Environmental
Hazards
Management
University of Tehran Press
Home Page: https://jhsci.ut.ac.ir
Iranian Hazardology Association
Online ISSN: 2383-0530

The effect of the UAV sprayer on the reduction of agricultural environmental hazards

Nikrooz Bagheri

Associate Professor, Agricultural Engineering Research Institute. Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO). Karaj. Iran. Email: n.bagheri@areeo.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:
Received: 11 April 2026
Revised: 29 April 2026
Accepted: 02 May 2026
Published: 15 May 2026

Keywords:
Hazards,
Precision Agriculture,
Unmanned Aerial Vehicle,
Spraying.

ABSTRACT

Conventional sprayers used for controlling pests, diseases, and weeds often lead to several challenges, including excessive water and pesticide consumption, low spraying efficacy, and significant risks to both humans and environment. In recent years, unmanned aerial vehicles (UAVs) sprayers has emerged as a promising alternative technology with considerable potential for improving spraying performance.

Objectives: The main objective of this research was to evaluate the performance of a UAV sprayer and compare it with three conventional spraying systems: a tractor-mounted turbine sprayer, a tractor-mounted boom sprayer and a tractor-mounted lance sprayer.

Method: Key parameters such as water and pesticide usage, spraying quality, water and pesticide loss, and crop damage were measured and compared for the four investigated sprayers.

Findings: The results indicated that water and pesticide consumption in the turbine, boom and lance sprayers were 17, 16 and 25 times higher than that of the UAV sprayer, respectively. Among the tested systems, the boom sprayer had the highest field efficiency, while the UAV sprayer had the highest uniformity. Furthermore, the UAV sprayer demonstrated superior spraying efficacy compared to the other methods two weeks after application. In terms of environmental impact, The UAV sprayer had the lowest water and pesticide usage, and the lance sprayer had the highest. In fact, the UAV sprayer poses lower environmental hazards due to lower pest consumption. The boom and lance sprayers caused 3.85% and 4.45% crop damage, respectively.

Conclusions: The findings suggest that UAV spraying technology can significantly reduce input use and environmental risks while maintaining or improving spraying performance. Therefore, the use of UAV sprayers is recommended, whereas the lance sprayer is not advised due to its comparatively higher environmental hazards.

Cite this article: Bagheri, N. (2026). The effect of the UAV sprayer on the reduction of agricultural environmental hazards. *Environmental Hazards Management*, 12 (4), 317-331. DOI: http//doi.org/10.22059/jhsci.2026.412588.930

© The Author(s).
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/10.22059/jhsci.2026.412588.930

Introduction

Pests, diseases, and weeds constitute major threats to agricultural production, human health and environmental sustainability due to their adverse effects on crop yield. At present, their control largely the application of chemical pesticides. These substances are inherently toxic and can cause relies on ,significant harm to human health, soil, water resources, and animals. According to available reports at least 44% —roximately one billion individualsestimated at app—of the global farming population experience pesticide poisoning annually. Chemical pesticides pose health risks through direct contact with farmers, contamination of soil and water resources, and the presence of residues in food products, ding to diseases such as cancerpotentially lea.

In recent years, UAV sprayers have emerged as a novel technology for spraying. Compared with conventional sprayers, UAV sprayers offer greater spray uniformity, higher field efficiency, improved reduced environmental risks operational performance and. Furthermore, in contrast to traditional

spraying methods, aerial spraying minimizes damage to crops and soil structure, requires less labor, lower energy and reduces both water and pesticide consumption. Additional advantages include consumption, reduced spray drift, and diminished environmental hazards.

A review of previous studies indicates that numerous investigations have been conducted on the evaluation of UAV sprayers, sfor various agricultural crops. In these studie, UAV sprayershave primarily been assessed based on technical and, in some cases economic criteria.However, given the critical importance of environmental protection and the pollution associated with conventional luate this technology from an environmental perspective and spraying methods, it is essential to eva compare it with traditional spraying approaches.Therefore, the main objective of this study is to ree assess spraying drones in terms of their environmental impacts, compare their performance with th conventional sprayers, and identify the most suitable technology with the lowest environmental footprint.

Methods

In this study, a UAV sprayer -was evaluated and compared with three conventional sprayers a tractor mounted turbinemounted lance sprayer. Field -ted boom sprayer and a tractormoun-sprayer, a tractor experiments were conducted under real conditions in a canola field for aphid control. The pesticide imidacloprid was applied at a rate of 1 and mixed with water at a ratio of ^{1}L ha^{-} 1:10 being before introduced into the sprayer tanks.The following parameters were evaluated: spray solution application rate, field efficiency spray quality coefficient, spray drift, and crop damage.

Results

Consumption Water and Pesticide

The application volumes for the UAV sprayer, turbine sprayer, boom sprayer, and lance sprayer were 11.1, 187.6, 179.0, and 279.0 L ha^{-1}, respectively. Thus, the UAV sprayer exhibited the lowest application volume, followed by the boom, turbine, and lance sprayers. In fact, the application volumes of the turbine, boom, and lance sprayers were approximately 17, 16, and 25 times higher than that of the UAV sprayer, respectively. The lowest and highest pesticide consumption corresponded to the UAV sprayer and lance sprayer, respectively, while the turbine and boom sprayers showed similar pesticide usage. Considering the direct relationship between increased pesticide consumption and environmental pollution, it can be concluded that the UAV sprayer generates less environmental contamination compared with the three conventional sprayers.

Field Efficiency of Sprayers

The field efficiencies of the UAV sprayer, turbine sprayer, boom sprayer, and lance sprayer were 51.4%, 32.3%, 56.8%, and 41.6%, respectively. Accordingly, the boom sprayer demonstrated the highest field efficiency, followed by the UAV sprayer, while the lance sprayer exhibited the lowest efficiency. Higher field efficiency implies reduced operational delays and time losses during spraying. Spraying speed is particularly critical during pest outbreaks. Therefore, the boom sprayer and UAV sprayer, due to their higher field efficiency, are more effective under such conditions.

Spray Quality Coefficient

The numerical median diameter of droplets for the UAV sprayer, turbine sprayer, boom sprayer, and lance sprayer was 541.8, 680.3, 144.1, and 246.3 μm, respectively. The volumetric median diameter values were 618.1, 814.0, 282.5, and 814.6 μm, respectively. The smallest droplet size was observed for the boom sprayer. According to previous studies, droplet size is a key factor influencing pesticide penetration and deposition. It also plays a crucial role in spray efficiency, drift, and coverage percentage on plant surfaces. Small droplets (less than 200 μm) are prone to evaporation and drift, whereas excessively large droplets fail to provide adequate coverage. Therefore, an optimal droplet size is essential to achieve maximum spraying efficiency while minimizing environmental impacts. The average spray quality coefficients for the UAV sprayer, turbine sprayer, boom sprayer, and lance sprayer were 1.15%, 1.21%, 1.96%, and 3.3%, respectively. These results indicate that the UAV sprayer provides superior spray quality and uniformity compared with other sprayer types.

Spray Drift and Loss of Water and Pesticide

The average spray drift values for the UAV sprayer, turbine sprayer, boom sprayer, and lance sprayer were 10%, 33%, 21%, and 36%, respectively. The lowest losses of water and pesticide per hectare were observed for the UAV sprayer, while the highest losses were associated with the lance sprayer. Due to manual operation and non-uniform spray width and height, the lance sprayer has consistently been identified as one of the least efficient spraying methods, a finding confirmed by the present study. Conversely, the UAV sprayer, with minimal water and pesticide losses, represents the most environmentally compatible spraying method and poses the least risk to both humans and the environment. Furthermore, given the limitations of water resources, the use of UAV sprayers is strongly recommended due to their lower water consumption.

Crop Damage

Crop damage was zero for both the drone sprayer and turbine sprayer, while it was 3.85% and 4.45% for the boom and lance sprayers, respectively. These results indicate that the lance sprayer causes the greatest crop damage, leading to yield reduction. The total cultivated area of canola in the country is 98,720 hectares, with a total production of 197,315 tons. Consequently, approximately 3,801 and 4,393 hectares of cultivated land are lost due to the operation of boom and lance sprayers, respectively. The corresponding yield losses amount to 7,598 and 8,780 tons, which can significantly affect food security.

