



Evaluation of the impact of spray volume, flight speed, and spray height on the spraying performance of a pesticide drone

Alaa Kamel Abd¹ | Amir Azizpanah² | Kobra Heidarbeigi³ | Somayeh Koohi⁴

1. Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Ilam, Ilam, Iran. E-mail:

alaa.k.abd@gmail.com

2. Corresponding Author, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Ilam, Ilam, Iran.

E-mail: a.azizpanah@ilam.ac.ir

3. Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Ilam, Ilam, Iran. E-mail:

k.heidarbeigi@ut.ac.ir

4. Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail:

Somayeh_koohi@modares.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: June. 29, 2025

Revised: Nov. 26, 2025

Accepted: Dec. 10, 2025

Published online: Winter 2026

Keywords:

*Autopilot,
Numerical median diameter,
Sprayer drone,
Spraying quality,
Spraying uniformity,
Volumetric median diameter*

ABSTRACT

Due to their different operational principles, sprayers have various effects on pest control. These differences arise from the spraying method, droplet size distribution, and the application rate of pesticide solution per unit area. This study evaluated a sprayer drone using image processing techniques. The tested sprayer drone was an eight-engine MG-1P model with variable-sweep wings, manufactured by DJI in China. The study examined the effects of spraying rate (6, 8, and 10 L/ha), flight speed (4, 5, and 6 m/s), and spraying height (1.5, 2, and 2.5 m) on volumetric median diameter, numerical median diameter, spraying quality, coverage area, and uniformity. The results showed that spraying rate had a significant effect ($P < 0.01$) on all parameters. The comparison of means for the main effects of the parameters indicated that volumetric median diameter, spraying quality, and coverage area decreased at lower spraying rates, whereas volumetric median diameter reached its highest levels in the drone speed and spraying height factors.

Cite this article: Kamel Abd, A., Azizpanah, A., Heidarbeigi, K., Koohi, S., (2026) Evaluation of the impact of spray volume, flight speed, and spray height on the spraying performance of a pesticide drone, *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 56 (4), 1-23. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.397734.665598>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.397734.665598>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Pests, plant diseases, and weeds are among the most significant challenges in crop production, accounting for approximately 32% of annual global crop losses, according to data from the Food and Agriculture Organization (FAO) (Lan et al., 2017; Guo et al., 2019). Herbicides are the most effective method for pest and disease control. However, conventional ground-based spraying methods, such as knapsack or tractor-mounted sprayers, are inefficient on sloped terrain, leading to higher spraying costs. Research indicates that using appropriate sprayers tailored to specific crops and pest species can reduce pesticide consumption by nearly 20-70% (Namvar & Heidari, 2014). Therefore, it is crucial to compare sprayers utilizing different technologies from various perspectives to identify the most effective option for pest control. Doing so can help to minimize environmental pollution, enhance production system efficiency, prevent unnecessary costs associated with pesticide overuse, and improve both crop quality and yield.

Agricultural drones are unmanned aerial vehicles designed to collect crop data quickly and cost-effectively, as well as to perform spraying and sowing operations. With recent advancements in drone technology and the recognition of their agricultural potential, they are increasingly being used for farm and orchard spraying. Farmers worldwide have been encouraged to adopt spraying drones due to their advantages, including low-altitude flight, reduced herbicide consumption, lower energy usage, decreased spraying costs, improved uniformity, and higher returns (Abdolkarim et al., 2019). Naseri et al. (2021) evaluated the application of drones for weed control in sugarcane farms. They generally recommended further research into drone-based spraying in sugarcane farms, especially pre-vegetative spraying, to promote sustainable agriculture and reduce herbicide consumption. Biglia et al. (2022) investigated the impact of flight modes and spray system adjustments on canopy deposition, coverage, and off-target losses in drone spraying. Their findings revealed that flight modes significantly affected spraying efficiency. Traditional airblast sprayers, which have a low spraying rate, provided better canopy coverage and minimized off-target losses compared to the most optimized drone spraying system configuration.

Given the significance of herbicide consumption rates in agriculture, their environmental impact, and the potential role of drones as a modern spraying technology, this study evaluated a sprayer drone using water-sensitive cards. In addition, image processing was used to determine the number, diameter, and volume of droplets, aiming to determine spraying indices for including volumetric median diameter, numerical median diameter, spraying quality, coverage, and uniformity.

Methodology

The studied sprayer drone was an eight-engine (octocopter) MG-1P model with variable-sweep wings, manufactured by DJI in China. This octocopter, capable of carrying a 23 Kg payload, featured dual motors on each of its four sturdy arms. The spraying system consisted of four specialized nozzles mounted beneath its propellers for precision application. Its tank had a maximum capacity of 10 liters and has been designed to distribute both solid and liquid materials through the nozzles.

Experiment time and location

The sprayer drone was tested in farms covering an area of 5,000 m² in Darreh Shahr County, Ilam, in April 2023 (Figure 2). During the air experiment, the temperature ranged from 17°C to 22°C. While no wind was perceptible, data from the AccWeather meteorological website showed a wind speed of 4 Km/h.

Water-sensitive cards

In each experiment, four pre-coded water-sensitive cards were placed on the ground, spaced 1 m apart in both width and length. The drone then performed the spraying operation in autopilot mode. Each treatment was replicated three times to capture variations in spraying conditions. The drone was evaluated based on three factors: spraying rate, flight speed, and spraying height. According to the manufacturer's recommendations, the optimal spraying rate for grain farms in the region was 8 L/ha, with a flight speed of 5 m/s and spraying height of 2 m. Therefore, the spraying rate was selected at three levels (6, 8, and 10 L/ha), the flight speed at three levels (4, 5, and 6 m/s), and the spraying height at three levels (1.5, 2, and 2.5 m above ground level), considering that the drone was unable to operate at height of 1 m.

Image processing

After the experiments were completed, the water-sensitive cards were collected and scanned using a 300 dpi HP Scanjet G2410. The output images were then processed in MATLAB software using command codes. First, the images were retrieved in MATLAB for cropping. They were then separated from the RGB channel

and converted into binary images. At this stage, pixels with values equal to or below a set threshold were displayed in black, while those with values above the threshold appeared in white. The binary images were then inverted, resulting in white spots on a black background.

Equation (1) was used to determine the primary and actual diameter of droplets based on water-sensitive card analysis:

$$\text{Real diameter of droplets} = \frac{\text{Diameter of droplets on the card}}{\text{Dispersion factor}} \quad (1)$$

Next, the actual diameter of droplets was calculated by dividing their measured diameter by a constant factor, as represented in Equation (1).

The volumetric median diameter and numerical median diameter were determined through coding. Equations (2), (3), and (4) were used to calculate spraying quality, coverage area, and the relative span factor. Since spraying quality is derived by dividing the volumetric median diameter by the numerical median diameter, this parameter serves to compare droplet volume with droplet count.

$$SQ = \frac{VMD}{NMD} \quad (2)$$

in which SQ represents spraying quality, VMD denotes volumetric median diameter, and NMD is the numerical median diameter (Daneshmand Vaziri, 2015).

$$SC = \frac{A_{at}}{A_t} \quad (3)$$

in which SC represents the coverage area of the droplets, A_{at} is the total area of all droplets, and A_t is the total area.

$$RSF = \frac{d_{0.9} - d_{0.1}}{d_{0.5}} \quad (4)$$

in which RSF represents the relative spraying factor as a criterion of spraying uniformity, $d_{0.9}$ represents the droplet diameter at 90% volumetric, $d_{0.1}$ represents the droplet diameter at 10% volumetric, and $d_{0.5}$ represents the droplet diameter at 50% volumetric (Daneshmand Vaziri, 2015).

Data were analyzed using analysis of variance (ANOVA) and comparison of means in the SPSS software package. The graphs were drawn in MS Excel software.

Results and Discussion

Volumetric median diameter

The present research tested spraying rate at three levels (6, 8, and 10 L/ha), flight speed at three levels (4, 5, and 6 m/s), and spraying height at three levels (1.5, 2, and 2.5 m above ground level). Based on the results, the volumetric median diameter decreased as spraying altitude increased at a spraying rate of 10 L/ha. However, the trend was nearly reversed at spraying rates of 8 and 6 L/ha. Furthermore, at an altitude of 2.5 m and a spraying rate of 10 L/ha, the volumetric median diameter of herbicide droplets decreased as flight speed increased, whereas it increased at spraying rates of 8 and 6 L/ha. No distinct ascending or descending trend was observed at altitudes of 2 and 1.5 m. In the interaction between spraying rate and flight speed, the volumetric median diameter decreased as the spraying rate was reduced, while it increased as the flight speed was reduced. In the interaction between spraying rate and flight altitude, a decrease in volumetric median diameter was observed with a lower spraying rate, whereas it increased with a lower flight altitude. No specific trend was observed in the interaction between flight speed and altitude.

Numerical median diameter

The numerical median diameters were calculated for different treatments of spraying rate, flight speed, and spraying height in μm . The results showed that the numerical median diameter increased as flight speed increased at a spraying rate of 10 L/ha, whereas it exhibited the opposite trend at spraying rates of 8 and 6 L/ha. This suggests that spraying altitude significantly influences numerical median diameter. In the interaction between spraying rate and flight speed, variations in these factors had no consistent effect on numerical median diameter. In the interaction between spraying rate and flight altitude, a slight increase in numerical median diameter was observed as the spraying rate decreased, while a mild increase occurred as flight altitude decreased. A similar trend was noted in the interaction between flight speed and altitude.

Spraying quality

The spraying quality of droplets was examined across different treatments involving spraying rate, flight speed, and spraying height. At a spraying rate of 10 L/ha, spraying quality decreased as drone speed increased. However, at spraying rates of 8 and 6 L/ha, spraying quality improved at higher speeds. The interaction

between spraying rate and drone speed showed that spraying quality remained nearly the same between spraying rates of 6 and 8 L/ha. However, when the spraying rate increased to 10 L/ha, spraying quality improved at higher speeds. A similar trend was observed in the interaction between spraying rate and flight altitude. Conversely, no specific trend was found in the interaction between flight speed and altitude, as spraying quality remained nearly constant.

Coverage area of droplets

The values of coverage area, as influenced by different treatments of spraying rate, drone speed, and spraying height, showed inconsistent trends. In the interaction between spraying rate and drone speed, the coverage area of droplets was greater at a spraying rate of 10 L/ha compared to the other two rates. However, variations in drone speed did not cause significant changes in coverage area. In the interaction between spraying rate and flight altitude, increasing altitude reduced coverage area at a spraying rate of 10 L/ha, though no clear trends were observed at other spraying rates. In the interaction between flight speed and altitude, the highest coverage area was observed at medium speed and altitude, although the difference was minimal.

Spraying uniformity

The spraying uniformity values obtained under different treatments of spraying rate, flight speed, and spraying height did not follow a single trend. In fact, the interactive effects of various factors on spraying uniformity varied across cases. However, all results fell within a certain classification. Therefore, spraying uniformity remained constant regardless of the influencing factors and variables.

Conclusion

The studied drone was an iCTA-copter MG-1P model with variable-sweep wings, manufactured by DJI in China. Assessments were conducted on a 5,000-m³ plot of land. After its specifications were recorded, the drone performed spraying operations in autopilot mode at various spraying rates (6, 8, and 10 L/ha), flight speeds (4, 5, and 6 m/s), and spraying heights (1.5, 2, and 2.5 m), with samples collected accordingly. According to ANOVA results, spraying rate significantly influenced all parameters, including volumetric median diameter, numerical median diameter, spraying quality, coverage area, and spraying uniformity of herbicide droplets. Flight speed and altitude significantly ($P < 0.05$) affected numerical median diameter, while flight speed significantly ($P < 0.05$) influenced coverage area. The comparison of means for the main effects on the parameters revealed that volumetric median diameter, spraying quality, and coverage area decreased at lower spraying rates. However, the highest median diameter showed its peak value at the manufacturer-recommended speed and altitude used in grain farms in the region. As speed and altitude decreased, numerical median diameter increased. Based on the comparison of means for the main effects on spraying uniformity, the drone maintained consistent spraying uniformity under all tested conditions. Thus, depending on flight conditions, the drone will change parameters that influence spraying. Consequently, the measured factors will not follow a fixed pattern, with spraying uniformity remaining at a stable level.

Author Contributions

Conceptualization: Ala Kamel Abd (Master's student, first author). **Methodology:** Ala Kamel Abd. **Software and Data Analysis:** Dr. Kobra Heidar Beigi. **Validation:** Ala Kamel Abd, Dr. Amir Azizpanah, Dr. Kobra Heidar Beigi. **Formal Analysis:** Dr. Kobra Heidar Beigi. **Investigation:** Ala Kamel Abd. **Resources:** Ala Kamel Abd. **Data Curation:** Somayeh Koohi. **Writing—Original Draft Preparation:** Ala Kamel Abd. **Writing—Review & Final Editing:** Somayeh Koohi, Dr. Amir Azizpanah.

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

If the study did not report any data, you might add "Not applicable" here.

