

The effect of gum and nozzle type on reducing drift and improving haloxyfop-R-methyl efficacy against spontaneous barley in unmanned aerial vehicle spraying

Abstract

To investigate the effect of nozzle and gum type on spray quality, drift, and efficiency of haloxyfop-R-methyl when applied with a drone (Agras MG-1P), a factorial experiment was conducted in a randomized complete block design with three replications at the research field of Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran, in the fall of 2023, under weather conditions of 14–18°C air temperature, 45–60% relative humidity, and wind speed of approximately 3 m/s. The first factor included gum type (with and without guar and xanthan gums), the second factor included haloxyfop-R-methyl dose (0, 9.4, 18.9, 37.8, 56.7, and 75.6 g/ha), and the third factor included flat fan nozzle type (standard, anti-drift, and air-induction). Moisture-sensitive papers were placed in the center of the plot and 2 meters from the edge of the plot to assess spray coverage and droplet density, and weed control efficiency was determined based on the reduction in dry biomass per plant. Data were analyzed using ANOVA, and means were compared using Tukey's test. In the center of the plot, the highest spray coverage (31.7%) was observed using anti-drift nozzle in the presence of xanthan gum. However, the highest droplet density (41.3 drops/cm²) was observed using standard nozzle in the absence of gum. However, the best spontaneous barley control efficiency was achieved by haloxyfop R-methyl using anti-drift nozzle in the presence of guar gum. Therefore, to control 50 and 90% spontaneous barley with this treatment, 7.7 and 31.0 g/ha haloxyfop R-methyl were required, respectively. No visible drift was recorded using air-induction nozzle with and without gum. With other nozzles, adding gums to the spray solution reduced the drift of spray droplets. Although the addition of gums to the spray solution reduced the spray coverage and density of droplets, contrary to expectations, it increased spontaneous barley control efficiency. This discrepancy is related to the water retention potential of the droplets by the gums.

Keywords: Air-induction nozzle; Anti-drift nozzle; Coverage percentage; Droplet deposition; Herbicide efficacy; UAV spraying system

Extended Abstract

Introduction

Unmanned aerial vehicles (UAVs) are increasingly being used in modern crop protection due to their rapid operation, reduced labor requirements, and ability to conduct precise, site-specific applications. Compared to traditional ground-based sprayers, UAV systems offer better accessibility in difficult terrains and faster field coverage. However, despite these advantages, challenges such as spray drift, inadequate droplet deposition, and reduced pesticide efficacy continue to limit the effectiveness of aerial spraying, especially in ultra-low-volume application scenarios. The quality of spray in UAV applications is significantly influenced by several factors, including the type of nozzle used, flight parameters, and the physicochemical properties of the spray solution. Nozzle design plays a critical role in determining droplet size distribution, spray pattern, and the kinetic energy of droplets, all of which affect spray coverage and uniformity of deposition. Additionally, spray additives, such as polymers and natural gums, can alter the viscosity and surface tension of the solution. This modification has the potential to enhance droplet stability and retention, as well as to reduce drift. Haloxyfop-R-methyl is a selective post-emergence herbicide commonly used to control grassy weeds in both cereal and non-cereal cropping systems. Its effectiveness relies heavily on uniform spray coverage and appropriate droplet distribution. In UAV (unmanned aerial vehicle) applications, where spray volumes are generally low, herbicide performance is particularly vulnerable to environmental losses, such as drift and evaporation. Thus, optimizing application parameters is crucial for ensuring effective weed control. Drift-reducing and air-induction nozzles are often recommended for aerial applications because they produce coarser droplets, which help reduce drift potential. However, using larger droplets may negatively impact target coverage and the biological effectiveness of the herbicide. This creates a trade-off between reducing drift and maintaining spray deposition efficiency. While UAV sprayers are being increasingly adopted in agricultural practices, there is still limited information on how the combination of nozzle type and gum additives affects spray characteristics, drift behavior, and herbicide efficacy in field conditions. Filling this knowledge gap is vital for optimizing herbicide performance in ultra-low-volume UAV spraying systems. To address this issue, the present study was conducted to evaluate how different nozzle types and gum additives influence spray coverage, droplet density, drift behavior, and weed control efficiency (WCE) for haloxyfop-R-methyl when applied with a UAV sprayer. The study also aimed to identify the most effective nozzle-gum combination that enhances herbicide performance while minimizing off-target movement and environmental losses.

Materials and Methods

The experiment was conducted in autumn 2023 at the Research Farm of Bu-Ali Sina University in Hamedan, Iran (34°48' N, 48°31' E; elevation ~1800 m), a region with a cold semi-arid climate, mean annual precipitation of approximately 330 mm, and mean annual temperature of about 11°C. The treatments were organized as a factorial experiment using a randomized complete block design with three replications in field conditions. The experimental factors included: gum type at three levels: no gum, guar gum, and xanthan gum (at a concentration of 2 g L⁻¹); herbicide dose at six levels: 0, 9.4, 18.9, 37.8, 56.7, and 75.6 g a.i. ha⁻¹; flat-fan nozzle type at three levels: standard (HARDI ISO F-015-110), anti-drift (HARDI ISO LD-015-110), and air-induction (HARDI ISO INJET-015-110) nozzles, each with a 110° spray angle, ISO 015 flow rate class, and a flow rate of 0.60 L min⁻¹ at 3 bar. Spraying was conducted at the three- to four-leaf stage of spontaneous barley, under weather conditions of 14–18°C air temperature, 45–60% relative humidity, and wind speed of approximately 3 m s⁻¹. Spray applications were conducted using an Agras MG-1P drone (DJI, China) equipped with a boom carrying four nozzles, operated at a flight height of 3 m above ground level (AGL). Other

spraying specifications included a spray volume of 29 L ha⁻¹, spray pressure of 3 bar, flight speed of 6 m s⁻¹, and an effective spray width of 3 m. To evaluate spray deposition characteristics, water-sensitive papers (3 × 7 cm) were placed horizontally at the center of each plot and at distances of 2, 4, and 8 m from the plot edge during application of the highest herbicide dose (75.6 g ha⁻¹). No visible spots were observed on papers placed at 4 and 8 m; therefore, these were excluded from analysis. After application, the papers were collected and scanned separately, and images were processed in Python to determine spray coverage percentage and droplet density (droplets cm⁻²). Weed control efficiency (WCE) was assessed based on the reduction in dry biomass per plant, four weeks after treatment application. Dose–response curves were fitted using nonlinear regression to estimate ED50 and ED90 values. Normality of data distribution was verified using the Shapiro–Wilk test prior to statistical analysis. Coverage and droplet density data were analyzed as a factorial experiment in a completely randomized design, while herbicide efficacy data were analyzed as a factorial experiment in a randomized complete block design. Means were compared using Tukey's test at the 5% probability level, using R and Excel software.

Results and Discussion

Analysis of variance indicated that both spray coverage and droplet density were significantly influenced by the interaction between nozzle type and gum additive. This means that the effect of each factor is dependent on the level of the other. The highest spray coverage (31.72%) and droplet density (41.33 droplets cm⁻²) were achieved with the low-drift nozzle when combined with xanthan gum treatment. Conversely, relatively high deposition values were recorded in treatments without gum, depending on the nozzle configuration. In contrast, the lowest spray coverage (11.21%) and droplet density (4.67 droplets cm⁻²) occurred when the air-induction nozzle was paired with xanthan gum. This finding suggests that certain combinations of coarse-droplet nozzles and high-viscosity additives may negatively impact spray uniformity. Overall, these results demonstrate that nozzle type predominantly affects spray deposition patterns, while gum additives modify droplet behavior in a nozzle-dependent manner. Dose-response analysis based on weed control efficiency revealed significant differences among various treatments. The lowest effective dose (ED50) values were recorded when using air-induction and anti-drift nozzles combined with guar gum, reaching 6.17 and 7.78 g a.i. ha⁻¹, respectively. The corresponding effective dose for 90% control (ED90) values were 31 and 38.3 g a.i. ha⁻¹, indicating improved herbicide efficiency and a reduced required dose under optimized conditions. Weed control efficiency (WCE) was also significantly influenced by the interaction between nozzle type and gum additive. The highest WCE (95%) was attained using the anti-drift nozzle coupled with guar gum. This combination provided an optimal balance between droplet retention, spray coverage, and drift reduction, leading to enhanced biological effectiveness of the herbicide. Spray drift evaluations showed that drift-reducing nozzle technologies effectively minimized off-target movement under UAV spraying conditions. The absence of measurable drift at 2 m and the extremely low deposition at 4 m confirm the effectiveness of both anti-drift and air-induction nozzles under ultra-low-volume application conditions.

The ED50 values obtained in this study (6.17–13.42 g ha⁻¹) were comparable to those reported for clodinafop-propargyl against the same weed species under ground spraying (9.23–12.35 g a.i. ha⁻¹; Aliverdi and Karami, 2020) and consistent with the superior performance of anti-drift and air-induction nozzles over standard nozzles reported for UAV-applied sulfosulfuron against *H. spontaneum* (Aliverdi and Aliverdi, 2024). Guar gum improved haloxyfop-R-methyl efficacy more than xanthan gum across all nozzle types, likely due to enhanced droplet stability, adhesion, and retention on the leaf surface (Zhang and Xiong, 2021; Bhardwaj et al., 2022). Although gum addition reduced spray coverage and droplet density, it unexpectedly increased weed control efficiency, indicating a negative relationship between deposition and efficacy at each nozzle level. This is likely attributable to the prolonged droplet evaporation time caused by gums, which increases the opportunity for cuticular penetration and herbicide uptake, as previously demonstrated for clodinafop-propargyl on winter wild oat (Khorshidvand et al., 2026). Consistent with this, the correlation between spray coverage and control efficiency was weak and non-significant ($r = 0.049$, $R^2 = 0.002$ for ED50; $r = -0.163$, $R^2 = 0.026$ for ED90), supporting the hypothesis that factors beyond surface coverage—particularly droplet retention and evaporation time—play a more decisive role in herbicide efficacy than coverage alone.

This study was conducted at a single location and growing season under variable wind speed, and the proposed evaporation-time mechanism was not directly measured but inferred from prior findings. Water-sensitive paper, used here as a qualitative tool for relative drift comparison, is not a substitute for standardized quantitative drift assessment. Future studies should directly measure droplet evaporation time, evaluate additional gums such as carboxymethyl cellulose, and repeat this work under varying wind speeds, in other crops, and using mass samplers or tracer methods (e.g., ISO 22369) at extended distances (20–40 m) for more precise drift quantification.

Conclusions

The findings of this study highlight the significant impact of nozzle type and gum additives on spray quality, drift behavior, and the effectiveness of herbicides in UAV spraying systems. Among the various treatments evaluated, the combination of a low-drift nozzle and guar gum demonstrated the best overall performance. This combination was characterized by enhanced spray coverage, adequate droplet density, reduced drift potential, lower ED50 and ED90 values, and a high weed control efficiency of 95%. While xanthan gum showed improvements in spray deposition under specific conditions, its interaction with air-induction nozzles led to decreased spray coverage and droplet density. This indicates that the effectiveness of spray additives is highly dependent on the design of the nozzle and the characteristics of droplet formation. Overall, the results suggest that guar gum can effectively enhance the performance of haloxyfop-R-methyl in UAV-based herbicide applications while minimizing environmental drift risks. Additionally, selecting appropriate nozzle types, especially low-drift nozzles, can significantly enhance spraying precision and improve weed management efficiency in ultra-low-volume UAV application systems.