Conclusion

The objective of this study was to evaluate a UAV sprayerbased on environmental criteria and mounted-compare it with three conventional sprayers, namely a tractor turbine sprayer, mounted lance sprayer-boom sprayer, and a tractor mounted-a tractor.The main findings are summarized as follows:

- The UAV sprayer exhibited the lowest application volume, while the turbine, boomand lance sprayers used approximately 17, 16 and 25 n, respectivelytimes more spray solutio.
- The lowest and highest pesticide consumption were observed for the UAV sprayer and lance sprayer, respectively. Therefore, due to lower pesticide usage of UAV spraying results in sreduced environmental pollution compared with other method.
- The boom sprayer had the highest field efficiency, followed by the UAV sprayer, whilethe lance sprayer had the lowest efficiency.
- The UAV sprayer demonstrated superior spray quality and uniformity along with the lowest spray drift. boom sprayer exhibited lower drift than the Additionally, theturbine and lance sprayers.

Overall, the application of UAV sprayers is recommended due to lower spray solution consumption, reduced water and pesticide losses, lower environmental pollution, absence of crop mage, and higher spray quality compared with other spraying methodsda. In contrast, the use of turbine and lance sprayers is strongly discouraged due to their high water and pesticide consumption and associated crop losses.

Ethical Consideration

The author avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Funding

This paper did not receive financial support.

Conflict of Interest

The author declares no conflict of interest.

انتشارات دانشگاه تهران

مدیریت مخاطرات محیطی

سایت نشریه: https://jhsci.ut.ac.ir

شاپا الکترونیکی: ۴۱۶۸-۲۴۲۳

نقش پهپاد سمپاش در کاهش مخاطرات زیست‌محیطی کشاورزی

نیکروز باقری

دانشیار پژوهشی، مؤسسهٔ تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی. کرج. ایران. رایانامه:n.bagheri@areeo.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقالهٔ پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۲۲
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۰۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۲
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۲/۲۵

کلیدواژه:
پهپاد،
سمپاشی،
کشاورزی دقیق،
مخاطرات.

چکیده

سمپاش‌های رایج برای مهار آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز دارای مشکلاتی مانند مصرف زیاد آب و سم هستند و مخاطرات زیادی برای سلامت انسان و محیط زیست به وجود می‌آورند. در سال‌های اخیر، پهپاد سمپاش به‌عنوان روش نوین سمپاشی مطرح شده و قابلیت‌های خوبی را برای سمپاشی نشان داده است.

اهداف: هدف از این پژوهش، ارزیابی پهپاد سمپاش از نظر آلودگی زیست‌محیطی و مقایسهٔ آن با سه سمپاش رایج شامل سمپاش توربینی پشت‌تراکتوری، سمپاش بوم‌دار پشت‌تراکتوری و سمپاش لانس‌دار پشت تراکتوری است.

روش: پارامترهایی مانند مقدار آب و سم مصرفی، کیفیت سمپاشی، مقدار هدررفت آب و سم، لنگی کار و تلفات محصول در روش‌های مختلف سمپاشی اندازه‌گیری و نتایج با هم مقایسه شد.

یافته‌ها: مقدار محلول مصرفی سمپاش‌های توربینی، بوم‌دار و لانس‌دار به‌ترتیب ۱۷، ۱۶ و ۲۵ برابر محلول مصرفی پهپاد سمپاش بود. سمپاش بوم‌دار بیشترین بازده مزرعه‌ای و پهپاد سمپاش بیشترین ضریب کیفیت پاشش را داشت. پهپاد سمپاش کمترین مقدار مصرف و تلفات سم و آب و سمپاش لانس‌دار بیشترین مقدار مصرف و تلفات سم و آب را داشت. سمپاش‌های بوم‌دار و لانس‌دار سبب لهیدگی محصول و آسیب ۳/۸۵ و ۴/۴۵ درصدی به سطح محصول شدند.

نتیجه‌گیری: با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، کاربرد پهپاد سمپاش به‌دلیل مصرف سم کمتر و آلودگی زیست‌محیطی کمتر برای سمپاشی توصیه شده و سمپاشی با سمپاش لانس‌دار به‌دلیل مصرف زیاد آب و سم و تلفات وارد بر محصول به هیچ‌وجه توصیه نمی‌شود.

استناد: باقری، نیکروز (۱۴۰۴). نقش پهپاد سمپاش در کاهش مخاطرات زیست‌محیطی کشاورزی. *مدیریت مخاطرات محیطی*، ۱۲ (۴)، ۳۱۷-۳۳۱.
DOI: http//doi.org/10.22059/jhsci.2026.412588.930

© نویسندگان **ناشر:** مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
DOI: http//doi.org/10.22059/jhsci.2026.412588.930

مقدمه

امروزه امنیت غذایی به‌دلیل جمعیت روزافزون و محدودیت منابع تولید از دغدغه‌های اصلی بخش کشاورزی است (جابری اقدم و همکاران، ۱۳۹۹). آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز (عوارض زیستی) به‌دلیل کاهش عملکرد محصول، تهدید بزرگی برای امنیت غذایی، سلامت انسان و حفظ محیط زیست هستند (Subramanian *et al*., 2021; Pranaswi *et al*., 2024). خسارت‌های ناشی از آفات و بیماری به محصولات کشاورزی در منابع مختلف حدود ۴۰ درصد گزارش شده است (Subramanian *et al*., 2021; Pranaswi *et al*., 2024).

امروزه برای مهار این عوارض زیستی، از سموم شیمیایی استفاده می‌شود (Yang *et al*., 2019; Zhang *et al*., 2022). سموم شیمیایی سمی‌اند و موجب آسیب به سلامت انسان (به‌ویژه برای کارگران کشاورزی که در معرض مستقیم سم هستند) (Wang *et al*., 2024)، خاک و منابع آب و حیوانات (مانند پرندگان، زنبورها، حشرات مفید، ماهی‌ها و ...) می‌شوند (Carvalho *et al*., 2017). براساس برآورد سازمان بهداشت جهانی، سالانه حدود یک میلیون نفر در اثر سموم شیمیایی آسیب می‌بینند (Pathak *et al*., 2022). براساس یک منبع دیگر، حداقل ۴۴ درصد از جمعیت حدود یک میلیاردی کشاورزان جهان، هرساله مسمومیت با سموم شیمیایی را تجربه می‌کنند (Boedeker *et al*., 2020). براساس بررسی‌ها، ۱۵ درصد از آلودگی آب‌ها ناشی از کاربرد سموم شیمیایی است. سموم شیمیایی از طریق تماس مستقیم با بدن کشاورز، ایجاد آلودگی آب و خاک و وجود باقی‌ماندهٔ آنها در مواد غذایی سبب ایجاد خطر برای سلامت و بروز بیماری‌هایی مانند سرطان می‌شود (برقی و همکاران، ۱۳۹۶).

انواع سمپاش دستی و تراکتوری برای توزیع سموم شیمیایی کاربرد دارند و اجرای درست سمپاشی موجب بهبود ۴۵ درصدی عملکرد محصول می‌شود. با این‌حال نتایج پژوهش‌ها به کافی نبودن کارایی سمپاشی با استفاده از این روش‌ها اشاره دارد (Ahmad *et al*., 2020; Gatkal *et al*., 2025) و در حدود ۴۶ درصد از سموم بر اثر کارکرد نادرست سمپاش‌ها تلف می‌شود (Nobre *et al*., 2023).

سمپاش‌های دستی، دقت پاشش کمی دارند و سمپاشی با آنها زمان‌بر بوده و الگوی پاشش آنها نایکنواخت است. در این روش، مصرف سم بیش از حد استاندارد است که سبب آسیب به سلامت کارگر کشاورزی (بیماری‌هایی مثل سرطان، مشکلات سیستم عصبی، اختلال عملکرد کلیه و ...) و محیط زیست می‌شود (Pranaswi *et al*., 2024; El Yousfi & Alavi., 2025). سمپاش‌های تراکتوری نیز نیاز به نیروی کارگری زیاد دارند و مصرف محلول سم آنها زیاد است که سبب افزایش هزینهٔ سمپاشی و خطرهای محیطی می‌شود. این سمپاش‌ها در اراضی شیبدار یا مرطوب مانورپذیری محدودی دارند و کاربرد آنها موجب پاشش غیریکنواخت و فشردگی خاک (Gunes & Hasegawa, 2025)، تأثیر منفی بر محیط زیست و انتشار دی‌اکسید کربن می‌شود (Semenisin *et al*., 2025). سمپاش بوم‌دار نسبت به انواع سمپاش، بازده مزرعه‌ای بیشتر، مصرف سم کمتر و کیفیت پاشش بیشتری دارد؛ اما کاربرد آن در مزارع دارای پستی و بلندی زیاد، در زمین‌های کوچک و برای محصولات غیرردیفی یا محصولات با ارتفاع بلند محدودیت دارد (Wang *et al*., 2019a).