Ethical considerations

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

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

ارزیابی تأثیر مقدار پاشش، سرعت پرواز و ارتفاع پاشش بر عملکرد پاششی پهپاد سم‌پاش

علا کامل عبد^۱ | امیر عزیزپناه^۲ | کبری حیدریگی^۳ | سمیه کوهی^۴^۱. گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران. رایانامه: alaa.k.abd@gmail.com^۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران. رایانامه: a.azizpanah@ilam.ac.ir^۳. گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران. رایانامه: k.heidarbeigi@ut.ac.ir^۴. گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: Somayeh_koohi@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۴/۸	آفت‌ها، بیماری‌های گیاهی و علف‌های هرز، از عمده‌ترین مشکلات در تولید محصولات کشاورزی هستند. سم‌پاش‌ها به دلیل اصول کاری مختلف، اثرات متفاوتی در فرایند کنترل آفت ایجاد می‌کنند. این تفاوت‌ها ناشی از نحوه پاشش، توزیع اندازه قطرات و مصرف متفاوت محلول سمی در واحد سطح می‌باشد. هدف پژوهش حاضر ارزیابی کیفیت پهپاد سم‌پاش با تغییر مقدار و مشخصات پروازی با استفاده از فناوری پردازش تصویر است. پهپاد مورد ارزیابی، از نوع بال متحرک هشت موتوره و سازنده آن شرکت DJI با مدل MG-1P از کشور چین بود. تأثیر عامل‌های مقدار پاشش (۶، ۸ و ۱۰ لیتر در هکتار)، سرعت پرواز (۴، ۵ و ۶ متر بر ثانیه) و ارتفاع پاشش (۱/۵، ۲ و ۲/۵ متر) بر پارامترهای قطر میانه حجمی، قطر میانه عددی، کیفیت پاشش، سطح پوشش و یکنواختی پاشش بررسی شد. در عامل مقدار پاشش، بیشترین میانگین یکنواختی پاشش در سطح ۱۰ و ۶ لیتر در هکتار و کمترین آن در سطح ۸ لیتر در هکتار رخ داده است. در عامل سرعت پرواز نیز بیشترین میانگین یکنواختی پاشش در سطح ۵ متر در ثانیه و کمترین آن در سطح ۴ و ۶ متر در ثانیه رخ داده است. همچنین در عامل ارتفاع پاشش، بیشترین میانگین یکنواختی پاشش در سطح ۱/۵ متر و کمترین آن در سطح ۲/۵ متر رخ داده است.
واژه‌های کلیدی: پهپاد سم‌پاش، خلبان خودکار، قطر میانه حجمی، قطر میانه عددی، کیفیت پاشش، یکنواختی پاشش.	

استناد: کامل عبد؛ علا، عزیزپناه؛ امیر، حیدریگی؛ کبری، کوهی؛ سمیه، (۱۴۰۴) ارزیابی تأثیر مقدار پاشش، سرعت پرواز و ارتفاع پاشش بر عملکرد پاششی پهپاد سم‌پاش،

مجله مهندسی بیوسیستم ایران ایران، ۵۶ (۴)، ۲۳-۱. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.397734.665598>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.397734.665598>

مقدمه

آفت‌ها، بیماری‌های گیاهی و علف‌های هرز عمده‌ترین مشکلات تولید محصولات کشاورزی هستند. طبق آمار سازمان خواروبار جهانی، حدود ۳۲ درصد از تلفات سالانه محصولات کشاورزی در جهان، توسط این عوارض ایجاد می‌شود (Lan et al., 2017; Guo et al., 2019). از این رو، حفاظت نباتات جایگاه مهمی در برنامه‌های اقتصادی کشورها دارد. مقدار مصرف سالانه سموم دفع آفات کشاورزی در ایران، حدود ۲۴۰۰ تن است؛ از این مقدار، حشره‌کش‌ها، قارچ‌کش‌ها و علف‌کش‌ها به ترتیب بیشترین مقدار مصرف را دارند. از عوامل مهم در ساماندهی وضعیت سم‌پاش‌های رایج کشور، بررسی عملکرد و کارکرد آنها در شرایط مزارع است تا بتوان با استناد به اطلاعات به دست آمده، برای آینده برنامه‌ریزی کرد (Rostsmi & Behaain, 2021). نیاز به غذا و امنیت غذایی و اهمیت آن‌ها از چالش‌های عصر حاضر و آینده هستند که صنعت کشاورزی را به سمت افزایش عملکرد در واحد سطح سوق داده‌اند. از طرفی کمبود آب و تلاش برای حفظ محیط زیست و منابع انرژی، متخصصان علوم کشاورزی را بر آن داشته تا با ایجاد شیوه‌های نوین، به دنبال کاهش مصرف نهاده‌ها و افزایش عملکرد و در نهایت بالا بردن بازده اقتصادی باشند (Mukhlesabadi Farahani et al., 2013). سم‌پاشی همچنان مؤثرترین روش برای کنترل آفت‌ها و بیماری‌های گیاهی است. روش‌های متداول سم‌پاشی زمینی مانند استفاده از سم‌پاش‌های پشتی و تراکتوری در اراضی شیب‌دار و ارتفاع زیاد محصول ناکارآمد است و هزینه‌های سم‌پاشی را افزایش می‌دهد. سم‌پاشی هوایی به طور گسترده در ترکیب با سم‌پاشی‌های زمینی در آمریکای شمالی، اروپا و برخی مناطق دیگر برای مزارع بسیار بزرگ استفاده می‌شود (Huang et al., 2018). سم‌پاش‌ها به دلیل اختلاف در اصول کاری، نحوه پاشش، توزیع اندازه قطرات و مصرف مختلف محلول سمی در واحد سطح، ممکن است در فرایند کنترل آفت تأثیرات متفاوتی داشته باشند. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که با استفاده از سم‌پاش مناسب بر اساس نوع محصول و نوع آفت مورد بررسی، می‌توان تا حدود ۲۰-۷۰ درصد در مصرف آفت‌کش‌ها صرفه‌جویی کرد (Namvar & Heidari, 2014). مقایسه سم‌پاش‌ها که دارای فناوری‌های مختلف می‌باشند از جهات گوناگون و معرفی مناسب‌ترین نوع آن در کنترل آفت برای جلوگیری از آلودگی محیط زیست، کاهش بازدهی سامانه تولید، بروز هزینه‌های اضافی ناشی از مصرف بیش از حد سم و افزایش کیفیت و عملکرد محصول تولیدی ضروری است. بنابراین تلاش‌هایی برای بهبود فناوری سم‌پاش‌ها و استفاده از قطرات کنترل شده انجام شده است که از بین آنها می‌توان به فناوری سم‌پاش‌های الکترواستاتیک، میکرون و سم‌پاش‌های با حامل هوا اشاره کرد. سم‌پاش‌های الکترواستاتیک بادی با استفاده از هوای تحت فشار و سامانه باردارکننده ذرات سم، قطرات باردار شده را به قسمت‌های داخلی پوشش گیاهی می‌رساند که در نتیجه نشست سم روی گیاهان به مقدار دو برابر افزایش می‌یابد (Amirshaghghi & Sasfari, 2016). برای دستیابی به این اهداف پهنپاش‌ها در عملیات‌های کشاورزی پا به عرصه نهاده‌اند (Mukhlesabadi Farahani et al., 2013). پهنپاش‌های کشاورزی وسایل پرنده بدون سرنشینی هستند که قادرند با هزینه نسبتاً پایین و در هر زمان، اطلاعات محصولات را جمع‌آوری نمایند و یا در امور سم‌پاشی و کاشت به کار گرفته شوند. در سال‌های اخیر، با توسعه پهنپاش‌ها و شناسایی قابلیت‌ها در حوزه کشاورزی، استفاده از پهنپاش برای سم‌پاشی مزرعه‌ها و باغ‌ها رو به گسترش است. پهنپاش سم‌پاش دارای قابلیت‌هایی از جمله پرواز در ارتفاع کم، مصرف کم سم، توان مصرفی کم، هزینه کم سم‌پاشی، افزایش یکنواختی و بازدهی سم‌پاشی است که کشاورزان را در سراسر دنیا به استفاده از پهنپاش برای سم‌پاشی ترغیب کرده است (Kharim et al., 2019). هواپیماهای سم‌پاش برای مزرعه‌های کوچک یا باغ‌ها کارایی ندارند و در این مناطق فناوری پرنده بدون سرنشین کاربردهای ویژه‌ای دارد. در مناطق صعب‌العبور مانند شالیزارها، تپه‌ها و کوه‌ها می‌توان از پهنپاش‌ها به صورت انعطاف پذیر و مؤثر و بدون نیاز به باند پرواز و فرود، برای کنترل گسترش آفات، علف‌های هرز و بیماری‌ها استفاده کرد (Huang et al., 2018). اثربخش بودن سم‌پاشی با پهنپاش وابسته به انتخاب درست و استفاده مناسب از آنها با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی، نوع محصول و معیارهای فنی و اقتصادی است. دانستن این معیارها در انتخاب و استفاده از پهنپاش سم‌پاش دارای اهمیت فراوان است (Sfari & Bagheri, 2021). در زمینه کارایی پهنپاش‌ها در کشاورزی تحقیقات مختلفی انجام گرفته است. عملکرد پهنپاش سم‌پاش در کنترل شته کلزا توسط (Bagheri et al., 2022) بررسی شد. پارامترهای مورد ارزیابی شامل مقدار ضریب کیفیت پاشش، ظرفیت مزرعه‌ای تتوری و مؤثر، بازده مزرعه‌ای، انرژی مصرفی و کارایی (اثربخشی) سم‌پاشی بودند. با توجه به کاهش مقدار محلول مصرفی و انرژی مصرفی و افزایش بازده مزرعه‌ای، کیفیت پاشش و کارایی در سم‌پاشی با پهنپاش سم‌پاش، استفاده از این روش برای کنترل جمعیت شته کلزا توصیه شد (Bagheri et al., 2022). محققین به ارزیابی استفاده از پهنپاش در کنترل علف‌های هرز در مزارع نیشکر پرداختند. در مجموع به منظور توصیه‌ی عمومی برای استفاده از تکنولوژی پهنپاش در سم‌پاشی مزارع نیشکر به‌ویژه سم‌پاشی پیش‌رویشی با هدف گام نهادن در مسیر کشاورزی پایدار و کاهش مصرف سموم انجام مطالعات بیش‌تر ضروری به نظر می‌رسد (Naseri et al., 2021). (Zareai et al., 2021) شبیه سازی پاشش سم از افشانک سم پاش به روش

دینامیک سیالات محاسباتی را مورد ارزیابی تجربی قرار دادند. مقایسه نتایج زاویه پاشش نشان داد که حداکثر اختلاف بین روش تجربی و روش شبیه‌سازی برابر ۸ درصد می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که روش دینامیک سیالات محاسباتی روش مناسبی برای پیش بینی رفتار ذرات سم در خلال پاشش سم از افشانک می‌باشد (Zareai ta al., 2021). در پژوهشی (Hajiagha Alizadeh et al., 2016) به ارزیابی عامل‌های عملکردی سم‌پاشی الکترواستاتیک در سطوح رویی و پشتی برگ به کمک پردازش تصویر پرداختند. به منظور بررسی مقدار بادبردگی ذرات باردار سم، آزمایش با عامل‌های باردارسازی، سرعت باد و فاصله از هد انجام شد. نتایج نشان داد که معنی‌داری فاکتورهای مورد بررسی در سطوح رویی و پشتی برگ، در برخی موارد متفاوت هستند. همچنین اثر باردارسازی ذرات بر درصد پوشش سطحی از نظر آماری با احتمال ۹۹ درصد معنی‌دار بود (Hajiagha Alizadeh et al., 2016). در پژوهشی (Hao et al., 2022) کیفیت پاشش پهپاد بر اساس مدل D-CNN1 و سیستم چند حسگری بی‌سیم را مورد ارزیابی قرار دادند. یک مدل پیش‌بینی نشست قطرات سم بر اساس داده‌های تجربی میدانی، با استفاده از یک الگوریتم شبکه عصبی کانولوشنیک یک‌بعدی (D-CNN1) ایجاد شد و اثرات ورودی‌های مختلف بر توانایی پیش‌بینی مدل، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزودن داده‌های دما و رطوبت نسبی هوا به ورودی‌ها، می‌تواند به دقت پیش‌بینی بیشتری نسبت به استفاده از پارامترهای عملیات پاشش پهپاد و داده‌های سرعت باد به عنوان ورودی مدل، دست یابد (Hao et al., 2022). در پژوهش (Biglia et al., 2022) اثرات حالت‌های پرواز و تنظیم سیستم پاشش بر رسوب سم بر تاج، پوشش و بادبردگی سم برای پهپاد سم‌پاش بررسی شد. نتایج نشان داد که حالت پرواز عمیقاً بر کارایی پاشش تأثیر می‌گذارد. سم‌پاش بادافشان معمولی، که با سرعت پاشش کم کار می‌کند، در مقایسه با بهترین حالت سیستم پاشش پهپاد، پوشش سایبان بالاتر و تلفات بادبردگی کمتری را نشان داد (Biglia et al., 2022). تأثیر پارامترهای عملیاتی پهپاد سم‌پاش بر الگوی نشست قطرات و بادبردگی اجرای برنامه کنترل علف‌های هرز مزرعه توسط (Ahmed et al., 2020) بررسی شد. نتایج نشان داد بیشترین مقدار پوشش‌دهی هدف ۳۶/۲ درصد و بیشترین مقدار نشست محلول سم روی هدف ۲/۳ میکرولیتر بر سانتی‌متر مربع مربوط به سرعت حرکت ۲ متر در ثانیه و ارتفاع پرواز ۲ متر بود (Ahmed et al., 2020). با توجه به اهمیت مقدار مصرف سم در کشاورزی و کاهش اثرات آن بر محیط زیست و نقش پهپاد به عنوان یک فناوری نوین در سم‌پاشی مزارع، در تحقیق حاضر به ارزیابی کیفیت پهپاد سم‌پاش با تغییر مقدار و مشخصات پروازی با استفاده از فناوری پردازش تصویر است پرداخته شده است. از پردازش تصویر برای تشخیص تعداد قطرات، قطر قطرات و حجم آن با به دست آوردن شاخص‌های قطر میانه حجمی، قطر میانه عددی، کیفیت پاشش، سطح پوشش و یکنواختی پاشش استفاده شد.

روش شناسی پژوهش

پهپاد سم‌پاش مورد استفاده، مطابق با شرایط در این پژوهش از نوع بال متحرک هشت موتوره (اکتاکوپتر) و سازنده آن شرکت DJI با مدل MG-1P از کشور چین است (جدول ۱ و شکل ۱). این اکتاکوپتر با توانایی حمل وزن ۲۳ کیلوگرم، مجهز به موتورهای دوتایی است که بر ۴ بازو نصب شده‌اند. سیستم پاشش آن دارای چهار افشانک بادبزی مخصوص است که زیر چهار تا از ملخ‌های تعبیه شده و سم‌پاشی را با دقت انجام می‌دهد. مخزن سم‌پاش DJI MG-1P دارای ظرفیت ۱۰ لیتر است و با استفاده از چند مکش قدرتمند، مواد جامد و مایع را به وسیله افشانک‌های آن پخش می‌کند. بر اساس اعلام سازنده، این سامانه قادر به سم‌پاشی حدود ۱ هکتار در ۱۵ دقیقه است. کارور می‌تواند مستقیماً به مقدار خروجی افشانک‌ها دسترسی پیدا کرده و با افزایش سرعت پرواز، مقدار خروجی را افزایش داده و سم‌پاشی را به صورت دلخواه انجام دهد.

