

Research Paper

Technical and Economic Evaluation of Spraying Drones and Turboliner Sprayers in the Control of Sunn Pest in Wheat Fields of Isfahan Province

Mohsen Heidarisoltanabadi ^{1*}, Mohammad Hossein Saeedi Rad ², Abdollah Imanmehr ³, Davood Momeni ⁴, Mohammad Hasan Beshart Nejad ⁵

^{1,4} Associate professor, Agricultural Engineering Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Isfahan, Iran

² Associate professor, Agricultural Engineering Research Department, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Khorasan Razavi, Iran

³ Assistant professor, Agricultural Engineering Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Isfahan, Iran

⁵ Assistant professor, Plant Protection Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center (AREEO), Isfahan, Iran

Article information

Extended Abstract

Received: 2025/07/20

Accepted: 2025/09/08

Keywords:

Wheat
Sunn pest
Spraying
Drone
Turboliner
Efficiency

*Corresponding
author:

mheisol@gmail.com

ORCID: 

0000-0001-7892-3487



Introduction

The increasing global population has made ensuring food security a critical challenge. Given the limited availability of water, energy, and arable land, improving the efficiency of agricultural production at various stages, including pest management, is essential to meet human food demands. Drones (UAVs) have been employed in agriculture since the 1980s, yet their application in pesticide spraying has notably expanded over the last two decades due to advancements in navigation systems, artificial intelligence, and high-capacity batteries. Drone-based spraying offers numerous benefits, including reduced fuel consumption, lower noise and chemical pollution, enhanced precision, and improved safety for operators. Despite these advantages, conventional methods such as manual mechanical sprayers remain widely used in many regions. These traditional approaches present several challenges, including excessive pesticide usage, labor shortages, low uniformity of application, environmental contamination, limited coverage efficiency, high operational costs, and lower effectiveness in pest control. Consequently, adopting drones in agriculture presents a promising solution to overcome these limitations. This study aims to evaluate and compare the technical and economic efficiency of two pesticide application methods,

<https://dx.doi.org/10.22034/jrmam.2025.15317.760>

modern (drone) and conventional (turboliner), for controlling wheat sun pest in Isfahan province. The novelty of this research lies in the simultaneous assessment of technical indicators, such as spray uniformity and field capacity, and economic factors, including operational costs and crop damage, which have received comparatively little attention in previous studies. By integrating both technical and economic perspectives, the study provides a comprehensive evaluation of drone applications in agricultural pest management.

Method

This study compared the efficiency of a spraying drone and a conventional Turboliner sprayer in controlling Sunn pest in wheat fields of Isfahan Province. Two one-hectare wheat fields were selected, with one treated using a tractor-mounted Turboliner and the other using a spraying drone, targeting both nymphs and adult Sunn pests. During and after spraying, multiple performance parameters were evaluated, including effective working width, solution consumption, spraying time, theoretical and effective field capacity, spray quality coefficient, spraying efficiency, wheat crop crushing percentage, and crop losses caused by Sunn pest. Additionally, an economic comparison of the two sprayers was conducted. The technical performance results were statistically analyzed using a t-test, and economic data were compiled into comparative tables. This integrated assessment of technical and economic indicators provides a comprehensive evaluation of modern versus conventional spraying methods for effective Sunn pest management in wheat cultivation.

Results

The results showed that the average effective working width for the Turboliner and drone sprayers was 40 meters and 10 meters, respectively. Although the pesticide dose was identical for both sprayers (100–125 cc/ha), the total spray solution volume applied per hectare differed significantly. The Turboliner applied the highest volume at 250 liters/ha, whereas the drone used only 10 liters/ha, representing a statistically significant difference at the 1% level. The spraying time per hectare was 10.9 minutes for the Turboliner and 7 minutes for the drone. Field capacity was higher for the drone at 8.57 ha/h, compared to 5.5 ha/h for the Turboliner. Field efficiency was 90% for the drone and 83% for the Turboliner. Using standard wheeled tractors in the Turboliner method, and based on measurements of tractor wheel width and the number of passes during spraying, crop lodging was estimated at 1.25%. The average Number Median Diameter (NMD) of droplets was 190 microns for the drone and 281 microns for the Turboliner.

In comparison, the Volume Median Diameter (VMD) was 300 microns for the drone and 690 microns for the Turboliner. Accordingly, the spray quality coefficient (VMD/NMD) was 1.57 for the drone and 2.45 for the Turboliner, indicating significantly better spray quality for the drone. Spraying efficiency, calculated using the Henderson-Tilton formula, was 100% for both methods, confirming equal effectiveness in controlling the Sunn pest. Assessment of pest damage in wheat kernels revealed that using a drone resulted in an average yield of 7.7 tons/ha, with only 0.05% of the kernels damaged.

In contrast, the Turboliner yielded an average of 9 tons/ha, with no observed pest damage. Economic analysis indicated that the average cost of drone spraying per hectare was 1,674,740 Rials for purchase and 5,913,000 Rials for rental. For the Turboliner, these costs were 19,418,150 Rials (purchase) and 21,728,000 Rials (rental). Thus, Turboliner spraying was 3.7 times more expensive when purchased and 11.6 times more expensive when rented, compared to drone spraying. Approximately 80–90% of the cost difference was attributed to crop damage caused by tractor and sprayer movement in the field, as well as the resulting yield loss.

Conclusions

A comparative study of drone and Turboline sprayers for controlling sunn pest in wheat fields in Isfahan Province revealed that the drone's field capacity and efficiency were 56% and 8% higher, respectively, than those of the Turboline. Moreover, the water volume required for the Turboline spray solution was 25 times greater than that needed for the drone, highlighting the operational convenience of drones, especially under challenging conditions. For the drone, the number median diameter (NMD) and volume median diameter (VMD) of droplets were 37% and 59% lower, respectively, than those of the Turboline. In comparison, the spray quality coefficient was 36% higher, indicating more uniform coverage. The study also showed that using the Turboline caused at least 1.25% of the field to suffer crop lodging due to tractor and sprayer traffic, leading to irreversible yield loss. Cost analysis indicated that Turboline spraying was 11.6 times more expensive under rental conditions and 3.7 times higher under purchase conditions, with 80–90% of the additional cost attributed to yield loss due to crop damage. Overall, considering improved spray uniformity, higher field capacity, and reduced crop damage, drone sprayers are superior to Turbolines and strongly recommended for crop protection.

Author Contributions

Heidarisoltanabadi Mohsen: Conceptualization, Formal analysis, Funding acquisition, Investigation, Methodology, Resources, Supervision, Validation, Visualization, Writing – review & editing.

Saeedi Rad Mohammad Hossein: Conceptualization, Formal analysis, Investigation, Methodology, Resources, Supervision, Validation, Visualization.

Imanmehr Abdollah: Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Investigation, Methodology, Software, Validation, Visualization, Writing -original draft, Writing – review & editing.

Momeni Davood: Formal analysis, Investigation, Methodology, Software, Validation, Visualization, Writing – review & editing.

Beshart Nejad Mohammad Hasan: Formal analysis, Investigation, Methodology, Software, Validation, Visualization, Writing – review & editing.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgments

The authors would like to express their sincere gratitude to the experts of the Organization of Agricultural Jihad in Isfahan Province, especially Ms. Engineer Eslami, for their valuable support and assistance in implementing this research.

Ethical Considerations

The authors confirm that research ethics were considered throughout the research methodology, including data definition, data collection, data analysis, data interpretation, and plagiarism prevention, to ensure the final report's accuracy.

Conflict of Interest

The authors declare no financial or personal conflicts of interest related to this paper.

Funding Statement

The authors received no specific funding for this research.

How to cite this paper:

Heidarisoltanabadi, M., Saeedi Rad, M.H., Imanmehr, A, Momeni, D. and Beshart Nejad, M.H. (2025). Technical and economic evaluation of spraying drones and turboliner sprayers in the control of sunn pest in wheat fields of Isfahan province. Journal of Research in Mechanics of Agricultural Machinery. 36: 125-139. <https://dx.doi.org/10.22034/jrmam.2025.15317.760>



Authors retain the copyright and full publishing rights.

