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.)

Yalda Khorshidvand[1], Akbar Aliverdi[2]*, Goudarz Ahmadvand[2]

1- Ph.D student - Weed Science, Department of Plant Production and Genetics, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

2- Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

a.aliverdi@basu.ac.ir, alahbareruca@gmail.com
https://doi.org/10.22067/JPP.2026.98289.1280

Introduction

The use of novel nozzles and natural gums has gained significant attention for improving the physical properties of spray solutions and reducing drift during herbicide application. It is essential to optimize spray droplet stability and deposition to enhance herbicide effectiveness while minimizing environmental risks. Despite advancements in spray technology, the potential impact of various plant-derived gums on droplet behavior remains unclear. This study aims to evaluate the effects of different plant gums on the activity of clodinafop-propargyl and the physical characteristics of spray droplets in the control of winter wild oat.

Materials and Methods

This study was designed as a dose-response experiment to investigate the effects of adding 12 different types of plant gums—namely pectin, Carboxymethyl cellulose(CMC), guar, konjac, dextran, xanthan, carrageenan, sodium alginate, Farsi, gum tragacanth, gum Arabic, and gellan—to a spray solution of the herbicide clodinafop-propargyl. The herbicide was sprayed using three types of flat fan nozzles: standard, anti-drift, and air-induction. The research focused on the spray coverage and effectiveness in controlling winter wild oats under greenhouse conditions. Additionally, the study examined how these gums influenced various factors, including the viscosity of the spray solution, the contact angle, the spread area, and the evaporation rate of herbicide droplets placed on the upper and lower surfaces of winter wild oats leaves.

Results and Discussion

The results indicated that konjac, CMC, and gellan gums produced the highest viscosity in the clodinafop-propargyl spray solution, with viscosities of 89.8, 93.9, and 195.4 mPas/s, respectively. However, these gums did not affect the efficacy of the herbicide against winter wild oats. Xanthan, guar, and CMC gums achieved the highest droplet-leaf contact angles (greater than 55°), with xanthan gum resulting in the longest droplet evaporation time of approximately 30 minutes. In contrast, gellan and konjac gums led to the shortest droplet evaporation times, which were less than 10 min. Among sprays with a standard flat fan nozzle, the addition of guar, xanthan, and sodium alginate gums increased spray coverage. Among sprays with an anti-drift flat fan nozzle, the addition of guar, konjac, sodium alginate, and Persian gums improved spray coverage. Among

sprays with an air-induction flat fan nozzle, the addition of cellulose, guar, konjac, xanthan, and Persian gums increased spray coverage. In sprays with standard, anti-drift and air-induction flat fan nozzles, the ED_{50} value in the control treatment without gum was 15.8, 20.5 and 16.9 g a.i. ha^{-1}, respectively.

Among the sprays with the standard flat fan nozzle, except for the addition of gum arabic, the addition of gums to the spray solution had no effect on the ED50 and ED90 values. Among the sprays with the anti-drift flat fan nozzle, the addition of pectin, cellulose, guar, konjac, dextran, xanthane, and sodium alginate gums caused a decrease in the ED50 value, and the addition of pectin, cellulose, guar, konjac, dextran, xanthane, and guar gums caused a decrease in the ED90 value. Among the sprays with the air-induction flat fan nozzle, the addition of guar and sodium alginate gums caused a decrease in the ED50 value, and the addition of guar gum caused a decrease in the ED90 value. These results indicate that in the sprays with the anti-drift flat fan nozzle, there is a greater need for the presence of gums in the solution, and out of 12 types of gums used, 8 types of gums improved the herbicide efficiency. Additionally, adding guar gum to the spray solution applied with an air-induction flat fan nozzle resulted in the highest spray coverage of 39.3% on moisture-sensitive paper. This combination also required the lowest herbicide dose to control 50% and 90% of the dry weight of winter wild oats (11/89 and 33/69 g a.i. ha^{-1}, respectively). Based on these findings, this treatment is recommended as the most effective option.

Conclusions

Overall, there is a significant need to incorporate gum into the spray solution when spraying it with anti-drift falt fan nozzle. Based on the findings of this study, the recommended approach is to use a clodinafop-propargyl spray solution that includes guar gum in conjunction with an air-induction flat fan nozzle. In contrast, adding gellan and xanthan gums to the clodinafop-propargyl spray solution did not enhance its effectiveness against winter wild oats. However, these gums can increase the viscosity of the spray solution and prolong the evaporation time of the spray droplets, making them potentially beneficial in windy, hot, and dry environments.

Keywords: Droplet drift, Droplet evaporation, Droplet surface area, Spray quality, Spray solution viscosity

تأثیر نوع نازل و صمغ بر ویژگی‌های محلول و قطرات پاشش و کارایی کلودینافوپ-پروپارژیل بر یولاف وحشی زمستانه (*Avena sterilis* subsp. *ludoviciana* Durieu.)