با توجه به دغدغه‌های موجود، اتحادیهٔ اروپا طرح کاهش ۵۰ درصدی مصرف مواد شیمیایی کشاورزی را تا سال ۲۰۳۰ تدوین کرده است (Testa *et al*., 2025). محدودیت‌های فناوری‌های سمپاشی موجود از یک طرف و تدوین برنامهٔ کاهش مصرف سموم از طرف دیگر، ضرورت کاربرد سمپاش‌های منعطف‌تر پربازده و سازگار با محیط زیست را آشکار می‌کند (Gunes & Hasegawa, 2025e). در سال‌های اخیر، پهپادهای سمپاش به‌عنوان نسل جدید سمپاش‌های کشاورزی پا به عرصه گذاشته‌اند و کاربرد آنها در حال افزایش است (Paul *et al*., 2024a). پهپاد در مقایسه با سمپاش‌های رایج دقت و یکنواختی پاشش بیشتر (Gunes & Hasegawa, 2025; Pranaswi *et al*., 2024)، بازده مزرعه‌ای و کارایی سمپاشی بیشتر، و خطرهای زیست‌محیطی کمتری دارد (Yang *et al*., 2019; Gatkal *et al*., 2025). همچنین، این نوع سمپاش در مقایسه با روش‌های دیگر سمپاشی، آسیب به محصول یا بافت خاک نمی‌زند، نیروی کاری کمتر و مصرف محلول کمتری دارد (Pranaswi *et al*., 2024).

پژوهش‌های پیشین، نشان‌دهندهٔ کاربرد موفقیت‌آمیز پهپاد برای سمپاشی است (Chen *et al*., 2019). پهپاد می‌تواند مصرف کود و آفت‌کش را به‌دلیل کاهش محلول مصرفی، ۲۰–۱۵ درصد کاهش دهد (Delavarpour *et al*., 2023). پهپاد سرعت

سمپاشی و بازده مزرعه‌ای را افزایش و مصرف محلول (سم و آب) و هزینهٔ سمپاشی را به‌ویژه در زمین‌های کوچک کاهش می‌دهد (Pranaswi *et al*., 2024; Wang *et al*., 2024) و برخلاف سمپاش‌های رایج توانایی سمپاشی مزارع غیرردیفی، ناصاف (Faical *et al*., 2017)، شالیزارها، کوه‌ها و تپه‌ها را دارد (Gatkal *et al*., 2025) و سبب لهیدگی محصول نمی‌شود (Pranaswi et al., 2024). نیاز نداشتن به باند پرواز، فشرده نکردن خاک (Semenisin *et al*., 2025)، کاهش مصرف انرژی، کاهش بادبردگی محلول و کاهش مخاطرات زیست‌محیطی از دیگر مزایای سمپاشی با پهپاد سمپاش است (Taseer & Han, 2024; Gunes & Hasegawa, 2025).

در چند سال گذشته، پژوهش‌های متعددی در زمینهٔ ارزیابی پهپادهای سمپاش برای مبارزه با انواع عوارض زیستی محصولات کشاورزی گوناگون اجرا شده است. در پژوهشی، نتایج ارزیابی پهپاد سمپاش و سمپاش لانس‌دار در سمپاشی برنج مقایسه شد (Qin *et al*., 2016). میانگین کارایی سمپاشی با پهپاد سمپاش ۸۳ درصد به دست آمد که بیشتر از کارایی سمپاشی با سمپاش لانس‌دار (۷۵ درصد) بود. در پژوهش‌هایی نشان دادند که در مبارزه با آفات گندم، سمپاشی با پهپاد نسبت به سمپاشی با سمپاش پشتی، کارایی بیشتری دارد و بازده مزرعه‌ای پهپاد سمپاش (برابر با ۴/۱ هکتار در ساعت) به‌ترتیب ۱/۷ و ۲/۶ برابر بازده مزرعه‌ای سمپاش بوم‌دار خودگردان و توربینی است (Wang *et al*; 2019 a,b). نتایج ارزیابی عملکرد و کارایی سمپاشی در دو روش سمپاشی با پهپاد سمپاش و سمپاش بوم‌دار در پاشش محلول برگ‌ریز پنبه مقایسه شد (Meng *et al*., 2019). نتایج عملکرد مشابه دو روش سمپاشی را نشان داد. در پژوهشی به ارزیابی مزرعه‌ای یک پهپاد سمپاش برای مبارزه با آفات کاهو پرداختند (Del Pozo-Valdivia *et al*., 2021). نتایج نشان داد که سمپاشی با پهپاد سمپاش سبب کاهش تراکم آفات شده است. نشان داده شد که در سمپاشی با پهپاد سمپاش برای مبارزه با آفات و علف‌های هرز، عملکرد محصول بیشتر از حالت سمپاشی با سمپاش پشتی بوده است. این در حالی است که مصرف محلول سم در سمپاش پشتی ۲۰ برابر بیشتر از مصرف محلول سم در پهپاد سمپاش است. همچنین کارایی سمپاشی در مبارزه با آفات برنج از سه تا ده روز بعد از سمپاشی، از ۷۴ تا ۹۲ درصد به دست آمد (Cumar *et al*., 2022). در پژوهشی نتایج ارزیابی فنی پهپاد سمپاش و سمپاش پشتی مقایسه شد (Jeevan *et al*., 2023). نتایج نشان داد که پهپاد با وجود مصرف محلول کمتر (۳۷/۵ لیتر در هکتار)، از نظر مقدار توزیع قطرات و پاشش روی هدف، مشابه سمپاش پشتی با مصرف ۵۰۰ لیتر محلول در هکتار است. نتایج پژوهش‌ها نشان داده که عملکرد پهپاد سمپاش با مقدار پاشش ۳۰ لیتر در هکتار، مشابه عملکرد سمپاش پشتی است (Paul *et al*., 2024a; Pranaswi *et al*., 2024). نشان داده شد که محلول مصرفی پهپاد سمپاش ۲۰ برابر کمتر از محلول مصرفی سمپاش پشتی است (Wang *et al*; 2023 a).

همان‌گونه که مرور پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد تا کنون تحقیقات زیادی در زمینهٔ ارزیابی پهپادهای سمپاش برای سمپاشی محصولات کشاورزی گوناگون انجام گرفته است. در تمامی این پژوهش‌ها، پهپاد سمپاش از نظر معیارهای فنی و در برخی موارد اقتصادی بررسی شده است. با این‌حال، با توجه به اهمیت حفظ محیط زیست و آلودگی‌های زیست‌محیطی ایجادشده به‌وسیلهٔ سمپاش‌ها، باید این فناوری از نظر معیارهای زیست‌محیطی نیز ارزیابی و با روش‌های مرسوم سمپاشی مقایسه شود. هدف اصلی این پژوهش ارزیابی پهپاد سمپاش از نظر زیست‌محیطی و مقایسهٔ نتایج آن با سه سمپاش رایج دیگر و معرفی فناوری مناسب سمپاشی با کمترین آلایندگی زیست‌محیطی است.

روش تحقیق

در این پژوهش پهپاد سمپاش از نظر اثرهای زیست‌محیطی ارزیابی و با سه نوع سمپاش رایج شامل سمپاش توربینی باغی پشت‌تراکتوری، سمپاش بوم‌دار پشت‌تراکتوری و سمپاش لانس‌دار پشت تراکتوری مقایسه شد. برای دستیابی به داده‌های میدانی در شرایط واقعی، سمپاش‌ها در یک مزرعه با محصول کلزا و برای مبارزه با شته، ارزیابی شدند. اندازهٔ کرت‌های سمپاشی برای هر سمپاش ۱۰ ×۱۰۰ متر بود.