اثر صمغ و نوع نازل در کاهش بادبردگی و بهبود کارایی هالوکسی فوپ-آر-متیل علیه جودره در سمپاشی پهپادی

چکیده

به منظور بررسی تأثیر نوع نازل و صمغ بر کیفیت پاشش، بادبردگی و کارایی هالوکسی فوپ-آر-متیل در کاربرد با پهپاد سمپاش مدل Agras MG-1P، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه بوعلی‌سینا، در پاییز ۱۴۰۲ و تحت شرایط جوی دمای ۱۴ تا ۱۸ درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۴۵ تا ۶۰ درصد و سرعت وزش باد حدود ۳ متر بر ثانیه اجرا شد. فاکتور اول شامل نوع صمغ (با و بدون صمغ‌های گوار و گزانتان)، فاکتور دوم شامل مقدار هالوکسی فوپ-آر-متیل (صفر، ۹/۴، ۱۸/۹، ۳۷/۸، ۵۶/۷ و ۷۵/۶ گرم در هکتار) و فاکتور سوم شامل نوع نازل بادبزی (استاندارد، ضد بادبردگی و القاء‌کننده هوا) بود. کاغذهای حساس به رطوبت در مرکز کرت و در فاصله ۲ متری از حاشیه کرت قرار داده شدند. در مرکز کرت، بیشترین میزان پوشش پاشش (۳۱/۷ درصد) با استفاده از نازل ضد بادبردگی در حضور صمغ گزانتان مشاهده شد. اما بیشترین تراکم قطرات پاشش (۴۱/۳ قطره در سانتی‌متر مربع) با استفاده از نازل استاندارد در غیاب صمغ مشاهده شد. با این وجود، بهترین کارایی کنترل جودره توسط هالوکسی فوپ-آر-متیل با استفاده از نازل ضد بادبردگی در حضور صمغ گوار حاصل شد. به طوری که برای کنترل ۵۰ و ۹۰ درصدی جودره با این تیمار به ترتیب به ۷/۷ و ۳۱/۰ گرم هالوکسی فوپ-آر-متیل در هکتار نیاز بود. هیچ بادبردگی قابل مشاهده‌ای با استفاده از نازل القاء‌کننده هوا با و بدون صمغ ثبت نشد. با دیگر نازل‌ها، افزودن صمغ به محلول پاشش، ریزش قطرات را کاهش داد. اگرچه افزودن صمغ‌ها به محلول پاشش موجب کاهش پوشش و تراکم قطرات پاشش شد، اما برخلاف انتظار، این امر باعث افزایش کارایی کنترل جودره شد. این تناقض به پتانسیل نگهداری آب قطرات پاشش توسط صمغ‌ها مرتبط است.

کلیدواژه‌ها: سامانه پهپادی سمپاش، درصد پوشش، کارایی علف‌کش، نازل القاء‌کننده هوا، نازل ضد بادبردگی، نشست قطرات

مقدمه

اخیراً توسعه فناوری پهپادهای سمپاش و کاربرد آن‌ها در حفاظت گیاهان در برابر آفات توجه زیادی را به خود جلب کرده است (Hu et al., 2024). پهپادهای سمپاش در مقایسه با سایر انواع سمپاش‌ها، به کاهش‌های قابل توجهی در مصرف آفت‌کش (۳۰ تا ۵۰ درصد)، آب، انرژی، هزینه کارگری، خطر مسمومیت کاربر و بادبردگی قطرات پاشش کمک می‌کنند (Wang et al., 2019; Ju et al., 2022). همچنین، پهپادهای سمپاش کاربرد آفت‌کش‌ها را در مزارع صعب‌العبور و محصولات با ارتفاع بلند بدون ایجاد خسارت فیزیکی به گیاه زراعی و عدم فشردگی خاک میسر می‌سازند (Zeng et al., 2020; Zhou et al., 2024). محققان نشان دادند که کاربرد علف‌کش بیس‌پیریباک سدیم با پهپاد سمپاش در مزارع برنج نشایی موجب کاهش قابل توجهی در تراکم و وزن خشک علف‌های هرز شد، به گونه‌ای که پهپاد سمپاش با مصرف تنها ۲۵ لیتر آب در هکتار، کارایی مشابه سمپاش کوله پستی با ۵۰۰ لیتر آب در هکتار را نشان داد (Jeevan et al., 2023). افزون بر این، به کارگیری پهپادهای سمپاش در مقایسه با سمپاش‌های دستی موجب کاهش ۲۰ تا ۳۲ درصدی مصرف آفت‌کش‌ها با حفظ کارایی کنترل مطلوب آفات (بیش از ۹۰ درصد) شده است (Raj et al., 2024; Senthilkumar & Jaganraj, 2025). از سوی دیگر، نتایج بررسی محققان نشان می‌دهد که کاربرد حشره‌کش اسپینتورام با پهپاد سمپاش ضمن کاهش ۲۵ درصدی در دُز مصرفی در مقایسه با سمپاش کوله پستی، کنترل بیش از ۸۰ درصدی تریپس را در لوبیا چشم بلبلی به همراه داشت (Yan et al., 2021). فناوری پهپاد سمپاش در کشاورزی دقیق امکان تصویربرداری هوایی برای شناسایی علف‌های هرز و عملیات سمپاشی هدفمند در مراحل بعدی را نیز فراهم می‌کند؛ رویکردی که می‌تواند کارایی کنترل علف‌های هرز را تا ۶۰ برابر در مقایسه با روش‌های سنتی کنترل علف‌های هرز بهبود بخشد و ظرفیت بالایی برای کاهش هزینه‌ها و مصرف نهاده‌ها ایجاد کند (Meesaragandla et al., 2024). از منظر شاخص‌های فنی پاشش نیز استفاده از پهپادهای سمپاش موجب افزایش ۳ برابری نشست محلول پاشش روی تاج پوشش گیاهی و کاهش ۵۰ درصدی نشست محلول پاشش آفت‌کش‌های شاخ و برگ مصرف روی زمین نسبت به سمپاش‌های دستی و پشت تراکتوری بوم‌دار می‌شود که نشان‌دهنده بهبود راندمان مصرف آفت‌کش‌هاست (Cavalari et al., 2023; Gao et al., 2024). مطالعات مقایسه‌ای نشان داد که پهپاد سمپاش ظرفیت کاری حدود ۴۰ تا ۸۰ برابر بیشتر از سمپاش پستی (Safaeinejad et al., 2025).

شارژی دارند (Chen et al., 2025). همچنین، بهره‌وری کاری پهپادهای سمپاش به ۵/۷۵ هکتار به ازای هر نفر-ساعت می‌رسد که حدود ۲۱/۳ برابر بیشتر از سمپاش پستی فشاری است. علاوه بر این، نرخ استفاده مفید از محلول پاشش در پهپاد سمپاش و سمپاش پست تراکتوری بوم‌دار بیش از ۵۰ درصد برآورد شده است، در حالی که این مقدار در سمپاش پستی شارژی ۲۷/۸ درصد برآورد شده است (Zhou et al., 2023). در پژوهشی دیگر، محققان نشان دادند که پهپاد سمپاش در مقایسه با سمپاش‌های کوله پستی و پست تراکتوری بوم‌دار باعث کاهش ۷۰ درصدی مصرف آب، کاهش ۳۰ تا ۴۰ درصدی آفت‌کش، افزایش ۱۵ تا ۲۰ درصدی بهره‌وری انرژی و کاهش ۱۲ درصدی بادبردگی قطرات پاشش می‌شوند (Ramteke et al., 2025). محققان دیگری نشان دادند که پهپاد سمپاش علاوه بر دستیابی به کارایی کنترل علف هرز بسیار بالا (۹۴ درصد)، مصرف علف‌کش را تا ۶۴ درصد، اثرات زیست‌محیطی مرتبط با آنرا حدود ۸ برابر و هزینه‌های عملیاتی را تا ۴۴ درصد نسبت به سمپاش پست تراکتوری بوم‌دار کاهش داد (Panduangnat et al., 2026).

با وجود مزایای متعدد، بادبردگی^۱ قطرات پاشش یکی از چالش‌های اصلی کاربرد آفت‌کش‌ها با انواع پهپادهای سمپاش است. گزارش‌هایی وجود دارد که نشان می‌دهد ۲۰ تا ۵۵ درصد از آفت‌کش مصرف‌شده ممکن است از منطقه هدف خارج شود (Zhang et al., 2018). برخلاف سمپاش‌های زمینی که محلول پاشش را در فاصله نزدیک به هدف می‌پاشند، در سمپاشی‌های هوایی، قطرات پاشش مستعد بادبردگی بیشتری هستند (Chen et al., 2020a) با این حال، محققان میزان بادبردگی ایجاد شده توسط یک سمپاش باغی را با یک پهپاد سمپاش (مدل ۶ ملخ چرخان) که هر دو مجهز به نازل مخروط توخالی با شماره ۸۰۰۶ بودند را تحت شرایط باغ زیتون مقایسه و گزارش کردند که ۹۰ درصد پاشش در فاصله ۸/۷ متری سمپاش باغی نشست کرد در حالی که ۹۰ درصد پاشش در فاصله ۳/۴ متری از پهپاد سمپاش نشست کرد (Sánchez-Fernández et al., 2023). این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از پهپاد سمپاش می‌تواند باعث کاهش بادبردگی قطرات پاشش شود. به هر حال، مسئله بادبردگی قطرات پاشش در کاربردهای هوایی به دلیل ارتفاع بالای پاشش حتی در سرعت‌های پایین وزش باد نیز مشاهده می‌شود و می‌تواند سبب آلودگی محیط زیست، آسیب به گیاهان غیر هدف و کاهش کارایی آفت‌کش شود (Shan et al., 2021; Martin et al., 2024). در پژوهش انجام شده در مزرعه سویا گزارش شده است که گیاهسوزی ناشی از بادبردگی علف‌کش پاشیده شده با پهپاد سمپاش به مزرعه ذرت مجاور تا ۴۰ درصد سطح برگ ذرت را کاهش داد (Chen et al., 2025). به طور مشابه، گیاهسوزی قابل توجهی در گیاهان غیر هدفی مانند ذرت و کدو حلوائی که در فاصله بیش از ۵ متری از محل سمپاشی با پهپاد سمپاش قرار داشتند نیز گزارش شده است (Kim et al., 2023).

اندازه قطرات یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر بادبردگی قطرات پاشش محسوب می‌شود؛ به طوری که افزایش اندازه قطرات می‌تواند احتمال بادبردگی آنها را کاهش دهد (Alves et al., 2017). قطرات ریزتر مدت بیشتری در هوا معلق باقی می‌مانند؛ لذا، آنها بیشتر تحت تأثیر جریان هوا قرار می‌گیرند. از این نظر، قطرات درشت‌تر با احتمال بیشتری روی سطح هدف نشست می‌کنند (Hu et al., 2022). از آنجایی که یکی از وظایف نازل تنظیم اندازه قطرات پاشش است، انتخاب نازل مناسب نقش کلیدی در کیفیت پاشش و کمیت بادبردگی دارد. محققان گزارش کردند که استفاده از نازل‌های تولیدکننده قطرات درشت‌تر موجب افزایش نشست و کاهش بادبردگی آنها می‌شود (García-Munguía et al., 2024). در همین راستا، مطالعات قبلی نشان می‌دهد که نازل بادبزی القاءکننده هوا کمترین میزان بادبردگی را به محیط غیر هدف در مقایسه با نازل بادبزی استاندارد ایجاد کرد (Wang et al., 2023). به طور مشابه، نازل بادبزی القاءکننده هوا با افزایش اندازه قطرات پاشش نسبت به نازل بادبزی دامنه گسترده، پتانسیل بادبردگی قطرات پاشش را کاهش داد (Dafsari et al., 2024). علاوه بر این، نتایج برخی مطالعات با پهپاد سمپاش نشان داد که استفاده از نازل بادبزی القاءکننده هوا در مقایسه با نازل بادبزی استاندارد موجب کاهش بادبردگی و در عین حال بهبود نشست قطرات پاشش روی سطح هدف شد (Wang et al., 2023). به همین دلیل، نازل‌های بادبزی القاءکننده هوا و ضد بادبردگی به دلیل توانایی در تولید قطرات درشت‌تر و کاهش پتانسیل بادبردگی، کاربرد گسترده‌ای در سمپاشی با پهپاد دارند (Liu et al., 2023). در پژوهشی مشابه در ایران نیز نشان داده شد که با افزایش تعداد بادبزن نازل، میزان بادبردگی افزایش می‌یابد؛ اما در نازل‌های ضد بادبردگی و القاءکننده هوا (برخلاف نازل

¹ Drift

استاندارد)، افزایش تعداد بادبزن موجب بهبود نشست و کارایی علف‌کش هالوکسی‌فوپ-آر-متیل علیه جو زراعی داوطلب شد (علی‌وردی، ۱۴۰۰). با این حال، کاهش بادبردگی از طریق استفاده از نازل‌های کاهنده بادبردگی ممکن است با کاهش پوشش سطحی ناشی از لغزش قطرات از سطح برگ همراه باشد (Brankov et al., 2023; Chourey & Singh, 2023; Wongsuk et al., 2024). حتی با استفاده از نازل‌های کاهنده بادبردگی در پهپاد سمپاش در سرعت وزش باد بین ۱ تا ۷ متر بر ثانیه احتمال بادبردگی قطرات پاشش گزارش شده است (Koo et al., 2024).