یلدا خورشیدوند[۱]، اکبر علی‌وردی[۲*] و گودرز احمدوند[۲]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۲۵
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۲۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۳

۱–دانشجوی دکتری علوم علف‌های هرز، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان
۲–دانشیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان
a.aliverdi@basu.ac.ir, alahbareruca@gmail.com
https://doi.org/10.22067/JPP.2026.98289.1280

چکیده

نوع صمغ طبیعی به عنوان مواد افزودنی چسباننده و نوع نازل می‌تواند در فرآیند پاشش و کارایی علف‌کش تأثیرگذار باشد. در پژوهش حاضر که در قالب آزمایش واکنش به مقدار علف‌کش اجرا شد، تأثیر افزودن ۱۲ نوع صمغ گیاهی شامل پکتین، کربوکسی متیل سلولز، گوار، کنجاک، دکستران، گزانتان، کراگینان، آلژینات سدیم، فارسی، کتیرا، عربی و ژلان به محلول پاشش علف‌کش کلودینافوپ–پروپارژیل تحت پاشش با ۳ نوع نازل بادبزنی شامل استاندارد، ضد بادبردگی و القاءکننده هوا بر پوشش پاشش و کنترل یولاف وحشی زمستانه در شرایط گلخانه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. همزمان، تأثیر صمغ‌ها بر گرانروی محلول پاشش، زاویه تماس، سطح پخش و تبخیر قطره حاوی علف‌کش قرار گرفته روی دو سطح رویین و زیرین برگ یولاف وحشی زمستانه نیز بررسی شد. نتایج نشان داد که صمغ‌های کنجاک، سلولز و ژلان بالاترین گرانروی محلول پاشش کلودینافوپ–پروپارژیل را به ترتیب با گرانروی برابر ۸۹/۸، ۹۳/۹ و ۱۹۵/۴ میلی‌پاسکال بر ثانیه فراهم کردند ولی تأثیری بر کارایی آن علیه یولاف وحشی زمستانه نداشت. صمغ‌های گزانتان، گوار و سلولز بیشترین زاویه تماس قطره با سطح برگ (بیش از ۵۵ درجه) ولی صمغ گزانتان بیشترین مدت زمان تبخیر قطره (حدود ۳۰ دقیقه) را ایجاد کرد. در مقابل، صمغ‌های ژلان و کنجاک کمترین مدت زمان تبخیر قطره (کمتر از ۱۰ دقیقه) را ایجاد کردند. افزودن صمغ گوار به محلول پاشش پاشیده شده با نازل القاءکننده هوا بیشترین پوشش پاشش (۳۹/۳ درصد) را روی کاغذ حساس به رطوبت ایجاد کرد که منجر به کمترین مقدار علف‌کش لازم برای کنترل ۵۰ و ۹۰ درصدی وزن خشک یولاف وحشی زمستانه به ترتیب به میزان ۱۱/۸۹ و ۳۳/۶۹ گرم ماده مؤثره در هکتار شد. تیمار فوق به عنوان بهترین تیمار قابل توصیه است. از طرفی دیگر، افزودن صمغ‌های ژلان و گزانتان به محلول پاشش کلودینافوپ–پروپارژیل تأثیری بر کارایی آن علیه یولاف وحشی زمستانه نداشت ولی به سبب توانایی آن‌ها در افزایش گرانروی محلول پاشش و مدت زمان تبخیر قطره پاشش ممکن است تحت شرایط کاربرد علف کش در وضعیت بادی و گرم و خشک مفید باشند.

واژه‌های کلیدی: تبخیر قطره، سطح تماس قطره، فرار قطره، کیفیت پاشش، گرانروی محلول پاشش

مقدمه

از میان علف‌های‌هرز باریک‌برگی که موجب کاهش عملکرد در محصولات زراعی نظیر گندم می‌شوند، یولاف وحشی زمستانه (*Avena sterilis* subsp. *ludoviciana* Durieu.) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. پراکنش این علف هرز باریک برگ یکساله زمستانه در بیش از ۵۵ کشور جهان گزارش شده است. یولاف وحشی زمستانه با تولید بذر بالا (در حدود ۴۸۰ بذر در هر بوته) و قدرت رقابتی بالا در برابر گندم برای جذب نور، آب و عناصر غذایی تأثیر منفی شدیدی بر رشد و عملکرد

گندم وارد می‌کند (Kalilian *et al*., 2023). به دلیل محدودیت در استفاده از روش‌های مکانیکی برای کنترل علف‌های‌هرز در مزارع گندم، کاربرد علف‌کش‌ها اصلی‌ترین روش کنترل علف‌های هرز محسوب می‌شود. در هفته‌های ابتدایی پس از کاشت گندم، کاربرد علف‌کش‌های پیش‌رویشی و یا به ویژه علف‌کش‌های پس‌رویشی رویکردی مؤثر برای کنترل شیمیایی علف‌های‌هرز محسوب می‌شود (Ravi *et al*., 2024). علف‌کش‌های متعدد با سازوکار عمل متفاوت برای کنترل یولاف وحشی زمستانه توسعه یافته است که به بازدارنده‌های آنزیم استیل کوآنزیم آ کربوکسیلاز (گروه 1/A) می‌توان اشاره کرد. این گروه از علف‌کش‌ها قادرند از تولید اسیدهای چرب در علف‌های هرز باریک‌برگ جلوگیری کنند. این امر منجر به توقف در رشد، زردی و بافت‌مردگی علف‌های هرز و نهایتاً مرگ آن‌ها می‌شود. در بین علف‌کش‌های گروه مذکور، کارایی کلودینافوپ–پروپارژیل در کنترل انواع گونه‌های یولاف وحشی بسیار مطلوب گزارش شده است (Akbarabadi *et al*., 2019). این ویژگی همراه با قیمت پایین و در دسترس بودن کلودینافوپ–پروپارژیل سبب کاربرد گسترده آن در مزارع گندم کشور شده است که منجر به بروز بیوتیپ‌هایی از یولاف وحشی زمستانه مقاوم در برابر کلودینافوپ–پروپارژیل در مزارع گندم برخی استان‌های کشور شده است (Moradi *et al*., 2023).