Published by [Shahrekord University](#). This article is an open access article licensed under the [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](#)



ارزیابی فنی و اقتصادی پمپا س‌پاش و توربولاینر در مبارزه با سن مزارع گندم استان اصفهان

محسن حیدری سلطان‌آبادی^{۱*}، محمد حسین سعیدی راد^۲، عبدالله ایمان‌مهر^۳، داود مومنی^۴، محمد حسن بشارت‌نژاد^۵

۱-۴- دانشیار پژوهش، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان

تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران

۲- دانشیار پژوهش، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خراسان رضوی، سازمان

تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، خراسان رضوی، ایران

۳- استادیار پژوهش، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان

تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران

۵- استادیار پژوهش، بخش تحقیقات گیاهپزشکی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و

ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۹	استفاده از س‌پاش‌های متداول در مبارزه با سن گندم، علاوه بر مصرف نسبتاً بالای سموم، موجب از بین رفتن بخشی از محصول به علت تردد تراکتور در مزرعه می‌شود. بهره‌گیری از فناوری جدید پمپا در س‌پاشی مزارع گندم علیه آفت سن، می‌تواند بیش‌تر معایب س‌پاش‌های مرسوم را حذف نماید. در این فناوری جدید با توجه به نوع نازل به کار رفته و فاصله مناسب نازل‌ها از هدف و وجود جریان هوا به سمت پایین، میزان نشست سم بر روی هدف، بالا رفته و کارایی پاشش شیمیایی افزایش می‌یابد. در تحقیق حاضر، کارایی دو روش س‌پاشی با پمپا و س‌پاش توربینی در پاشش سن گندم مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. پمپا س‌پاش مورد آزمایش، از مدل EFT با حجم مخزن ۲۰ لیتری، پمپ با دبی ۴ تا ۸ لیتر در دقیقه و نازل میکرونر بود. س‌پاش توربولاینر از نوع کششی با مخزن ۲۰۰۰ لیتری با پمپ پیستونی دیافراگمی و دبی تقریبی ۷۰ تا ۱۲۰ لیتر در دقیقه و فشار کاری ۲۰ تا ۴۰ بار بود. در زمان س‌پاشی و پس از آن، عوامل عملکردی دو نوع س‌پاش مقایسه شدند. طبق نتایج، عرض مؤثر پاشش در س‌پاش پمپا و توربولاینر به ترتیب ۱۰ و ۴۰ متر، میزان محلول مصرفی ۱۰ و ۲۵۰ لیتر، مدت زمان س‌پاشی در هر هکتار ۷ و ۱۰/۹ دقیقه، ظرفیت مزرعه ای ۸/۵۸ و ۵/۵ هکتار در ساعت، بازده مزرعه‌ای ۹۰ و ۸۳ درصد، لهیدگی محصول صفر و ۱/۲۵ درصد، قطر میانه حجمی ۳۰۰ و ۶۹۰ میکرون، قطر میانه عددی ۱۹۰ و ۲۸۱ میکرون، ضریب کیفیت پاشش ۱/۵۷ و ۲/۴۵، کارایی س‌پاشی در هر دو ۱۰۰ درصد، درصد سن‌زدگی ۰/۰۵ و صفر درصد و عملکرد گندم به صورت مساوی حدود ۹ تن در هکتار به دست آمد. برآورد هزینه‌های س‌پاشی به دو روش نشان داد که هزینه س‌پاشی با توربولاینر در حالت اجاره س‌پاش‌ها ۱۱/۶ و در صورت خرید آنها ۳/۷ برابر بیش‌تر از پمپا است که تقریباً ۸۰ تا ۹۰ درصد آن مربوط به خسارت لهیدگی محصول در اثر تردد تراکتور و س‌پاش در مزرعه است. در کل با توجه به یکنواختی پاشش بهتر، ظرفیت مزرعه‌ای بیش‌تر و حذف آفت ناشی از لهیدگی محصول در زمان س‌پاشی، استفاده از پمپا س‌پاش نسبت به س‌پاش توربولاینر ارجح و قابل توصیه است.
واژه‌های کلیدی:	
گندم	
سن گندم	
س‌پاشی	
پمپا	
توربولاینر	
کارایی	
*پست الکترونیکی نویسنده	
مسئول:	
mheisol@gmail.com	
ORCID:	
۳۴۸۷-۷۸۹۲-۰۰۰۱-۰۰۰۰	

مقدمه

افزایش روز افزون جمعیت جهان، تأمین امنیت غذایی بشر را به چالشی بزرگ تبدیل کرده است. با توجه به محدود بودن منابع آبی، انرژی و سطح قابل کشت محصولات کشاورزی، یکی از اصلی‌ترین راهکارها برای تأمین نیاز غذایی بشر، ارتقا عملکرد محصولات کشاورزی در مراحل مختلف تولید از جمله مبارزه با آفات گیاهی از طریق استفاده از فناوری‌های نوین و به روز است (Canicatti & Vallone, 2024).

در بسیاری از نقاط جهان هنوز عمدتاً از روش‌های سنتی مانند سم‌پاش دستی مکانیکی برای کاربرد سموم استفاده می‌شود. این روش‌ها علاوه بر خطرات انسانی، مشکلاتی مانند مصرف بیش از حد سموم، کمبود نیروی کار، یکنواختی پایین پاشش، آلودگی محیط زیست، عملکرد پوششی محدود، هزینه بالا و اثر کم‌تر در پایش آفات دارند. استفاده از پهپاد در کشاورزی می‌تواند راه‌حلی مؤثر برای رفع این مشکلات باشد. (García-Munguía et al., 2024). از مزایای استفاده از پهپاد در سم‌پاشی می‌توان به مواردی مانند کاهش مصرف سوخت، کاهش آلودگی صوتی و شیمیایی، افزایش دقت در سم‌پاشی و ایمنی بیش‌تر برای اپراتورها اشاره کرد (Balaji et al., 2018). کاربرد پهپادها (هواپیماهای بدون سرنشین یا UAVها) در کشاورزی به دهه ۱۹۸۰ میلادی باز می‌گردد، اما کاربرد آن‌ها در سم‌پاشی به‌ویژه در دو دهه اخیر با پیشرفت فناوری‌های ناوبری، هوش مصنوعی و توسعه باتری‌های با ظرفیت بالا گسترش یافته است (Canicatti & Vallone, 2024).

تحقیقات متعددی در زمینه کاربرد پهپادها در مبارزه با آفات گیاهی صورت گرفته است. در یک تحقیق، کاربرد پهپاد در سم‌پاشی بررسی شد. پهپادهای سم‌پاش با استفاده از داده‌های مکانی، حسگرهای GPS و سامانه PWM می‌توانند میزان و محل پاشش سم را دقیق و هدفمند تنظیم کنند. این فناوری، مصرف آب و سموم را تا ۹۰ درصد کاهش داده و سرعت عملیات را تا ۵ برابر نسبت به روش‌های سنتی افزایش می‌دهد. هم‌چنین، پهپادها با حذف تماس مستقیم کشاورزان با مواد شیمیایی و امکان کار در شرایط دشوار (مانند زمین‌های گلی، محصولات بلند یا مناطق غیرقابل دسترسی)، ایمنی و کارایی بیش‌تری فراهم می‌کنند. (Gopal Dutta, 2020). در یک مطالعه