جدول ۱. مشخصات فنی پهپاد مورد استفاده عملیات سم‌پاشی

نوع و مدل	بال متحرک هشت موتوره، DJI - MG-1P
فاصله دو محور مورب	۱۵۰۰ میلی متر
طول بازوی قاب	۶۱۹ میلی متر
وزن کل بدون باتری	۹/۷ کیلوگرم
حداکثر سرعت عملیاتی	۷ متر در ثانیه
دمای عملیاتی	۰ تا ۴۰ درجه سانتی گراد
سیستم موقعیت یابی	GPS+GLONASS (جهانی) یا GPS+Beidou (آسیا و اقیانوسیه)
دقت موقعیت یابی	یک سانتی متر
ماژول رادار	RD2412R
نوع افشانک	XR11001VS (۰/۳۷۹ لیتر در دقیقه) بادبزی
تعداد افشانک	۴

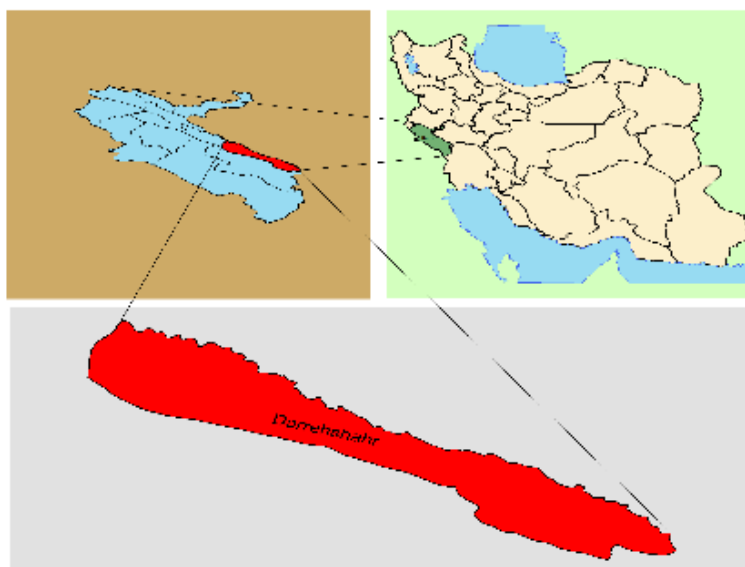


شکل ۱. پهپاد سمپاش مورد استفاده در پژوهش

پهپاد سمپاش DJI MG-1P با طراحی آیرودینامیکی مناسب و مخزن مخصوص، به کاربر این امکان را می‌دهد که در هر پرواز به مقدار ۱۰ لیتر سم را در زمینی به مساحت ۴ تا ۶ هکتار پخش نماید. حداکثر سرعت پهپاد ۱۲ متر در ثانیه است که عملیات سمپاشی ۴۰ تا ۶۰ درصد سریع‌تر از روش‌های سنتی انجام می‌شود. استفاده از چراغ‌های LED پرنور در ساختار پهپاد این امکان را به اپراتور می‌دهد که عملیات سمپاشی را در شب نیز انجام دهد. این پهپاد مجهز به سیستم D-RTK برای موقعیت‌یابی دقیق با دقت ۱ سانتی‌متر می‌باشد. همچنین دارای رادارهای مایکروویو در قسمت جلو، عقب و زیر مخزن است که به پهپاد این امکان را می‌دهند تا ارتفاع خود را تنظیم کرده و همواره ارتفاع مناسبی از محصولات داشته باشد. باتری لیتیومی پهپاد باعث مداومت در پرواز به مدت ۲۳ دقیقه می‌شود. سامانه کنترل از راه دور پیشرفته با صفحه نمایش ۵/۵ اینچی، باتری با طراحی مقاوم در برابر نفوذ آب و گرد و غبار، رادارهای مایکروویو و پمپ تحویل در بالای مخزن از ویژگی‌های پهپاد مورد مطالعه هستند. همچنین رادیو کنترل با برد ۳ کیلومتری، قابلیت هدایت همزمان ۵ پهپاد را دارد.

زمان و مکان انجام آزمایش

آزمایش‌های ارزیابی پهپاد سمپاش در فروردین ماه ۱۴۰۲ (April 2023) در زمینی به مساحت ۵۰۰۰ مترمربع در مزارع غلات شهرستان دره شهر استان ایلام انجام گرفت (شکل ۲). دمای هوا در زمان انجام آزمایش بین ۱۷ تا ۲۲ درجه سلسیوس گزارش شد. گرچه در هنگام انجام آزمایش وزش بادی حس نشد، اما سرعت وزش باد برابر سایت هواشناسی (Accuweather ۴ کیلومتر بر ساعت اعلام شد.



شکل ۲. موقعیت شهرستان دره شهر، محل انجام آزمایشات سمپاشی

کاغذ حساس به آب

برای نمونه برداری از قطرات سم، پاشش شده توسط پهپاد سمپاش از کاغذهای حساس زرد رنگ استفاده شد؛ که با برخورد ذرات آب به آنها اثرات آبی رنگ بر کاغذ ایجاد شد و امکان شمارش ذرات و بررسی پارامترهای دیگر فراهم شد. با توجه به اینکه پهپاد سمپاش وزش باد شدیدی را در هنگام عملیات سمپاشی ایجاد می‌کند، بنابراین، امکان قرار دادن کاغذها به تنهایی بر زمین و انجام نمونه برداری وجود ندارد. به همین منظور قاب چوبی به ابعاد ۷ در ۱۱ سانتی‌متر طراحی و ساخته شد (شکل ۳) تا با قرار دادن کاغذ حساس به آب در آن (و

امکان تعویض آن به صورت کشویی) مشکل مورد نظر برطرف شد.

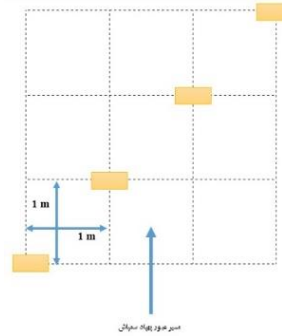


شکل ۳. قاب چوبی ساخته شده برای تثبیت کاغذهای حساس به آب

کاغذهای حساس به آب پس از کد گذاری، در هر بار آزمایش به تعداد چهار عدد با فواصل یک متر از عرض و یک متر از طول بر زمین قرار داده شد (شکل ۴) و پهباد به صورت تنظیم خودکار عملیات سمپاشی را در زمین مورد نظر انجام داد که هر تیمار در سه تکرار انجام گرفت تا حالت‌های مختلف سمپاشی نمونه برداری شود. عرض پاشش پهباد در شرایط آزمایش حدود ۴ متر بود. کیفیت پاشش در عرض کار پهباد یکنواخت می‌باشد، زیرا جریان هوا و پخش سم توسط پهباد به صورت متقارن در عرض پاشش پهباد توزیع می‌شود و اثر ارتفاع پروازی و سرعت آن در هر آزمایش ثابت بود و نازل‌ها با دبی و فشار کنترل شده عمل می‌کنند.



شکل ۵. کاغذ حساس به آب، قبل و بعد از سمپاشی



شکل ۴. نحوه قرار گیری کاغذهای حساس به آب بر زمین

سمپاشی در حالت خلبان خودکار، توسط پهباد انجام شد. پس از هر مرحله سمپاشی، قاب‌های چوبی نگهدارنده کاغذهای حساس به آب در سایه به مدت ۱۵ دقیقه نگهداری شد تا کاملاً خشک شود. در پایان هر آزمایش، کاغذهای نمونه برداری شده خارج و کاغذ کدگذاری شده جدید برای مرحله بعدی اجرای عملیات سمپاشی قرار داده شد (شکل ۵).

عوامل‌های مورد آزمایش

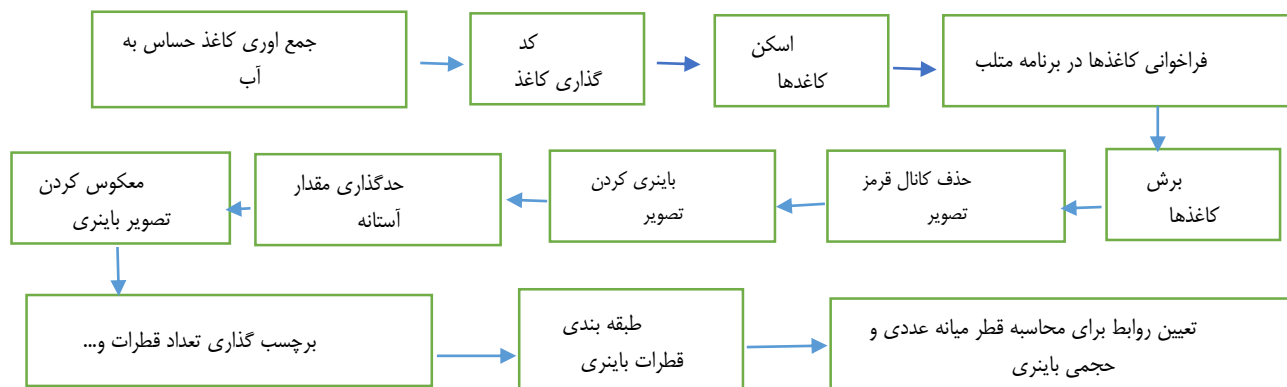
برای ارزیابی پهباد، سه عامل مقدار پاشش، سرعت پرواز و ارتفاع پاشش مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس توصیه شرکت سازنده مقدار پاشش ۸ لیتر در هکتار، سرعت مورد استفاده ۵ متر در ثانیه و ارتفاع ۲ متر برای کشت غلات منطقه بود. بنابراین مقدار پاشش در سه سطح ۶، ۸ و ۱۰ لیتر در هکتار، سرعت پرواز سه سطح ۴، ۵ و ۶ متر در ثانیه و با توجه به اینکه پهباد در ارتفاع ۱ متر عملیات سمپاشی را انجام نمی‌دهد، بنابراین ارتفاع در سه حالت ۱/۵، ۲ و ۲/۵ متر از سطح زمین انتخاب شد (شکل ۶).



شکل ۶. پهباد در حال انجام سمپاشی

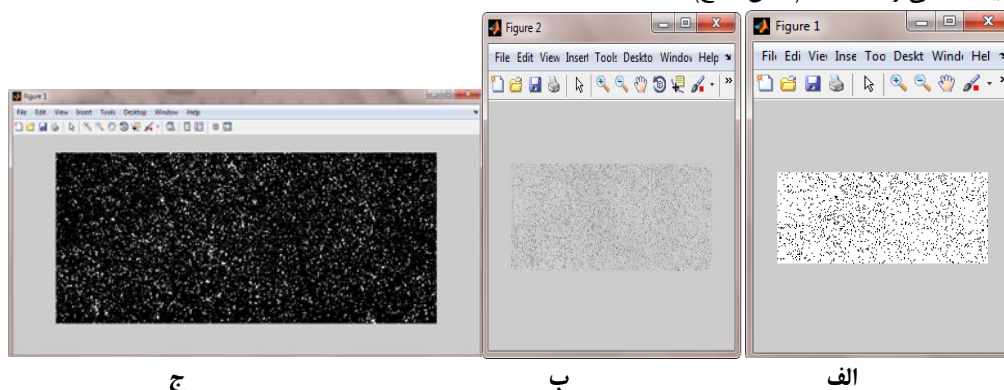
پردازش تصویر

پس از انجام آزمایش و جمع آوری کاغذهای حساس به آب (جمعاً به تعداد ۳۲۴ عدد)، از اسکنر HP Scanjet G2410 با وضوح ۳۰۰ dpi برای اسکن آنها استفاده شد. تصاویر اسکن شده کاغذهای حساس به آب وارد نرم افزار MATLAB شد و عملیات پردازش آنها مطابق فلوچارت شکل ۷ با استفاده از کدهای دستوری نوشته شده انجام گرفت.



شکل ۷. مراحل پردازش تصاویر کارت های حساس به آب

در فرآیند پردازش، ابتدا تصاویر فراخوانی شد (تصاویر فراخوانی شده برش داده شد. از کانال قرمز تصویر جدا شد (شکل ۸-الف) و به تصویر باینری تبدیل شد (شکل ۸-ب). در این مرحله پیکسل‌هایی که مقادیر آنها کمتر یا مساوی مقدار آستانه باشد، به رنگ سیاه و پیکسل‌هایی که مقدار آنها بزرگتر از آستانه باشند، به رنگ سفید نشان داده شدند. سپس تصویر باینری را معکوس کرده و تصویر تبدیل به قطرات سفید با زمینه مشکی رنگ شدند (شکل ۸-ج).



شکل ۸. الف) کانال قرمز تصویر ب) تبدیل کانال قرمز تصویر به سطح باینری ج) ظاهر شدن قطرات سفید با زمینه مشکی رنگ.