علیرغم مزایای شناخته شده کنترل شیمیایی علف‌های هرز، همواره نگرانی‌هایی در رابطه با فرار[1] یا بادبردگی قطرات پاشش علف‌کش توسط باد یا جریان هوا به منطقه غیر هدف وجود دارد. محققان پیش‌بینی کرده‌اندکه در حدود نیمی از مقدار علف‌کش بکار رفته به دلیل فرار از دسترس خارج می‌شود. این پدیده، ضمن کاهش کارایی علف‌کش در کنترل علف‌های هرز در منطقه هدف، می‌تواند به گیاهان در منطقه غیر هدف آسیب وارد سازد (Bolwerk *et al*., 2024). لذا، با به حداقل‌رسانی فرار می‌توان مصرف علف‌کش‌ها را به‌طور قابل توجهی کاهش داد (Creech *et al*., 2015). مطالعات متعددی اثرات منفی فرار علف‌کش‌ها بر گیاهان غیر هدف را گزارش کردند. برای مثال، گزارش شده است که فرار علف‌کش دایکامبا می‌تواند باعث اخلال در فرآیند گرده‌افشانی گیاه نیلوفر پیچ[2] در حاشیه مزرعه شود. از اینرو، فرار آن می‌تواند تنوع زیستی را تحت تأثیر قرار دهد (Baucom *et al*., 2025). در گزارشی دیگر، فرار علف‌کش گلایفوسیت موجب بروز زردی، بافت‌مردگی، کاهش رشد و اختلالات فتوسنتزی در گونه‌هایی مانند اکالیپتوس، جو و آفتابگردان شده است (Tuffi Santos *et al*., 2006; Cedergreen *et al*., 2010; Yaniccari *et al*., 2012). به‌طور مشابه، فرار علف‌کش توفوردی باعث بدشکلی برگ، ریزش گل و میوه و کاهش عملکرد در محصولاتی مانند پنبه، گوجه‌فرنگی و انگور شده است (Fagliari *et al*., 2005; Ronchi *et al*., 2005; Constantin *et al*., 2007). همچنین، آسیب ناشی از فرار علف‌کش‌های آترازین و آمترین روی گیاهان نیشکر و انگور از طریق کاهش فتوسنتز، تغییر محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی و بروز بافت‌مردگی گزارش شده است (Dayan & Zaccaro, 2012; Silva *et al*., 2016). در تحقیقات فوق بیان شده است که اندازه قطرات پاشش یکی از عوامل مهم در پدیده فرار آن‌ها محسوب می‌شود. به‌طوری‌که قطرات کوچک‌تر بیشتر از قطرات درشت‌تر در معرض فرار قرار می‌گیرند. علاوه بر این، قطرات کوچک‌تر دیرتر نیز سقوط می‌کنند و به همین دلیل می‌توانند به مسافت بیشتری فرار کنند

[1] Drift
[2] Impomoea hederacea

(Lan *et al*., 2024). اندازه قطرات پاشش نیز تحت تأثیر فشار پاشش، نوع نازل و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی محلول پاشش قرار دارد (Zhang *et al*., 2024).

مطالعات پیشین نشان داده است که نازل القاءکننده هوا[1] با تولید قطرات درشت‌تر، پتانسیل فرار پاشش را به‌طور قابل توجهی نسبت به نازل بادبزنی استاندارد کاهش می‌دهد، بدون اینکه تأثیر نامطلوبی بر کارایی کنترل علف‌های هرز داشته باشد. کاهش فرار ناشی از استفاده از نازل القاءکننده هوا عمدتاً با کاهش سهم قطرات کوچک‌تر از ۱۰۰ میکرومتر مرتبط است. از اینرو، این نوع نازل گزینه‌ی مناسبی برای حفاظت گیاهان غیر هدف در اطراف مزرعه محسوب می‌شود (Wang *et al*., 2023). محققان در کاربرد دایکامبا با نازل القاءکننده هوا کمترین میزان فرار قطرات پاشش را در سرعت‌های مختلف وزش باد ثبت کردند. در مقابل، با نازل بادبزنی استاندارد لبه یکنواخت دامنه گسترده، رابطه‌ای مثبت بین سرعت وزش باد و فرار قطرات پاشش مشاهده شد. این نتایج مجدداً تأکید می‌کنند که انتخاب نوع نازل مناسب، به‌ویژه در کاربرد علف‌کش‌هایی با قابلیت فرار بیشتر مانند دایکامبا، نقش کلیدی در کاهش خسارت به گیاهان در مناطق غیر هدف و بهبود کارایی علف‌کش در کنترل علف‌های هرز در مناطق هدف دارد (Alves *et al*., 2018). به دلیل وضع قوانین برای کاهش فرار آفت‌کش‌ها، استفاده از نازل القاءکننده هوا به‌طور فزاینده‌ای در برخی کشورهای اروپایی رایج شده است. این نوع نازل قادر است درصد بالایی قطرات مستعد فرار را در مقایسه با نازل بادبزنی استاندارد (تا بیش از ۷۵–۹۰ درصد) کاهش دهد و در عین حال کارایی قابل قبولی در کنترل علف‌های هرز را نیز حفظ کند (De Cauwer *et al*., 2023).