آفت‌کش ایمیداکلوپراید به مقدار یک لیتر در هکتار با نسبت ۱ به ۱۰ با آب مخلوط و در مخزن سمپاش‌ها ریخته شد. در زمان سمپاشی، متوسط دمای هوا ۲۱–۱۵ درجهٔ سلسیوس و رطوبت نسبی هوا ۳۰–۱۰ درصد (با استفاده از دستگاه دیجیتالی

سنجش دما–رطوبت) و متوسط سرعت باد ۶–۲ متر در ثانیه (با استفاده از بادسنج پره‌ای دیجیتالی برند UNI-T مدل UT363BT) ثبت شد. در شکل۱، سمپاش‌ها هنگام سمپاشی مزرعه و در جدول ۱، مشخصات فنی سمپاش‌ها ارائه شده است.

شکل ۱. چهار مدل سمپاش آزمون‌شده: سمپاش بوم‌دار پشت‌تراکتوری (a)، سمپاش لانس‌دار پشت‌تراکتوری (b)، پهپاد سمپاش (c)، سمپاش توربینی (d).

جدول ۱. مشخصات فنی سمپاش‌های آزمایش‌شده

نوع سمپاش	حجم مخزن پرشده (لیتر)	عرض مؤثر پاشش (متر)	نوع افشانک	ارتفاع پاشش از سطح زمین (متر)	دبی کل (لیتر در دقیقه)
پهپاد سمپاش	۱۰	۴/۵	بادبزنی تخت	۱/۸	۱/۸
سمپاش توربینی	۱۲۰	۲۸	مخروطی	۲/۵	۶۴/۸
سمپاش بوم‌دار	۲۰۰	۱۱	مخروطی	۰/۸	۲۶/۲
سمپاش لانس‌دار	۲۵۰	۸	مخروطی	۰/۹	۶/۷

پارامترها به روش‌های زیر اندازه‌گیری شدند:

مقدار محلول مصرفی

یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی سمپاش‌ها مقدار محلول مصرفی است. مقدار محلول مصرفی (شامل محلول آب و سم) در هر هکتار از رابطهٔ ۱ به دست آمد (Chen *et al*., 2020):

$$Q = \frac{600 \times q}{V \times W} \quad (۱)$$

که در آن:

V: سرعت پیشروی ($Km\ hr^{-1}$)، q: دبی همهٔ افشانک‌ها ($L\ min^{-1}$)، W: عرض کار مؤثر (m)، Q: محلول مصرفی ($L\ ha^{-1}$).

بازده مزرعه‌ای

بازده مزرعه‌ای[1] پارامتری است که عملکرد عملیات را نشان می‌دهد و از رابطهٔ ۲ به دست می‌آید (باقری و همکاران، ۱۴۰۳):

$$E = \left(\frac{C_o}{V \times W}\right) \times 10 \quad (۲)$$

E: بازده مزرعه‌ای (٪)، C_o: ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر ($ha\ hr^{-1}$)، V: سرعت پیشروی ($Km\ hr^{-1}$) و W: عرض کار اسمی (m).

1. Field Efficiency

ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر (C_o)، سطح واقعی سمپاشی شده در عرض ۱ ساعت است که به‌صورت عملی اندازه‌گیری شد.

ضریب کیفیت پاشش

ضریب کیفیت پاشش، معیار یکنواختی پاشش است که از تقسیم قطر میانهٔ حجمی[1] بر قطر میانهٔ عددی[2] به دست می‌آید (Zhua *et al.*, 2011). برای اندازه‌گیری قطر میانهٔ حجمی و عددی، از کاغذهای حساس به آب شد. این کاغذها ابتدا شماره‌گذاری شده و با فاصلهٔ نیم‌متری از هم در جهت عمود بر مسیر حرکت سمپاش (در طول عرض پاشش) قرار داده شدند. کاغذها پس از سمپاشی و خشک شدن، جمع‌آوری شدند. در سمپاشی با سمپاش لانس‌دار پشت‌تراکتوری و توربینی، برخی از کارت‌ها به‌طور کامل خیس شده بودند و امکان تحلیل آنها وجود نداشت. کاغذها با اسکنر با قدرت تفکیک[3] ۳۰۰dpi اسکن شدند. سپس، تعداد و قطر قطره‌ها با نرم‌افزار Image J اندازه‌گیری شد. در این نرم‌افزار، ابتدا تصویر کاغذها به‌صورت باینری درمی‌آید و مقیاس‌دهی می‌شود. سپس با تعیین حد آستانهٔ مناسب برای هر تصویر، قطره‌ها از تصویر زمینه جدا، تعداد آنها شمارش و قطر آنها اندازه‌گیری می‌شود. قطرهای میانهٔ عددی و حجمی با استفاده از رابطهٔ زیر به دست آمدند (Behrouzi Lar, 1999):

$$D_{pq}^{p-q} = \left(\sum_{i=1}^{n} NiD_i^p \Big| \sum_{i=1}^{n} NiD_i^q \right)^{\frac{1}{(p-q)}} \quad (۳)$$

p و q: اعداد صحیح، p>q. (برای محاسبهٔ قطر میانه عددی p=۱،q=۰؛ برای محاسبهٔ قطر میانهٔ حجمی p=۳ و q=۰)، D_i: قطر قطره برای گروه اندازهٔ i (µm)، Ni: تعداد قطره در گروه اندازهٔ i، i: تعداد اندازهٔ گروه، n: تعداد گروه اندازه‌ها.

بادبردگی قطرات محلول سم

برای اندازه‌گیری بادبردگی[4] قطرات محلول سم، ۱۵ عدد کاغذ حساس به آب در مزرعه (روی تاج بوته‌ها) و در خارج از محدودهٔ عرض کار سمپاشی به فاصلهٔ ۱ متری از هم قرار داده شدند. بادبردگی (به‌صورت درصد) از تقسیم تعداد کاغذهای خیس‌شده به تعداد همهٔ کاغذهای نصب‌شده (۱۵ عدد) به دست آمد (Abd Kharim *et al.*, 2019).

مقدار لهیدگی محصول

پهپاد سمپاش به‌دلیل پرواز در ارتفاعی بالاتر از سطح محصول و سمپاش توربینی به‌دلیل سمپاشی از کنار مزرعه، لهیدگی برای محصول ایجاد نکردند. سطح لهیدگی[5] سمپاش بوم‌دار پشت‌تراکتوری از نسبت مساحت طی‌شده به‌وسیلهٔ عبور چرخ‌های تراکتور به تمام مساحت سمپاشی‌شدهٔ مزرعه به دست آمد (صفری و گرامی، ۱۳۹۸). برای اندازه‌گیری سطح لهیدگی ناشی از سمپاش لانس‌دار پشت‌تراکتوری، سطح لهیدگی شامل مجموع سطح لهیدگی ناشی از چرخ‌های تراکتور و سطح لهیدگی ناشی از تردد کشاورز در مزرعه (نسبت مساحت کف کفش‌های کاربر نسبت به کل مساحت سمپاشی‌شده) بود.

نتایج و بحث

مقدار سم و آب مصرفی سمپاش‌ها

در جدول ۲، مقدار سم و آب مصرفی چهار نوع سمپاش ارائه شده است. حجم محلول مصرفی پهپاد سمپاش، سمپاش توربینی، سمپاش‌های بوم‌دار و لانس‌دار به‌ترتیب ۱۱/۱، ۱۸۷/۶، ۱۷۹/۰ و ۲۷۹/۰ لیتر در هکتار به دست آمد. بنابراین پهپاد سمپاش کمترین مصرف محلول را دارد. سمپاش‌های بوم‌دار، توربینی و لانس‌دار به‌ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار دارند. در واقع محلول مصرفی سمپاش‌های توربینی، بوم‌دار و لانس‌دار به‌ترتیب ۱۷، ۱۶ و ۲۵ برابر محلول مصرفی پهپاد سمپاش بود. علت مصرف کمتر پهپاد

1. Volume Median Diameter (VMD)
2. Number Median Diameter (NMD)
3. Resolution
4. Drift
5. The percent of Crop Damage Surface

سمپاش، کمتر بودن دبی خروجی آن است. از طرفی، جریان گردابی رو به پایین ایجادشده به‌وسیلهٔ روتورهای پهپاد سبب کاهش اندازهٔ ذرات و توزیع بهتر آنهاست. بنابراین در سمپاشی با پهپاد نسبت به روش‌های دیگر سمپاشی، به افزایش حجم محلول نیاز نیست و مقدار کمتر محلول می‌تواند با این سازوکار، اثربخشی کافی داشته باشد که این موضوع یکی از مزیت‌های پهپاد سمپاش است. ظریف‌نشاط (۱۴۰۱) نیز حجم محلول سم مصرفی پهپاد سمپاش و سمپاش توربینی را به‌ترتیب ۱۱/۱ و ۲۴۹/۱ لیتر در هکتار به دست آورد. Lamare و همکاران (۲۰۲۲) حجم مصرفی سمپاش بوم‌دار را ۱۵۸ لیتر در هکتار گزارش کردند.