میدانی، سه روش سم‌پاشی شامل سم‌پاش‌های پشتی، بوم‌دار و پهپاد در مزارع سویا مقایسه شد. نتایج نشان داد که سم‌پاش‌های پشتی بیش‌ترین کارایی را در پایش علف‌های هرز داشتند، اما پهپادها با کاهش ۹۹ درصدی زمان عملیات، صرفه‌جویی در مصرف آب و نیروی کار و امکان کاهش ۳۰ درصدی محلول علف‌کش، برتری قابل توجهی از نظر سرعت و بهره‌وری نشان دادند (Hiremath et al., 2024). در یک تحقیق، کارایی پهپادهای سم‌پاش در مدیریت فضای سبز شهری بررسی شد. نتایج نشان داد که این روش با کاهش چشم‌گیر مصرف سموم و افزایش دقت پاشش، از آلودگی‌های محیطی جلوگیری شده و برای درختان زینتی با شکل‌های پیچیده بسیار کارآمد است. (Rayamajhi et al., 2024). طراحی و ارزیابی یک پهپاد هشت‌موتوره (اوکتاکوپتر) برای سم‌پاشی، کودپاشی و پاشش مواد ضدعفونی‌کننده نشان از مزایای کلیدی پهپاد در کاهش هزینه‌ها، کاهش زمان عملیات و کاهش خطرات انسانی نسبت به روش‌های سنتی داشت (Shaw & Vimalkumar, 2020). در یک نمونه پهپاد، از اپلیکیشن اندرویدی با واسط کاربری Wi-Fi برای سم‌پاشی یکنواخت استفاده شد. پهپاد توانست بدون محدودیت شکل زمین، مسیریابی کرده و برای مزارع کوچک مناسب باشد، اما استفاده از آن مستلزم دانش فنی کشاورزان بود. (Spoorthi et al., 2017). در مطالعه‌ای به منظور تعیین عوامل عملیاتی پهپاد سم‌پاش در پایش شته گندم، آزمایش‌هایی شامل تعداد آفت شته و توزیع قطرات محلول آفت کش با سرعت پرواز ۳ تا ۶ متر بر ثانیه و ارتفاع ۱/۵ تا ۲/۵ متر انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش سرعت و ارتفاع پرواز، تراکم و یکنواختی قطرات کاهش می‌یابد. بهترین ترکیب عملیاتی برای مبارزه با شته گندم، سرعت ۳ متر بر ثانیه و ارتفاع پرواز ۱/۵ متر بود. در این حالت، کارایی پایش آفت ۹۲ درصد به دست آمد (Wang et al., 2019).

خلاصه مطالعات یاد شده نشان می‌دهد که کاربرد پهپادهای سم‌پاش با کاهش مصرف آب و سموم، هزینه‌های عملیات را به‌طور چشم‌گیری کاهش می‌دهد. پهپادها سرعت و دقت سم‌پاشی را افزایش داده و پاشش هدفمند را ممکن می‌سازند. هم‌چنین با حذف تماس مستقیم کشاورزان با مواد شیمیایی، ایمنی و سلامتی کاربران را ارتقا می‌دهند.

است. این سم‌پاش‌ها با وجود مصرف کم محلول و تولید قطرات ریزتر، پاشش یکنواختی ندارند و مشکلاتی مانند نیاز به جاده‌های بین مزارع و بادبردگی دارند. (Naseri et al., 2008).

استفاده از پهپاد در مبارزه با آفات مجصول گندم، مانند سن، راه کار مناسبی با توجه به مزایای کاربرد سم‌پاش‌های پهپاد است. در پژوهش امکان‌سنجی کاربرد پهپاد سم‌پاش در پایش شیمیایی سن گندم، کارایی آن با سم‌پاش میکرونر پستی مقایسه و مشخص گردید که هر دو روش کارایی مشابهی بیش از ۹۵ درصد دارند. با این حال، پهپاد در ظرفیت مزرعه‌ای، مصرف حشره‌کش و محلول، کاهش بادبردگی و کاهش احتمال آلودگی کاربر، برتری دارد. (Sheikhi Garjan, 2019). در تحقیقی بهره‌وری انرژی و اثرات زیست‌محیطی کاربرد پهپاد در سم‌پاشی مزارع گندم استان لرستان در مقایسه با روش‌های سنتی بررسی شد. نتایج نشان داد که در سم‌پاشی سنتی، ۴۳/۲ برابر بیش‌تر انرژی مصرف می‌شود. با این حال، محدودیت باتری و نیاز به آموزش، چالش‌های اصلی بوده و مطالعات بیش‌تری برای ارزیابی بلندمدت و مقیاس‌پذیری لازم است. (Safaeinejad et al., 2025a). نتایج تحقیقی در مورد استفاده از پهپاد و سم‌پاش بوم‌دار در پایش علف‌های هرز و زنگ زرد گندم نشان داد که در مجموع، پهپاد سم‌پاش به دلیل کارایی و درآمدزایی بیش‌تر، گزینه اقتصادی‌تری برای سم‌پاشی نسبت به سم‌پاش بوم‌دار است و می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی بهره‌وری و سودآوری عملیات سم‌پاشی را افزایش دهد. (Safaeinejad et al., 2025b).

این تحقیق با هدف ارزیابی و مقایسه کارایی فنی و اقتصادی روش نوین (پهپاد) و مرسوم (توربولاینر) در مبارزه با آفت سن گندم در استان اصفهان انجام شد. تمایز این مطالعه در بررسی هم‌زمان شاخص‌های فنی (یکنواختی پاشش، ظرفیت مزرعه‌ای) و اقتصادی (هزینه‌ها، خسارت لهدیگی) مبارزه با سن گندم است که در تحقیقات قبلی کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق، کارایی سم‌پاش پهپاد و سم‌پاش متداول توربولاینر در پایش آفت سن گندم در استان اصفهان مورد مقایسه قرار گرفت. پهپاد سم‌پاش مورد آزمایش، از

با ورود و گسترش فناوری پهپادها در کشور، استفاده از آنها برای سم‌پاشی و محلول‌پاشی مزارع در ایران نیز رواج یافته است. به همین دلیل، مطالعاتی در همین زمینه صورت گرفته است. در پژوهش، کارایی سم‌پاشی هوایی (پهپاد) و زمینی (سم‌پاش لانس‌دار فرقونی) در پایش آفات مقایسه و مشخص شد که هر دو روش به یک اندازه مؤثرند. بنابراین، استفاده از هر روش با توجه به مزایا و معایب آن می‌تواند به‌صورت مدیریت‌شده توصیه شود. (Heidari & Asari, 2016). در پژوهشی برای پایش زنجبرک خرما، سه روش شامل پهپاد سم‌پاش، سم‌پاش لانس‌دار تراکتوری و شاهد (بدون سم‌پاشی) مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که پهپاد سم‌پاش مصرف سم کم‌تر (۲۸/۹ لیتر در هکتار)، بادبردگی کم‌تر (۱۱/۰۲ درصد)، ظرفیت مزرعه‌ای بالاتر (۵/۵۵ هکتار در ساعت)، ضریب کیفیت پاشش بالاتر (۱/۳۵ برابر سم‌پاش لانس‌دار) و مصرف انرژی کم‌تر (۴/۴ برابر سم‌پاش لانس‌دار) دارد. (Safari et al., 2018).

از مجموع ۲/۸ میلیون هکتار سطح زیر کشت گندم در ایران، در حدود ۱۰/۵ میلیون تن گندم تولید می‌شود. سطح زیر کشت گندم در اصفهان بالغ بر ۸۲۲۷۵ هکتار آبی و ۶۲۱۹۵ هکتار دیم می‌شود. متوسط عملکرد گندم دیم و آبی در اصفهان به ترتیب ۸۶۱ و ۴/۶۳۱ تن در هکتار گزارش شده است (Anonymous, 2024). یکی از عوامل خسارت‌زا در تولید گندم، آفت سن گندم است. از متداول‌ترین دستگاه‌های سم‌پاش مورد استفاده در مبارزه با سن گندم، می‌توان به سم‌پاش‌های لانس‌دار پشت تراکتوری، سم‌پاش زنبه‌ای و سم‌پاش توربینی زراعی (توربولاینر) اشاره کرد. استفاده از این سم‌پاش‌ها علاوه بر مصرف نسبتاً بالای سموم که منجر به آلودگی آب و خاک و محیط زیست می‌شود، مشکلاتی نظیر ورود به سطح مزرعه و له کردن محصول و عدم یکنواختی پاشش سم دارند (Safari et al., 2010 Falah Jedi, 2000). سم‌پاش‌های توربولاینر (Turbuliner) به‌عنوان یکی از فناوری‌های رایج در مبارزه با آفات گندم، به‌ویژه سن گندم، در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند. این سم‌پاش‌ها به دلیل ظرفیت مزرعه‌ای بالا، کاهش تردد در داخل مزرعه و کم‌تر بودن لهدیگی محصول در مقایسه با سم‌پاش‌های پشت تراکتوری بوم‌دار، مورد توجه هستند. با این حال، استفاده از سم‌پاش‌های توربولاینر نیز با چالش‌هایی همراه