از آنجایی که یکی از جنبه‌های مهم در کاربرد مؤثر علف‌کش‌ها اطمینان از قرارگیری ماده مؤثره علف‌کش بر روی علف های هرز هدف از طریق کاهش فرار آنهاست، فناوری نازل‌ها همواره تحت تأثیر این موضوع قرار داشته است. تولید انواع نازل‌های کاهنده فرار قطرات پاشش علف‌کش‌ها از جمله نازل‌های ضد بادبردگی[2] و القاءکننده هوا موید همین واقعیت است. با این وجود، نازل‌های ضدبادبردگی و القاءکننده هوا از طریق تولید قطرات پاشش درشت‌تر می‌توانند از میزان فرار آن‌ها بکاهند، اما این امر ممکن است با کاهش پوشش پاشش روی سطح علف‌های هرز همراه باشد زیرا افزایش اندازه قطرات پاشش ممکن است به افزایش لغزش و پرش آن‌ها از سطوح برگ علف‌های هرز به ویژه در باریک‌برگ‌ها منتهی شود (Brankov *et al*., 2023; Chourey & Sing, 2023). در چنین شرایطی، توصیه بر این است که از مواد افزودنی چسباننده استفاده شود تا ماندگاری قطرات پاشش روی سطوح پس از برخورد را افزایش دهند. این مواد با تغییر در برخی ویژگی‌های فیزیکی محلول پاشش مثل گرانروی و کشش سطحی باعث افزایش ماندگاری قطرات پاشش روی سطوح می‌شوند (Moraes *et al*., 2019; Basílio *et al*., 2024). در سال‌های اخیر، توجه ویژه‌ای به پتانسیل مواد افزودنی چسباننده طبیعی، به‌ویژه پلی‌ساکاریدهای گیاهی، در کاربرد مواد حفاظت از گیاهان شده است. این ترکیبات که از منابع گیاهی (مثل صمغ‌های گوار، پکتین، عربی، کتیرا، دکستران، فارسی و کنجاک)، میکروارگانیسم‌ها (مثل صمغ‌های گزانتان و ژلان)، ترکیبات سلولزی اصلاح

[3] Air induction flat fan nozzle
[2] Anti-drift flat fan nozzle

شده (مثل صمغ سلولز[1]) و جلبک‌های دریایی (مثل صمغ‌های آلژینات‌سدیم و کاراگینان) استخراج می‌شوند، ضمن داشتن خاصیت چسبانندگی و پخش‌کنندگی مطلوب، سازگار با محیط زیست هستند به‌طوری‌که هیچ نگرانی زیست‌محیطی متوجه آن‌ها نیست (Berninger *et al*., 2021).

در این پژوهش، تحت شرایط پاشش با سه نوع نازل متفاوت (استاندارد، ضد بادبردگی و القاءکننده هوا) که اندازه قطرات پاشش متفاوتی فراهم می‌کنند، عملکرد صمغ‌های طبیعی مذکور به عنوان مواد افزودنی چسباننده به منظور افزودن به محلول پاشش کلودینافوپ–پرپارژیل جهت کنترل یولاف وحشی زمستانه مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

آزمایش تعیین گرانروی صمغ‌ها

این بخش از پژوهش در اواسط تابستان ۱۴۰۲ در آزمایشگاه شیمی فیزیک دانشگاه بوعلی سینا در قالب طرح کاملاً تصادفی (۱۳ تیمار) در سه تکرار انجام گرفت. تیمارها شامل محلول علف‌کش کلودینافوپ–پروپارژیل (فرمولاسیون ۸ درصد مایع امولسیون شونده با نام تجاری تاپیک، تهیه شده از شرکت آریا شیمی) بود بدون صمغ و محلول علف‌کش کلودینافوپ–پروپارژیل حاوی ۲ گرم در لیتر از صمغ‌های پکتین، سلولز، گوار، کنجاک، دکستران، گزانتان، کاراگینان، آلژینات سدیم، فارسی، کتیرا، عربی و ژلان بود. صمغ های مورد استفاده از شرکت‌های تمادکالا، پویاطب، سیتی‌ژن و شیمی‌سنتر (ایران) تهیه شدند. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی صمغ‌های مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است. مقدار علف‌کش کلودینافوپ–پروپارژیل در تمام محلول‌های فوق ثابت و معادل غلظت نهایی به کار رفته در آزمایش گلخانه‌ای بود (۰/۳۵ گرم ماده مؤثره در لیتر).