ضمن انتخاب نازل مناسب، استفاده از مواد افزودنی مناسب جهت کاهش بادبردگی نیز یکی از روش‌های مؤثر برای کاهش بادبردگی قطرات پاشش در عملیات سمپاشی به ویژه با پهپاد سمپاش محسوب می‌شود (He Ling et al., 2017). این مواد از طریق تغییر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی محلول پاشش می‌توانند اندازه قطرات، پخش‌شدگی و میزان نشست آنها روی سطح هدف را تحت تأثیر قرار دهند (Gao et al., 2018; Zeeshan et al., 2024). مطالعات نشان می‌دهد که مواد افزودنی کاهنده بادبردگی می‌توانند با افزایش لزوجت محلول پاشش سبب کاهش تولید قطرات کوچک‌تر شوند و از این طریق بادبردگی آنها را ۵۰ تا ۸۰ درصد کاهش دهند (Wang et al., 2018; Popescu et al., 2022). صمغ‌ها از جمله مواد افزودنی کاهنده بادبردگی هستند که در غلظت‌های کم، لزوجت محلول پاشش را به شدت افزایش می‌دهند؛ از اینرو، در کاهش بادبردگی قطرات پاشش مورد توجه قرار گرفته‌اند. محققان نشان دادند که صمغ‌های گوار و گزانتان می‌توانند با افزایش لزوجت محلول و کاهش تشکیل قطرات ریز، کیفیت پاشش را بهبود دهند (Berninger et al., 2021). برای مثال، افزودن صمغ گوار (۰/۷۹ گرم در لیتر) به محلول پاشش موجب افزایش اندازه قطرات پاشش شد. این امر باعث کاهش قابل توجهی در سهم قطرات بسیار ریز (کمتر از ۱۵۰ میکرومتر) از کل طیف قطرات پاشش شد (Samples et al., 2021). همچنین، با افزودن ۰/۵ تا ۵ گرم صمغ گزانتان به ازای هر لیتر محلول پاشش امکان افزایش لزوجت و کاهش خطر بادبردگی در سمپاشی هوایی با پهپاد میسر شد (Wang et al., 2018).

با توجه به تفاوت در مکانیسم فیزیکی نازل‌ها و اصلاح شیمیایی محلول با مواد افزودنی در تشکیل قطرات پاشش، انتخاب مناسب آن‌ها می‌تواند نقش مهمی در کاهش بادبردگی و بهبود کارایی علف‌کش داشته باشد. از این‌رو، پژوهش مزرع‌های حاضر با هدف بررسی اثر افزودن صمغ‌های گوار و گزانتان به محلول پاشش علف‌کش هالوکسی‌فوپ-آر-متیل و نقش نازل‌های بادبزی استاندارد، ضد بادبردگی و القاء‌کننده هوا بر میزان بادبردگی قطرات پاشش و کارایی علف‌کش علیه علف‌هرز جودره در کاربرد با پهپاد سمپاش Agras MG-1P انجام شد.

مواد و روش‌ها

مشخصات محل اجرای آزمایش

این آزمایش در پاییز ۱۴۰۲ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه بوعلی‌سینا همدان اجرا گردید. موقعیت جغرافیایی محل اجرای آزمایش دارای ارتفاع تقریبی ۱۸۰۰ متر از سطح دریا و در مختصات جغرافیایی ۳۴ درجه و ۴۸ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۳۱ دقیقه طول شرقی قرار دارد. این منطقه از نظر اقلیمی دارای آب و هوای نیمه‌خشک سرد و کوهستانی بوده و میانگین بارندگی سالانه آن حدود ۳۳۰ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه حدود ۱۱ درجه سانتی‌گراد است.

طرح آزمایشی و تیمارها

آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. فاکتور اول شامل نوع صمغ در سه سطح بدون صمغ (شاهد) و افزودن صمغ‌های گوار و گزانتان هر یک با غلظت ۲ گرم در لیتر به محلول پاشش بود. فاکتور دوم شامل مقدار علف‌کش در شش سطح صفر، ۹/۴، ۱۸/۹، ۳۷/۸، ۵۶/۷ و ۷۵/۶ گرم هالوکسی‌فوپ-آر-متیل در هکتار بود. فرمولاسیون علف‌کش بکار رفته به صورت ۱۰/۸ درصد مایع امولسیون‌شونده با نام تجاری سوپر گالانت بود. حداکثر مقدار بکار رفته از فرمولاسیون فوق معادل مقدار توصیه

شده آن بر روی برچسب است. فاکتور سوم شامل نوع نازل در سه سطح بود: نازل بادبزنی استاندارد^۱ نازل ضد بادبردگی^۲ و نازل القاءکننده هوا^۳. هر سه نازل از محصولات شرکت هاردی (دانمارک)، با زاویه پاشش ۱۱۰ درجه و کلاس دبی ۰.۱۵ (رنگ سبز) بودند و دبی هر یک در فشار کاری ۳ بار بر اساس کاتالوگ رسمی شرکت برابر ۰.۶۰ لیتر در دقیقه است (Hardi, 2026).

کاشت و آماده‌سازی مزرعه

بذرهای علف هرز جودره (*Hordeum vulgare* L. subsp. *spontaneum* (C. Koch) Thell.) که سال قبل از مزارع اطراف محل اجرای آزمایش جمع‌آوری شده بودند با استفاده از بذرکار مکانیزه با تراکم کاشت ۳۵۰ بوته در مترمربع در سطح مزرعه کشت شدند. آبیاری مزرعه طی دوره آزمایش به‌صورت بارانی انجام گرفت. ابعاد هر کرت آزمایشی ۳ × ۳ متر در نظر گرفته شد. در داخل هر کرت، چهار ناحیه ۱ × ۱ متر تعیین گردید که یک ناحیه به‌عنوان شاهد بدون علف‌کش و سه ناحیه برای ارزیابی اثر تیمار در مقایسه با ناحیه شاهد استفاده شد. همچنین، به‌منظور جلوگیری از تداخل تیمارها و کاهش اثرات ناشی از بادبردگی، فاصله‌ای برابر با ۱۰ متر بین کرت‌ها به‌عنوان ناحیه حائل در نظر گرفته شد.

عملیات سمپاشی

عملیات سمپاشی در مرحله سه تا چهار برگی جودره و تحت شرایط جوی شامل دمای هوای ۱۸-۱۴ درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۴۵-۶۰ درصد و سرعت وزش باد حدود ۳ متر بر ثانیه، بر اساس داده‌های ثبت‌شده توسط بادسنج دیجیتال در ایستگاه هواشناسی دانشگاه بوعلی‌سینا، انجام شد. از پهپاد سمپاش مدل Agras MG-1P (شرکت DJI، چین) مجهز به مخزن ۱۰ لیتری، موتورهای براشلس و سیستم کنترل جریان هوشمند استفاده شد. وزن عملیاتی دستگاه در زمان پرواز (با مخزن پر) حدود ۲۳/۹ کیلوگرم بود. ارتفاع پرواز پهپاد سمپاش ۳ متر از سطح زمین تنظیم شد که با شرایط عملیاتی توصیه‌شده توسط سازنده برای این مدل پهپاد مطابقت دارد (Sinha et al., 2022). سایر مشخصات سمپاشی به صورت حجم پاشش ۲۹ لیتر در هکتار، فشار پاشش ۳ بار، سرعت پرواز ۶ متر بر ثانیه و عرض مؤثر پاشش ۳ متر بود.

دوازده ساعت پیش از سمپاشی، محلول آب مقطر حاوی ۲ گرم در لیتر از صمغ گوار و گزانتان به طور جداگانه آماده شد و در زمان پاشش، مقادیر مختلف علف‌کش همراه با مویان گلدن گیت (یک در هزار) به آن محلول‌ها اضافه شد. قبل از تیمار هر کرت، سایر کرت‌ها با یک لایه پارچه توری سبک پوشانده شد تا از بادبردگی احتمالی قطرات پاشش محافظت شوند. علاوه بر این، مساحتی برابر با ۱ مترمربع از هر کرت در زمان تیمار کردن آن کرت با پارچه پوشانده شد تا به عنوان ناحیه شاهد بدون علف‌کش در نظر گرفته شود. براساس تجربه قبلی، با قرار دادن چوب‌هایی به صورت عمودی زیر پارچه از خوابیدن آن بر روی زمین جلوگیری شد تا به بوته‌ها آسیب فیزیکی وارد نشود (طلایی و همکاران، ۱۴۰۴).

ارزیابی ویژگی‌های پاشش

برای ارزیابی ویژگی‌های پاشش، از کاغذهای حساس به آب^۴ با ابعاد ۷×۳ سانتی‌متر استفاده شد. سطح این کاغذها دارای پوششی زرد رنگ حاوی ماده بروموفنول آبی^۵ است که در اثر برخورد قطرات آب به رنگ آبی پایدار تغییر وضعیت می‌دهد. در زمان اجرای تیمارها، سه قطعه کاغذ به‌صورت افقی در مرکز کرت و همچنین در فواصل ۲، ۴ و ۸ متری از حاشیه کرت نصب شدند. پس از اعمال تیمارها، ابتدا زمان لازم برای خشک شدن کامل قطرات روی کاغذها سپری شد؛ سپس کاغذها جمع‌آوری و در کیسه‌های زیپ‌دار پلاستیکی

^۱ HARDI ISO F-015-110

^۲ HARDI ISO LD-015-110

^۳ HARDI ISO INJET-015-110

^۴ Above Ground Level

^۵ Water-Sensitive Paper, Syngenta Crop Protection AG, Basel, Switzerland

^۶ Bromophenol blue

جهت جلوگیری از تغییرات رطوبتی نگهداری شدند. در مرحله بعد، کاغذها با اسکنر تخت با رزولوشن dpi ۶۰۰ اسکن گردیدند. تصاویر حاصل با استفاده از یک اسکریپت سفارشی در محیط پایتون^۱ پردازش شدند تا شاخص‌های درصد پوشش و تراکم قطرات (تعداد در سانتی‌متر مربع) محاسبه گردند. شایان ذکر است هدف از تعبیه کاغذها در فواصل مذکور، مقایسه نسبی تیمارها از نظر انتقال قطرات به مناطق غیرهدف بوده و این روش جایگزین اندازه‌گیری استاندارد و کمی بادبردگی (مانند استفاده از نمونه‌بردار جرمی) نمی‌باشد.

ارزیابی کارایی علف‌کش

چهار هفته پس از اعمال تیمارها و در ساعات صبح، تراکم بوته‌های جودره در یک کادر یک مترمربعی شمارش شد (یک کادر یک مترمربعی در هر کرت). سپس، بوته‌ها از سطح زمین بریده و به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد در آون خشک شدند. سپس زیست توده خشک تک بوته جودره محاسبه گردید. کارایی کنترل جودره^۲ (SBCE) که نشان دهنده درصد کاهش زیست توده خشک جودره در اثر تیمار علف‌کشی است از طریق رابطه (۱) تعیین شد.

$$SBCE (\%) = \frac{(A-B)}{A} \times 100 \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه فوق، A و B به ترتیب زیست توده خشک جودره (گرم در مترمربع) در بخش‌های سمپاشی نشده و سمپاشی شده کرت هستند (Mamnoie et al., 2022).