۲- اندازه‌گیری محلول مصرفی: در هریک از سم‌پاش‌ها میزان خروجی محلول از همه نازل‌ها در یک دقیقه در ظرفی اندازه‌گیری گردید. مقدار پاشش محلول سم در هر هکتار با در نظر گرفتن سرعت پیشروی و عرض پاشش از رابطه ۱ محاسبه شد (دوز سم مصرفی در هکتار برای هر یک از روش‌ها یکسان بود) (Zarifnesht et al., 2025):



شکل ۱- سم‌پاش توربولاینر مورد استفاده در آزمایش



شکل ۲- پهباد سم‌پاش مورد استفاده در آزمایش

که در آن q : مقدار پاشش محلول (لیتر در هکتار)، Q : دبی کلی سم‌پاش (لیتر در دقیقه)، W : عرض کار مؤثر سم‌پاش (متر) و V : سرعت پیشروی (کیلومتر در ساعت) است.

۳- زمان لازم برای سم‌پاشی یک هکتار: با توجه به عرض کار مؤثر هر سم‌پاش و سرعت پیشروی آن، زمان لازم برای سم‌پاشی یک هکتار به‌وسیله کرونومتر اندازه‌گیری شد.

۴- ظرفیت مزرعه‌ای تئوری سم‌پاش‌ها مطابق رابطه (۲) محاسبه شد (Safari & Sheikhi Garjan, 2020):

$$C_t = \frac{V \times W}{10} \quad (2)$$

که در آن C_t : ظرفیت تئوری (هکتار در ساعت)، V : سرعت پیشروی (کیلومتر در ساعت) و W : عرض کار مؤثر (متر) است.

مدل EFT بود. این پهباد دارای چهار بازو با ملخ‌های ۲۴ اینچی و مخزن ۲۰ لیتری است. پمپ این پهباد با دبی ۴ تا ۸ لیتر در دقیقه عمل کرده و انرژی خود را از باتری S LiPo۱۲ تأمین می‌کند (شکل ۱). نازل مورد استفاده از نوع میکروتر است. سم‌پاش توربولاینر مورد استفاده از نوع کششی با مخزن ۲۰۰۰ لیتری بود که به PTO تراکتور متصل شده و مجهز به فن گریز از مرکز برای توزیع محلول در عرض پاشش است. پمپ سم‌پاش از نوع پیستونی دیافراگمی با دبی تقریبی ۷۰ تا ۱۲۰ لیتر در دقیقه و فشار کاری ۲۰ تا ۴۰ بار است. نازل‌ها از نوع سرامیکی و در تعداد ۸ عدد هستند (شکل ۲).

به منظور تعیین کارایی دو نوع سم‌پاش ذکر شده در مبارزه با سن گندم، دو قطعه زمین یک هکتاری مجاور که به کشت گندم اختصاص داده شده بود، انتخاب گردید. این مزرعه در شهرستان برخوار اصفهان واقع بوده که دارای اقلیم گرم و خشک و خاک‌های رسی و سنگین است. رقم گندم کشت شده با نام بهاران بود.

در قطعه اول بر اساس عرض پاشش حدود ۱۰ متری پهباد سم‌پاش (شکل ۱)، هشت تردد به طول ۱۲۵ متر سم‌پاشی شد و میانگین اندازه‌گیری‌ها در هر دو تردد به عنوان یک تکرار در نظر گرفته شد. در قطعه دوم با توجه به عرض پاشش حدود ۴۰ متری توربولاینر (شکل ۲)، چهار تردد به طول ۶۳ متر برعلیه پوره و سن بالغ گندم سم‌پاشی شد و اندازه‌گیری‌ها در هر تردد به عنوان یک تکرار ثبت گردید. موارد اندازه‌گیری شده در طی سم‌پاشی و پس از آن شامل موارد زیر بود:

۱- عرض کار مؤثر: این عامل در سم‌پاش‌های مختلف یکسان نبوده و برای هر سم‌پاش عرض مؤثر پاشش به‌وسیله متر اندازه‌گیری شد. در سم‌پاش پهباد با توجه به ارتفاع پرواز، عرض کار مؤثر، فاصله بین پاشش دورترین افشانک‌ها از هم است. ارتفاع پرواز پهباد و نوع افشانک نیز بر عرض کار مؤثر تأثیرگذار است. کارت‌های حساس به آب به فاصله ۰/۵ متری از یکدیگر عمود بر جهت حرکت پهباد قرار داده شد و فاصله بین اولین و آخرین کارت رنگی شده با متر اندازه‌گیری شد (Safari & Bagheri, 2021). در سم‌پاش توربولاینر با توجه به عرض کاری اسمی نسبتاً بالا (حدود ۴۰ متر) کارت‌های حساس با فواصل بیش‌تری از هم قرار داده شد و عرض مؤثر کار مطابق روش فوق اندازه‌گیری گردید.

از شیشه با ابعادی بزرگ‌تر از کارت تهیه و کارت‌ها با استفاده از چسب روی آن ثابت شد.

۹- ضریب کیفیت سم‌پاشی (Q_c): از تقسیم قطر میانه حجمی (VMD) بر قطر میانه عددی (NMD) ضریب کیفیت سم‌پاشی به دست می‌آید (رابطه ۵). در حالت ایده‌آل این ضریب برابر ۱ است ولی در عمل با توجه به شرایط کار و نوع افشانک و سم‌پاش دستیابی به این کیفیت سم‌پاشی غیرممکن است. هر چه این عدد نزدیک به ۱ باشد کیفیت سم‌پاشی بالاتر خواهد بود (Naseri, 2007; Safari et al., 2018).

$$Q_c = \frac{VMD}{NMD} \quad (5)$$

۱۰- کارایی سم‌پاشی: به منظور بررسی کارایی روش‌های سم‌پاشی بر پایش جمعیت و خسارت سن گندم، تعداد پوره‌ها و سن گندم قبل از سم‌پاشی و ۵، ۱۰ و ۱۵ روز بعد از سم‌پاشی شمارش گردید. برای این منظور با استفاده از تور حشره‌گیری در هر مزرعه، حداقل ۵ بار در ۴ نقطه متفاوت تور حشره‌گیری زده شد و پوره‌ها و سن‌های بالغ جمع‌آوری و شمارش گردید (شکل ۳). هر بار تور زدن به صورت نیم‌دایره کامل (حدود ۱۸۰ درجه) و به گونه‌ای انجام شد که تمامی بخش‌های هوایی بوته‌های گندم در پوشش قرار گیرد (Karimzadeh et al., 2011). سپس داده‌های به دست آمده با استفاده از رابطه هندرسون-تیلتون (رابطه ۶) به درصد کارایی تبدیل و به روش آزمون t مقایسه گردید (Bozsik, 1996).

$$E_s = (1 - \frac{T_a \times C_b}{T_b \times C_a}) \times 100 \quad (6)$$

که در آن:

E_s : کارایی سم‌پاشی (درصد)، T_a : میانگین تعداد سن بعد از سم‌پاشی، T_b : میانگین تعداد سن قبل از سم‌پاشی، C_a : میانگین تعداد سن در شاهد بعد از سم‌پاشی و C_b : میانگین تعداد سن در شاهد قبل از سم‌پاشی است.