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی صمغ‌های مورد مطالعه

Table 1- Physicochemical properties of the studied gums

Gum	Source	Main Composition	Approximate Molecular Weight (Da)	Charge	Solubility	Gelation Properties	Rheology / Viscosity Characteristics	Primary Function
Pectin	Citrus peels / Apple pomace	α-(1→4)-linked D-galacturonic acid (partially methylated)	50,000 – 300,000	Anionic	Soluble in cold & hot water	HM (high methoxyl): sugar + low pH; LM (low methoxyl): Ca^{2+}	Medium, pseudoplastic (shear-thinning)	Gelling agent, stabilizer

[1] Carboxymethyl cellulose (CMC)

CMC	Chemical modification of cellulose	β-(1→4)-linked glucose with carboxymethyl groups	50,000 – 1,000,000 (grade-dependent)	Anionic	Cold water soluble	Non-gelling (thickener only)	High, shear-thinning	Thickener, stabilizer
Guar	Seed endosperm of Cyamopsis tetragonoloba	β-(1→4)-mannose backbone with α-(1→6)-galactose (Man:Gal ≈ 2:1)	1,000,000 – 2,000,000 (up to 8×10^6)	Non-ionic (Neutral)	Cold water soluble	Non-gelling (rarely with borax/Ca)	Very high, strongly shear-thinning	Thickener, stabilizer
Konjac Glucomannan	Tuber of Amorphophallus konjac	β-(1→4)-linked glucose & mannose (Glc:Man ≈ 1:1.6)	500,000 – 2,000,000	Non-ionic (Neutral)	Hot water or alkali	Strong irreversible gel with alkali (deacetylation)	Very high, pseudoplastic	Gelling agent, thickener
Dextran	Bacterial fermentation (Leuconostoc)	α-(1→6)-linked D-glucose (branched)	1,000 – >2,000,000 (highly variable)	Non-ionic (Neutral)	Cold water soluble	Generally non-gelling	Low to medium (depends on MW)	Stabilizer, viscosity modifier
Xanthan	Bacterial (Xanthomonas campestris)	Cellulose backbone with trisaccharide side chains (glucose, mannose, glucuronic acid)	2,000,000 – 20,000,000+	Anionic	Cold & hot water soluble	Weak gel / fluid gel at rest	Very high, excellent shear-thinning & thixotropic	Thickener, stabilizer, suspending
Carrageenan	Red seaweed (Chondrus, Eucheuma)	Sulfated D-galactose & 3,6-anhydrogalactose	200,000 – 800,000 (up to 1.5M)	Anionic	Hot water (kappa/iota)	Kappa: firm gel with K^+; Iota: elastic with Ca^{2+}	High, pseudoplastic	Gelling & stabilizing
Sodium alginate	Brown seaweed (Laminaria, Macrocystis)	β-(1→4)-linked D-mannuronic (M) & L-guluronic (G) acids	32,000 – 600,000+ (typically 100-400k)	Anionic	Cold & hot water soluble	Strong, irreversible "egg-box" gel with Ca^{2+}	Medium to high, pseudoplastic	Gelling (films)
Persian Gum (Farsi Gum)	Exudate of Amygdalus scoparia	Arabinogalactan (galactose + arabinose backbone)	≈4,000,000 – 4,760,000	Anionic	Partial (≈30% cold soluble, 70% swells in hot)	Weak gel at high concentration	High	Emulsifier, thickener, stabilizer

Tragacanth	Exudate of Astragalus spp.	Heterogeneous: Tragacanthin (soluble arabinogalactan) + Bassorin (swellable)	800,000 – >1,500,000+	Anionic	Partial (swells in cold/hot water)	Weak gel / highly swellable	High	Emulsifier, stabilizer, thickener
Arabic	Exudate of Acacia trees	Arabinogalactan-protein complex	250,000 – 1,000,000	Mildly Anionic	Highly soluble in cold water	Non-gelling	Very low viscosity	Excellent emulsifier, stabilizer
Gellan	Bacterial (Sphingomonas elodea)	Linear tetrasaccharide (glucose, rhamnose, glucuronic acid)	500,000 – 2,000,000	Anionic	Hot water	Strong, clear gels with cations (Ca^{2+}/K^{+})	Low in solution → high gel strength	Gelling agent (clear gels)

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی صمغ‌های مورد مطالعه. مقادیر ارائه شده، محدوده‌های معمول گزارش‌شده در ادبیات علمی برای گریدهای تجاری هستند. مقادیر واقعی ممکن است بسته به منبع، درجه تجاری، روش استخراج و شرایط فرآوری متفاوت باشد (Dabestani *et al*., 2018; Phillips & Williams, 2021; Rostamabadi *et al*., 2024)