تحلیل آماری

به منظور بررسی واکنش جودره به مقادیر مختلف علف‌کش، داده‌های کارایی کنترل جودره با استفاده از مدل لجستیک چهارپارامتری (رابطه ۲) نسبت به مقدار علف‌کش برازش داده شدند^۳. این برازش با استفاده از پکیج drc در نرم‌افزار R انجام شد (Ritz et al., 2015; Knezevic et al., 2007). صحت مدل با استفاده از آزمون عدم برازش^۴ ارزیابی و تأیید گردید.

$$Y = \frac{D-C}{1+\exp(B(\log X - \log ED_{50}))} + C \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن، Y کارایی کنترل علف هرز، X مقدار علف‌کش مصرفی، D حد بالای پاسخ (حداکثر کارایی)، C حد پایین پاسخ (حداقل کارایی)، B شیب منحنی در نقطه ED₅₀ و ED₉₀ مقدار علف‌کش لازم برای دستیابی به ۵۰ درصد تأثیر (بین حد بالا و پایین) است. از این مدل برای برآورد مقادیر ED₅₀ و ED₉₀، به ترتیب به عنوان مقادیر علف‌کش لازم برای دستیابی به ۵۰ و ۹۰ درصد کارایی کنترل جودره، استفاده شد (Ritz et al., 2015). مقایسه مقادیر ED₅₀ و ED₉₀ بین تیمارهای مختلف بر اساس خطای استاندارد این پارامترها انجام گرفت.

پیش از انجام تجزیه و تحلیل آماری، توزیع نرمال داده‌ها با استفاده از آزمون Shapiro-Wilk بررسی و تأیید شد. داده‌های مربوط به پوشش و تراکم قطرات پاشش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی ولی داده‌های مربوط به کارایی علف‌کش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی تجزیه و تحلیل شدند. میانگین‌ها با کمک آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد مقایسه شدند. تجزیه و تحلیل آماری و ترسیم نمودارها با استفاده از نرم‌افزارهای R و Excel انجام شد. لازم به ذکر است، روی کاغذهای حساس به رطوبت قرار گرفته در فواصل ۴ و ۸ متری از حاشیه کرت هیچ لکه قابل تشخیصی با این روش مشاهده نگردید؛ لذا، مورد تجزیه و تحلیل قرار نگرفتند. با این حال، با توجه به محدودیت کاغذهای حساس به رطوبت در ثبت قطرات بسیار ریز (کمتر از ۵۰ میکرومتر)، این یافته را نمی‌توان به عنوان عدم وقوع کامل بادبردگی در این فواصل تفسیر کرد.

¹ Python

² Spontaneous Barley Control Efficiency

³ Fitting

⁴ Lack-of-fit test

نتایج و بحث

پوشش و تراکم قطرات پاشش در منطقه هدف و غیر هدف

نتایج تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها نشان داد که اثر اصلی نوع صمغ و نوع نازل و نیز برهمکنش آن‌ها بر پوشش و تراکم قطرات پاشش روی کاغذهای حساس به رطوبت قرار گرفته در مرکز کرت و فاصله ۲ متری از حاشیه آن در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۱).

جدول ۱- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر نوع صمغ و نازل بر پوشش و تراکم قطرات پاشش روی کاغذهای حساس به رطوبت قرار گرفته در مرکز کرت و فاصله دو متری از حاشیه کرت

منبع تغییرات		درجه آزادی		پوشش قطرات پاشش		تراکم قطرات پاشش	
				مرکز	فاصله ۲ متری	مرکز	فاصله ۲ متری
نوع صمغ		۲		۴۶/۲۹** (۱۶/۴۲)	۱۲/۲۱** (۵۷/۱۲)	۲۳۵۹/۲۵** (۷۴۰/۷۰)	۳۵۰/۹۴** (۱۴۷۱/۸۹)
نوع نازل		۲		۳۸۳/۶۵** (۱۳۶/۰۵)	۱۵۶/۶۵** (۷۳۲/۵۶)	۹۶۸/۲۵** (۳۰۳/۹۹)	۲۱۲/۲۸** (۹۱۱/۲۹)
نوع صمغ × نوع نازل		۴		۹۱/۶۱** (۳۲/۴۹)	۴/۷۶** (۲۲/۲۶)	۲۱۲/۳۷** (۶۶/۶۷)	۷۷/۸۵** (۳۲۶/۵۱)
خطای آزمایشی		۱۸		۲/۸۱	۰/۲۱	۳/۱۸	۰/۲۴
ضریب تغییرات (درصد)		-		۷/۹۴	۱۲/۹	۶/۷۴	۹/۲۱

** نشان دهنده وجود معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد است. اعداد داخل پرانتز نشان‌دهنده مقدار F-value است.

ارزیابی کارایی در منطقه هدف (مرکز کرت)

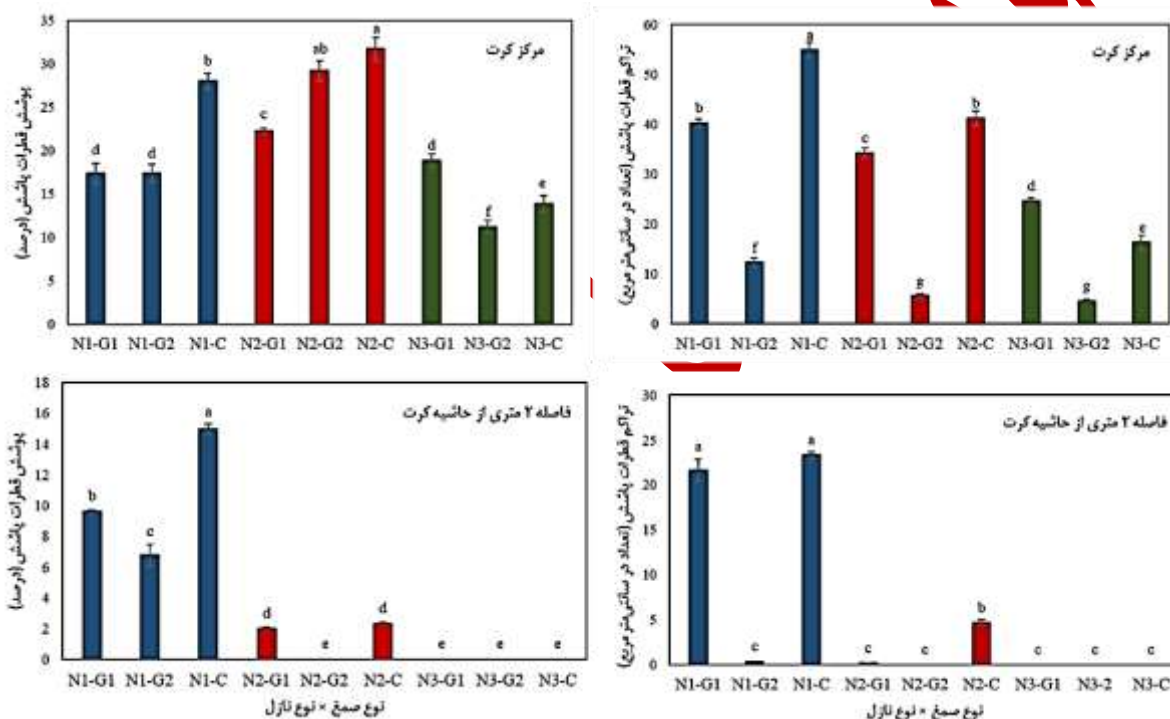
در مرکز کرت، بیشترین پوشش قطرات پاشش (۳۱/۷ درصد) در تیمار نازل ضد بادبردگی در غیاب صمغ و کمترین پوشش قطرات پاشش (۱۱/۲ درصد) در تیمار نازل القاء‌کننده هوا در حضور صمغ گزانتان مشاهده شد (شکل ۱). این در حالی بود که بیشترین تراکم قطرات پاشش (۵۵ قطره در سانتی‌متر مربع) مربوط به تیمار نازل بادبزی استاندارد در غیاب صمغ و کمترین تراکم قطرات پاشش (کمتر از ۴/۵ قطره در سانتی‌متر مربع) مربوط به تیمارهای نازل‌های بادبزی ضد بادبردگی و القاء‌کننده هوا در حضور صمغ گزانتان بود (شکل ۱).

تحت شرایط بدون صمغ، تراکم قطرات پاشش روی کاغذ حساس به رطوبت قرار گرفته در مرکز کرت و در فاصله ۲ متری از حاشیه کرت به صورت نازل بادبزی استاندارد < ضد بادبردگی < القاء‌کننده هوا بود. از این یافته می‌توان استنتاج کرد که با افزایش اندازه قطرات پاشش، تراکم (تعداد) آنها در منطقه هدف کاهش یافت. مطالعات قبلی نیز نشان دادند که نازل بادبزی استاندارد به دلیل تولید قطرات کوچکتر می‌تواند پوشش بیشتری در منطقه هدف ایجاد کند (Ranabhat et al., 2025). برای مثال، در مطالعه‌ای تحت شرایط مزرعه نیشکر گزارش شده است که تحت شرایط حجم پاشش برابر (۷/۵ لیتر در هکتار)، نازل بادبزی استاندارد در مقایسه با نازل بادبزی القاء‌کننده هوا طیف وسیع‌تری از اندازه قطرات تولید می‌کند که باعث افزایش پوشش قطرات پاشش می‌شود؛ به‌طوری‌که میزان پوشش قطرات پاشش در نازل‌های فوق به ترتیب برابر ۰/۸۵ و ۱/۶۹ درصد اندازه‌گیری شد (Ranabhat et al., 2025).

ارزیابی بادبردگی در حاشیه کرت (فاصله ۲ متری)

تحت شرایط بدون صمغ، تراکم قطرات پاشش روی کاغذ حساس به رطوبت قرار گرفته در فاصله ۲ متری از حاشیه کرت نیز به همین ترتیب (نازل بادبزی استاندارد < ضد بادبردگی < القاء‌کننده هوا) بود، که نشان‌دهنده کاهش بادبردگی با افزایش اندازه قطرات پاشش است. این یافته با مطالعات پیشین همخوانی دارد که نشان داده‌اند نازل بادبزی استاندارد به دلیل تولید قطرات کوچکتر، معمولاً بادبردگی بیشتری نسبت به نازل‌های ضد بادبردگی و القاء‌کننده هوا دارد (Chen et al., 2020b; Wang et al., 2021; García-Munguía et al.,).

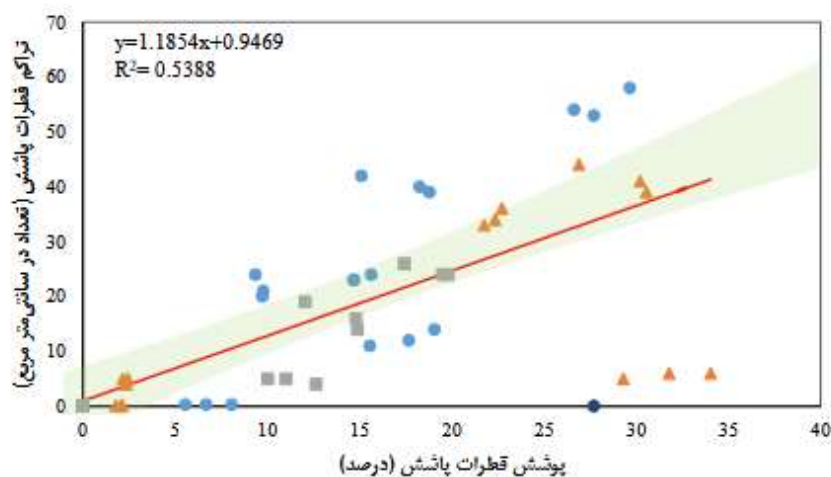
(Li et al., 2025; 2024). رای مثال، در مطالعه‌ای که با استفاده از روش تونل باد (wind tunnel) انجام شد، میزان بادبردگی قطرات پاشش از کل قطرات پاشش ایجاد شده در نازل بادبزنی استاندارد حدود ۷/۲ درصد و در نازل بادبزنی القاء‌کننده هوا ۱/۳ درصد برآورد شد (Ferguson et al., 2016). در پژوهش مشابه دیگری نشان داده شده است که نازل بادبزنی ضد بادبردگی در مقایسه با نازل بادبزنی استاندارد، ضمن افزایش اندازه قطرات، پتانسیل بادبردگی قطرات پاشش را کاهش داد (Li et al., 2023). همچنین گزارش شده است که نازل بادبزنی القاء‌کننده هوا، صرف‌نظر از نوع ماده افزودنی، بادبردگی کمتری در مقایسه با نازل‌های بادبزنی تخت و مخروط توخالی نشان می‌دهد (Xue et al., 2024)؛ به‌طوری‌که در مطالعه مشابه دیگری نیز کاهش پتانسیل بادبردگی حدود ۶۴ درصدی برای نازل القاء‌کننده هوا نسبت به نازل استاندارد گزارش شده است (Liu et al., 2023). این یافته‌ها با نتایج مطالعه حاضر همخوانی دارند؛ به‌طوری‌که در پاشش با نازل بادبزنی القاء‌کننده هوا، روی کاغذ حساس به رطوبت قرار گرفته در فاصله ۲ متری از مرکز کرت هیچ قطره قابل مشاهده‌ای مشاهده نشد.