۱۱- درصد سن‌زدگی محصول گندم: قبل از برداشت محصول، از هر قطعه ۲۰۰ عدد خوشه گندم به صورت تصادفی انتخاب و بعد از پاک کردن، تعداد پنج نمونه ۱۰ گرمی دلنه گندم با مشخص کردن تکرار و تیمار جدا شد. در نمونه‌های ۱۰ گرمی، تعداد دانه سالم، شکسته و

۵- ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر سم‌پاش‌ها از رابطه (۳) به دست آمد (Safari & Sheikhi Garjan, 2020):

$$C_o = \frac{A}{T} \quad (3)$$

که در آن C_o : ظرفیت مؤثر مزرعه‌ای (هکتار در ساعت)، A : سطح سم‌پاشی شده (هکتار) و T : زمان اندازه‌گیری شده برای سم‌پاشی (ساعت) است.

۶- بازده مزرعه دو دستگاه سم‌پاش، مطابق رابطه (۴) محاسبه شد (Safari & Sheikhi Garjan, 2020):

$$E = \frac{C_o}{C_t} \times 100 \quad (4)$$

که در آن E : بازده مزرعه‌ای (درصد) است.

۷- لهیدگی محصول ناشی از حرکت تراکتور: با اندازه‌گیری عرض چرخ‌های تراکتور و تعداد عبور تراکتور و سم‌پاش برای سم‌پاشی، سطح له‌شدگی مزرعه تعیین و این مقدار نسبت به مساحت کل محصول به عنوان درصد لهیدگی در نظر گرفته شد.

۸- به منظور تعیین کیفیت سم‌پاشی، قطر میانه حجمی (VMD) و قطر میانه عددی (NMD) اندازه‌گیری و تعیین گردید. قطر میانه حجمی، قطر ذره یا قطره‌ای است که مجموع حجم ذرات قبل و بعد از آن برابر هستند. قطر میانه عددی، قطر ذره‌ای است که از نظر شمارش تعداد قطرات، در وسط قرار می‌گیرد (Zarifneshat et al., 2025). به منظور اندازه‌گیری دو عامل یاد شده، کاغذهای حساس به آب که در عرض پاشش سم‌پاش‌ها قرار داده شده بود، به طور جداگانه توسط اسکنر با دقت dpi 600 تصویربرداری شدند (Naseri, 2007; Daneshjoo, 2006). سپس تصاویر به دست آمده توسط نرم‌افزار سنجش ذرات SIBA¹ (یک برنامه پژوهشی است که در داخل کشور) تحلیل شده و دو عامل قطر میانه حجمی و قطر میانه عددی به دست آمد. کاغذهای حساس به آب، آغشته به محلول برموفنل آبی بوده و به محض برخورد قطرات حاوی آب با سطح کاغذ لکه‌هایی آبی‌رنگ در نتیجه یونیزه شدن رنگ اصلی بر سطح کاغذ پدیدار می‌گردد. این کارت‌ها در نقاط مختلف پلات‌ها روی زمین در محل سم‌پاشی قرار داده شدند. با توجه به شدت جریان باد ایجاد شده به وسیله ملخ‌های پمپاد و جریان هوای ایجاد شده به وسیله سم‌پاش توربولانیزر و امکان حرکت کارت‌های حساس از محل قرارگیری، قطعاتی

¹ - یک نرم‌افزار پژوهشی است که توسط پژوهشگران ایرانی ساخته شده است.

سن زده شمارش و در پایان از مجموع داده‌های به‌دست‌آمده درصد سن زدگی هر تیمار مشخص شد.



شکل ۳- روش جمع‌آوری پوره و سن بالغ با استفاده از تور حشره‌گیری

۱۲- عملکرد محصول گندم: در هر دو تیمار سم‌پاشی عملکرد محصول اندازه‌گیری شد. به این منظور پس از رسیدگی کامل، در هر تکرار، از یک سطح ۱ متر مربعی محصول برداشت شده و وزن دانه‌های آن ثبت گردید. پس از جمع‌آوری داده‌ها بر اساس تیمارها و تکرارها، نرمال بودن آنها در نرم‌افزار SPSS 16.0 بررسی شد. این بررسی با استفاده از آزمون اسلکمواف انجام گرفت. نتایج آزمون نشان داد که داده‌ها دارای توزیع نرمال بوده و قابلیت تحلیل آماری را دارند. سپس میانگین‌های مستقل دو روش سم‌پاشی با استفاده از آزمون t مقایسه و گروه‌بندی شد.

۱۳- به‌منظور مقایسه اقتصادی کاربرد پهیاد و توربولایر در عملیات سم‌پاشی، پس از تعیین ظرفیت کاری هر دستگاه، عوامل مؤثر شامل قیمت اولیه سم‌پاش، تعداد اپراتور و کارگر، هزینه اجاره سم‌پاش، افت محصول ناشی از لهیدگی و سن‌زدگی، ادوات موردنیاز و عمر مفید سم‌پاش‌ها مشخص گردید. سپس هزینه‌های مرتبط شامل استهلاک، سود سرمایه، استفاده از تراکتور یا وانت، نیروی کارگری، سم‌پاشی اجاره‌ای و افت محصول محاسبه شد. استهلاک سالیانه و سود سرمایه به روش خطی از معادلات زیر محاسبه شد (Almasi et al., 2008).

$$A_d = \frac{P - S}{N} \quad (7)$$

$$C = \frac{(P + S)i}{2} \quad (8)$$

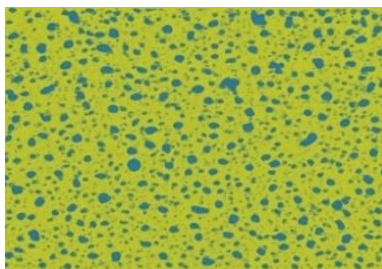
در این روابط، A_d : هزینه استهلاک سالانه، P : قیمت اولیه، S : ارزش اسقاط، N : عمر مفید، C : ارزش سود سرمایه سالانه و i : نرخ بهره است. در این محاسبات، نرخ

بهره ۲۰ درصد به‌عنوان نرخ متعارف سرمایه در بخش کشاورزی ایران در نظر گرفته شد (نرخ‌های رایج تسهیلات مبادله‌ای و مشارکتی در بازه ۱۵-۱۸ درصد گزارش شده‌اند). عمر مفید دستگاه‌ها ۵ سال فرض گردید. برای ارزیابی اقتصادی از روش هزینه‌سالانه (Annual Cost Method) استفاده گردید. بدین ترتیب، هزینه کل سالیانه هر دستگاه محاسبه و بر اساس قابلیت ساعت کار هر سم‌پاش و سطح قابل سم‌پاشی، هزینه نهایی به ازای واحد سطح (ریال بر هکتار) به‌عنوان شاخص اصلی اقتصادی استخراج و مقایسه شد.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل (t-test) نشان داد که عرض کار مؤثر، مقدار محلول مصرفی، زمان سم‌پاشی، ظرفیت مؤثر مزرعه‌ای، بازده مزرعه‌ای، درصد لهیدگی محصول، قطر میانه حجمی، قطر میانه عددی، ضریب کیفیت پاشش سم‌پاش‌ها و درصد سن‌زدگی محصول در سطح احتمال یک درصد با یکدیگر اختلاف معنی‌دار داشتند (جدول ۲). میانگین عرض کاری مؤثر پهیاد سم‌پاش و سم‌پاش توربولایر به ترتیب حدود ۴۰ و ۱۰ متر به دست آمد که نزدیک به عرض کار اسمی این سم‌پاش‌ها است. در این آزمایش مقدار سم مورد استفاده (دز سم) در همه سم‌پاش‌ها برابر با ۱۰۰ تا ۱۲۵ سی‌سی در هکتار و تقریباً برابر هم بوده ولی میزان محلول پاشیده شده سم در هکتار در هر سم‌پاش متفاوت بود. بنابر نتایج حاصل شده، بیش‌ترین میزان محلول سم مصرفی در هکتار مربوط به سم‌پاش‌های توربولایر با مقدار ۲۵۰ لیتر در هکتار و کم‌ترین مقدار با ۱۰ لیتر در هکتار مربوط به سم‌پاش پهیادی بود (جدول ۲).