براساس دوز سم (نسبت ۱ به ۱۰)، مقدار سم مصرفی در هکتار برای هر یک از سمپاش‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. کمترین و بیشترین مصرف سم به‌ترتیب متعلق به پهپاد سمپاش و سمپاش لانس‌دار است. سمپاش‌های توربینی و بوم‌دار مصرف سم مشابهی دارند. افزایش دقت سمپاشی پهپاد سمپاش و ایجاد جریان گردابی ایجادشده به‌وسیلهٔ روتورهای پهپاد، موجب نشست بهتر محلول سم و کاهش بادبردگی شده است. با توجه به ارتباط مستقیم بین افزایش مصرف سم با افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی، می‌توان نتیجه گرفت که پهپاد سمپاش در مقایسه با سه نوع سمپاش رایج، آلودگی زیست‌محیطی کمتری ایجاد می‌کند.

جدول ۲. مقدار سم و آب مصرفی سمپاش‌های آزمون‌شده

نوع سمپاش	حجم محلول مصرفی (لیتر در هکتار)	مقدار سم مصرفی (لیتر در هکتار)
پهپاد سمپاش	۱۱/۱	۱/۱
سمپاش توربینی	۱۸۷/۶	۱۸/۸
سمپاش بوم‌دار	۱۷۹/۰	۱۷/۹
سمپاش لانس‌دار	۲۷۹/۰	۲۷/۹

بازده مزرعه‌ای سمپاش‌ها

براساس نتایج ارائه‌شده در جدول۳، ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر پهپاد سمپاش، سمپاش توربینی، سمپاش بوم‌دار و سمپاش لانس‌دار به‌ترتیب ۵/۰، ۶/۷، ۵/۰ و ۰/۶ هکتار در ساعت به دست آمد. بنابراین سمپاش بوم‌دار بیشترین ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر را دارد و سمپاش‌های توربینی و پهپاد سمپاش دارای ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر مشابه و کمتر از سمپاش بوم‌دار هستند. سمپاش لانس‌دار کمترین ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر را دارد که به‌علت کم بودن عرض کار و سرعت حرکت آن (به‌دلیل متکی بودن بر نیروی انسانی) است.

بازده مزرعه‌ای پهپاد سمپاش، سمپاش توربینی و سمپاش‌های بوم‌دار و لانس‌دار به‌ترتیب ۵۱/۴، ۳۲/۳، ۵۶/۸ و ۴۱/۶ درصد است. بنابراین سمپاش بوم‌دار بیشترین بازده مزرعه‌ای را داشته و پهپاد سمپاش در رتبهٔ بعدی قرار دارد. سمپاش لانس‌دار کمترین بازده مزرعه‌ای را دارد. بازده کاری بیشتر به‌معنای لنگی کار و تلفات زمانی سمپاشی کمتر (کاهش زمان سمپاشی) است. بازده مزرعه‌ای بیشتر سمپاش بوم‌دار به‌دلیل عرض کاری مؤثر بیشتر به‌دلیل وجود دیرک (بوم) برای نصب تعداد زیاد افشانک است. همچنین بازده مزرعه‌ای مناسب پهپاد سمپاش به‌دلیل مصرف محلول کمتر و نیاز به زمان کمتر برای پر کردن مخزن است که موجب کاهش تلفات زمانی می‌شود. انواع سمپاش نیاز به صرف زمان برای دور زدن و قرار گرفتن در ردیف بعدی کشت دارند که این زمان برای پهپاد به‌دلیل کوچک بودن آن و پرواز از بالای محصول (به‌جای حرکت روی زمین) کمتر است. بازده مزرعه ای پهپاد سمپاش با افزایش تعداد باتری‌های شارژشدهٔ در دسترس و کاهش توقف عملیات برای شارژ شدن باتری افزایش می یابد. در پژوهشی بازده مزرعه‌ای پهپاد سمپاش را ۵۲ درصد به دست آوردند که به نتیجهٔ پژوهش حاضر بسیار نزدیک است (Xue *et al*., 2020). پژوهشگران ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر پهپاد سمپاش، سمپاش بوم‌دار، سمپاش توربینی و سمپاش پشتی الکتریکی را به‌ترتیب ۴/۱۱، ۲/۳۸، ۱/۵۷ و ۰/۲۱ هکتار در ساعت به دست آوردند (Wang *et al*., 2019a).

سرعت سمپاشی به‌ویژه در زمان طغیان آفت برای کاهش تلفات محصول بسیار مهم است. سمپاش بوم‌دار و پهپاد سمپاش با توجه به بازده مزرعه‌ای بیشتر در شرایط شیوع آفت، کارامدتر هستند. با این‌حال، اگر در زمان طغیان، ارتفاع بوته زیاد باشد، کاربرد سمپاش بوم‌دار به‌دلیل پایین بودن شاسی آن و ممکن نبودن عبور از روی محصول، مناسب سمپاشی نیست و کاربرد پهپاد سمپاش در این شرایط بهترین راه حل است.

جدول ۳. بازده مزرعه‌ای سمپاش‌های آزمایش‌شده

نوع سمپاش	عرض مؤثر پاشش (متر)	میانگین سرعت (کیلومتر در ساعت)	ظرفیت مزرعه‌ای تئوری (هکتار در ساعت)	ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر (هکتار در ساعت)	بازده مزرعه‌ای (درصد)
پهپاد سمپاش	۴/۵	۲۱/۶	۹/۷	۵/۰	۵۱/۴
سمپاش توربینی	۲۸	۷/۴	۲۰/۷	۶/۷	۳۲/۳
سمپاش بوم‌دار	۱۱	۸/۰	۸/۸	۵/۰	۵۶/۸
سمپاش لانس‌دار	۸	۱/۸	۱/۴	۰/۶	۴۱/۶

کیفیت پاشش

نتایج ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی قطرات و یکنواختی پاشش سمپاش‌ها در جدول۴ ارائه شده است. میانگین قطر میانهٔ عددی قطره‌های محلول سم برای پهپاد سمپاش و سمپاش‌های توربینی، بوم‌دار و لانس‌دار به‌ترتیب ۵۴۱/۸، ۶۸۰/۳، ۱۴۴/۱ و ۲۴۶/۳ میکرون و قطر میانهٔ حجمی قطره‌های محلول سم برای پهپاد سمپاش و سمپاش‌های توربینی، بوم‌دار و لانس‌دار به‌ترتیب ۶۱۸/۱، ۸۱۴/۰، ۲۸۲/۵ و ۸۱۴/۶ میکرون به دست آمد. بنابراین کمترین قطر قطره‌ها متعلق به سمپاش بوم‌دار است که علت آن فشار زیاد پمپ سمپاش است. براساس نتایج پژوهش‌ها، اندازهٔ قطره‌ها یکی از عوامل تأثیرگذار بر نفوذ و نشست محلول سم است (Ahmad *et al*., 2020). همچنین اندازهٔ قطره‌ها نقش مهمی بر کارایی سمپاشی داشته و بر بادبردگی و مقدار پوشش محصول تأثیر دارد. قطرات کوچک (با قطر کمتر از ۲۰۰ میکرون) ممکن است تبخیر شوند یا در معرض بادبردگی قرار گیرند (Gunes & Hasegawa ., 2025). قطره‌های بزرگ نیز پوشش کافی ایجاد نمی‌کند. بنابراین اندازهٔ بهینهٔ قطره‌ها برای نشست بهتر روی هدف و کاهش آلودگی لازم است.