در مرحله بعد هر لکه به صورت مستقل برچسب‌گذاری شد. بدین معنی که نرم‌افزار پیکسل را خوانده، هر زمان به پیکسل سفید رنگ برسد که برچسب نداشته باشد، به تمام پیکسل‌های متصل به آن برچسب یکسانی می‌دهد. بنابراین با ورود اولین پیکسل از یک لکه، به تمام پیکسل‌های آن لکه برچسب واحدی تعلق می‌گیرد. دقت بالا، عدم وابستگی به شکل اشیاء در تصویر و مناسب بودن برای اشیاء کوچک از مزایای الگوریتم برچسب‌گذاری است. با داشتن تعداد پیکسل‌های سطح هر لکه، نرم‌افزار سطح لکه‌ها را به اندازه واقعی تبدیل می‌کند. پس از به دست آوردن مساحت لکه و توجه به این که سطح لکه روی کاغذ غیر دایره‌ای است می‌توان دایره‌ای را در نظر گرفت که مساحت آن برابر با مساحت لکه باشد. بعد از مرحله برچسب‌گذاری، تعداد قطرات، مساحت قطره و قطر میانگین هندسی قطرات طبق رابطه ۱ تعیین شد.

$$GMD = \exp\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(di)\right)$$

رابطه ۱)

در این رابطه، di قطر قطره شمارش شده (برحسب پیکسل)، n تعداد کل قطرات در تصویر، و $\ln$ لگاریتم طبیعی است.

GMD: قطر میانگین هندسی (Geometric Mean Diameter)

برای تعیین ضریب تبدیل پیکسل به میکرومتر از نسبت فاصله بین دو نقطه روی کاغذ بر حسب میکرومتر به تعداد پیکسل بین آن

دو نقطه استفاده شد. قسمتی از کاغذ با ابعاد $۲۸/۷ \times ۵۹/۳$ میلی‌متر در نظر گرفته شد، از تقسیم اندازه طولی و عرضی کاغذ، بر حسب میکرومتر بر تعداد پیکسل آن، عدد $۵۳/۵۸۱$ برای مقدار ضریب تبدیل به دست آمد. با ضرب این مقدار در تعداد پیکسل به دست آمده برای قطر قطرات محاسبه شده توسط نرم‌افزار، مقدار قطر قطرات بر حسب میکرومتر محاسبه شد. قطرات پاشیده شده روی سطح کاغذ اسکن شده طبقه بندی شد. پس از انجام اسکن کارت های حساس به سم، تصاویر حاصله در نرم‌افزار پردازش تصویر وارد شدند و سپس قطر هر قطره با شمارش پیکسل‌ها محاسبه شد و قطرات بر اساس اندازه محاسبه شده (μm) به کلاس‌های کوچک، متوسط و بزرگ طبقه‌بندی شدند. در نهایت درصد سطح پوشش که برابر نسبت مساحت قطرات بر مساحت کل تصویر می‌باشد. برای تعیین قطر اصلی و واقعی قطره از رابطه ۲ استفاده شد (Daneshmand vaziri, 2015):

$$\text{رابطه ۲)} \quad \text{قطر لکه بر روی کاغذ} = \frac{\text{قطر واقعی قطره}}{\text{ضریب پخش}}$$

مقادیر به دست آمده از رابطه ۲ و تقسیم قطر قطرات بر یک ضریب ثابت (جدول ۲)، قطر واقعی قطرات محاسبه شد.

جدول ۲. تعیین قطر واقعی قطرات با استفاده از ضریب پخش (Daneshmakd vaziri, 2015).

قطر قطرات بر روی کاغذ حساس (μm)	ضریب پخش	قطر واقعی قطره (میکرومتر)
۱۰۰	۱/۷	۵۹
۲۰۰	۱/۸	۱۱۱
۳۰۰	۱/۹	۱۵۸
۴۰۰	۲	۲۰۰
۵۰۰	۲/۱	۲۳۸
۶۰۰	۲/۱	۲۸۶

محاسبه قطر میانه حجمی و قطر میانه عددی با استفاده از کدنویسی صورت گرفت و از روابط ۳، ۴ و ۵ برای محاسبه کیفیت پاشش، سطح پوشش و یکنواختی پاشش استفاده شد. از آنجایی که کیفیت پاشش از تقسیم نسبت قطر میانه حجمی به قطر میانه عددی به دست می‌آید، از این رو، در این پارامتر حجم قطرات با تعداد قطره‌ها مقایسه می‌شود.

$$\text{رابطه ۳)} \quad SQ = \frac{VMD}{NMD}$$

در این رابطه SQ کیفیت پاشش، VMD قطر میانه حجمی و NMD قطر میانه عددی است (Daneshmand vaziri, 2015).

$$\text{رابطه ۴)} \quad SC = \frac{A_{at}}{A_t}$$

که در آن SC سطح پوشش قطرات و A_{at} مجموع مساحت تمام قطرات و A_t مساحت کل می‌باشد.

$$\text{رابطه ۵)} \quad R.S.F = \frac{d_{0.9} - d_{0.1}}{d_{0.5}}$$

که در آن R.S.F ضریب یکنواختی پاشش، $d_{0.9}$ قطر قطره در ۹۰ درصد حجمی، $d_{0.1}$ قطر قطره در ۱۰ درصد حجمی و $d_{0.5}$ قطر قطره در ۵۰ درصد حجمی است (Daneshmakd vaziri, 2015).

برای بررسی اثرات عوامل مطالعه (مقدار پاشش، سرعت پرواز، ارتفاع پاشش) از جدول تجزیه واریانس چندعاملی فاکتوریل آنووا با سطح معنی داری آلفا برابر $\alpha = 0.05$ استفاده شد. برای این منظور از نرم افزار SPSS و برای رسم نمودارهای مورد نظر از نرم افزار Excel استفاده شد.

یافته‌های پژوهش و بحث

در این تحقیق مقدار پاشش پهباد سم‌پاش در سه سطح ۴، ۵ و ۶ لیتر در هکتار و سرعت حرکت پروازی پهباد در سه سطح ۴، ۵ و ۶ متر در ثانیه و ارتفاع پرواز در سه سطح ۱/۵، ۲ و ۲/۵ متر از سطح زمین مورد بررسی و آزمایش قرار گرفت. داده‌های به دست آمده از نرم افزار MATLAB شامل قطر میانه حجمی، قطر میانه عددی، کیفیت پاشش، سطح پوشش و یکنواختی پاشش با استفاده از نرم افزار آماری

SPSS و در قالب طرح فاکتوریل تجزیه و تحلیل شد.

قطر میانه حجمی

با توجه به نتایج مشاهده شد در مقدار پاشش ۱۰ لیتر در هکتار، با افزایش ارتفاع پاشش، مقدار قطر میانه حجمی کاهش یافت. اما در مقدار پاشش ۸ لیتر و ۶ لیتر این روند تقریباً معکوس بود. همچنین در ارتفاع ۲/۵ متر در مقدار پاشش ۱۰ لیتر در هکتار با افزایش سرعت پرواز، قطر میانه حجمی قطرات سم کاهش و در مقدار پاشش ۸ و ۶ لیتر در هکتار قطر میانه حجمی قطرات سم افزایش داشته است؛ اما در ارتفاع ۲ و ۱/۵ متری روندی صعودی یا نزولی ثابت خاصی نداشت. اثرات متقابل مقدار پاشش و سرعت پرواز، با کاهش مقدار پاشش قطر میانه حجمی قطرات سم کاهش یافت ولی با کاهش سرعت پرواز قطر میانه حجمی قطرات سم افزایش یافت (شکل ۹). در اثرات متقابل مقدار پاشش و ارتفاع پاشش، مشاهده شد با کاهش مقدار پاشش قطر میانه حجمی قطرات سم کاهش و با کاهش ارتفاع پاشش قطر میانه حجمی قطرات افزایش می‌یابد. اما در اثرات متقابل سرعت و ارتفاع پاشش روند ثابتی ملاحظه نشد.

اثر مقدار پاشش بر قطر میانه حجمی قطرات

با توجه به اینکه مقدار پاشش بیشتر (مثلاً ۱۰ لیتر در هکتار) باعث کاهش قطر میانه با افزایش ارتفاع پاشش شده ولی در مقادیر کمتر (۶ و ۸ لیتر) این روند معکوس است، این موضوع نشان می‌دهد که تراکم و حجم مایع پاشیده شده نقش مؤثری در رفتار قطرات دارند. در دوز بالا (۱۰ لیتر)، افزایش ارتفاع باعث افزایش زمان سقوط و پراکندگی قطرات می‌شود که منجر به تبخیر و شکست قطرات بزرگ به قطرات ریزتر می‌شود. در دوزهای کمتر، قطرات اولیه کوچک‌تر و جمع‌شده کمتر هستند، بنابراین افزایش ارتفاع باعث ادغام قطرات (کواگولاسیون) و افزایش اندازه قطرات می‌شود.

تأثیر سرعت پرواز

اثر سرعت پرواز در ارتفاع ۲/۵ متر:

در مقدار پاشش بالا، افزایش سرعت باعث افزایش نیروی برشی روی قطرات می‌شود که منجر به شکستن قطرات و کاهش قطر میانه حجمی می‌شود.

در پاشش‌های پایین‌تر (۶ و ۸ لیتر)، افزایش سرعت پرواز باعث افزایش برخورد و احتمال ادغام قطرات شده و قطر متوسط افزایش می‌یابد. اما در ارتفاعات پایین‌تر (۱/۵ و ۲ متر) نظم مشخصی در روند تأثیر سرعت وجود ندارد؛ زیرا در ارتفاع کم، محدوده انتقال قطرات و تعامل ناپایدار بین قطرات بیشتر است.

اثرات متقابل مقدار پاشش و سرعت پرواز

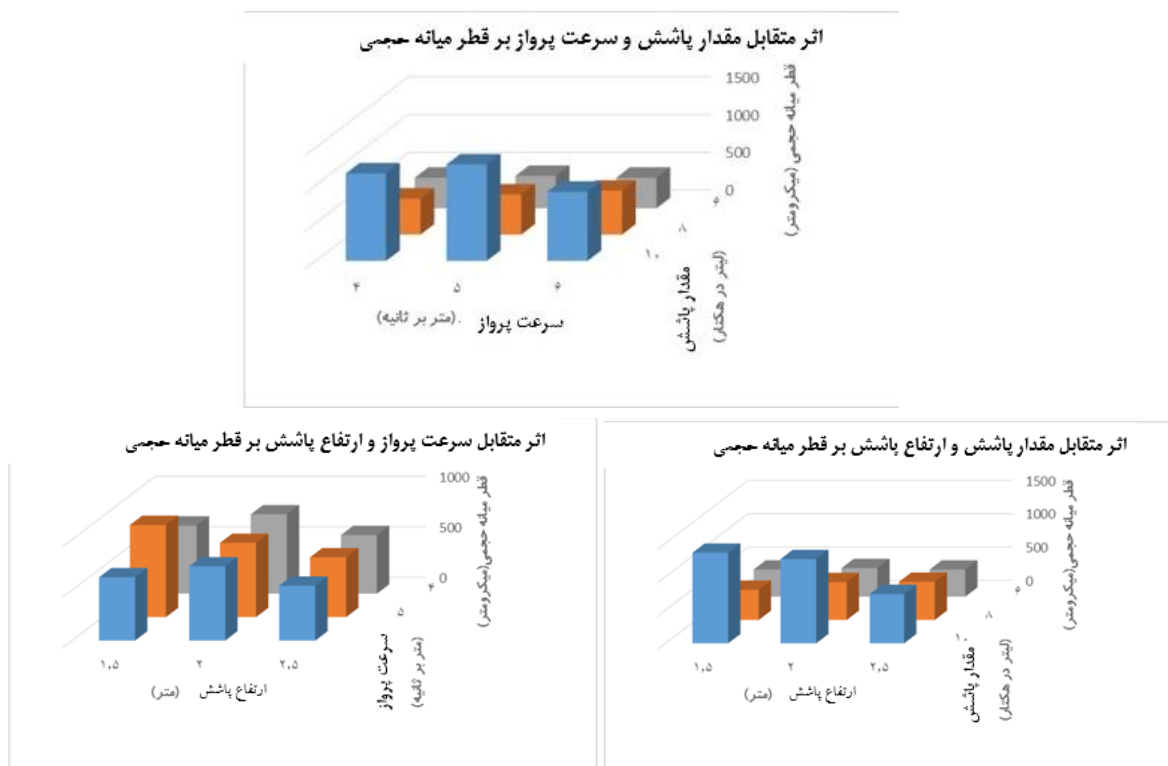
کاهش مقدار پاشش باعث کمتر شدن حجم و تراکم قطرات شده که باعث می‌شود قطر متوسط قطرات کاهش یابد. کاهش سرعت پرواز، افزایش زمان حضور قطرات در هوا را به دنبال دارد که باعث ادغام قطرات و افزایش قطر متوسط می‌شود.

اثرات متقابل مقدار پاشش و ارتفاع پاشش

کاهش مقدار پاشش باعث کاهش کل حجم سم پاشیده شده می‌شود، پس قطرات ریزتر تولید می‌شود که منجر به کاهش قطر میانه حجمی است.

کاهش ارتفاع پاشش به دلیل کاهش زمان سقوط و تبخیر قطرات، باعث کاهش شکست قطرات و حفظ اندازه‌های بزرگ‌تر قطرات می‌شود که منجر به افزایش قطر میانه حجم قطرات می‌شود.

تأثیر متقابل عوامل فیزیکی و دینامیکی مانند تبخیر، شکست قطرات بر اثر نیروی برشی افزایش یافته با سرعت پرواز بالا، و همچنین کواگولاسیون یا ادغام قطرات در شرایط سرعت و تراکم کمتر است. افزایش ارتفاع پاشش باعث افزایش زمان ماندگاری و تبخیر قطرات شده و در دوزهای بالا قطرات کوچک‌تر و در دوزهای پایین‌تر با ادغام قطرات بزرگ‌تر می‌شوند. کاهش مقدار پاشش به دلیل کاهش حجم و تراکم قطرات، قطر میانه را کاهش می‌دهد و کاهش ارتفاع پاشش به دلیل کاهش تبخیر قطرات، قطر متوسط را افزایش می‌دهد. این عوامل باعث تغییرات پیچیده قطر میانه حجمی قطرات سم تحت تأثیر متقابل سرعت پرواز، ارتفاع و مقدار پاشش می‌شوند.