میانگین زمان سم‌پاشی در هکتار برای سم‌پاش‌های توربولایر و پهیاد به ترتیب ۱۰/۹ و ۷ دقیقه اندازه‌گیری شد که از این لحاظ در سطح احتمال یک درصد باهم اختلاف معنی‌دار داشتند (جدول ۲). ظرفیت مؤثر مزرعه‌ای به ترتیب در پهیاد سم‌پاش و توربولایر، ۸/۵۷ و ۵/۵ هکتار در ساعت بود که در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). این موضوع با توجه به زمان سم‌پاشی کم‌تر پهیاد قابل تصور است. بازده مزرعه‌ای سم‌پاش پهیاد و سم‌پاش توربولایر به ترتیب برابر ۹۰ و ۸۳ درصد به دست آمد (جدول ۲). این نتیجه نشان می‌دهد که در سم‌پاشی با



شکل ۴- نمونه‌ای از کارت حساس (توربولاینر)



شکل ۵- نمونه‌ای از کارت حساس (پهپاد)

اندازه‌گیری میزان سن‌زدگی محصول دو مزرعه نشان داد که در تیمار شماره ۱ (استفاده از پهپاد سم‌پاش)، ۰/۰۵ درصد از دانه‌های گندم دچار سن‌زدگی شدند. در تیمار شماره ۲ (استفاده از سم‌پاش توربولاینر) سن‌زدگی در دانه‌های گندم مشاهده نشد (جدول ۳). علت این امر می‌تواند کمی دیر شدن آغاز سم‌پاشی با پهپاد باشد، چرا که انجام هماهنگی‌های لازم برای سم‌پاشی زمان بر است. طبق نتایج جدول ۳، در هر دو روش سم‌پاشی، میزان کارایی سم‌پاشی‌ها ۱۰۰ درصد بوده است. این نتیجه مبین آن است که از نظر کارایی سم‌پاشی در مبارزه با سن گندم، هر دو روش سم‌پاشی کارا و مؤثر بوده‌اند. جدول ۴ نتایج حاصل از شمارش پوره و سن بالغ موجود در دو مزرعه گندم قبل از سم‌پاشی و فاصله‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ روز بعد از سم‌پاشی و کارایی سم‌پاشی را در دو روش استفاده از سم‌پاش توربولاینر و پهپاد نشان می‌دهد. بر این اساس ۱۵ روز پس از سم‌پاشی در هر دو روش سن بالغ یا پوره در مزارع گندم مشاهده نشد.

در اندازه‌گیری عملکرد محصول گندم در هر دو تیمار سم‌پاشی تقریباً ۹ تن در هکتار به دست آمد که با توجه به یکسان بودن رقم گندم و شرایط یکسان مدیریت زراعی که متعلق به یک کشاورزی بود، دور از انتظار نیست. با این که کارایی سم‌پاشی در دو زمین مجاور یکسان بود، مقدار سن‌زدگی ۰/۰۵ درصدی در زمین با پهپاد تغییر معنی‌داری در عملکرد محصول ایجاد نکرد (جدول ۳).

پهپاد، زمان‌های تلف شده کمتر از نوع توربولاینر بوده است. همچنین قدرت مانور بالای پهپاد و عرض کار قابل توجه سم‌پاش توربولاینر از دلایل بازده مزرعه‌ای زیاد این دو وسیله هستند. سایر محققان بازده مزرعه‌ای سم‌پاش‌های بوم‌دار، لانس‌دار، توربولاینر و میکرونر را به ترتیب ۸۳/۶، ۴۸/۸، ۶۱/۴ و ۸۵/۵ درصد محاسبه نمودند. آنها ظرفیت مزرعه‌ای پهپاد مورد مطالعه را ۵/۵۵ هکتار در ساعت به دست آوردند (Safari et al., 2010; Safari et al., 2018).

میزان لهدگی محصول گندم هنگام سم‌پاشی با سم‌پاش توربولاینر، ۱/۲۵ درصد محاسبه شد (جدول ۲). این مقدار افت سطحی مزرعه، با توجه به این که در آواخر فصل رشد قرار داشته و زمان جبران گیاه نیست، مستقیماً باعث افت عملکرد می‌شود. این در حالی است که در استفاده از پهپاد، به علت سم‌پاشی هوایی و عدم تردد در مزرعه، هیچگونه لهدگی در سطح مزرعه ایجاد نمی‌شود و به تبع آن افت محصولی نیز در این ارتباط وجود ندارد.

شکل ۴ و ۵، نمونه‌ای از کارت‌های استفاده شده در سم‌پاش پهپاد را نشان می‌دهد. طبق نتایج جدول ۳ میانگین قطر میانه عددی (NMD) سم‌پاش پهپاد و توربولاینر به ترتیب ۱۹۰ و ۲۸۱ میکرون و میانگین قطر میانه حجمی (VMD) در آنها به ترتیب ۳۰۰ و ۶۹۰ میکرون به دست آمد. ضریب کیفیت سم‌پاشی (VMD/NMD) برای سم‌پاش پهپاد و توربولاینر به ترتیب ۱/۵۷ و ۲/۴۵ محاسبه شد.

نتیجه مقایسه میانگین‌ها نشان داد که ضریب کیفیت پاشش سم‌پاش پهپاد به‌طور معنی‌داری از سم‌پاش توربولاینر بالاتر است (جدول ۳). محققان دیگر مقدار نسبت یکنواختی پاشش را برای سم‌پاش توربینی زراعی (توربولاینر) در شرایط مزرعه ۳/۵۷ به دست آوردند (Safari et al., 2010). ضریب کیفیت سم‌پاشی ویژگی مهمی در سم‌پاشی محسوب می‌شود، اما در عمل در تعیین یکنواختی پاشش نباید فقط به نسبت دو مقدار قطر میانه حجمی و قطر میانه عددی توجه شود. بلکه مقدار هر یک از این دو پارامتر در کیفیت سم‌پاشی مهم هستند. به عنوان مثال در دو سم‌پاش مختلف ممکن است ضریب کیفیت سم‌پاشی برابر باشد، در حالی که تأثیر سم‌پاشی به قطر ذرات سم (قطر میانه حجمی و قطر میانه عددی) نیز بستگی دارد.

جدول ۲- نتایج آزمون t و مقایسه میانگین‌های عوامل عملکردی سم پاش‌ها

خصوصیات مورد مطالعه						
تیمارها (سم پاش‌ها)	عرض کار مؤثر (متر)	محلول مصرفی در هکتار (لیتر)	زمان سم پاشی در هکتار (دقیقه)	ظرفیت مؤثر مزرعه‌ای (هکتار در ساعت)	بازده مزرعه‌ای (درصد)	لهیدی محصول (درصد)
پهیاد	۱۰	۱۰ b	۷ b	۸/۵۷ a	۹۰ a	۰ b
توربولایر	۴۰	۲۵۰ a	۱۰/۹ a	۵/۵ b	۸۳ b	۱/۲۵a
مقدار t	-۵۵/۵۴۹**	-۵۵/۶۴۱**	-۱۴/۴۰۲**	۱۵/۵۶۶**	۳/۹۳۴**	-۱۰/۵۰۲**

در هر عامل، اعداد دارای حرف مشترک، فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد هستند.

جدول ۳- نتایج آزمون t و مقایسه میانگین‌های عوامل عملکردی سم پاش‌ها

خصوصیات مورد مطالعه						
تیمارها (سم پاش‌ها)	قطر میانه حجمی (میکرون)	قطر میانه عددی (میکرون)	ضریب کیفیت پاشش سم پاش (درصد)	کارایی سم پاشی (درصد)	سن زدگی محصول (درصد)	عملکرد محصول (کیلوگرم در هکتار)
پهیاد	۳۰۰ b	۱۹۰ b	۱/۵۷ b	۱۰۰ a	۰/۰۵a	۹۰۰۰a
توربولایر	۶۹۰ a	۲۸۱ a	۲/۴۵ a	۱۰۰ a	۰/۰۰ b	۹۰۱۰a
مقدار t	-۲۸/۸۰۳**	-۵/۸۷۰**	-۷/۱۸۱**	۰/۰۰۰۰۵ ^{n.s}	۱۲/۲۴۷**	۰/۰۸۳ ^{n.s}

در هر عامل، اعداد دارای حرف مشترک، فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد هستند.

n.s و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۹۹ درصد.