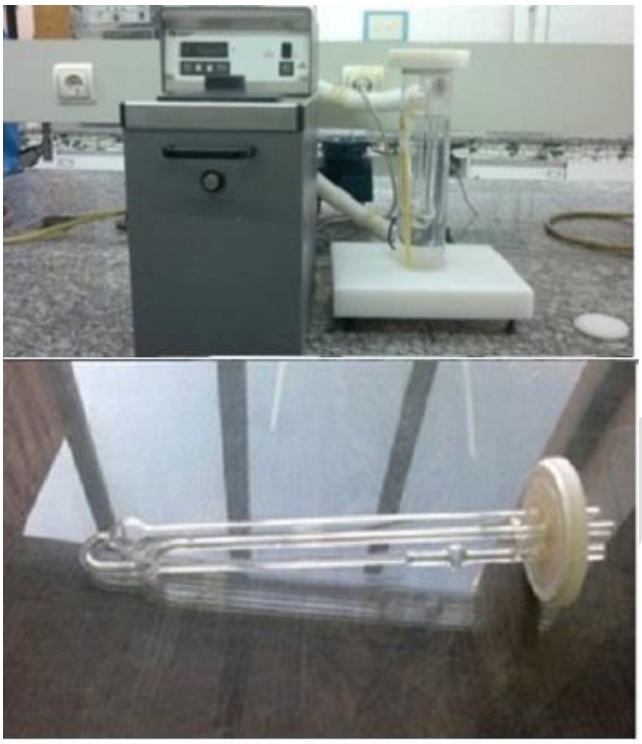
Physicochemical properties of the studied gums. Values represent typical ranges reported in the scientific literature for commercial grades. Actual values may vary depending on the source, grade, extraction method, and processing conditions.

برای اندازه‌گیری گرانروی محلول‌های فوق از ویسکومتر لوله مویین مدل Ubbelohde با استفاده از یکی از لوله‌های مویین با قطر ۰/۶ یا ۰/۸ میلی‌متر بسته به شدت گرانروی محلول‌ها استفاده شد (شکل ۱). ویسکومتر لوله مویین شامل سه شاخه است. شاخه اول برای ریختن سیال (نمونه)، شاخه دوم برای رفع مشکل پر کردن شاخه اول و شاخه سوم که دارای یک لوله مویین و دو نشانه جهت اندازه‌گیری زمان عبور است. اساس عملکرد این ویسکومتر بر معادله پویزوی-هاگن (معادله ۱) استوار است که بر مبنای تعیین سرعت جریان سیال از درون لوله مویین با شعاع و طول مشخص که تحت تأثیر فشار سیال نیز هست، گرانروی سیال (η) را محاسبه می‌کند (Bird *et al*., 2006).

$$\eta = 4\pi r^2 \Delta p \left(\frac{8Q[l+nr] - mQ\rho}{8\pi[l+nr]} \right) \qquad \text{معادله (۱)}$$

در معادله فوق، η برابر گرانروی پویا، Δp برابر اختلاف فشار اعمال شده، Q برابر دبی جریان سیال، Q_P برابر دبی جریان سیال اصلاح شده با در نظر گرفتن شرایط واقعی دستگاه، l برابر طول مؤثر مسیر جریان، m برابر پارامتر انرژی مؤثر در پویایی سیستم و r برابر ضریب تصحیح نهایی برای اصلاح اثرات غیر ایده‌آل دستگاه است. طبق دستورالعمل، ابتدا لوله مویین درون حمام آب مدل medigen K31 که روی دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد تنظیم شده بود قرار داده شد. حمام آب فوق دارای ورودی و خروجی برای گردش آب است. پس از ریختن نمونه (محلول) مورد نظر در شاخه اول، ترموستات حمام آب روشن گردید تا دما به حالت پایدار برسد. پس از تثبیت دما، نمونه به وسیله یک پُرکن از شاخه حاوی لوله مویین و حباب‌ها بالا

کشیده شد و در این حین، مدت زمان برای عبور نمونه از میان دو نشانه خطی روی لوله مویین با استفاده زمان‌سنج دیجیتال با دقت صدم ثانیه ثبت گردید.



شکل ۱– دماپا، حمام آب و ویسکومتر لوله مویین استفاده شده در پژوهش

Figure 1 – Thermometer, water bath and Ubbelohde capillary viscometer used in the study

آزمایش تبخیر، زاویه و سطح تماس قطره با برگ یولاف وحشی زمستانه

این بخش از پژوهش در اواسط تابستان ۱۴۰۲ در آزمایشگاه علوم علف‌های هرز دانشگاه بوعلی سینا اجرا شد. آزمایش به صورت فاکتوریل دو عاملی (۲ × ۱۳) در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار انجام گرفت. عامل اول افزودن صمغ به محلول پاشش کلودینافوپ–پروپارژیل در ۱۳ سطح که شامل محلول پاشش بدون صمغ و محلول‌های حاوی ۲ گرم در لیتر از صمغ‌های پکتین، سلولز، گوار، کنجاک، دکستران، گزانتان، کاراگینان، آلژینات سدیم، فارسی، کتیرا، عربی و ژلان بود. مقدار کلودینافوپ–پروپارژیل در تمام محلول‌های فوق ثابت و معادل غلظت نهایی به کار رفته در آزمایش گلخانه‌ای بود (۰/۳۵ گرم ماده مؤثره در لیتر). عامل دوم سطح برگ شامل سطح رویین و زیرین برگ یولاف وحشی زمستانه بود. برای این منظور، از برگ سوم گیاه در مرحله چهار برگی استفاده شد. مراحل اجرای آزمایش بدین صورت بود که در ابتدا، بر روی لبه میز آزمایشگاه قطعه‌ای از چسب دوطرفه نصب و سه قطعه حدوداً سه‌سانتی‌متری از برگ یولاف وحشی زمستانه بر روی آن قرار داده شد. این عمل یکبار به گونه‌ای انجام گرفت که سطح رویین برگ نمایان باشد و همزمان و بار دیگر به گونه‌ای انجام گرفت که سطح زیرین برگ نمایان باشد. سپس، با استفاده از میکروسرنگ، سه قطره ۵ میکرولیتری از محلول‌های مورد بررسی به‌آرامی روی قطعات برگی چکانده شد. پس از آن، با کمک دوربین، از قطرات از نمای جانبی (برای برآورد زاویه