شکل ۹. مقایسه اثرات متقابل عوامل مختلف در قطر میانه حجمی قطرات سم

تجزیه واریانس اثر عامل‌های مقدار پاشش، سرعت پرواز و ارتفاع پاشش و اثرات متقابل آنها بر قطر میانه حجمی قطرات سم بررسی شد. نتایج در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳. نتایج تجزیه واریانس اثر عامل‌های مختلف در قطر میانه حجمی قطرات سم

F	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	منبع تغییر
۲۲/۸۶۷ **	۱۵۴۲۲۴۵۹/۴۸	۳۰۸۴۴۹۱۸/۹۶	۲	مقدار پاشش
۰/۵۰۷ ns	۳۴۱۹۹۴/۲۰۸	۶۸۳۹۸۸/۴۱۶	۲	سرعت پرواز
۱/۶۰۷ ns	۱۰۸۳۹۳۴/۸۲۷	۲۱۶۷۸۶۹/۶۵۵	۲	ارتفاع پاشش
۰/۷۳۵ ns	۴۹۵۵۷۷/۷۷	۱۹۸۲۳۱۱/۰۷۹	۴	مقدار پاشش × سرعت پرواز
۲/۲۷۰ ns	۱۵۳۰۹۹۷/۳۹۸	۶۱۲۳۹۸۹/۵۹۳	۴	مقدار پاشش × ارتفاع پاشش
۰/۴۱۳ ns	۲۷۸۸۰۶/۱۷	۱۱۱۵۲۲۴/۶۴۵	۴	سرعت پرواز × ارتفاع پاشش
۰/۵۷۳ ns	۳۸۶۶۹۶/۸۳۱	۳۰۹۳۵۷۴/۶۴۵	۸	مقدار پاشش × سرعت پرواز × ارتفاع پاشش
—	۶۷۴۴۴۵/۰۸۷	۲/۰۰۳E۸	۲۹۷	خطا
—	—	۳/۹۹۳E۸	۳۲۴	کل

** معنی داری در سطح احتمال ۱٪، ns معنی دار نیست.

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که فقط اثرات مستقل مقدار پاشش روی قطر میانه حجمی قطرات سم در سطح یک درصد معنی دار است و دیگر اثرات مستقل (سرعت پرواز و ارتفاع پاشش) بر قطر میانه حجمی معنی دار نیستند. همچنین اثرات متقابل این عوامل بر قطر میانه حجمی قطرات سم نیز معنی دار نبود. بدین معنی که بین قطر میانه حجمی و دو سطح از هر تیمار اختلاف معنی داری وجود ندارد. این موضوع نشان داد که مقدار پاشش تعیین کننده اصلی قطر میانه حجمی قطرات سم است. نتایج محاسبات آماری و مقایسه میانگین اثر عامل‌های مقدار پاشش، سرعت پرواز و ارتفاع پاشش بر قطر میانه حجمی در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴. مقایسه میانگین اثرات اصلی عوامل روی قطر میانه حجمی قطرات سم

فاکتورها	سطوح فاکتورها	میانگین قطر میانه حجمی
مقدار پاشش (lit/ha)	۱۰	۱۱۱۸/۳۱
	۸	۵۳۰/۱۵
	۶	۴۱۳/۱۹
سرعت پرواز (m/s)	۶	۶۳۴/۸۶
	۵	۷۴۶/۷۲
	۴	۶۸۰/۰۷
ارتفاع پاشش (m)	۲/۵	۵۷۱/۸۲
	۲	۷۵۱/۹۳
	۱/۵	۶۹۲/۷۱

با توجه به نتایج جدول ۴ مشاهده شد در عامل مقدار پاشش، بیشترین میانگین قطر میانه حجمی در سطح ۱۰ لیتر در هکتار و کمترین آن در سطح ۶ لیتر در هکتار رخ داده است. با افزایش مقدار پاشش حجم کل مایع پاشیده شده بیشتر می‌شود که منجر به افزایش قطر قطرات شده در نتیجه حجم بیشتری از مایع در واحد سطح تزریق می‌شود. همچنین ممکن است با افزایش مقدار پاشش، نرخ همپوشانی قطرات و میزان تجمع قطرات بر روی سطح افزایش یابد که باعث افزایش قطر میانه حجمی شود. در عامل سرعت پمپاژ بیشترین میانگین قطر میانه حجمی در سطح ۵ متر در ثانیه و کمترین آن در سطح ۶ متر در ثانیه رخ داده است. وقتی سرعت پمپاژ افزایش می‌یابد (از ۵ به ۶ متر بر ثانیه)، قطرات پاشش شده زمان کمتری برای سقوط آزاد و ادغام دارند و به سرعت از مسیر پاشش عبور می‌کنند. سرعت بالاتر هوا جریان بیشتری ایجاد می‌کند که ممکن است باعث شکستن بیشتر قطرات (افزایش پراکندگی قطرات با قطر کمتر) شود. بنابراین، در سرعت بالاتر قطر میانه کمتر است زیرا قطرات ریزتر تولید می‌شوند یا قطرات بزرگتر شکسته می‌شوند. در عامل ارتفاع، بیشترین میانگین قطر میانه حجمی در سطح ۲ متر و کمترین آن در سطح ۲/۵ متر بوده است. افزایش ارتفاع پمپاژ از ۲ به ۲/۵ متر باعث افزایش فاصله سقوط قطرات می‌شود. این امر باعث تبخیر بیشتر قطرات و همچنین شکستن بیشتر قطرات بزرگتر به قطرات ریزتر در مسیر سقوط می‌شود؛ زیرا قطرات بزرگتر کمتر و قطرات کوچکتر بیشتر می‌شوند در قطر میانه حجمی کاهش می‌یابد.

قطر میانه عددی قطرات سم

مقادیر قطر میانه عددی بر حسب (μm) به دست آمده مربوط به تیمارهای مختلف مقدار پاشش، سرعت پرواز و ارتفاع پاشش بررسی شد. نتایج نشان داد با افزایش سرعت پرواز در مقدار پاشش ۱۰ لیتر در هکتار قطر میانه عددی افزایش و در مقدار پاشش ۸ و ۶ لیتر در هکتار روندی کاهش دارد. بنابراین ارتفاع پاشش تأثیر زیادی بر قطر میانه عددی دارد. در اثرات متقابل مقدار پاشش و سرعت پرواز، کاهش یا افزایش مقدار پاشش و سرعت پرواز تأثیر ثابتی روی قطر میانه عددی ندارد (شکل ۱۰). در اثرات متقابل مقدار پاشش و ارتفاع پاشش، مشاهده شد با کاهش مقدار پاشش قطر میانه عددی افزایش خیلی کم داشته و با کاهش ارتفاع پرواز قطر میانه عددی به‌طور ملایم افزایش یافت. در اثرات متقابل سرعت و ارتفاع پاشش نیز همین روند مشاهده شد.

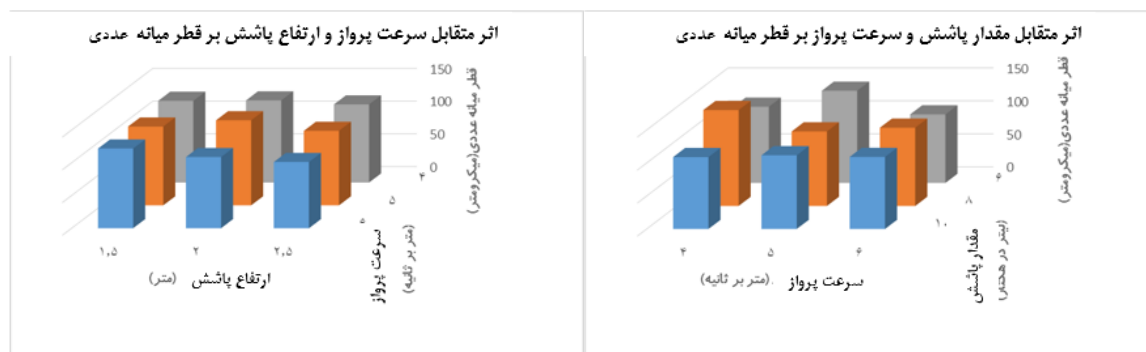
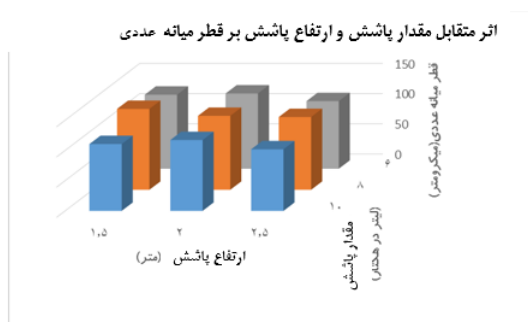
تأثیر سرعت پرواز بر قطر میانه عددی

افزایش سرعت پرواز می‌تواند تأثیرات متفاوتی بر قطر میانه عددی داشته باشد که به مقدار پاشش بستگی دارد. در مقدار پاشش ۱۰ لیتر در هکتار، افزایش سرعت پرواز منجر به افزایش قطر میانه عددی می‌شود. در مقابل، برای مقادیر پاشش ۸ و ۶ لیتر در هکتار، افزایش سرعت پرواز روندی کاهشی در قطر میانه عددی نشان می‌دهد. این نتایج نشان‌دهنده اثر متقابل بین سرعت پرواز و مقدار پاشش بر قطر قطرات است.

تأثیر ارتفاع پاشش بر قطر میانه عددی

ارتفاع پاشش نقش مهمی در تعیین قطر میانه عددی دارد. به‌طور کلی، با کاهش ارتفاع پرواز، قطر میانه عددی به‌طور ملایم افزایش می‌یابد. این پدیده ممکن است به دلیل کاهش بادبردگی و پخش شدگی کمتر قطرات در ارتفاعات پایین‌تر باشد. اثر متقابل مقدار پاشش و سرعت پرواز بر قطر میانه عددی ثابت نیست و بسته به شرایط می‌تواند متغیر باشد. با کاهش مقدار پاشش، قطر میانه عددی افزایش بسیار کمی دارد. در مقابل، کاهش ارتفاع پرواز به افزایش ملایم قطر میانه عددی منجر می‌شود. این اثرات متقابل

نشان می‌دهد که تنظیم بهینه هر دو پارامتر برای دستیابی به قطر قطرات مطلوب ضروری است. با این حال، در برخی موارد اثر متقابل این دو عامل بر شاخص کیفیت پاشش معنی‌دار نبوده است. اثرات متقابل سرعت و ارتفاع پاشش روندی مشابه با اثرات متقابل مقدار پاشش و ارتفاع پاشش را نشان می‌دهد. این بدان معناست که کاهش ارتفاع پرواز و تغییر در سرعت می‌تواند به افزایش ملایم قطر میانه عددی منجر شود.



شکل ۱۰. مقایسه اثرات متقابل عوامل مختلف بر قطر میانه عددی

تجزیه واریانس اثر عامل‌های مقدار پاشش، سرعت پرواز و ارتفاع پاشش و اثرات متقابل آنها بر قطر میانه عددی انجام گرفت و نتایج در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵. نتایج تجزیه واریانس اثر عامل‌های مختلف بر قطر میانه عددی قطرات سم

F	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	منبع تغییر
۹/۵۱۶**	۶۷۳۸/۵۶۸	۱۳۴۷۷/۱۳۵	۲	مقدار پاشش
۷/۲۱۱**	۵۱۰۵/۸۶	۱۰۲۱۱/۷۲۱	۲	سرعت پرواز
۵/۵۳۷**	۳۹۲۰/۶۱۶	۷۸۴۱/۲۳۲	۲	ارتفاع پاشش
۲/۵۸۳**	۸۹۱۰/۲۲۲	۳۵۶۴۰/۸۸۷	۴	مقدار پاشش × سرعت پرواز
۱/۲۳ ^{ns}	۸۶۴/۰۹۱	۳۴۵۶/۳۶۲	۴	مقدار پاشش × ارتفاع پاشش
۱/۹۳۷ ^{ns}	۱۳۷۱/۷۱۵	۵۴۸۶/۸۵۸	۴	سرعت پرواز × ارتفاع پاشش
۴/۹۷۴**	۳۵۲۲/۳۹۳	۲۸۱۷۹/۱۴۶	۸	مقدار پاشش × سرعت پرواز × ارتفاع پاشش
—	۷۰۸/۰۹۸	۲۱۰۳۰۵/۲۱	۳۹۷	خطا
—	—	۴۸۵۵۱۵۲/۷۶۶	۳۲۴	کل

** معنی داری در سطح احتمال ۱٪، ns معنی دار نیست.

بر اساس جدول ۶، نتایج تجزیه واریانس نشان داد که از تمام اثرات مستقل مقدار پاشش، سرعت و ارتفاع پاشش روی قطر میانه عددی قطرات در سطح یک درصد معنی‌دار است. همچنین از بین اثرات متقابل این عوامل بر قطر میانه عددی، اثر دو عامل متقابل مقدار

پاشش و سرعت پرواز، و اثر هر سه عامل مقدار پاشش، سرعت پرواز و ارتفاع پاشش در سطح یک درصد معنی دار بودند. اما دیگر عوامل متقابل با هم معنی دار نبودند. بنابراین عوامل مستقل با اطمینان ۹۹ درصد هر کدام به تنهایی بر قطر میانه عددی قطرات سم تأثیر دارند. نتایج محاسبات آماری و مقایسه میانگین اثر عامل‌های مقدار پاشش، سرعت و ارتفاع پاشش بر قطر میانه عددی در جدول ۶ نشان داده شده است.