شکل ۱. اثر نوع نازل (N1: بادبزنی استاندارد، N2: بادبزنی ضد بادبردگی، N3: بادبزنی القاء‌کننده هوا) و نوع صمغ (G1: گوار، G2: گزانتان و C: بدون صمغ) بر میزان پوشش و تراکم قطرات پاشش در مرکز کرت و فاصله ۲ متری از حاشیه کرت. بر اساس آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار. میله روی هر ستون نشان دهنده خطای استاندارد است. وجود حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح احتمال ۱ درصد براساسی آزمون توکی است.

بررسی همبستگی بین مقادیر پوشش و تراکم قطرات پاشش نشان داد که بین این دو ویژگی رابطه‌ای مثبت و خطی وجود دارد (شکل ۲). مطالعات پیشین نیز چنین رابطه‌ای را نشان دادند (Abraheem & Alheidary, 2022). هم در پاشش‌های زمینی با سمپاش کوله پشتی فشاری (Aliverdi & Ahmadvand, 2018) و هم در پاشش‌های هوایی با پهپاد سمپاش (Yu et al., 2023) گزارش شده است که نازل بادبزنی استاندارد در مقایسه با نازل بادبزنی القاء‌کننده هوا به دلیل تولید قطرات کوچکتر، تراکم قطرات بیشتری در واحد سطح ایجاد می‌کند. با این حال، برخی مطالعات نشان دادند که رابطه بین تراکم قطرات پاشش و پوشش آنها همواره مثبت نیست. برای مثال، در کاربرد حشره‌کش کلر فنایر با پهپاد روی گل داوودی، با وجود تراکم کمتر قطرات پاشش، پوشش پاشش بیشتری در سطح رویین برگ ایجاد شده است (Wu & Yu, 2023). همچنین، پژوهشگران در شرایط هوای بادی نشان دادند که تولید قطرات کوچکتر

توسط نازل بادبزنی استاندارد می‌تواند به افزایش پتاسیل بادبردگی آنها منجر شود؛ لذا، پوشش و تراکم کمتری توسط نازل بادبزنی استاندارد در مقایسه با نازل بادبزنی القاء‌کننده هوا ایجاد می‌شود (Vaz et al., 2024).



شکل ۲. رابطه همبستگی بین پوشش و تراکم قطرات پاشش برای نازل‌های بادبزنی استاندارد (N1: دایره آبی)، ضد بادبردگی (N2: مثلث نارنجی) و القاء‌کننده هوا (N3: مربع خاکستری). خط قرمز نشان‌دهنده خط رگرسیون و ناحیه سبز اطراف آن نشان‌دهنده فاصله اطمینان ۹۵ درصد است.

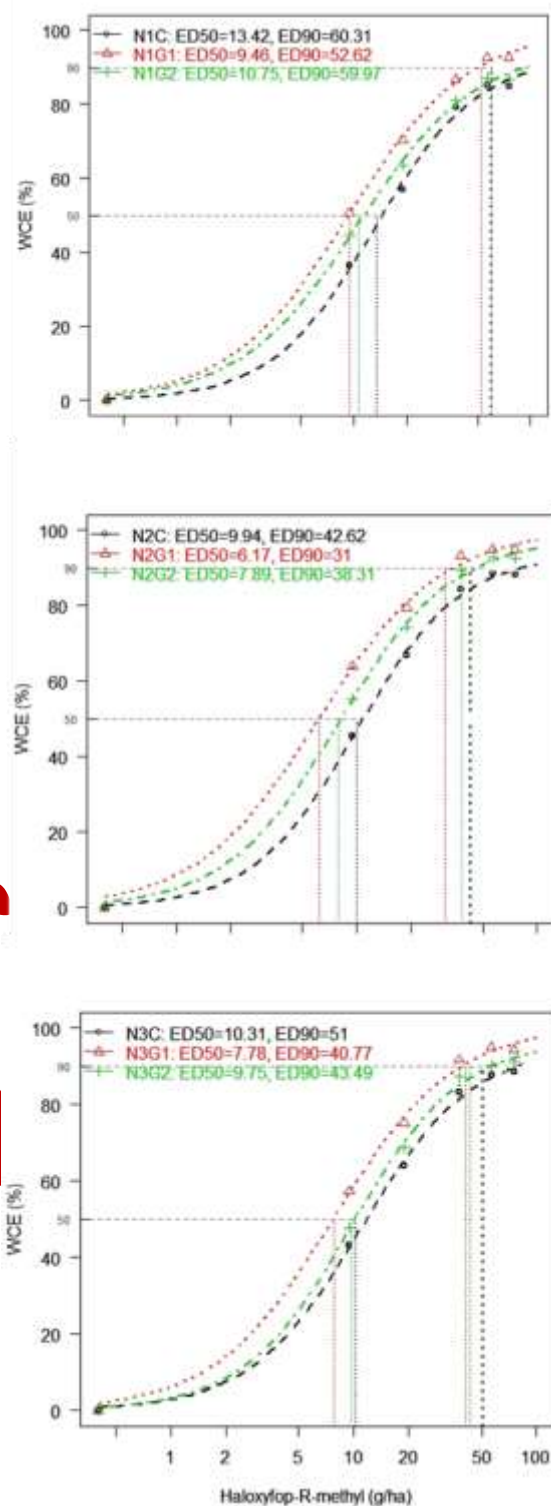
به طور کلی، در هر سطحی از نوع نازل، افزودن صمغ‌ها به محلول پاشش علف‌کش هالوکسی‌فوپ-آر-متیل باعث کاهش معنی‌دار میزان پوشش و تراکم قطرات پاشش روی کاغذهای حساس قرار گرفته در مرکز کرت شد، بجز در مورد نازل القاء‌کننده هوا در حضور صمغ گوار. در فاصله دو متری از مرکز کرت، بیشترین پوشش قطرات پاشش (۱۵ درصد) مربوط به نازل استاندارد در غیاب صمغ مشاهده شد (شکل ۱). این در حالی است که بیشترین تراکم قطرات پاشش مربوط به نازل استاندارد در غیاب صمغ (۲۳/۳ قطره در سانتی مترمربع) و یا در حضور صمغ گوار (۲۱/۶ قطره در سانتی مترمربع) مشاهده شد. در نازل القاء‌کننده هوا، در هر سطحی از نوع صمغ، هیچ لکه‌ای بر روی کاغذ حساس به رطوبت قابل مشاهده نبود که نشان‌دهنده پتاسیل این نوع نازل در جلوگیری از بادبردگی قطرات پاشش است. این نتیجه ماحصل تولید قطرات درشت‌تر در مقایسه با دیگر نازل‌های استفاده شده در پژوهش حاضر است (Hardi, 2026). علی‌رغم وجود استثناها، در نازل‌های بادبزنی استاندارد و ضد بادبردگی، نکته کاهش پوشش و تراکم قطرات پاشش ناشی از افزودن صمغ‌ها تا حدود زیادی قابل مشاهده بود. از اینرو، افزودن صمغ‌های گوار و گزانتان در زمان پاشش با نازل‌های بادبزنی استاندارد و ضد بادبردگی توانست از بادبردگی قطرات پاشش جلوگیری کند. مطالعات قبلی نشان دادند که افزودن صمغ‌ها به محلول پاشش می‌تواند باعث افزایش گرانروی محلول پاشش شود که این تغییر فیزیکی محلول پاشش می‌تواند اندازه و پوشش قطرات پاشش را متأثر سازد. برای مثال، استفاده از صمغ‌های گوار و گزانتان در کاربرد با نازل‌های بادبزنی استاندارد و القاء‌کننده هوا باعث تولید قطرات درشت‌تر و یکنواخت‌تر و کاهش سهم قطرات ریز شده است (Zhang & Xiong, 2021; Basílio et al., 2024). همچنین، افزودن صمغ گوار به محلول پاشش کارفنترازون-اتیل، پوشش روزنه‌های برگ را به بیش از ۹۵ درصد رساند و کارایی کنترل را افزایش داده است (Bhardwaj et al., 2022). در مطالعه مشابهی نیز گزارش شده است که افزودن صمغ آلژینات سدیم به محلول پاشش علف‌کش گلو فوسینات آمونیوم و کاربرد آن با نازل القاء‌کننده هوا، قطرات کوچکتر از ۱۵۰ میکرومتر را به طور قابل توجهی کاهش داد و در مقابل، یکنواختی پوشش را بهبود بخشید (Kannan et al., 2024). همچنین، افزودن صمغ گوار به محلول پاشش علف‌کش گلایفوسیت موجب افزایش اندازه قطرات پاشش شد (Hewitt, 2024).

اثر نوع صمغ و نازل بر کارایی علف‌کش

تأثیر نوع صمغ و نوع نازل بر منحنی رابطه بین کارایی کنترل جودره با مقادیر کاربرد هالوکسی‌فوپ-آر-متیل در شکل ۳ نمایش داده شده است. همانطور که از شکل ۳ ملاحظه می‌شود، در هر سطحی از نوع نازل، با افزودن صمغ‌ها به محلول پاشش منحنی فوق به سمت چپ تمایل پیدا کرده است که نشان دهنده بهبود کارایی علف‌کش توسط صمغ‌هاست. در شرایط بدون صمغ، برای کنترل ۵۰ درصدی جودره توسط نازل‌های بادبزی استاندارد، ضد بادبردگی و القاء‌کننده هوا به ترتیب به مقادیر ۱۳/۴، ۹/۹ و ۱۰/۳ گرم هالوکسی‌فوپ-آر-متیل در هکتار نیاز بود (شکل ۴). برای کنترل ۹۰ درصدی جودره نیز به ترتیب به مقادیر ۶۰/۳، ۴۲/۶ و ۵۱/۰ گرم