جدول ۴- نتایج شمارش پوره و سن بالغ در دو روش مبارزه با سن گندم

قبل از سم پاشی		۵ روز پس از سم پاشی		۱۰ روز پس از سم پاشی		۱۵ روز پس از سم پاشی	
پوره	سن بالغ	پوره	سن بالغ	پوره	سن بالغ	پوره	سن بالغ
۱۸	۱۶	۷	۱	۳	۰	۰	۰
۱۲	۱۰	۴	۱	۲	۰	۰	۰

توسط پهیاد و توربولایر را نشان می‌دهد. هزینه لهیدی محصول بر اساس ۱/۲۵ درصدی کاهش سطح کشت در اثر تردد تراکتور، عملکرد متوسط ۷ تن در هکتاری در منطقه و قیمت دویست هزار ریالی برای هر کیلوگرم گندم محاسبه شد. هزینه افت قیمت گندم سن زده نیز بر اساس کاهش عملکرد ۰/۰۵ درصدی گندم و قیمت دویست هزار ریال برای هر کیلوگرم گندم به دست آمد.

طبق نتایج جدول ۷، به ازاء هر هکتار سمپاشی گندم با پهیاد به طور متوسط در صورت خرید پهیاد، مبلغ ۵۹۱۳۰۰۰ ریال و در صورت اجاره پهیاد، مبلغ ۱۶۷۴۷۴۰ ریال هزینه می‌شود. همچنین هزینه سمپاشی توربولایر

مشخصات اقتصادی و عوامل مؤثر در هزینه‌های سمپاشی شامل قیمت اولیه سم پاش، تعداد اپراتور و کارگر، هزینه اجاره سم پاش، هزینه افت محصول ناشی از لهیدی و سن زدگی و ادوات مورد نیاز در جدول‌های ۵ تا ۷ ارائه گردیده است. پس از تعیین ظرفیت کاری سمپاش‌های توربولایر و پهیاد، هزینه‌های به کارگیری این دو دستگاه محاسبه و مقایسه گردید. با توجه به کارکرد مورد انتظار ۳ ماهه (۸ ساعت در روز) دستگاه‌های سمپاش در طول یک سال برای مبارزه با سن گندم و ظرفیت کاری آنها (جدول ۲)، ظرفیت کاری سالانه پهیاد ۶۱۷۰ هکتار و توربولایر ۳۹۶۰ هکتار بالغ می‌شود. جدول ۵ هزینه‌های سمپاشی

۳/۷ برابر پهپاد است که تقریباً ۸۰ تا ۹۰ درصد آن مربوط به خسارت لهیدگی محصول در اثر تردد تراکتور و سم‌پاش و افت عملکرد مرتبط با آن است.

در صورت خرید سم‌پاش ۱۹۴۱۸۱۵۰ ریال و در صورت اجاره ۲۱۷۲۸۰۰۰ ریال بالغ می‌شود. مقایسه این ارقام نشان می‌دهد که در مجموع، هزینه سم‌پاشی با توربولاینر در حالت اجاره سم‌پاش‌ها ۱۱/۶ و در صورت خرید آنها

جدول ۵- مشخصات اقتصادی سم‌پاشی در دو روش توربولاینر و پهپاد

روش سم‌پاشی	قیمت اولیه سم‌پاش (ریال)	تعداد اپراتور+کارگر	هزینه اجاره سم‌پاش در هر هکتار (ریال)	ادوات مورد نیاز
پهپاد	۱۰۰۰۰۰۰۰۰	۲	۵۰۰۰۰۰۰	وانت حمل‌ونقل
توربولاینر	۵۷۰۰۰۰۰۰۰	۲	۴۰۰۰۰۰۰	تراکتور

جدول ۶- هزینه‌های عملیات سم‌پاشی با پهپاد سم‌پاش و توربولاینر (تمام هزینه‌ها بر حسب ریال در هکتار هستند)

نوع سم‌پاش	هزینه استهلاک	سود سرمایه	هزینه تراکتور یا وانت	هزینه کارگری
پهپاد	۲۹۱۷۳۰	۱۷۸۲۸۰	۲۹۱۷۲۰	۱۴۳۰۰۰
توربولاینر	۲۵۹۰۹۰	۱۵۸۳۳۰	۱۲۷۲۷۳۰	۲۲۸۰۰۰

جدول ۷- هزینه‌های عملیات سم‌پاشی با پهپاد سم‌پاش و توربولاینر (تمام هزینه‌ها بر حسب ریال در هکتار هستند)

نوع سم‌پاش	هزینه سم‌پاشی اجاره‌ای	هزینه لهیدگی محصول	هزینه افت قیمت گندم سن زده	جمع هزینه‌ها
پهپاد	۵۰۰۰۰۰۰	۰	۷۷۰۰۰۰	۱۶۷۴۷۴۰ *
توربولاینر	۴۰۰۰۰۰۰	۱۷۵۰۰۰۰۰	۰	۱۹۴۱۸۱۵۰ *

* و ** به ترتیب حالت خرید و اجاره را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

استفاده از پهپادها در سم‌پاشی محصولات کشاورزی برای مبارزه با آفات و بیماری‌ها و نیز علف هرز، یکی از روش‌های مؤثر در افزایش بهره‌وری عملیات سم‌پاشی محسوب می‌شود. بررسی و مقایسه استفاده از پهپاد و سم‌پاش توربولاینر در مبارزه با آفت سن گندم در استان اصفهان نشان داد که ظرفیت و بازده مزرعه‌ای پهپاد سم‌پاش به ترتیب ۵۶ و ۸ درصد بیش‌تر از سم‌پاش توربولاینر است. همچنین مقدار آب مورد نیاز محلول سم در توربولاینر ۲۵ برابر پهپاد بوده و سهولت تهیه محلول سم به‌خصوص در شرایط خاص را در سم‌پاشی با پهپاد نشان می‌دهد. در پهپاد سم‌پاش، قطر میانه عددی و قطر میانه حجمی به ترتیب ۳۷ و ۵۹ درصد کم‌تر از توربولاینر و ضریب کیفیت پاشش ۳۶ درصد بیش‌تر از آن به دست آمد که یکنواختی بیش‌تر را در سم‌پاش پهپاد نشان می‌دهد.

طبق نتایج تحقیق، در استفاده از سم‌پاش توربولاینر در مبارزه با سن گندم، حداقل ۱/۲۵ درصد سطح مزرعه در اثر تردد تراکتور و سم‌پاش، دچار لهیدگی می‌شود که با توجه به غیر بازگشت‌پذیر بودن آن، در همین حدود باعث افت عملکرد سطحی محصول می‌شود. برآورد هزینه‌های به‌کارگیری سم‌پاش‌ها نشان داد که هزینه سم‌پاشی با توربولاینر در حالت اجاره ۱۱/۶ و در صورت خرید ۳/۷ برابر پهپاد است که تقریباً ۸۰ تا ۹۰ درصد اضافه هزینه، مربوط به خسارت لهیدگی محصول و افت عملکرد در اثر تردد تراکتور و سم‌پاش در مزرعه است. در کل با توجه به یکنواختی پاشش بهتر، ظرفیت مزرعه‌ای بیش‌تر و حذف افت ناشی از لهیدگی محصول در زمان سم‌پاشی، استفاده از پهپاد سم‌پاش نسبت به سم‌پاش توربولاینر ارجح و قابل توصیه است.