جدول ۶. مقایسه میانگین اثرات اصلی عوامل روی قطر میانه عددی

فاکتورها	سطوح فاکتورها	میانگین قطر میانه عددی
مقدار پاشش (lit/ha)	۱۰	۱۰۹/۹۳
	۸	۱۲۵/۵۸
	۶	۱۱۹/۶۳
سرعت پرواز (m/s)	۶	۱۱۰/۵۱
	۵	۱۳۱/۴۱
	۴	۱۳۳/۲۲
ارتفاع پاشش (m)	۲/۵	۱۱۱/۴۵
	۲	۱۳۱/۳۹
	۱/۵	۱۳۲/۳۱

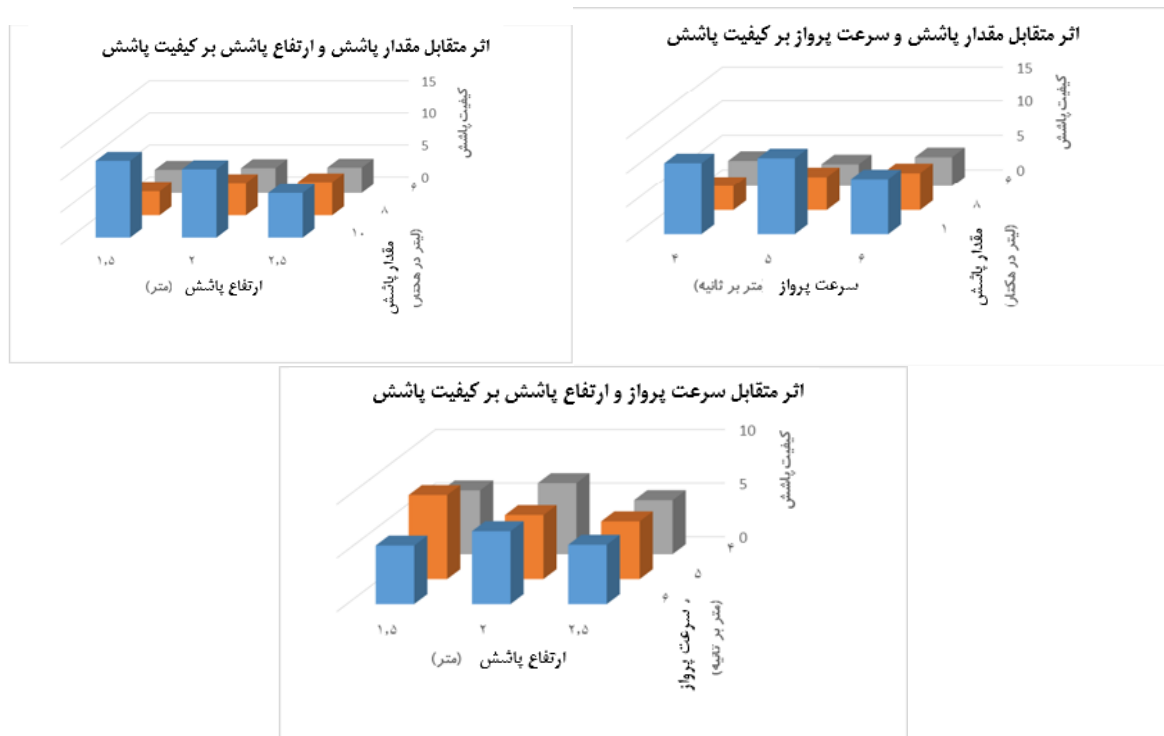
در جدول ۶ مشاهده شد در عامل مقدار پاشش، بیشترین میانگین قطر میانه عددی در سطح ۸ لیتر در هکتار و کمترین آن در سطح ۱۰ لیتر در هکتار رخ داده است. در عامل سرعت پرواز نیز بیشترین میانگین قطر میانه عددی در سطح ۴ متر در ثانیه و کمترین آن در سطح ۶ متر در ثانیه رخ داده است. همچنین در عامل ارتفاع پاشش، بیشترین میانگین قطر میانه عددی در سطح ۱/۵ متر و کمترین آن در سطح ۲/۵ متر رخ داده است. بنابراین با کاهش ارتفاع و در سرعت باد، قطر میانه عددی افزایش خواهد داشت.

کیفیت پاشش قطرات سم

مقادیر پارامتر کیفیت پاشش قطرات به دست آمده مربوط به تیمارهای مختلف مقدار پاشش، سرعت پرواز و ارتفاع پاشش بررسی شد. در مقدار پاشش ۱۰ لیتر در هکتار با افزایش سرعت پرواز کیفیت پاشش کاهش و در مقدار پاشش ۸ و ۶ لیتر در هکتار با افزایش سرعت پرواز کیفیت پاشش نیز افزایش یافت. اثرات متقابل مقدار پاشش و سرعت پرواز نشان داد در مقدار پاشش ۶ و ۸ لیتر در هکتار مقدار کیفیت پاشش تقریباً به یک اندازه و بوده و تغییرات محسوسی نداشته اما در مقدار پاشش ۱۰ لیتر در هکتار با کاهش مقدار سرعت پرواز کیفیت پاشش افزایش داشته است (شکل ۱۱). در اثرات متقابل مقدار پاشش و ارتفاع پاشش، نیز روندی مشابه مشاهده شد. اما در اثرات متقابل سرعت پرواز و ارتفاع پاشش تغییرات خاصی مشاهده نشد و روند در مقداری تقریباً یکسان مشاهده شد.

مقدار پاشش مستقیماً روی اندازه و توزیع قطرات اثر می‌گذارد. در مقادیر بالاتر (مثلاً ۱۰ لیتر در هکتار)، قطرات بزرگ‌تر یا تعداد بیشتری قطره ایجاد می‌شود که می‌تواند باعث تجمع قطرات و عدم توزیع یکنواخت شود. سرعت پرواز نقش مهمی در پخش و پراکندگی قطرات دارد. با افزایش سرعت پرواز در مقادیر پایین‌تر پاشش (۶ و ۸ لیتر)، افزایش سرعت پرواز باعث بهبود پراکندگی و پخش قطرات شده و کیفیت پاشش بهتر می‌شود. اما در مقدار پاشش بالاتر (۱۰ لیتر)، افزایش سرعت باعث خرد شدن قطرات یا پراکندگی نامناسب می‌شود که کیفیت را کاهش می‌دهد.

ارتفاع پاشش با سرعت پرواز و مقدار پاشش عملکرد پراکندگی قطرات را تنظیم می‌کند. مانند سرعت پرواز، در مقادیر پاشش بالا، افزایش ارتفاع می‌تواند باعث پراکندگی بسیار زیاد یا افت قطرات از هدف دستگاه شود و کیفیت کاهش می‌یابد. اما در مقادیر پایین، این اثر کمتر است. دو پارامتر سرعت پرواز و ارتفاع پاشش هر دو بر پراکندگی فیزیکی اثر می‌گذارند اما در بازه‌های استفاده شده، این دو پارامتر احتمالاً تأثیر متقابل معناداری ندارند؛ چون تغییرات آنها در محدوده‌هایی بوده که خصوصیات پراکندگی قطرات تقریباً ثابت مانده است. دلیل این رفتار، اثر ترکیبی پارامترهای مقدار پاشش، سرعت پرواز و ارتفاع پاشش بر توزیع و اندازه قطرات است؛ در مقادیر بالای پاشش (۱۰ لیتر در هکتار) افزایش سرعت پرواز و ارتفاع باعث پراکندگی نامناسب و کاهش کیفیت پاشش می‌شود، اما در مقادیر پایین‌تر (۶ و ۸ لیتر در هکتار) این عوامل به بهتر شدن پراکندگی کمک می‌کنند و کیفیت پاشش افزایش می‌یابد؛ همچنین اثرات متقابل سرعت پرواز و ارتفاع پاشش در محدوده‌های مورد بررسی تغییر محسوسی نداشته است.



شکل ۱۱. مقایسه اثرات متقابل عوامل مختلف بر کیفیت پاشش قطرات سم

نتایج تجزیه واریانس اثر عامل‌های مقدار پاشش، سرعت پرواز و ارتفاع پاشش و اثرات متقابل آنها بر کیفیت پاشش بررسی شد و نتایج در جدول ۷ گزارش شده است.

جدول ۷. نتایج تجزیه واریانس اثر عامل‌های مختلف بر کیفیت پاشش

F	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	منبع تغییر
۳۷/۶۵۴**	۱۱۷۵/۵۴۳	۲۳۵۱/۰۸۵	۲	مقدار پاشش
۰/۲۱۵ ^{ns}	۹/۱۴۲	۱۸/۲۸۵	۲	سرعت پرواز
۱/۰۶۷ ^{ns}	۴۵/۳۴۳	۹۰/۶۸۵	۲	ارتفاع پاشش
۱/۴۸۹ ^{ns}	۶۳/۲۹	۲۵۳/۱۶	۴	مقدار پاشش × سرعت پرواز
۲/۵۰۸ ^{ns}	۱۰۶/۵۹۴	۴۲۶/۳۷۷	۴	مقدار پاشش × ارتفاع پاشش
۰/۶۶۷ ^{ns}	۲۸/۳۷۱	۱۱۳/۴۸۵	۴	سرعت پرواز × ارتفاع پاشش
۰/۴۵۶ ^{ns}	۱۹/۳۶۸	۱۵۴/۹۴۱	۸	مقدار پاشش × سرعت پرواز × ارتفاع پاشش
-	۴۲/۵۰۹	۱۲۶۲۵/۰۵۳	۳۹۷	خطا
-	-	۲۷۹۴۴/۱۲۱	۳۲۴	کل

** معنی داری در سطح احتمال ۱٪، ^{ns} معنی دار نیست.

با توجه به نتایج جدول ۷، تنها عامل مقدار پاشش قطرات سم بر کیفیت پاشش در سطح یک درصد معنی دار است. دیگر عوامل مستقل و متقابل همگی معنی دار نبودند. همچنین تنها عامل مقدار پاشش روی کیفیت پاشش تأثیر دارد و دیگر عوامل تأثیری محسوس در این زمینه ندارند.

نتایج محاسبات آماری و مقایسه میانگین اثر عامل‌های مقدار پاشش، سرعت پرواز و ارتفاع پاشش بر کیفیت پاشش قطرات سم در جدول ۸ نشان داده شده است.

جدول ۸. مقایسه میانگین اثرات اصلی عوامل روی کیفیت پاشش قطرات سم

فاکتورها	سطوح فاکتورها	میانگین کیفیت پاشش
مقدار پاشش (lit/ha)	۱۰	۹/۸۴
	۸	۴/۶۰
	۶	۳/۷۵
سرعت پرواز (m/s)	۶	۵/۹۳
	۵	۶/۴۰
	۴	۵/۸۷
ارتفاع پرواز (m)	۲/۵	۵/۳۲
	۲	۶/۴۶
	۱/۵	۶/۴۱

با توجه به نتایج جدول ۸ مشاهده شد در عامل مقدار پاشش قطرات سم، بیشترین میانگین کیفیت پاشش در سطح ۱۰ لیتر در هکتار و کمترین آن در سطح ۶ لیتر در هکتار رخ داده است. در عامل سرعت پرواز نیز بیشترین میانگین کیفیت پاشش در سطح ۵ متر در ثانیه و کمترین آن در سطح ۴ متر در ثانیه رخ داده است. همچنین در عامل ارتفاع پاشش، بیشترین میانگین کیفیت پاشش در سطح ۲ متر و کمترین آن در سطح ۲/۵ متر رخ داده است.

سطح پوشش قطرات سم

مقادیر پارامتر سطح پوشش به دست آمده مربوط به تیمارهای مختلف مقدار پاشش، سرعت پرواز و ارتفاع پاشش پهباد بررسی شد. نتایج نشان داد تیمارهای مختلف از روند واحد تبعیت نمی کنند. همچنین اثرات متقابل مقدار پاشش و سرعت پرواز نشان داد در مقدار پاشش ۱۰ لیتر در هکتار مقدار سطح پوشش قطرات بیشتر از دیگر مقدارهای پاشش بوده و اما در تغییرات سرعت پرواز فاکتور سطح پوشش معنی دار نبود. در اثرات متقابل مقدار پاشش و ارتفاع پاشش، در مقدار پاشش ۱۰ لیتر در هکتار با افزایش ارتفاع پاشش مقدار سطح پوشش کاهش یافت ولی در دیگر مقدار پاشش ها تغییرات روند خاصی را دنبال نکردند. اما در اثرات متقابل سرعت پرواز و ارتفاع پاشش، سرعت و ارتفاع میانه بیشترین سطح پوشش قطرات (گرچه به مقدار کم) را نشان دادند (شکل ۱۲).

در سم پاشی با پهباد، ارتفاع و سرعت پرواز بر نفوذ و یکنواختی پاشش سم تأثیرگذار هستند. در مقدار پاشش ۱۰ لیتر در هکتار، سطح پوشش قطرات بیشتر از سایر مقادیر پاشش بود، در حالی که تغییرات سرعت پرواز تأثیر معنی داری بر عامل سطح پوشش نداشت. ممکن است در این میزان پاشش، ۱۰ لیتر در هکتار، ترکیبی از عوامل دیگر، مانند اندازه قطرات و شرایط آب و هوایی، به بهترین شکل برای پوشش دهی مؤثر عمل کرده باشد. در این شرایط، افزایش یا کاهش سرعت پرواز در محدوده مورد آزمایش، نتوانسته تغییر محسوسی در سطح پوشش ایجاد کند. با افزایش سرعت پاشش و قطر متوسط قطرات و همچنین کاهش دمای اولیه سوخت، چرخش ناحیه احتراق پذیر درون ابر افزایش می یابد.