میانگین ضریب کیفیت پاشش پهپاد سمپاش و سمپاش‌های توربینی، بوم‌دار و لانس‌دار به‌ترتیب ۱/۱۵، ۱/۲۱، ۱/۹۶ و ۳/۳ درصد به دست آمد که نشان می‌دهد پهپاد سمپاش از کیفیت و یکنواختی پاشش بیشتری نسبت به انواع دیگر سمپاش برخوردار است. این موضوع به‌دلیل تأثیر جریان رو به پایین روتورهاست که با ایجاد فشار روی قطره‌ها از بادبردگی یا بخش آنها جلوگیری کرده و آنها را به‌سمت پایین و روی سر محصول هدایت می‌کند. در پژوهش صفری و شیخی‌گرجان (۲۰۱۸) ضریب کیفیت پاشش پهپاد سمپاش ۱/۳۵ به دست آمد که به نتیجهٔ این پژوهش نزدیک است.

جدول ٤. میانگین ضریب کیفیت پاشش سمپاش‌های آزمایش‌شده

نوع سمپاش	میانگین ضریب کیفیت پاشش	میانگین قطر میانهٔ عددی (میکرون)	میانگین قطر میانهٔ حجمی (میکرون)
پهپاد سمپاش	۱/۱۵	۵۴۱/۸	۶۱۸/۱
سمپاش توربینی	۱/۲۱	۶۸۰/۳	۸۱۴/۰
سمپاش بوم‌دار	۱/۹۶	۱۴۴/۱	۲۸۲/۵
سمپاش لانس‌دار	۳/۳۰	۲۴۶/۳	۸۱۴/۶

بادبردگی و هدررفت آب و سم

مقدار بادبردگی و هدررفت آب و سم در روش‌های مختلف سمپاشی در جدول ۵ ارائه شده است. میانگین مقدار بادبردگی در پهپاد سمپاش ۱۰ درصد، در سمپاش توربینی ۳۳ درصد، در سمپاش بوم‌دار ۲۱ درصد و در سمپاش لانس‌دار ۳۶ درصد به دست آمد. کمتر بودن مقدار بادبردگی پهپاد سمپاش و سمپاش بوم‌دار به‌دلیل دقت پاشش ذاتی این دو روش سمپاشی و ارتفاع کم پاشش است که موجب می‌شود قطره‌های سم بهتر روی هدف بنشینند. همچنین همان‌طور که پیشتر گفته شد، رابطهٔ مستقیمی بین جریان گردابی ایجادشده به‌وسیلهٔ روتورهای پهپاد و توزیع و نفوذ محلول سم و کاهش بادبردگی وجود دارد (Ahmad *et al*., 2020; Semenisin *et al*., 2025). بیشتر بودن ارتفاع پاشش سمپاش لانس‌دار و غیریکنواخت بودن ارتفاع و عرض پاشش در

حرکت لانس، موجب افزایش بادبردگی شده است. یو و همکاران (۲۰۱۴) بادبردگی قطرات را در سمپاشی با پهپاد سمپاش ۱۳ درصد به دست آوردند (Xue *et al*., 2014). در پژوهشی بادبردگی پهپاد سمپاش و سمپاش لانس‌دار را به‌ترتیب ۱۳ و ۵۲ درصد به دست آوردند (Safari *et al*., 2025). برای مهار آفات و بیماری‌های گندم در سمپاشی با پهپاد سمپاش، قطره‌های بزرگ‌تر از ۱۵۰ میکرون و حجم پاشش بیش از ۱۷ لیتر در هکتار توصیه شده است (Delavarpour *et al*., 2023).

براساس نتایج این جدول، مقدار آب هدررفته و همچنین سم هدررفته در هر هکتار سمپاشی، برای پهپاد سمپاش کمترین و برای سمپاش لانس‌دار بیشترین مقدار است. با توجه به اینکه در سمپاش لانس‌دار، سمپاشی توسط کارگر و با عرض و ارتفاع پاشش غیریکنواخت انجام می‌گیرد، این نوع سمپاش همواره از نامناسب‌ترین سمپاش‌های موجود معرفی شده است و نتایج این پژوهش نیز این موضوع را به‌خوبی نشان می‌دهد. از طرفی پهپاد سمپاش به‌دلیل دارا بودن کمترین تلفات آب و سم، و ایجاد آلودگی سم کمتر، سازگارترین روش سمپاشی با محیط زیست است و کمترین مخاطره را برای انسان و محیط زیست دارد. همچنین به‌دلیل محدودیت منابع آبی کشور، کاربرد پهپاد سمپاش به‌دلیل مصرف آب کمتر (درحالی که بیشترین مقدار کارایی سمپاشی را نیز دارد) توصیه می‌شود.

جدول ۵. مقدار بادبردگی و هدررفت آب و سم در روش‌های مختلف سمپاشی

نوع سمپاش	میانگین بادبردگی قطرات محلول (درصد)	حجم محلول مصرفی (لیتر در هکتار)	مقدار محلول هدررفته (لیتر در هکتار)	مقدار آب هدررفته (لیتر در هکتار)	مقدار سم هدررفته (لیتر در هکتار)
پهپاد سمپاش	۱۰	۱۱/۱	۱/۱۱	۱/۰	۰/۱۱
سمپاش توربینی	۳۳	۱۸۷/۶	۶۱/۹۰	۵۵/۷	۶/۱۹
سمپاش بوم‌دار	۲۱	۱۷۹/۰	۳۷/۵۹	۳۳/۸	۳/۷۶
سمپاش لانس‌دار	۳۶	۲۷۹/۰	۱۰۰/۴۴	۹۰/۴	۱۰/۰۴

لهیدگی محصول

سطح لهیدگی محصول برای پهپاد سمپاش و سمپاش توربینی صفر و برای سمپاش‌های بوم‌دار و لانس‌دار پشت‌تراکتوری به‌ترتیب ۳/۸۵ و ۴/۴۵ درصد به دست آمد. این نتیجه نشان می‌دهد که سمپاش لانس‌دار بیشترین آسیب را به محصول می‌زند و موجب کاهش عملکرد می‌شود. براساس آمار وزارت جهاد کشاورزی (۱۴۰۲)، کل سطح زیر کشت کلزا در کشور ۹۸۷۲۰ هکتار و مقدار تولید آن ۱۹۷۳۱۵ تن است. بنابراین سطح ۳۸۰۱ و ۴۳۹۳ هکتار از کل سطح زیر کشت کلزا در اثر ورود به‌ترتیب سمپاش‌های بوم‌دار و لانس‌دار به مزرعه از بین می‌رود. خسارت وارد بر محصول برای سمپاش‌های بوم‌دار و لانس‌دار به‌ترتیب ۷۵۹۸ و ۸۷۸۰ تن محصول است. این مقدار تلفات تأثیر منفی بر امنیت غذایی دارد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

هدف این پژوهش، ارزیابی پهپاد سمپاش از نظر زیست‌محیطی و مقایسه آن با سه سمپاش رایج شامل سمپاش توربینی پشت‌تراکتوری، سمپاش بوم‌دار پشت‌تراکتوری، و سمپاش لانس‌دار پشت تراکتوری برای مبارزه با آفت بود. پارامترهایی مانند مقدار آب و سم مصرفی، کیفیت سمپاشی، مقدار هدررفت آب و سم، لنگی کار و تلفات ناشی از لهیدگی محصول در روش‌های مختلف سمپاشی اندازه‌گیری و با هم مقایسه شدند. جمع‌بندی نتایج به‌دست‌آمده به‌شرح زیر است:

– حجم محلول مصرفی پهپاد سمپاش، سمپاش توربینی، سمپاش‌های بوم‌دار و لانس‌دار به‌ترتیب ۱۱/۱، ۱۸۷/۶، ۱۷۹/۰ و ۲۷۹/۰ لیتر در هکتار به دست آمد. محلول مصرفی سمپاش‌های توربینی، بوم‌دار و لانس‌دار به‌ترتیب ۱۷، ۱۶ و ۲۵ برابر محلول مصرفی پهپاد سمپاش بود. بنابراین پهپاد سمپاش کمترین مقدار مصرف محلول را دارد؛

– کمترین و بیشترین مصرف سم به‌ترتیب متعلق به پهپاد سمپاش و سمپاش لانس‌دار بود. بنابراین با توجه به مصرف سم کمتر در سمپاشی با پهپاد سمپاش، این روش سمپاشی نسبت به دیگر روش‌های سمپاشی آلودگی‌های زیست‌محیطی کمتری ایجاد می‌کند؛

