rust disease on agronomic and physiological characteristics of winter and facultative bread wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 22(1), 81-93. <https://doi.org/10.29252/abj.22.1.81>
30. Safavi, S. (2019). Evaluation of wheat resistance genes to yellow rust disease and pathogenicity factors of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* over two years in Ardabil. *Applied Research in Plant Protection (Agricultural Science)*, 8(3), 95-107. https://arpp.tabrizu.ac.ir/article_9730.html
31. Salcedo, R., Pons, P., Llop, J., Zaragoza, T., Campos, J., Ortega, P., Gallart, M., & Gil, E. (2019). Dynamic evaluation of airflow stream generated by a reverse system of an axial fan sprayer using 3D-ultrasonic anemometers. Effect of canopy structure. *Computers and Electronics in Agriculture*, 163, 104851. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.06.006>
32. Shabani, A., & Sepaskhah, A. R. (2019). Reviewing the harvest index estimation in crop modeling. *Iran Agricultural Research*, 38(2), 1-8. <https://doi.org/10.22099/iar.2019.5455>
33. 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*, 746, 139118. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139118>
34. Springmann, M., Clark, M., Mason-D'Croz, D., Wiebe, K., Bodirsky, 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>
35. Subramanian, K. S., Pazhanivelan, S., Srinivasan, G., Santhi, R., & Sathiah, N. (2021). Drones in insect pest management. *Frontiers in Agronomy*, 3, 640885. <https://doi.org/10.3389/fagro.2021.640885>
36. 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>
37. Tillett, N. D., Hague, T., Grundy, A. C., & Dedousis, A. P. (2008). Mechanical within-row weed control for transplanted crops using computer vision. *Biosystems Engineering*, 99(2), 171-178. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.09.026>
38. Usigbe, J., Asem-Hiablle, S., Uyeh, D. D., Iyiola, O., Park, T., & Mallipeddi, R. (2024). Enhancing resilience in agricultural production systems with AI-based technologies. *Environment, Development and Sustainability*, 26, 21955-21983. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03588-0>
39. Ying, K. C., & Tsai, Y. J. (2017). Minimising total cost for training and assigning multiskilled workers in seru production systems. *International Journal of Production Research*, 55(10), 2978-2989. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1277594>
40. Zarifneshat, S., Saeidirad, M. H., Safari, M., Motame AlShariati, H. R., & Naseri, M. (2022). Tecnical Evaluation of Agriculture drone sprayer for control of wheat weeds and comparison with conventional methods. *Agriculture System and Machanizatoin Research*, 23(82), 53-70. <https://doi.org/10.22092/amsr.2022.360045.1427>
41. Zhang, R., Hewitt, A. J., Chen, L., Li, L., & Tang, Q. (2016). Challenges and opportunities of unmanned aerial vehicles as a new tool for crop pest control. *Pest Management Science*, 72(11), 4123-4131. <https://doi.org/10.1002/ps.7683>