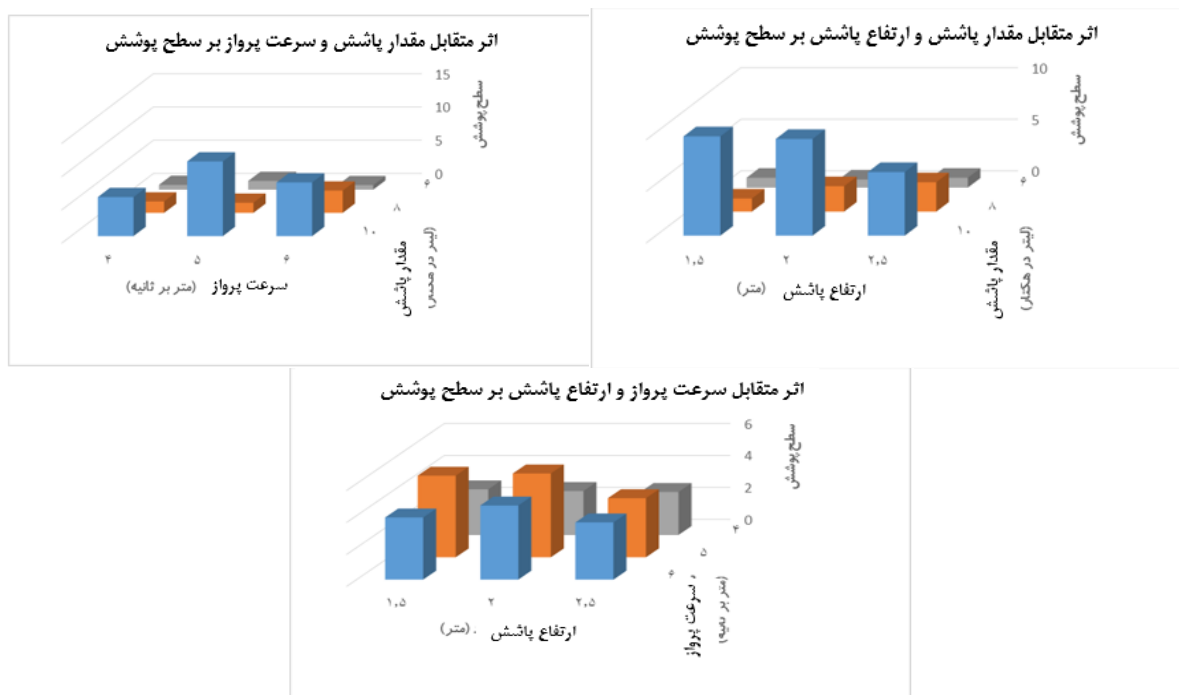
اثرات متقابل مقدار پاشش و ارتفاع پاشش

در مقدار پاشش ۱۰ لیتر در هکتار، با افزایش ارتفاع پاشش، مقدار سطح پوشش کاهش یافت. این پدیده می تواند به دلیل پراکندگی بیشتر قطرات در ارتفاعات بالاتر و کاهش تراکم آنها بر روی سطح هدف باشد. در واقع، هر چه پهباد از سطح هدف دورتر باشد، احتمال انحراف قطرات توسط باد یا تبخیر افزایش یافته و در نتیجه پوشش دهی کاهش می یابد. اما در سایر مقادیر پاشش، تغییرات روند خاصی را دنبال نکردند. این عدم پیروی از روند خاص ممکن است نشان دهنده پیچیدگی بیشتر اندرکنش بین مقدار پاشش و ارتفاع در این شرایط باشد که به عوامل دیگری مانند اندازه قطرات سم، نوع گیاه، و جریان هوای ایجاد شده توسط پروانه های پهباد نیز بستگی دارد. در سم پاشی با پهباد، ارتفاع و سرعت پرواز بر نفوذ و یکنواختی پاشش سم مؤثر است.

اثرات متقابل سرعت پرواز و ارتفاع پاشش

در اثرات متقابل سرعت پرواز و ارتفاع پاشش، سرعت و ارتفاع میانه، بیشترین سطح پوشش قطرات را نشان دادند. این نتایج می تواند نشان دهنده یک نقطه بهینه در ترکیب سرعت و ارتفاع باشد که در آن تعادل مناسبی بین نفوذ قطرات، کاهش بادبردگی و پوشش دهی یکنواخت برقرار می شود. جریان هوای رو به پایین که توسط پروانه پهباد ایجاد می شود، می تواند به نفوذ قطرات به داخل گیاه کمک کند.

با این حال، بادبردگی و ریزش برخی از قطرات روی زمین به دلیل جریان باد پروانه‌ها، دقت و کنترل سم‌پاشی را کاهش می‌دهد و منجر به هدر رفتن سموم و آلودگی محیطی می‌شود. بنابراین، در سرعت و ارتفاع میانه، ممکن است جریان هوای ناشی از پروانه به اندازه کافی قوی باشد که قطرات را به سمت هدف هدایت کند، اما نه آنقدر قوی که باعث بادبردگی بیش از حد شود. همچنین، ارتفاع میانه به پهباد اجازه می‌دهد تا به اندازه کافی نزدیک به هدف باشد تا پراکندگی بیش از حد قطرات رخ ندهد.



شکل ۱۲. مقایسه اثرات متقابل عوامل مختلف بر سطح پوشش

نتایج تجزیه واریانس اثر عامل‌های مقدار پاشش، سرعت پرواز و ارتفاع پاشش و اثرات متقابل آنها بر سطح پوشش در جدول ۹ گزارش شده است.

جدول ۹. نتایج تجزیه واریانس اثر عامل‌های مختلف بر سطح پوشش

F	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	منبع تغییر
۶۹/۰۱**	۱۷۲۸/۲۳	۳۴۵۶/۴۶۱	۲	مقدار پاشش
۴/۱۰۹*	۱۰۲/۹۱۳	۲۰۵/۸۲۶	۲	سرعت پرواز
۰/۸۹۵ ^{ns}	۲۲/۴۰۴	۴۴/۸۰۹	۲	ارتفاع پاشش
۳/۹۶۱**	۹۹/۱۸۹	۳۹۶/۷۵۸	۴	مقدار پاشش × سرعت پرواز
۲/۷۱۵*	۶۷/۹۹۶	۲۷۱/۹۸۴	۴	مقدار پاشش × ارتفاع پاشش
۰/۲۹۶ ^{ns}	۷/۴۲۵	۲۹/۷۰۱	۴	سرعت پرواز × ارتفاع پاشش
۱/۲۱۵ ^{ns}	۳۰/۴۳۰	۲۴۳/۴۴۱	۸	مقدار پاشش × سرعت پرواز × ارتفاع پاشش
—	۲۵/۰۴۳	۷۴۳۷/۷۷۷	۲۹۷	خطا
—	—	۱۶۸۳۰/۲۵۳	۳۲۴	کل

** معنی داری در سطح احتمال ۱٪، * معنی داری در سطح احتمال ۵٪، ns معنی دار نیست.

نتایج نشان داد که اثر مستقل مقدار پاشش و اثر متقابل مقدار پاشش و سرعت پرواز بر روی سطح پوشش در سطح یک درصد معنی‌دار بودند. همچنین اثر مستقل سرعت پرواز و اثر متقابل مقدار پاشش و ارتفاع پاشش روی سطح پوشش در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود. اما دیگر اثرات مستقل و متقابل روی سطح پوشش معنی‌دار نبودند. تأثیر مقدار پاشش روی سطح پوشش کاملاً مشخص بوده و نشان داد پارامتر اصلی در سم‌پاشی این نوع پهباد مقدار پاشش است.

محاسبات آماری و مقایسه میانگین اثر عامل‌های مقدار پاشش، سرعت پرواز و ارتفاع پاشش بر سطح پوشش بررسی شد و نتایج در جدول ۱۰ نشان داده شده است.

جدول ۱۰. مقایسه میانگین اثرات اصلی عوامل روی سطح پوشش قطرات سم

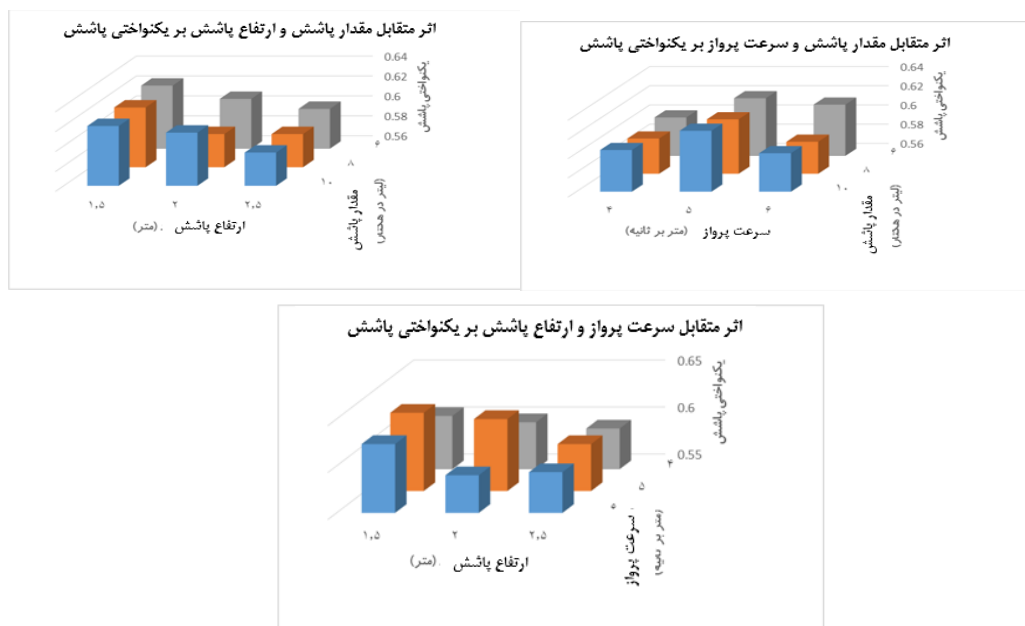
فاکتورها	سطوح فاکتورها	میانگین سطح پوشش
مقدار پاشش (lit/ha)	۱۰	۸/۳۸
	۸	۲/۱۹
	۶	۰/۹۰
سرعت پرواز (m/s)	۶	۴/۰۳
	۵	۴/۶۸
	۴	۲/۷۶
ارتفاع پاشش (m)	۲/۵	۳/۳۲
	۲	۴/۲۱
	۱/۵	۳/۹۵

با توجه به نتایج مشاهده شد در عامل مقدار پاشش، بیشترین میانگین سطح پوشش در سطح ۱۰ لیتر در هکتار و کمترین آن در سطح ۶ لیتر در هکتار رخ داده است. در عامل سرعت پرواز نیز بیشترین میانگین سطح پوشش در سطح ۵ متر در ثانیه و کمترین آن در سطح ۴ متر در ثانیه رخ داده است. همچنین در عامل ارتفاع پاشش، بیشترین میانگین سطح پوشش در سطح ۲ متر و کمترین آن در سطح ۲/۵ متر رخ داده است.

یکنواختی پاشش قطرات سم

مقادیر پارامتر یکنواختی پاشش به دست آمده مربوط به تیمارهای مختلف مقدار پاشش، سرعت پرواز و ارتفاع پاشش بررسی شد. نتایج نشان داد تیمارهای مختلف از روند واحدی تبعیت نکرده و در تمام حالت های اثرات متقابل عوامل مختلف بر یکنواختی پاشش، روندی واحد را طی نکرده است؛ اما تمامی آنها در یک رده خاص قرار دارند. بنابراین یکنواختی پاشش با هر کدام از عوامل و متغیرها، مقداری ثابت داشته است (شکل ۱۳).

یکنواختی پاشش به مجموعه ای از عوامل بستگی دارد که شامل متغیرهای محیطی و سیستمی می شوند. علاوه بر سرعت پرواز و ارتفاع پاشش، عوامل دیگری مانند باد، فاصله و آرایش آبپاش ها نیز بر یکنواختی توزیع تأثیر می گذارند. تلفات تبخیر و بادبردگی می تواند مقدار آب ورودی به خاک را کاهش داده و الگوی پاشش را تغییر دهد، که این موضوع به نوبه خود پارامترهایی مانند ضریب یکنواختی را تغییر می دهد. پیچیدگی اثرات متقابل عوامل مختلف (مانند فشار، سرعت، ارتفاع، و باد) بر روی الگوی پاشش، باعث می شود که حتی با تغییر یک عامل، تغییرات کلی در یکنواختی پاشش در یک محدوده قابل پیش بینی باقی بماند.



شکل ۱۳. مقایسه اثرات متقابل عوامل مختلف بر یکنواختی پاشش

نتایج تجزیه واریانس اثر عامل‌های مقدار پاشش، سرعت پرواز و ارتفاع پاشش و اثرات متقابل آنها بر یکنواختی پاشش در جدول ۱۱ گزارش شده است.

جدول ۱۱. نتایج تجزیه واریانس اثر عامل‌های مختلف بر یکنواختی پاشش قطرات سم.

F	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	منبع تغییر
۰/۲۸۵ ^{ns}	۰/۰۰۲	۰/۰۰۳	۲	مقدار پاشش
۱/۳۹۳ ^{ns}	۰/۰۰۷	۰/۰۱۵	۲	سرعت پرواز
۳/۰۳۳ ^{ns}	۰/۰۱۶	۰/۰۳۳	۲	ارتفاع پاشش
۰/۲۸۷ ^{ns}	۰/۰۰۲	۰/۰۰۶	۴	مقدار پاشش × سرعت پرواز
۰/۲۸ ^{ns}	۰/۰۰۲	۰/۰۰۶	۴	مقدار پاشش × ارتفاع پاشش
۰/۷۰۵ ^{ns}	۰/۰۰۴	۰/۰۱۵	۴	سرعت پرواز × ارتفاع پاشش
۱/۹۷۸ [*]	۰/۰۱۱	۰/۰۸۵	۸	مقدار پاشش × سرعت پرواز × ارتفاع پاشش
-	۰/۰۰۵	۱/۵۵۹	۲۹۷	خطا
-	-	۱۲۰/۷۱۷	۳۲۴	کل

* معنی داری در سطح احتمال ۵٪، ns معنی دار نیست.

با توجه به نتایج جدول ۱۱، تنها اثر متقابل هر سه عامل با یکنواختی پاشش در سطح ۵ درصد معنی دار است، اما دیگر اثرات مستقل و متقابل بر یکنواختی پاشش تأثیری ندارد. از این رو، تغییرات در هر کدام از عوامل مورد بررسی روی یکنواختی پاشش تأثیر نداشته و یکنواختی پاشش همواره در یک بازه بسیار کوچک ثابت است. بنابراین این پهنای هوشمند با توجه به عوامل تنظیم شده، پرواز و سم‌پاشی را آغاز کرده اما در حین پرواز، بسته به وضعیت پرواز، پارامترهای خود را تغییر داده تا یکنواختی پاشش ثابتی را داشته باشد. نتایج محاسبات آماری و مقایسه میانگین اثر عامل‌های مقدار پاشش، سرعت پرواز و ارتفاع پاشش بر یکنواختی پاشش در جدول ۱۲ نشان داده شده است.