- سمپاش بوم‌دار بیشترین ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر و سمپاش لانس‌دار کمترین ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر را داشتند. سمپاش بوم‌دار بیشترین بازده مزرعه‌ای را داشته و پهپاد سمپاش در رتبه بعدی قرار داشت و سمپاش لانس‌دار کمترین بازده مزرعه‌ای را داشت؛
- کمترین قطر قطره‌ها متعلق به سمپاش بوم‌دار بود. میانگین ضریب کیفیت پاشش پهپاد سمپاش، و سمپاش‌های توربینی، بوم‌دار و لانس‌دار به‌ترتیب ۱/۱۵، ۱/۲۱، ۱/۹۶ و ۳/۳ درصد به دست آمد که نشان می‌دهد پهپاد سمپاش از کیفیت و یکنواختی پاشش بیشتری نسبت به انواع دیگر سمپاش برخوردار است؛
- پهپاد سمپاش کمترین مقدار بادبردگی قطره‌ها را داشت. بادبردگی سمپاش بوم‌دار کمتر از مقدار بادبردگی سمپاش‌های توربینی و لانس‌دار بود؛
- پهپاد سمپاش کمترین و سمپاش لانس‌دار بیشترین تلفات آب و سم را داشتند.
- سمپاش‌های بوم‌دار و لانس‌دار به‌ترتیب سبب لهیدگی ۳۸۰۱ و ۴۳۹۳ هکتار از کل سطح زیر کشت کلزا و تلفات ۷۵۹۸ و ۸۷۸۰ تن محصول شدند.

با توجه به نتایج، کاربرد پهپاد سمپاش به‌دلیل مصرف محلول کمتر، تلفات کمتر آب و سم، آلودگی زیست‌محیطی کمتر، عدم لهیدگی محصول و ضریب کیفیت پاشش بیشتر نسبت به روش‌های دیگر سمپاشی، توصیه می‌شود. گزینهٔ بعدی، سمپاش بوم‌دار است؛ به‌شرط آنکه ارتفاع محصول زیاد نباشد. کاربرد سمپاش‌های توربینی و به‌ویژه سمپاش لانس‌دار به‌دلیل مصرف زیاد آب و سم و تلفات محصول به هیچ‌وجه توصیه نمی‌شود.

به‌طور کلی دستاورد این پژوهش این است که کاربرد پهپاد سمپاش در ارتفاع و سرعت پرواز استاندارد، نسبت به روش‌های رایج سمپاشی از نظر فنی و کاهش مخاطرات زیست‌محیطی ناشی از مصرف سم توصیه می‌شود.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسنده اصول اخلاقی را در اجرا و انتشار پژوهش رعایت کرده است.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسنده، این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

این مقاله حمایت مالی نداشته است.

منابع

[۱] باقری، نیکروز؛ صفری، محمود؛ و شیخی‌گرجان، عزیز (۱۴۰۳). ارزیابی عملکرد پهپاد سمپاش در کنترل شتهٔ کلزا. *ماشین‌های کشاورزی*. ۱۴ (۲)، ۱۳۵-۱۴۶.

[۲] برقی، حمید؛ حسنی‌نژاد، آسیه؛ و شایان، محسن (۱۳۹۶). ارزیابی آثار سموم شیمیایی کشاورزی بر محیط زیست روستاها (مطالعهٔ موردی: روستاهای شهرستان زرین‌دشت). *مدیریت مخاطرات محیطی*. ۴(۳)، ۲۴۷-۲۶۲.

[۳] جابری‌اقدم، مهریار؛ ممیزی، محمدرضا؛ باقری، نیکروز؛ عزیزی، پیمان؛ و نصری، محمد (۱۳۹۹). تشخیص تنش نیتروژن گیاه ذرت و مخاطرات آن با استفاده از تصویربرداری چندطیفی هوایی به‌وسیلهٔ پهپاد. *مدیریت مخاطرات محیطی*. ۷(۲)، ۱۶۳-۱۸۰. https://doi.org/10.22059/jhsci.2020.305887.575

[۴] صفری، محمود؛ و گرامی، کریم (۱۳۹۸). اولویت‌بندی روش‌های سمپاشی مزارع گندم با استفاده از روش سلسله‌مراتبی. *مهندسی بیوسیستم ایران*. (۱)۵۱. ۱۴۸-۱۳۹. https://doi.org/ 10.22059/IJBSE.2019.287967.665217

[۵] ظریف نشاط، سعید (۱۴۰۱). ارزیابی فنی و اقتصادی پهپاد سمپاش برای کنترل علف‌های هرز در مقایسه با روش‌های مرسوم. گزارش نهایی. مؤسسهٔ تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی. ۵۹۹۰۳.

[۶] کیهانیان، علی‌اکبر؛ شیخی‌گرجان، عزیز؛ و امینی خلف، محمدعلی (۱۳۸۷). بررسی کارایی حشره‌کش‌های مختلف در کنترل شتهٔ مومی کلم *Brevicoryne brassicae* L. (Hem: Aphididae) در مزارع کلزای ساوه. *پژوهش و سازندگی (ویژه‌نامهٔ زراعت و باغبانی)*، ۱۶۳-۱۶۷.

[7] Abd Kharim, M. N. A., Wayayok, A., Shariff, Sharif, A. R. M., Abdullah, A. F., & Husin, E. M. (2019). Droplet deposition density of organic liquid fertilizer at low altitude UAV aerial spraying in rice cultivation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 167, 105045.

[8] Ahmad, F., Qiu, B., Dong, X., Ma, J., Huang, X., Ahmed, S., & Chandio, F. A. (2020). Effect of operational parameters of UAV sprayer on spray deposition pattern in target and off-target zones during outer field weed control application. *Computers and Electronics in Agriculture*, 172, 105350. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105350

[9] Behrouzi Lar, M. (1999). Engineering Principles of Agricultural Machines (Translated). *Azad Islamic University Press*. 1st Edition, 355-357.

[10] Boedeker, W., Watts, M., Clausing, P., & Marquez, E. (2020). The global distribution of acute unintentional pesticide poisoning: Estimations based on a systematic review. *BMC Public Health*. 20, 1–19. https://doi.org/10.1186/s12889-020-09939-0

[11] Carvalho, F. P. (2017). Pesticides, environment, and food safety. Food and Energy Security. 6(2): 48–60. http://www.doi:10.1002/fes3.108

[12] Chen, Y., Qi, H. L, Li, G. Z., & Lan, Y. B. (2019). Weed control effect of unmanned aerial vehicle (UAV) application in wheat field. *Int J Precis Agric Aviat*. *2*(2): 25–31.

[13] Chen, P., Lan, Y., Huang, X., Qi, H., Wang, G., Wang, J. Wang, L., & Xiao, H. (2020). Droplet Deposition and Control of Planthoppers of Different Nozzles in Two-Stage Rice with a Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle. *Agronomy*, *10*(303), 1-14.

[14] Delavarpour, N., Koparan, C., Zhang, Y., Steele, D. D., Betitame, K., Bajwa, S.G., & Sun, X. (2023). A review of the current unmanned aerial vehicle sprayer applications in precision agriculture. *66*(3): 703-721. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. https://doi.org/10.13031/ja.15128

[15] Del Pozo-Valdivia, A. I., Morgan, E., & Bennett, C. (2021). In-field evaluation of drone-released lacewings for aphid control in California organic lettuce. *Journal of Economic Entomology*. 114(5), 1882–1888.