پذیرا شدی نشد

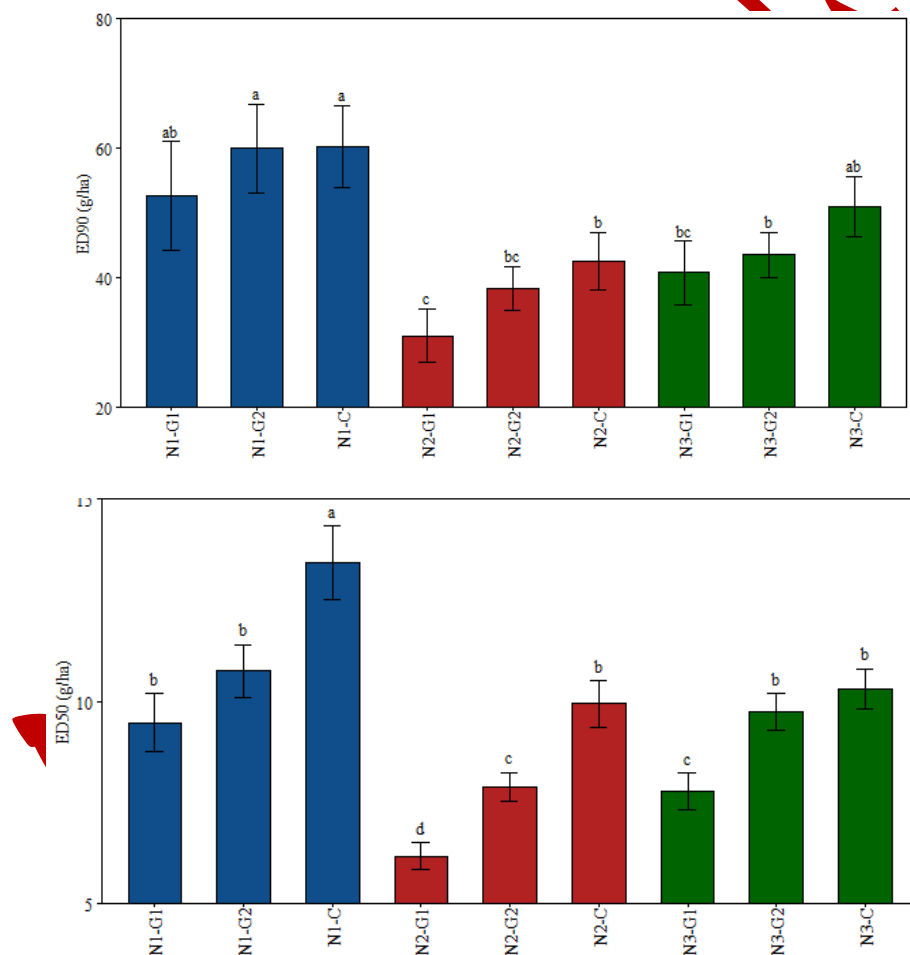
شکل ۳



شکل ۳. رابطه کارایی کنترل علف هرز جودره (SBCE) با مقادیر علف کش هالوکسی فوپ-آر-متیل که حاوی صمغ‌های گوار (G1)، گزانتان (G2) و بدون صمغ (C) بودند و با نازل‌های بادبزنی استاندارد (N1)، ضد بادبردگی (N2) و القاء‌کننده هوا (N3) پاشیده شدند. بر اساس مدل لجستیک چهارپارامتری، با سه تکرار برای هر تیمار

برازش داده شدند. بر اساس آزمون عدم برازش (Lack-of-fit test)، مدل لجستیک چهارپارامتری برازش مناسبی با داده‌های هر سه نازل داشت (مقدار P بین ۶۶ تا ۰/۱۱ برای آزمون برازش).

هالوکسی‌فوپ-آر-متیل در هکتار نیاز بود. کارایی کمتر با نازل بادبزنی استاندارد در مقایسه با دیگر نازل‌ها احتمالاً می‌تواند به دلیل بادبردگی بیشتر قطرات از محل هدف (مرکز کرت) به محل غیر هدف (فاصله ۲ متری از حاشیه کرت) باشد (شکل ۱). به طور مشابه، مطالعات پیشین به برتری نازل بادبزنی القاء‌کننده هوا در پاشش‌ها با پهنپاش سمپاش اشاره کردند. برای مثال، استفاده از این نازل در مقایسه با نازل بادبزنی استاندارد موجب کاهش خسارت بیماری بلاست و آفت کرم ساقه‌خوار برنج شد (Yu et al., 2023). همچنین، در مطالعه مقایسه‌ای بین انواع نازل‌ها، نازل بادبزنی استاندارد کمترین کارایی کنترل علف هرز جودره توسط سولفوسولفورون را نشان داد، در حالی که نازل بادبزنی القاء‌کننده هوا با ایجاد حدود ۳۹ درصد نشست قطرات و دستیابی به ۹۳ درصد کنترل، عملکرد بهتری نشان داد (Aliverdi & Aliverdi, 2024). این یافته‌ها با نتایج پژوهشی مشابه در ایران نیز همخوانی دارد که در آن، کمترین کارایی هالوکسی‌فوپ-آر-متیل علیه جو زراعی داوطلب با نازل استاندارد سه بادبزنه (۳/۳۸ درصد) و بیشترین کارایی با نازل‌های ضد بادبردگی سه بادبزنه (۳/۹۴ درصد) و القاء‌کننده هوا سه بادبزنه (۷/۹۱ درصد) به دست آمد (علی‌وردی، ۱۴۰۰).



شکل ۴. اثر نوع نازل (N1: بادبزنی استاندارد، N2: بادبزنی ضد بادبردگی، N3: بادبزنی القاء‌کننده هوا) و نوع صمغ (G1: گوار، G2: گزانتان و C: بدون صمغ) بر مقدار هالوکسی‌فوپ-آر-متیل لازم برای وقوع کارایی ۵۰ و ۹۰ درصدی کنترل علف هرز جودره که به ترتیب با ED₉₀ و ED₅₀ نمایش داده شدند. بر اساس مدل لجستیک چهارپارامتری، با استفاده از داده‌های زیست‌توده حاصل از آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار، برازش داده شدند میله روی ستون‌ها نشان دهنده خطای استاندارد هستند. وجود حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح احتمال یک درصد است.

براساس مقادیر ED₅₀ و ED₉₀، بهترین کارایی کنترل جوده توسط هالوکسی فوپ-آر-متیل با استفاده از نازل بادبزی ضد بادبردگی در حضور صمغ گوار حاصل شد (شکل ۴). مقادیر ED₅₀ به دست آمده در پژوهش حاضر با نتایج پژوهش‌های مشابه انجام شده بر روی جوده با علف‌کش‌های دیگر بازدارنده ACCase قابل مقایسه است. برای مثال، مقادیر ED₅₀ کلودینافوپ-پروپازریل با نازل‌های مختلف در سمپاشی زمینی بین ۹/۲۳ تا ۱۲/۳۵ گرم ماده مؤثره در هکتار گزارش شده است (Aliverdi & Karami, 2020)، که با محدوده ED₅₀ پژوهش حاضر (۶/۱۷ تا ۱۳/۴۲ گرم در هکتار) هم‌خوانی نسبی دارد. همچنین، در مطالعه‌ای با کاربرد پهبادی سولفوسولفورون علیه جوده، کارایی کنترل با نازل‌های استاندارد، ضد بادبردگی و القاء‌کننده هوا به ترتیب ۶۶، ۷۴ و ۹۳/۵ درصد گزارش شد (Aliverdi, 2024)، که با روند مشابه برتری نازل‌های ضد بادبردگی و القاء‌کننده هوا نسبت به نازل استاندارد در پژوهش حاضر هم‌خوانی دارد. به طور کلی، نتایج نشان داد که افزودن صمغ گوار به محلول پاشش علف‌کش در هر سطحی از نوع نازل کارآمدتر از افزودن صمغ گزانتان باعث بهبود کارایی هالوکسی فوپ-آر-متیل علیه علف هرز جوده شد. به نظر می‌رسد بهبود کارایی هالوکسی فوپ-آر-متیل توسط صمغ گوار ناشی از پایداری بهتر قطرات، کاهش خردشدگی، بهبود نشست و افزایش ماندگاری قطره روی سطح برگ مربوط باشد. در واقع، در سیستم‌های پاشش پهبادی که جریان هوا و آشفته‌گی ناشی از ملخ‌ها می‌تواند بر رفتار قطرات اثر بگذارد، پایداری بیشتر قطرات و کاهش احتمال بادبردگی یا تأخیر زود هنگام می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش کارایی علف‌کش داشته باشد (Bhardwaj et al., 2022). نتایج این پژوهش با نتایج مطالعات پیشین نیز هم‌خوانی دارد. محققان گزارش کردند که استفاده از صمغ گوار به دلیل ایجاد خاصیت چسبندگی مطلوب در قطرات پاشش موجب افزایش پایداری آن‌ها در مرحله تشکیل می‌شود و در نتیجه احتمال بادبردگی آن‌ها را کاهش و در مقابل، کارایی علف‌کش را افزایش می‌دهد (Zhang & Xiong, 2021). همچنین گزارش شده است که استفاده از صمغ گزانتان همراه با نازل بادبزی استاندارد باعث افزایش اندازه قطرات پاشش، بهبود چسبندگی آن‌ها و تغییر الگوی پخش قطرات روی برگ ذرت شده است (Wang et al., 2018; Bhardwaj et al., 2022). بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که اثر مثبت صمغ گوار در پژوهش حاضر نیز حاصل برهم‌کنش چند ویژگی شامل افزایش چسبندگی، کاهش اتلاف قطرات و بهبود فرصت جذب علف‌کش بوده است. اگرچه نازل‌های ضد بادبردگی و القاء‌کننده هوا هر دو از نازل‌های کاهنده بادبردگی محسوب می‌شوند، اما برتری نازل ضد بادبردگی در حضور صمغ گوار نشان داد که صرف تولید قطرات درشت‌تر همیشه به افزایش بیشتر کارایی منجر نمی‌شود. به عبارت دیگر، در شرایطی که قطرات بیش از حد درشت شوند، ممکن است تعداد قطرات نشست کرده کاهش یابد و در نتیجه پوشش مناسب روی سطح برگ محدود شود. از این‌رو، به نظر می‌رسد نازل ضد بادبردگی در این پژوهش توانسته است تعادل مناسب‌تری بین کاهش بادبردگی و حفظ تراکم قطرات روی سطح هدف ایجاد کند. این برداشت با گزارش تحقیقات پیشین هم‌خوانی دارد. به طوری که نشان داده شده است که نازل‌های القاء‌کننده هوا در ترکیب با صمغ‌هایی مانند گوار و گزانتان می‌توانند قطرات بسیار درشتی تولید کنند که در برخی شرایط با کاهش کارایی پاشش همراه باشد (Lewis et al., 2016). با این حال، این موضوع به معنای ناکارآمدی نازل القاء‌کننده هوا نیست، زیرا در پژوهش حاضر نیز این نازل در حضور صمغ گوار عملکرد بهتری نسبت به تیمار شاهد (نازل بادبزی استاندارد در غیاب صمغ) داشت. در همین راستا، محققان گزارش کردند که استفاده از صمغ گوار همراه با نازل‌های بادبزی القاء‌کننده هوا می‌تواند میزان پوشش پاشش را روی برگ افزایش دهد و با وجود تولید قطرات درشت، کارایی علف‌کش در سطح مطلوب حفظ شود (Samples et al., 2021; Hewitt, 2024).

همانطور که در بالا ذکر شد، افزودن صمغ‌های گوار و گزانتان به محلول پاشش هالوکسی فوپ-آر-متیل موجب کاهش پوشش و تراکم قطرات پاشش بر روی کاغذ حساس به رطوبت شد (شکل ۱). اما برخلاف انتظار، این امر باعث افزایش کارایی کنترل جوده شد (شکل ۴). به عبارتی دیگر، نتایج این پژوهش نشان داد که در هر سطح از نوع نازل، رابطه بین نشست قطرات پاشش و کارایی علف‌کش منفی بود (برخلاف انتظار که باید مثبت باشد). این تناقض را می‌توان به تأثیر صمغ‌ها بر مدت زمان ماندگاری قطره روی سطح برگ

مرتبط باشد. در پژوهش قبلی (خورشیدوند و همکاران، ۱۴۰۵)، ثابت شد که افزودن برخی صمغ‌ها، به‌ویژه صمغ‌های گوار و گزانتان، به محلول پاشش کلودینافوپ پروپارژیل موجب افزایش قابل توجه مدت زمان لازم برای تبخیر قطرات پاشش از هر دو سطح برگ یولاف وحشی زمستانه می‌شوند. افزایش مدت زمان تبخیر می‌تواند فرصت بیشتری برای نفوذ ماده مؤثره علف‌کش به داخل بافت برگ از طریق به تعویق انداختن تبلور آن فراهم کند. در نتیجه، جذب و کارایی زیستی علف‌کش افزایش می‌یابد. از اینرو، به نظر می‌رسد که کاهش نشست قطرات پاشش ناشی از افزودن صمغ‌ها از طریق افزایش مدت زمان تبخیر قطرات پاشش جبران شده باشد.