تماس) و از نمای عمودی (برای برآورد سطح تماس) عکس‌برداری شد و سپس، تصاویر در نرم افزار GeoGebra Classic برای برآورد زاویه و سطح تماس قطره با سطح برگ پردازش شدند (Aliverdi., 2023). علاوه بر این، مدت زمان لازم برای خشک و ناپدید شدن قطرات قرار گرفته بر روی قطعات برگی سنجیده شد. فرآیند ناپدید شدن قطره حاصل ترکیب دو عامل تبخیر در هوا و جذب توسط بافت گیاهی است. دمای محیط آزمایشگاه برابر ۲۴ درجه سانتی‌گراد با رطوبت نسبی ۱۵ درصد بود.

آزمایش واکنش یولاف وحشی زمستانه به مقادیر علف‌کش

این بخش از پژوهش در اوایل پاییز ۱۴۰۲ در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه بوعلی‌سینا اجرا شد. آزمایش به صورت فاکتوریل سه عاملی (۳ × ۶ × ۱۳) در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار انجام گرفت. عامل اول افزودن صمغ به محلول پاشش در ۱۳ سطح که شامل محلول پاشش بدون صمغ و با صمغ‌های پکتین، سلولز، گوار، کنجاک، دکستران، گزانتان، کاراگینان، آلژینات سدیم، فارسی، کتیرا، عربی و ژلان بود. عامل دوم مقدار کلودینافوپ–پرپارژیل در شش سطح که شامل صفر، ۸، ۱۶، ۳۲، ۴۸ و ۶۴ گرم ماده مؤثره در هکتار بود. عامل سوم نوع نازل در سه سطح که شامل نازل‌های بادبزنی استاندارد، ضد بادبردگی و القاءکننده هوا با شماره 110015 بود. نازل‌ها از محصولات شرکت هاردی دانمارک بودند که در فشار ۳ بار، به ترتیب قطرات پاشش ریز در محدوده ۲۳۵–۱۰۶ میکرون، متوسط در محدوده ۳۴۰–۲۳۶ میکرون و بسیار درشت در محدوده ۵۰۲–۴۰۴ میکرون تولید می‌کنند.

مراحل اجرای آزمایش فوق بدین صورت بود که در ابتدا، پوسته (لما و پالئا) بذرهای یولاف وحشی زمستانه که در تابستان ۱۴۰۲ از محوطه دانشگاه بوعلی‌سینا جمع‌آوری شده بودند از بذرها جدا شد. سپس، بذرها با محلول ۵ درصد هیپوکلریت سدیم ضدعفونی شدند و درون پتری‌دیش‌هایی حاوی یک لایه کاغذ صافی قرار گرفتند. پس از اینکه به هر پتری دیش حدوداً ۱۰ میلی‌لیتر محلول ۰/۲ گرم در لیتر نیترات پتاسیم اضافه شد، پتری‌دیش‌ها به مدت ۲۴ ساعت در یخچال و ۴۸ ساعت در دمای محیط (هر دو در تاریکی) نگهداری شدند تا بذرها جوانه بزنند. سپس، گیاهچه‌هایی با طول ساقه‌چه حدوداً یک‌سانتی‌متری درون گلدان‌های پلاستیکی با مقطع مربعی بر روی سطح خاک از قبل آبیاری شده قرار داده شد و بر روی آن‌ها مقداری خاک ریخته شد تا عمق کاشت بذر یک‌سانتی‌متری رعایت شود. در هر گلدان، پنج گیاهچه کشت گردید. پس از خروج گیاهچه‌ها از خاک، آبیاری سطحی بر حسب نیاز گیاهان انجام گرفت.

عملیات سمپاشی پس از رسیدن گیاهان به مرحله ۴ برگی انجام شد. دوازده ساعت قبل از سمپاشی، محلول‌های حاوی ۲ گرم در لیتر از هر نوع صمغ آماده شد. در زمان سمپاشی، مقادیر مختلف علف‌کش به همراه مویان گلدن گیت به میزان یک در هزار به محلول فوق اضافه و بکار برده شدند. عملیات سمپاشی با استفاده از سمپاش دستی فشاری ۵ لیتری مدل Berry 7 (شرکت Matabi، زیر مجموعه Goizper Group، اسپانیا) مجهز به لانس با قابلیت تعویض نازل، تحت فشار پاشش ۳ بار و حجم پاشش ۱۸۰ لیتر در هکتار در دمای ۲۰ الی ۲۳ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۱۸ الی ۲۱ درصد انجام گرفت.