[16] El Yousfi, A., & Alawi, Y. (2025). Development and evaluation of drone based spraying system for precision agriculture application. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, *12*(1), 347–360. http://iieta.org/journals/mmep

[17] Faical, B. S., Freitas, H., Gomes, P. H., Mano, L. Y., Pessin, G., de Carvalho, A. C. P. L. F., Krishnamachari, B., & Ueyama, J. (2017). An adaptive approach for UAV-based pesticide spraying in dynamic environments. *Computers and Electronics in Agriculture*, 138, 210–223. https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.04.011

[18] Gatkal, N. R., Nalawade, S. M., Shelke, M. S., Sahni, R. K., Bhanage, G. B., More, N. M., Walunj, A. A., Kadam, P. B., & Singh, S. P. (2025). A comprehensive study on operational parameters optimization of quadcopter unmanned aerial vehicle-based spraying system in sugarcane. *Sugar Tech*. https://doi.org/10.1007/s12355-025-01586-2

[19] Gunes, D., & Hasegawa, H. (2025). Optimizing UAV sprayer performance using field data and machine learning approaches. *Smart Agricultural Technology*, 11, 101013.
[20] Jeevan, N., Pazhanivelan, S., Kumaraperumal, R., Ragunath, K., Arthanari, P. M., & Sritharan, N., et al. (2023). Effect of different herbicide spray volumes on weed control efficiency of a battery-operated unmanned aerial vehicle sprayer in transplanted rice (Oryza sativa L.). *Journal of Applied and Natural Science*, 15, 972–977. https://doi.org/10.31018/jans.v15i3.4753
[21] Kumar, S., Singh, M., Singh, S. K., & Bhullar, M. S. (2022). Droplet distribution and weed control efficacy of unmanned aerial vehicle sprayer in wheat crop. *Journal of Agricultural Engineering*, 59, 126–136. https://doi.org/10.52151/jae2022592.1770
[22] Lamare, A. I., Zwertvaegher, D., Nuyttens, P., Balsari, P., Marucco, Grella, M. A., Caffini, N., Mylonas, S, Fountas, & Douzals, J. 2022. Performance of a prototype boom sprayer for bed-grown carrots based on canopy deposition optimization, ground losses and spray drift potential mitigation in semi-field conditions. *Applied Sciences*, 12, 4462. https://doi.org/10.3390/app12094462.
[23] Liu, Q., Chen, S., Wang, G., & Lan, Y. (2021). Drift Evaluation of a Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Sprayer: Effect of Liquid Pressure and Wind Speed on Drift Potential Based on Wind Tunnel Test.. *Appl. Sci.* 11, 7258. https:// doi.org/10.3390/app11167258
[24] Meng, Y., Song, J., Lan, Y., Mei, G., Liang, Z., & Han, Y. (2019). Harvest aids efficacy applied by unmanned aerial vehicles on cotton crop. *Industrial Crops and Products*, 140, 111645. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111645
[25] Nobre, F.L.L., Santos, R.F., Herrera, J.L., Araujo, A.L., Johann, J.A., Gurgacz, F., Siqueira, J.A.C., & Prior, M. (2023). Use of drones in herbicide spot spraying: a systematic review. *Adv Weed Sci*. 2023; 41: e020230014. https://doi.org/10.51694/AdvWeedSci/2023;41:00028
[26] Pathak, V.M., Verma, V.K., Rawat, B.S., & Kaur, B., et al. (2022). Current status of pesticide effects on environment, human health and it's eco-friendly management as bioremediation: A comprehensive review. *Frontiers in Microbiology*, 13: 962619. https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.962619
[27] Paul, R. A. I., Arthanari, P. M., Pazhanivelan, S., Kavitha, R., & Djanaguiraman, M. (2024a). UAV-based herbicide application for efficient weed management in direct-seeded rice. *Agricultural Science Digest*, 44, 295–300. https://doi.org/10.18805/ag.D-5826
[28] Paul, R. A. I., Palanisamy, M. A., Peramaiyan, P., Kumar, V., Bagavathiannan, M., Gurjar, B., Vijayakumar, S., Djanaguiraman, M., Pazhanivelan, S., & Ramasamy, K. (2024b). Spray volume optimization with UAV-based herbicide application for effective droplet deposition and weed control in direct-seeded rice. *Frontiers in Agronomy*, 6, 1491842. https://doi.org/10.3389/fagro.2024.1491842
[29] Pranaswi, D., Jagtap, M. P., Shinde, G. U., Khatri, N., Shetty, S., & Pare, S. (2024). Analyzing the synergistic impact of UAV-based technology and knapsack sprayer on weed management, yield-contributing traits, and yield in wheat (Triticum aestivum L.) for enhanced agricultural operations. *Computers and Electronics in Agriculture*, 219, 108796. https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108796
[30] Qin, W. C., Qiu, B. J., Xue, X. Y., Chen, C., Xu, Z. F., & Zhou, Q. Q. (2016). Droplet deposition and control effect of insecticides sprayed with an unmanned aerial vehicle against plant hoppers. *Crop Protection*, 85, 79–88. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.03.018
[31] Safari, M., Majidi Shilsar, F., Sheikhigarjan, A., & Bagheri, N. (2025). Performance evaluation of a UAV granule spreader in controlling rice striped stem borer (Chilo suppressalis). *Journal of Plant Protection Research*. https://doi.org/10.24425/jppr.2025.156890
[32] Semenisin, M., Steponavicius, D., Kemzuraite, A., & Savickas, D. (2025). Optimizing UAV spraying for sustainability: Different system spray drift control and adjuvant performance. *Sustainability*, 17, 2083. https://doi.org/10.3390/su17052083
[33] Subramanian, K.S., Pazhanivelan, S., Srinivasan, G., Santhi, R., & Sathiah, N. (2021). Drones in Insect Pest Management. *Front. Agron*. 3: 640885. doi: 10.3389/fagro.2021.640885
[34] Taseer, A., & Han, X. (2024). Advancements in variable rate spraying for precise spray requirements in precision agriculture using Unmanned aerial spraying Systems: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 219: 108841.
[35] Testa, R., Galati, A., Schifani, G., & Migliore, G. (2025). Cost-effectiveness of conventional and precision agriculture sprayers in Southern Italian vineyards: A break-even point analysis. *Precision Agriculture*, 26, 39. https://doi.org/10.1007/s11119-025-10233-5
[36] Tsimbiri, P. F., Moturi, W. N., Sawe, J., Henley, P., & Bend, J. R. (2015). Health Impact of Pesticides on Residents and Horticultural Workers in the Lake Naivasha Region, Kenya. *Occupational Diseases and Environmental Medicine*, 3, 24-34.
[37] Wang, G., Lan, Y., Yuan, H., Qi, H., Chen, P., Ouyang, F., & Han, Y. (2019a). Comparison of spray deposition, control efficacy on wheat aphids and working efficiency in the wheat field of the unmanned aerial

vehicle with boomsprayer and two conventional knapsack sprayers. Applied Sciences, 9, 218. https://doi.org/10.3390/app9020218

[38] Wang, J., Lan, Y., Wen, S., Hewitt, A. J., Yao, W., & Chen, P. (2019b). Meteorological and flight altitude effects on deposition, penetration, and drift in pineapple aerial spraying. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 15. https://doi.org/10.1002/apj.2382

[39] Wang, J., Ma, C., Chen, P., Yao, W., Yan, Y., Zeng, T., Chen, S., & Lan, Y. (2023a). Evaluation of aerial spraying application of multi-rotor unmanned aerial vehicle for Areca catechu protection. Frontiers in Plant Science, 14, 1093912. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1093912

[40] Wang, J., Lv, X., Wang, B., Lan, X., Yan, Y., Chen, S., & Lan, Y. (2023b). Numerical simulation and analysis of droplet drift motion under different wind speed environments of single-rotor plant protection UAVs. *Drones*, 7, 128. https://doi.org/10.3390/drones7020128

[41] Wang, P., Hanif, A. S., Yu, S., Lee, C., Kang, Y. H., Lee, D., & Han, X. (2024). Development of an autonomous drone spraying control system based on the coefficient of variation of spray distribution. *Computers and Electronics in Agriculture*, 227, 109529. https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109529

[42] Xue, X. Y., Tu, K., Qin, W. C., Lan, Y., B., & Zhang, H. H. (2014). Drift and deposition of ultralow altitude and low volume application in paddy field. *Int. J. Agric. Biol. Eng*. 7: 23–28.

[43] Yang, S. H., Zheng, Y. J., Liu, X. X. (2019). Research status and trends of downwash airflow of spray UAVs in agriculture. *Int J Precis Agric Aviat*, 2(1): 1–8.

[44] Zhou, Q., Xue, X., Qin, W., Chen, C., & Cai, C. (2020). Analysis of pesticide use efficiency of a UAV sprayer at different growth stages of rice. *International Journal of Precision Agricultural Aviation*, 3(1), 38-42.

[45] Zhua, H. Salyanib, M., & FOX, R. (2011). A portable scanning system for evaluation of spray deposit distribution. *Computers and Electronics in Agriculture*, 76: 38–43. https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.01.003.