به‌منظور ارزیابی کمی رابطه بین پوشش قطرات پاشش و کارایی کنترل علف‌هرز جودره توسط هالوکسی‌فوپ-آر-متیل، ضریب همبستگی پیرسون و ضریب تعیین (R^2) بین مقادیر پوشش و مقادیر ED_{50} و ED_{90} محاسبه شد (به‌ترتیب، $r=0.049$; $R^2=0.002$ و $r=0.163$; $R^2=0.026$). ضعیف‌بودن این همبستگی، خود مؤید یافته‌ای است که پیش‌تر در این پژوهش مطرح شد؛ چرا که اگر کارایی علف‌کش صرفاً تابعی از میزان پوشش سطحی بود، انتظار می‌رفت افزودن صمغ‌ها که پوشش و تراکم قطرات را کاهش داد، کارایی کنترل جودره را نیز کاهش دهد، در حالی که نتایج این پژوهش خلاف این روند را نشان داد. به بیان دیگر، نبود همبستگی معنادار بین پوشش و کارایی، این فرضیه را تقویت می‌کند که عواملی فراتر از پوشش سطحی، از جمله ماندگاری قطرات روی برگ و مدت زمان تبخیر آن‌ها، در تعیین کارایی نهایی هالوکسی‌فوپ-آر-متیل نقش تعیین‌کننده‌تری داشته‌اند.

محدودیت‌های پژوهش و پیشنهادات

پژوهش حاضر با برخی محدودیت‌ها همراه بود که باید در تفسیر نتایج لحاظ گردند. نخست، انجام آزمایش تنها در یک مکان و یک فصل زراعی و عدم ثبات کامل سرعت باد در حین عملیات، می‌تواند بر تعمیم‌پذیری نتایج اثر گذارد. همچنین، از نظر روش‌شناختی، در این مطالعه از کاغذ حساس به رطوبت صرفاً به‌عنوان ابزاری کیفی برای مقایسه نسبی تیمارها استفاده شد و نه برای اندازه‌گیری استاندارد و کمی بادبردگی. لذا توصیه می‌شود در مطالعات آتی، از نمونه‌بردارهای جرمی و روش ردیاب مطابق با استانداردهای معتبر (ISO 22369) در فواصل گسترده‌تر (۲۰ تا ۴۰ متر) برای ارزیابی دقیق‌تر بادبردگی استفاده شود.

علاوه بر این، مکانیسم پیشنهادی مبنی بر افزایش زمان تبخیر قطرات در حضور صمغ‌ها، در این پژوهش به‌طور مستقیم اندازه‌گیری نشد و صرفاً بر پایه یافته‌های پیشین (خورشیدوند و همکاران، ۱۴۰۵) به‌عنوان یک فرضیه مطرح گردید. با توجه به اینکه افزایش زمان تبخیر می‌تواند از طریق کاهش سرعت تبلور و افزایش فرصت نفوذ کوتیکولی، جذب علف‌کش را بهبود بخشد، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های بعدی، اثر صمغ‌ها بر زمان تبخیر به‌طور مستقیم اندازه‌گیری شود. همچنین، بررسی سایر صمغ‌های طبیعی نظیر کربوکسی‌متیل سلولز، انجام آزمایش در سرعت‌های مختلف باد و بر روی محصولات زراعی متنوع‌تر، می‌تواند درک عمیق‌تری از این سازوکار ارائه دهد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که نوع نازل (بادبزی استاندارد، ضد بادبردگی و القاء‌کننده هوا) و نوع صمغ (گوار و گزانتان) تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های پاشش (پوشش و تراکم قطرات) و کارایی علف‌کش هالوکسی‌فوپ-آر-متیل در کاربرد پهنپاشی علیه علف‌هرز جودره داشت. در میان تیمارهای مورد بررسی، افزودن صمغ گوار به محلول پاشش هالوکسی‌فوپ-آر-متیل پاشیده شده با نازل بادبزی ضد بادبردگی از طریق ایجاد پوشش و تراکم قطرات پاشش مطلوب‌ترین کارایی کنترل شیمیایی جودره با هالوکسی‌فوپ-آر-متیل را منجر شد. برخلاف انتظار، در هر سطح از نوع نازل، رابطه بین نشست قطرات پاشش و کارایی علف‌کش منفی بود که به قدرت نگهداری بالای آب قطرات پاشش توسط صمغ‌ها مرتبط است.

منابع

خورشیدوند، یلدا؛ علی‌وردی، اکبر و احمدوند، گودرز (۱۴۰۵). تأثیر نوع نازل و صمغ بر ویژگی‌های محلول و قطرات پاشش و کارایی کلودینافوپ-پروپارژیل بر یولاف وحشی زمستانه (*Avena sterilis* subsp. *ludoviciana* Durieu). *پژوهش‌های حفاظت گیاهان ایران*، پذیرفته شده، انتشار آنلاین.

طلایی، علی حسن؛ علی وردی، اکبر و احمدوند، گودرز (۱۴۰۴). تأثیر سرعت پرواز و دور چرخش نازل میکرونر پیهاد EFT-G620 بر کارایی و بادبردگی علف‌کش نیکوسولفورون در ذرت علوفه‌ای. *مجله مهندسی بیوسیستم ایران*، ۵۶ (۳): ۴۳-۵۹.

علی‌وردی، اکبر (۱۴۰۰). تأثیر نوع نازل در پیهاد سمپاش بر کارایی علف‌کش هالوکسی‌فوپ-آر-متیل علیه جو زراعی داوطلب (مقاله کوتاه علمی). *آفات و بیماری‌های گیاهی*، ۸۹ (۲): ۲۶۹-۲۷۵.

علی وردی، اکبر و کرمی، سمیرا (۱۳۹۸). تأثیر نوع و شماره نازل‌های یک، دو و سه بادبزنه بر عملکرد سیکلوکسیدیم علیه جودره (*Hordeum spontaneum* Koch). *پژوهش‌های حفاظت گیاهان ایران*، ۳۳ (۴): ۴۶۵-۴۷۴.

REFERENCES

- Abraheem, S. N., & Alheidary, M. H. (2022). Evaluation of spray droplets characteristics depending on the configuration of boomless nozzle. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1060(1), 012128. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1060/1/012128>.
- Aliverdi, A., & Ahmadvand, G. (2018). The effect of nozzle type on clodinafop-propargyl potency against winter wild oat. *Crop Protection*, 114, 113–119. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2018.08.029>.
- Aliverdi, A. (2021). Effect of nozzle type in a spray drone on the efficacy of haloxyfop-R-methyl herbicide against volunteer barley (Short scientific article). *Journal of Plant Pests and Diseases*, 89(2), 269–275. <https://doi.org/10.22092/jaep.2021.354131.1396>. (In Persian).
- Aliverdi, A., & Aliverdi, A. (2024). Increased outlet design of flat-fan nozzle improves octocopter unmanned aerial vehicle sprayer's efficiency. *Crop Protection*, 182, 106736. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2024.106736>. <https://doi.org/10.22092/jaep.2021.354131.1396>
- Aliverdi, A., & Karami, S. (2020). The effect of type and size of single, twin, and triplet flat fan nozzles on the activity of cycloxydim against wild barley (*Hordeum spontaneum* Koch.). *Iranian Journal of Plant Protection Research*, 33(4), 465–474. <https://doi.org/10.22067/jpp.v33i4.81208>. (In Persian)
- Alves, G. S., Kruger, G. R., da Cunha, J. P. A., de Santana, D. G., Pinto, L. A. T., Guimarães, F., & Zaric, M. (2017). Dicamba spray drift as influenced by wind speed and nozzle type. *Weed Technology*, 31(5), 724–731. <https://doi.org/10.1017/wet.2017.61>.
- Basílio, S., Furtado Júnior, M. R., de Alvarenga, C. B., Vitória, E. L. D., Vargas, B. C., Privitera, S., & Manetto, G. (2024). Effect of adjuvants on physical–chemical properties, droplet size, and drift reduction potential. *Agriculture*, 14(12), 2271. <https://doi.org/10.3390/agriculture14122271>.
- Berninger, T., Dietz, N., & González López, Ó. (2021). Water-soluble polymers in agriculture: Xanthan gum as eco-friendly alternative to synthetics. *Microbial Biotechnology*, 14(5), 1881–1896. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13867>.
- Bhardwaj, R., Prakash, O., Tiwari, S., Maiti, P., Ghosh, S., Singh, R. K., & Maiti, P. (2022). Efficient herbicide delivery through a conjugate gel formulation for mortality of broadleaf weeds. *ACS Omega*, 7(23), 19964–19978. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c01782>.
- Brankov, M., Simic, M., Ulber, L., Tolimir, M., Chachalis, D., & Dragičević, V. (2023). Effects of nozzle type and adjuvant selection on common lambsquarters (*Chenopodium album*) and johnsongrass (*Sorghum halepense*) control using nicosulfuron in corn. *Weed Technology*, 37(2), 156–164. <https://doi.org/10.1017/wet.2023.16>.
- Cavalaris C, Karamoutis C., & Markinos A. Efficacy of cotton harvest aids applications with unmanned aerial vehicles (UAV) and ground-based field sprayers – a case study comparison. *Smart Agricultural Technology*, 2, 100047. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100047>.
- Chen, S., Lan, Y., Zhou, Z., Ouyang, F., Wang, G., Huang, X., & Cheng, S. (2020a). Effect of droplet size parameters on droplet deposition and drift of aerial spraying by using plant protection UAV. *Agronomy*, 10(2), 195. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020195>.

- Chen, Y., Qi, H. L., Zhang, L., Ma, J. L., Jin, S. J., Li, G. Z., & Lan, Y. B. (2020b). Effects of different adjuvants and nozzles on droplet distribution and drift when applied with UAV. *Journal of South China Agricultural University*, 41(6), 50–58. <https://doi.org/10.7671/j.issn.1001-411X.202007037>.
- Chen, X., Wang, C., Zhao, M., Zhu, Z., Zhu, T., Gao, J., & Wang, K. (2025). Pesticide spray drift and risk assessment using unmanned aerial vehicle (UAV) sprayer and traditional electric knapsack sprayer (EKS). *Science of the Total Environment*, 1005, 180866. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180866>.
- Chourey, S., & Singh, H. (2023). Drift reduction and environmental impact. *International Journal of Exploring Emerging Trends in Engineering*, 1(1), 451–455.
- Dafsari, R. A., Yu, S., Yu, S., Choi, Y., & Lee, J. (2024). Drift potential and coverage ratio analysis of an air induction nozzle under an agricultural drone with various operating condition: an indoor test. *Computers and Electronics in Agriculture*, 224, 109171. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109171>.
- Ferguson, J. C., Chechetto, R. G., O'Donnell, C. C., Dorr, G. J., Moore, J.H., Baker, G. J., & Hewitt, A. J. (2016). Determining the drift potential of Venturi nozzles compared with standard nozzles across three insecticide spray solutions in a wind tunnel. *Pest Management Science*, 72(8), 1460–1466. <https://doi.org/10.1002/ps.4214>.
- Gao, J., Liao, W., Nuytens, D., Lootens, P., Xue, W., Alexandersson, E., & Pieters, J. (2024). Cross-domain transfer learning for weed segmentation and mapping in precision farming using ground and UAV images. *Expert Systems with Applications*, 246, 122980. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122980>.
- García-Munguía, A., Guerra-Ávila, P. L., Islas-Ojeda, E., Flores-Sánchez, J. L., Vázquez-Martínez, O., García-Munguía, A.M., & García-Munguía, O. (2024). A review of drone technology and operation processes in agricultural crop spraying. *Drones*, 8(11), 674. <https://doi.org/10.3390/drones8110674>.
- Hardi (2026). Nozzle product guide. Information website. <https://hardi.co.za>.
- He Ling, H. L., Wang GuoBin, W. G., Hu Tao, H. T., Meng YanHua, M. Y., Yan XiaoJing, Y. X., & Yuan HuiZhu, Y.H. (2017). Influences of spray adjuvants and spray volume on the droplet deposition distribution with unmanned aerial vehicle (UAV) spraying on rice. *Plant Protection*, 44(6), 1046–1052. <https://doi.org/10.13802/j.cnki.zwbhxb.2017.2016147>.
- Hewitt, A. J. (2024). Adjuvant use for the management of pesticide drift, leaching and runoff. *Pest Management Science*, 80(10), 4819–4827. <https://doi.org/10.1002/ps.825>.
- Hu, H., Kaizu, Y., Huang, J., Furuhashi, K., Zhang, H., Li, M., & Imou, K. (2022). Research on methods decreasing pesticide waste based on plant protection unmanned aerial vehicles: a review. *Frontiers in Plant Science*, 13, 811256. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.811256>.
- Hu, S., Xu, X., Liu, J., Guo, J., Guan, R., Zhou, Z., & Chen, S. (2024). Movement characteristics of droplet deposition in flat spray nozzle for agricultural UAVs. *Agriculture*, 14(11), 1994. <https://doi.org/10.3390/agriculture14111994>.
- Jeevan, N., Pazhanivelan, S., Kumaraperumal, R., Ragunath, K., Arthanari, P. M., Sritharan, N., & Manikandan, S. (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 & Natural Science*, 15(3), 972–977. <https://doi.org/10.31018/jans.v15i3.4753>.
- Ju, C., Kim, J., Seol, J., & Son, H. I. (2022). A review on multirobot systems in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 202, 107336. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107336>.
- Kannan, N., Read, Q., & Zhang, W. (2024). An algae-based polymer material as a pesticide adjuvant to mitigate drift. *Heliyon*, 10(16), e35510. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35510>.
- Knezevic, S. Z., Streibig, J. C., & Ritz, C. (2007). Utilizing R software package for dose-response studies: the concept and data analysis. *Weed Technology*, 21(3), 840–848. <https://doi.org/10.1614/WT-06-161.1>.
- Khorshidvand, Y., Aliverdi, A., & Ahmadvand, G. (2026). Effect of nozzle and gum type on the properties of spray solution and droplets and efficacy of clodinafop-propargyl on winter wild oat (*Avena sterilis* subsp. *ludoviciana* Durieu.). *Iranian Journal of Plant Protection Research*, Accepted, In Press. (In Persian).