سیاسگزاری

بدین وسیله از کارشناسان سازمان جهاد کشاورزی استان اصفهان به خصوص سرکار خانم مهندس اسلامی که ما را در اجرای این تحقیق یاری نمودند، تشکر و قدردانی می‌شود.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

نحوه و میزان مشارکت نویسندگان در انجام این پژوهش به صورت زیر است:

محسن حیدری سلطان‌آبادی: مفهوم‌سازی، تحلیل رسمی، تأمین مالی، تحقیق، روش‌شناسی، منابع، نظارت، اعتبارسنجی، مصورسازی، نگارش، بررسی و ویرایش.

محمدحسین سعیدی‌راد: مفهوم‌سازی، تحلیل رسمی، تحقیق، روش‌شناسی، منابع، نظارت، اعتبارسنجی، مصورسازی.

عبداله ایمانمهر: مفهوم‌سازی، گردآوری داده‌ها، تحلیل رسمی، تحقیق، روش‌شناسی، نرم‌افزار، اعتبارسنجی، مصورسازی، نگارش پیش‌نویس اصلی، نگارش، بررسی و ویرایش.

داوود مومنی نویسنده: تحلیل رسمی، تحقیق، روش‌شناسی، نرم‌افزار، اعتبارسنجی، مصورسازی، نگارش، بررسی و ویرایش.

محمدحسن بشارت نژاد نویسنده: تحلیل رسمی، تحقیق، روش‌شناسی، نرم‌افزار، اعتبارسنجی، مصورسازی، نگارش، بررسی و ویرایش.

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنها است.

تضاد منافع نویسندگان

در این مقاله هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید همه نویسندگان است.

حمایت مالی

نویسندگان هیچ حمایت مالی خاصی برای انجام این پژوهش دریافت نکرده‌اند.

منابع

- Almasi, M., Kiani, Sh., & Loimi, N. (2008). Principles of Agricultural Mechanization. Jangal Publications, Tehran, 265 pages. (In Persian).
- Anonymous, (2024). Agricultural Statistics for the year 2022-2023. Volume 1: Crops, Deputy Statistics Officer, Statistics Center, Information and Communication Technology. (In Persian).
- Balaji, B., Chnnupati, S. K., Chilakalapudi, S.R.K., Katuri, R., & Mareedu, K. (2018). Design of UAV (Drone) for Crop, Weather Monitoring and for Spraying Fertilizers and Pesticides. *IJRTI1803008, International Journal for Research Trends and Innovation*, 3(3), 42-47.
- Bozsik, A. (1996). Studies on aphicidal efficiency of different stinging nettle extracts. *An-zeiger von Schädlingkunde, Pflanzenschutz, Umweltschutz*, 69, 21-22.
- Canicatti, M. & Vallone, M. (2024). Drones in vegetable crops: A systematic literature review. *Smart Agricultural Technology*, 7, 100396. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100396>
- Daneshjoo, A. (2006). Introducing and evaluating a suitable software for sprayers calibration and other similar purposes. Msc dissertation, Ferdowsi University of Mashhad. (In Persian).
- Falah Jedi, R. (2000). application and construction of the common applications in the educational office of technology and services. (In Persian).
- García-Munguía, A., Lucía Guerra-Ávila, P., Islas-Ojeda, E., Luis Flores-Sánchez, J., Vázquez-Martínez, O., Margarito García-Munguía, A. & García-Munguía, O. (2024). A Review of Drone Technology and Operation Processes in Agricultural Crop Spraying. *Drones*, 8(11), 674. <https://doi.org/10.3390/drones8110674>.
- Gopal Dutta, P.G. (2020). Application of drone in agriculture: A review. *International Journal of Chemical Studies*, 8(5), 181-187. <https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i5d.10529>
- Heidari, M., & Asari, M. (2016). Evaluation of aerial spraying efficiency in Dubasbug Ommatissus lybicus control. 22th Iranian Palnt Protection Congress, 6-9.Karaj, Iran. (In Persian).
- Hiremath, C., Khatri, N. & Jagtap, M. P. (2024). Comparative studies of knapsack, boom, and drone sprayers for weed management in soybean (*Glycine max L.*). *Environmental Research*, 240, 117480. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117480>
- Karimzadeh, J., Hejazi, M. J., Iranipour, S., & Mohammadi, S. A. (2011). Analysis of the spatio-temporal distribution of Eurygaster integriceps (Hemiptera: Scutelleridae) using spatial analysis by distance indices and geostatistics. *Environmental*

- Sheikhi Garjan, A. (2019). Evaluation of UAV sprayer in wheat *Eurygaster integriceps* control. Plant Protection Institute Resrach Report, No. 55872. (In Persian).
- Spoorthi, S. Shadaksharappa, B., Suraj, S. & Manasa, V. K. (2017). Freyr drone: pesticide/fertilizers spraying drone - an agricultural approach. 2nd International Conference on Computing and Communications Technologies (ICCCT).
- Wang, G., Lan, Y., Yuan, H., Qi, H., Chen, P., Ouyang, F., & Han, Y. (2019). Comparison of spray deposition, control efficacy on wheat aphids and working efficiency in the wheat Field of the unmanned aerial vehicle with boom sprayer and two conventional knapsack sprayers. *Applied Sciences; Basel*, 9(2), 218. <https://doi.org/10.3390/app9020218>
- Zarifneshat, S., Bagherani, N., Saeedi Rad, M. H., naseri, M., Safari, M., & Sadeghi, A. (2025). Comparison of the performance of the drone sprayer with Turboliner sparayer against wheat weeds in Quchan city. *Applied Field Crops Research*, 36(4), 30-15. [doi: 10.22092/aj.2025.367296.1685](https://doi.org/10.22092/aj.2025.367296.1685). (In Persian).
- Entomology*, 40(5), 1259–1268. <https://doi.org/10.1603/EN10188>
- Naseri, M. (2007). Investigating and evaluating effective factors on performance of field air-assisted sprayer. Msc dissertation, Ferdowsi University of Mashhad. (In Persian).
- Naseri, M., Abbaspourfard, M.H., Chaji, H. and Heydarzadeh, A. (2008). Investigation of the effect of nozzle orifice diameter, pump pressure and tractor forward speed on spraying uniformity in an agricultural turbine sprayer (turboliner). 05th National Conference on Agricultural Machinery Engineering and Mechanization, Mashhad.
- Rayamajhi, A., Jahanifar, H. & Mahmud, M. S. (2024). Measuring ornamental tree canopy attributes for precision spraying using drone technology and self-supervised segmentation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 225, 109359. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109359>
- Safaeinejad, M., Ghasemi-Nejad-Racini, M. & Taki, M. (2025a). Reducing energy and environmental footprint in agriculture: A study on drone spraying vs. conventional methods. *PLoS One; San Francisco*, 20(6), e0323779. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0323779>
- Safaeinejad, M., Ghasemi-Nejad-Racini, M. & Taki, M. (2025b). Field and economic evaluation of spraying drones versus boom sprayers for weed and yellow rust control in wheat fields. *Journal of Agricultural Machinery*, 15(4):1-16. <https://doi.org/10.22067/jam.2025.91236.1322>. (In Persian).
- Safari, M., & Bagheri, N. (2021). Selection and evaluation criteria for UAV sprayers. Technical report. Agricultural engineering research institute extention. (In Persian).
- Safari, M., & Sheikhi Garjan, A. (2020). Comparison between unmanned aerial vehicle and tractor lance sprayer against Dubas bug (*Ommatissus lybicus*) Hemiptera: Tropicuchidae). *Iranian Journal of Plant Protection Science*, 51(1), 13-26. (In Persian).
- Safari, M., Sheikhi Garjan, A., Sharifnasab, H., & Bagheri, N. (2018). Date palm spraying using new technology. Final Research report, Agricultural Engineering Research Institute. (In Persian).
- Safari, M., Amirshaghghi, F. Loimi, N. & Chaji, H. (2010). Evaluation of Common Sprayers Used in Wheat Fields. *Food Industry Engineering Research*, 10(4), 1-12. (In Persian).
- Shaw, K. K., Vimalkumar, R. (2020). Design and Development of a Drone for Spraying Pesticides, Fertilizers and Disinfectants. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 9(5), 1-5. <https://doi.org/10.17577/IJERTV9IS050787>