جدول ۱۲. مقایسه میانگین اثرات اصلی عوامل روی یکنواختی پاشش قطرات سم.

فاکتورها	سطوح فاکتورها	میانگین یکنواختی پاشش
مقدار پاشش (lit/ha)	۱۰	۰/۶۱
	۸	۰/۶۰
	۶	۰/۶۱
سرعت پرواز (m/s)	۶	۰/۶۰
	۵	۰/۶۲
	۴	۰/۶۰
ارتفاع پاشش (m)	۲/۵	۰/۶۰
	۲	۰/۶۱
	۱/۵	۰/۶۲

با توجه به نتایج به‌دست آمده از در جدول ۱۲ مشاهده شد در عامل مقدار پاشش، بیشترین میانگین یکنواختی پاشش در سطح ۱۰ و ۶ لیتر در هکتار و کمترین آن در سطح ۸ لیتر در هکتار رخ داده است. در عامل سرعت پرواز نیز بیشترین میانگین یکنواختی پاشش در سطح ۵ متر در ثانیه و کمترین آن در سطح ۴ و ۶ متر در ثانیه رخ داده است. همچنین در عامل ارتفاع پاشش، بیشترین میانگین یکنواختی پاشش در سطح ۱/۵ متر و کمترین آن در سطح ۲/۵ متر رخ داده است. نتایج بدست آمده از این تحقیق با نتایج گزارش شده از تحقیقات باقری و همکاران (Bagheri et al., 2022)، (Safari & Shaikhi, 2020)، (Meng et al., 2020) و (Biglia et al., 2022) همخوانی دارد و آنها نیز در تحقیقات خود نتایج مشابهی را اعلام کرده‌اند.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر تأثیر عامل‌های مقدار پاشش (۴، ۵ و ۶ متر بر ثانیه) و ارتفاع پاشش (۱/۵، ۲ و ۲/۵ متر) بر پارامترهای قطر میانه حجمی، قطر میانه عددی، کیفیت پاشش، سطح پوشش و یکنواختی پاشش بررسی شد. در عامل مقدار پاشش، بیشترین میانگین یکنواختی پاشش در سطح ۱۰ و ۶ لیتر در هکتار و کمترین آن در سطح ۸ لیتر در هکتار رخ داده است. در عامل

سرعت پرواز نیز بیشترین میانگین یکنواختی پاشش در سطح ۵ متر در ثانیه و کمترین آن در سطح ۴ و ۶ متر در ثانیه رخ داده است. همچنین در عامل ارتفاع پاشش، بیشترین میانگین یکنواختی پاشش در سطح ۱/۵ متر و کمترین آن در سطح ۲/۵ متر رخ داده است. در مقدار پاشش ۱۰ لیتر در هکتار، با افزایش ارتفاع پاشش، مقدار سطح پوشش کاهش یافت. این پدیده می‌تواند به دلیل پراکندگی بیشتر قطرات در ارتفاعات بالاتر و کاهش تراکم آنها بر روی سطح هدف باشد. در واقع، هر چه پهپاد از سطح هدف دورتر باشد، احتمال انحراف قطرات توسط باد یا تبخیر افزایش یافته و در نتیجه پوشش‌دهی کاهش می‌یابد. اما در سایر مقادیر پاشش، تغییرات روند خاصی را دنبال نکردند. این عدم پیروی از روند خاص ممکن است نشان‌دهنده پیچیدگی بیشتر اندرکنش بین مقدار پاشش و ارتفاع در این شرایط باشد که به عوامل دیگری مانند اندازه قطرات سم، نوع گیاه، و جریان هوای ایجاد شده توسط پروانه‌های پهپاد نیز بستگی دارد. عدم معنی‌دار بودن یا تأثیر کمتر عوامل مستقل و متقابل بر روی پارامترهای مورد نظر نشان داد عملکرد پهپاد به گونه‌ای است که از عوامل مورد نظر تأثیر کمتری می‌پذیرد. پهپاد با ایجاد وزش باد در زیر ملخ‌های خود و ایجاد جریان متلاطم باعث می‌شود تا پارامترهای قطر میانه حجمی و عددی و همچنین کیفیت پاشش که متأثر از دو پارامتر قبلی هستند، به صورت کاملاً نامنظم و به دور از تابعی خاص باشند. مقایسه میانگین اثرات اصلی روی پارامترها نشان داد پارامترهای قطر میانه حجمی، کیفیت پاشش و سطح پوشش با کاهش عامل مقدار پاشش، کاهش دارد، اما در عامل سرعت و ارتفاع، مقدار میانه (توصیه شده از سوی شرکت سازنده و مورد استفاده برای سم‌پاشی مزارع غلات منطقه) بیشترین مقدار را نشان داد. همچنین با کاهش عوامل سرعت و ارتفاع، پارامتر قطر میانه عددی افزایش یافت. مقایسه میانگین اثرات اصلی روی پارامتر یکنواختی پاشش نشان داد پهپاد در هر شرایطی مقدار یکنواختی پاشش یکسانی دارد. لذا پهپاد بسته به شرایط پرواز، مقدار پارامترهای مؤثر در پاشش را تغییر خواهد داد و همین عامل باعث شده تا عوامل مورد ارزیابی به طور کامل و قطعی از یک تابع خاص پیروی نکنند؛ و تنها عامل یکنواختی پاشش در یک مقدار خاصی انجام گیرد.

منابع

- امیرشقایق، فرید و صفری، محمود. (۱۳۹۵). مقایسه و ارزیابی فنی سم‌پاش‌های الکترواستاتیک، میکروتر و پشت تراکتوری لانس‌دار در کنترل آفت کرم سیب. *نشریه ماشین‌های کشاورزی*، جلد ۶، شماره ۲، صفحات ۳۷۶-۳۸۳.
- باقری، نیکروز؛ صفری، محمود و شیخی گرجان، عزیز. (۱۴۰۱). ارزیابی عملکرد پهپاد سم‌پاش در کنترل شته کلزا. *نشریه ماشین‌های کشاورزی*، جلد ۱۴، شماره ۲، ص ۱۴۶-۱۳۵.
- حاجی آقا علیزاده، حسین؛ پوروثوقی گرگری، حسن و بختیاری، امیرعباس. (۱۳۹۵). ارزیابی فاکتورهای عملکردی سم‌پاشی الکترواستاتیک در سطوح رویی و پشتی برگ به کمک پردازش تصویر. *نشریه مجلات علمی دانشگاه تهران*، ۴۷(۱)، ۴۹-۳۹.
- دانشمند وزیری، محسن. (۱۳۹۴). شناخت و کاربرد انواع سم‌پاش‌های کشاورزی، انتشارات تحقیقات آموزش کشاورزی، تهران.
- رستمی، محمدعلی و به‌آئین، محمدعلی. (۱۴۰۰). *راهنمای شناسایی، کالبراسیون و تنظیمات سم‌پاش‌ها*. نشر آموزش کشاورزی، چاپ اول.
- زارعی، مصطفی؛ غلامی پرشکوهی، محمدعلی؛ غفوری ورزنده، حسن و محمد زمانی، داوود. (۱۴۰۰). ارزیابی تجربی و شبیه‌سازی پاشش سم از افشانک سم‌پاش به روش دینامیک سیالات محاسباتی. *پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی*، ۱۰(۱)، ۲۸-۱۹.
- صفری، محمود و باقری، نیکروز. (۱۴۰۰). *معیارهای انتخاب و ارزیابی سم‌پاش پهپاد*. مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، چاپ اول.
- صفری، محمود و شیخی گرجان، عزیز. (۱۳۹۹). مقایسه پهپاد با سم‌پاش تراکتوری لانس‌دار در کنترل زنجرف‌خوار. *دانش گیاهپزشکی ایران (علوم کشاورزی ایران)*، ۵۱(۱)، ۱۳-۲۶.
- مخلص آبادی فراهانی، مرتضی؛ سواری، مسلم و مطیعی، ناصر. (۱۳۹۲). کشاورزی دقیق، چشم‌انداز نوین در کشاورزی جهان. *اولین همایش سراسری کشاورزی و منابع طبیعی پایدار، تهران، موسسه آموزش عالی مهراروند، گروه ترویجی دوستداران محیط زیست و و انجمن حمایت از طبیعت ایران*.
- ناصری، حکیم؛ احسانی پور، علی و نیسی، داود. (۱۴۰۰). ارزیابی استفاده از پهپاد در کنترل علف‌های هرز در مزارع نیشکر. *جمعیت علمی فناوری نیشکر ایران، سال یازدهم*، شماره ۵۵-۵۶، صفحات ۱۵-۲۴.
- نامور، پیمان و حیدری، احمد. (۱۳۹۳). مطالعه کارایی روش‌های مختلف سم‌پاشی در کنترل کنه زرد و پهن سیب زمینی. *نشریه آفت‌کش‌ها در علوم گیاه‌پزشکی*، دوره ۱، جلد ۱ شماره ۲، صفحات ۱۳۷-۱۴۷.

REFERENCES

- Ahmed, F., Qui, B., Dong, X., Ma, J., Huang, X., Ahmed, Sh., & Chandio, F. (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(10350), 1-10.
- Biglia, A., Grella, M., Bloise, N., Comba, L., Mozzanini, E., Sopegno, A., Pittarello, A., Dicembrini, E., Eloi Alcatrão, L., Guglieri, G., Balsari, P., Ricauda Aimonino, D., & Gay, P. (2022). UAV-spray application in vineyards: Flight modes and spray system adjustment effects on canopy deposit, coverage, and off-target losses, *Science of The Total Environment*, Volume 845, 1 November 2022, 157292.
- Guo, S., Li, J., Yao, W., Zhan, Y., Li, Y., & Shi, Y. (2019). Distribution characteristics on droplet deposition of wind field vortex formed by multi-rotor uav, *PloS One*, 14 (7), e0220024.
- Hajiagha alizadeh, H., Poorvosoooghi, H., & Abbas bakhtiari, A. (2016). Evaluating functional factors of electrostatic spraying for the upper and rear surfaces of the leaves using image processing. *Tehran University Scientific Journals*, 47(1), 39-49. doi: 10.22059/ijbse.2016.58476. (In Persian).
- Hao, Z., Li, M., Yang, W., & Li, X. (2022). Evaluation of UAV spraying quality based on 1D-CNN model and wireless multi-sensors system, *Information Processing in Agriculture*.
- Huang, H., Deng, J., Lan, Y., Yang, A., Deng, X., & Zhang, L. (2018). A fully convolutional network for weed mapping of unmanned aerial vehicle (UAV), *PLoS ONE* (13), 4: e0196302.
- Kharim, M. N. A., Wayayok, A., Shariff, 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.
- Lan, Y.B., Chen, S.D., & Fritz, B.K. (2017). Current status and future trends of precision agricultural aviation technologies. *International Journal of Agricultural & Biological Engineering*, 10(3), 1-17.
- Meng, Y., Su, J., Song, J., Chen, W.H., & Lan, Y. (2020). Experimental evaluation of UAV spraying for peach trees of different shapes: Effects of operational parameters on droplet distribution. *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 170, 105282.
- Amirshaghagh, F., & Safari, M. (2016). Comparison and technical evaluation of electrostatic, micronair and tractor-mounted lance sprayers in order to control (*Carpocasa pomonella* L) in apple orchards. *Journal of Agricultural Machinery*, 6 (2), pages 376-383. doi: [20.1001.1.22286829.1395.6.2.9.9](https://doi.org/10.1001.1.22286829.1395.6.2.9.9). (In Persian).
- Bagheri, N., Safari, M., & Sheikhi garjan, A. (2022). Performance Evaluation of the UAV Sprayer in Controlling *Brevicoryne Brassicae* L. Pest in Canola. *Journal of Agricultural Machinery*, 14(2), 135-146. doi: <https://doi.org/10.22067/jam.2022.79329.1129>. (In Persian).
- Daneshmakdvaziri, M. (2015). Understanding and using different types of agricultural sprayers. *Agricultural Education Research Publications*, Tehran. (In Persian).
- Mukhlesabadi farahani, M., Savari, M., & Motiei, N. (2013). Precision farming: a new perspective in global agriculture. *The First National Conference on Sustainable Agriculture and Natural Resources*. (In Persian).
- Namvar, P., & Heidari, A. (2014). Study of the effectiveness of different pesticide spraying methods in controlling the yellow and broad potato mite (*Polyphagotarsonemus latus* Banks). *Journal of Pesticides in Plant Sciences*, 1, 1(2), 137-147. doi: 10.22092/jppps.2014.100066. (In Persian).
- Nasseri, H., Ehsanipour, A., & Nisi, D. (2021). Evaluation of the use of drones in weed control in sugarcane fields. *Scientific Extension Journal of the Iranian Sugarcane Technology Scientific Society*, Volume 11, Issue: 56. (In Persian).
- Rostami, M. A., & Behaain, M.A. (2021). Guide to identifying, calibrating, and adjusting sprayers. *Agricultural Education Publication*, first edition. (In Persian).
- Safari, M., & Sheikhi garjan, A. (2020). Comparison between unmanned aerial vehicle and tractor lance sprayer against Dubas bug *Ommatissus lybicus*. *Iranian journal of plant protection science*, 51(1), 13-26. doi: 10.22059/ijpps.2020.281898.1006894. (In Persian).
- Safari, M., & Baghrei, N. (2020). Criteria for selecting and evaluating drone sprayers. *Agricultural Engineering and Technical Research Institute*, First edition. (In Persian).
- Zareai, M., Gholami parshkahi, M.A., Ghafouri varzaneh, H., & Mohammad zaman, D. (2021). Experimental evaluation and simulation of pesticide spraying from a pesticide sprayer nozzle using computational fluid dynamics. *Journal and Agricultural Machinery Mechanics Research of Shahrekord University*, 10(1), 19-28. (In Persian).