- Kim, C. J., Yuan, X., Kim, M., Kyung, K. S., & Noh, H.H. (2023). Monitoring and risk analysis of residual pesticides drifted by unmanned aerial spraying. *Scientific Reports*, 13(1), 10834. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36822w>.
- Koo, D., Gonçalves, C. G., & Askew, S. D. (2024). Agricultural spray drone deposition, Part 2: Operational height and nozzle influence pattern uniformity, drift, and weed control. *Weed Science*, 72(6), 824–832. <https://doi.org/10.1017/wsc.2024.67>.
- Lewis, R.W., Evans, R. A., Malic, N., Saito, K., & Cameron, N. R. (2016). Polymeric drift control adjuvants for agricultural spraying. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 217(20), 2223–2242. <https://doi.org/10.1002/macp.201600139>.
- Li, L., Zhang, R., Tang, Q., Yan, W., Ding, C., Xu, G., & Yi, T. (2025). Predicting spray drift reduction classification of flat-fan nozzles based on droplet size spectrum. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 18(6), 24–32. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20251806.9727>.
- Li, S., Li, J., Yu, S., Wang, P., Liu, H., & Yang, X. (2023). Anti-drift technology progress of plant protection applied to orchards: a review. *Agronomy*, 13(11), 2679. <https://doi.org/10.3390/agronomy13112679>.
- Liu, Q., Shan, C., Zhang, H., Song, C., & Lan, Y. (2023). Evaluation of liquid atomization and spray drift reduction of hydraulic nozzles with four spray adjuvant solutions. *Agriculture*, 13(2), 236. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020236>.
- Mamnoie, E., Karaminejad, M. R., Aliverdi, A., & Moeini, M. M. (2022). Application efficacy of newly released pre-mixed herbicide in winter wheat: Joystick®. *Agrarteasus*, XXXIII, 118–123. <https://doi.org/10.15159/jas.22.13>.
- Martin, D. E., Tang, Z., Yang, Y., Latheef, M. A., Fritz, B. K., Kruger, G. R., & Houston, T. W. (2024). Spray drift characterization of a remotely piloted aerial application system. *Applied Engineering in Agriculture*, 40(4), 385–399. <https://doi.org/10.13031/aea.15605>.
- Meesaragandla S, Jagtap MP, Khatri N, Madan H., & Vadduri A. A. (2024). Herbicide spraying and weed identification using drone technology in modern farms: a comprehensive review. *Results in Engineering*, 21, 101870. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101870>.
- Panduangnat, L., Posom, J., & Gonkhamdee, S. (2026). Site-specific UAV spraying versus conventional weed control in sugarcane: effects on herbicide use, efficiency, and environmental impact. *Sugar Tech*, 28, 686–699. <https://doi.org/10.1007/s12355-026-01742-2>.
- Popescu, C. V., Paraschivu, M., Matei, G., Sălceanu, C., & Roşculete, E. (2022). Anti-drift technology: market, formulation, applying methods. *Scientific Papers Series Management, Economic Engineering in Agriculture and Rural Development*, 22(3), 581–588.
- Raj, M., Harshini, N. B., Gupta, S., Atiquzzaman, M., Rawlley, O., & Goel, L. (2024). Leveraging precision agriculture techniques using UAVs and emerging disruptive technologies. *Energy Nexus*, 14, 100300. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2024.100300>.
- Ramteke, S.V., Varadwaj, P. K., & Tiwari, V. (2025). Optimizing UAV spraying for sustainable agriculture: A life cycle and efficiency analysis in India. *Sustainability*, 17(13), 6211. <https://doi.org/10.3390/su17136211>.
- Ranabhat, S., & Price, R. (2025). Effects of flight heights and nozzle types on spray characteristics of unmanned aerial vehicle (UAV) sprayer in common field crops. *AgriEngineering*, 7(2), 22. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7020022>.
- Ritz, C., Baty, F., Streibig, J. C., & Gerhard, D. (2015). Dose-response analysis using R. *PLoS ONE*, 10(12), e0146021. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0146021>.
- Safaeinejad, M., Ghasemi-Nejad-Raeini, M., & Taki, M. (2025). Reducing energy and environmental footprint in agriculture: A study on drone spraying vs. conventional methods. *PLOS ONE*, 20(6), e0323779. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0323779>.
- Samples, C. A., Butts, T. R., Vieira, B. C., Irby, J. T., Reynolds, D. B., Catchot, A., & Dodds, D. M. (2021). Effect of deposition aids tank-mixed with herbicides on cotton and soybean canopy deposition and spray droplet parameters. *Agronomy*, 11(2), 278. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020278>.

- Sánchez-Fernández, L., Barrera, M., Martínez-Guanter, J., & Pérez-Ruiz, M. (2023). Drift reduction in orchards through the use of an autonomous UAV system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 211, 107981. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107981>.
- Senthilkumar, M., & Jaganraj R. R. (2025). High-capacity agricultural UAV with DEM-based terrain following and lidar obstacle avoidance for precision spraying application. *Plant Science Today*, 12, 10112. <https://doi.org/10.14719/pst.10112>.
- Shan, C. F., Wang, G. B., Wang, H. H., Xie, Y. J., Wang, H. Z., & Wang, S. L. (2021). Effects of droplet size and spray volume parameters on droplet deposition of wheat herbicide application by using UAV. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 14(1), 74–81. <https://doi.org/10.25165/ijabe.20211401.6129>.
- Sinha, R., Johnson, J., Power, K., Moodie, A., Warhurst, E., & Barbosa, R. (2022). Understanding spray attributes of commercial UAAS as impacted by operational and design parameters. *Drones*, 6(10), 281. <https://doi.org/10.3390/drones6100281>.
- Talaie, A. H., Aliverdi, A., & Ahmadvand, G. (2025). Effect of flight speed and microner nozzle rotation speed of drone EFT-G620 on the efficiency and drift of nicosulfuron in forage maize. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 56(3), 43–59. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.401025.665609>. (In Persian)
- Vaz, V., Ferreira, G. A. D. P., de Freitas, F. C., Paiva, M. C., Lemos, A. S., Souza, W. M. D., & Cecon, P. R. (2024). Spray volume and droplet spectrum in the control of *Bidens pilosa* and *Ipomoea triloba* with the fomesafen herbicide. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 28, e282568. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v28n8e282568>.
- Wang, C., Herbst, A., Zeng, A., Wongsuk, S., Qiao, B., Qi, P., & He, X. (2021). Assessment of spray deposition, drift and mass balance from unmanned aerial vehicle sprayer using an artificial vineyard. *Science of the Total Environment*, 777, 146181. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146181>.
- Wang, C., Wongsuk, S., Huang, Z., Yu, C., Han, L., Zhang, J., & He, X. (2023). Comparison between drift test bench and other techniques in spray drift evaluation of an eight-rotor unmanned aerial spraying system: the influence of meteorological parameters and nozzle types. *Agronomy*, 13(1), 270. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010270>.
- Wang, G., Lan, Y., Yuan, H., Qi, H., Chen, P., Ouyang, F., & Han, Y. (2019). Comparison of spray deposition, control efficacy on wheat aphids and working efficiency in the wheat field of the unmanned aerial vehicle with boom sprayer and two conventional knapsack sprayers. *Applied Sciences*, 9(2), 218. <https://doi.org/10.3390/app9020218>.
- Wang, S. L., He, X. K., Song, J. L., Wang, S. S., Jia, X. M., & Ling, Y. (2018). Effects of xanthan gum on atomisation and deposition characteristics in water and silwet 408 aqueous solution. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(3), 29–34. <https://doi.org/10.25165/ijabe.20181103.3802>.
- Wongsuk, S., Qi, P., Wang, C., Zeng, A., Sun, F., Yu, F., & Xiongkui, H. (2024). Spray performance and control efficacy against pests in paddy rice by UAV-based pesticide application: effects of atomization, UAV configuration and flight velocity. *Pest Management Science*, 80(4), 2072–2084. <https://doi.org/10.1002/ps.7942>.
- Wu, J. T., & Yu Tu, J. (2023). Compare efficacy between knapsack sprayer and UAV sprayer application in chemical spraying: a case study of garland chrysanthemum. *International Journal of Agriculture and Environmental Research*, 9(3), 342–380. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.338412>.
- Xue, S., Han, J., Xi, X., Lan, Z., Wen, R., & Ma, X. (2024). Coordination of distinctive pesticide adjuvants and atomization nozzles on droplet spectrum evolution for spatial drift reduction. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 66, 250–262. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2023.10.001>.
- Yan, X., Zhou, Y., Liu, X., Yang, D., & Yuan, H. (2021). Minimizing occupational exposure to pesticide and increasing control efficacy of pests by unmanned aerial vehicle application on cowpea. *Applied Sciences*, 11(20), 9579. <https://doi.org/10.3390/app11209579>.

- Yu, S. H., Kang, Y., & Lee, C. G. (2023). Comparison of the spray effects of air induction nozzles and flat fan nozzles installed on agricultural drones. *Applied Sciences*, 13(20), 11552. <https://doi.org/10.3390/app132011552>.
- Zeng, A., Wang, C., Song, J., Wang, Z., Huang, M., He, X., & Herbst, A. (2020). Effects of nozzle types, adjuvants and environmental conditions on spray drift potential of unmanned aerial vehicles in a wind tunnel. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 22(2), 315–323. <https://doi.org/10.16801/j.issn.1008-7303.2020.0067>.
- Zeeshan, M., Li, H., Yousaf, G., Ren, H., Liu, Y., Arshad, M., & Han, X. (2024). Effect of formulations and adjuvants on the properties of acetamiprid solution and droplet deposition characteristics sprayed by UAV. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1441193. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1441193>.
- Zhang, X., & Xiong, L. (2021). Effect of adjuvants on spray droplet size of pesticide emulsions. *Colloids and Surfaces A*, 619, 126557. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126557>.
- Zhang, X., Luo, Y., & Goh, K.S. (2018). Modeling spray drift and runoff-related inputs of pesticides to receiving water. *Environmental Pollution*, 234, 48–58. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.032>.
- Zhou, Q., Zhang, S., Lin, T., Jiao, Y., Cai, C., Xue, C., & Xue, X. (2024). The impact of fluroxypyr drift on soybean phytotoxicity and the safety drift thresholds. *Agriculture*, 14(12), 2203. <https://doi.org/10.3390/agriculture14122203>.
- Zhou, Q., Zhang, S., Xue, X., Cai, C., & Wang, B. (2023). Performance evaluation of UAVs in wheat disease control. *Agronomy*, 13(8), 2131. <https://doi.org/10.3390/agronomy13082131>.