چهار هفته پس از اعمال تیمارها، بوته‌ها از سطح خاک کف‌بر شدند و درون پاکت‌های کاغذی به مدت ۷۲ ساعت درون آون با دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. سپس، میانگین وزن خشک بوته‌ها اندازه‌گیری شد.

آزمایش کیفیت پاشش روی کاغذ حساس به رطوبت

این بخش از پژوهش همزمان با آزمایش قبل و در زمان پاشش مقدار نهایی کلودینافوپ–پرپارژیل (۶۴ گرم ماده مؤثره در هکتار) انجام گرفت. آزمایش به صورت فاکتوریل دو عاملی (۳ × ۱۳) در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام گرفت. عامل نوع صمغ در ۱۳ سطح و عامل نوع نازل در سه سطح در نظر گرفته شد که در بخش قبل به آن‌ها اشاره شده است. مراحل اجرای آزمایش بدین صورت بود که در ابتدا، سه کاغذ حساس به رطوبت زرد رنگ با ابعاد ۳ × ۷ سانتی‌متر به صورت افقی در مسیر حرکت نازل روی سطح زمین قرار داده شدند. پس از سمپاشی، کاغذها جمع‌آوری و بعداً به‌طور جداگانه اسکن و تصویر آن‌ها در نرم افزار Python پردازش شد تا تراکم قطرات پاشش و نسبت مساحت آبی رنگ شده به مساحت زرد رنگ باقیمانده کاغذها به‌عنوان پوشش پاشش برآورد شود.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

پیش از تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، توزیع نرمال آن‌ها با استفاده از آزمون Shapiro–Wilk بررسی و تأیید گردید. در آزمایش واکنش یولاف وحشی زمستانه به مقادیر علف‌کش، مقادیر زیست توده (Y) با کمک مدل چهار پارمتری لُجستیک (معادله ۲) که نیکویی آن براساس آزمون فقدان برازش محرز گردید بر روی مقادیر علف‌کش (X) برازش داده شد تا مقادیر ED_{50} و ED_{90} که به ترتیب مقدار علف‌کش لازم برای کاهش ۵۰ و ۹۰ درصدی بین حد بالا (D) و پایین (C) زیست توده است برآورد شوند (Ritz *et al*., 2015).

$$Y = \frac{D-C}{1+\exp\left(B(logX-logED50)\right)} + C \qquad \text{معادله (۲)}$$

سایر داده‌ها از طریق آنالیز واریانس یک یا دوطرفه با استفاده از نرم‌افزار SAS تجزیه و تحلیل شدند. میانگین‌ها با کمک آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد از همدیگر جدا شدند. تمامی منحنی‌ها و نمودارها در نرم‌افزار R ترسیم شدند.

نتایج و بحث

تأثیر صمغ‌ها بر گرانروی محلول پاشش علف‌کش

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که گرانروی محلول پاشش کلودینافوپ–پروپارژیل به‌طور معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد تحت تأثیر افزودن صمغ قرار گرفت (جدول ۲). گرانروی محلول پاشش کلودینافوپ–پروپارژیل در شرایط بدون صمغ ۲/۴۱ میلی‌پاسکال بر ثانیه اندازه‌گیری شد. بجز پکتین و عربی، افزودن سایر صمغ‌ها موجب افزایش معنی‌دار گرانروی محلول پاشش علف‌کش گردید (شکل ۲). بیشترین مقدار گرانروی را صمغ ژلان با ۱۹۵/۴ میلی‌پاسکال در ثانیه و

به دنبال آن، صمغ‌های کنجاک و سلولز به ترتیب با گرانروی برابر ۸۹/۸ و ۹۳/۹ میلی‌پاسکال بر ثانیه ایجاد کردند. صمغ‌های گوار، گزانتان و آلژینات سدیم گرانروی حد واسطی بین ۱۰ تا ۱۵ میلی‌پاسکال بر ثانیه را سبب شدند. سایر صمغ‌ها (پکتین، دکستران، کاراگینان، فارسی، کتیرا و عربی) نیز گرانروی کمتر از ۱۰ میلی‌پاسکال بر ثانیه ایجاد کردند (شکل ۲). گرانروی محلول پاشش یکی از عوامل مؤثر بر رفتار و پایداری قطرات پاشش علف‌کش‌ها محسوب می‌شود. افزایش گرانروی محلول پاشش می‌تواند موجب تشکیل قطرات درشت‌تر و بهبود پایداری آن‌ها پس از برخورد با سطح برگ شود زیرا احتمال برگشت یا پَرش[1] قطرات پاشش از سطح برگ را کاهش دهد که منجر به افزایش نشست قطرات روی سطح برگ شود (Xu *et al*., 2010; Zhong *et al*., 2013; Ferguson *et al*., 2018). همچنین، صمغ‌ها با بهبود ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی محلول پاشش می‌توانند از طریق کاهش کشش سطحی و زاویه تماس قطره با سطح برگ موجب بهبود جذب علف‌کش شوند (Polli *et al*., 2021; Hewitt, 2024). گزارش شده است که افزودن صمغ‌ها به محلول‌های پاشش، اگرچه ممکن است اندازه قطرات پاشش را افزایش دهد، اما با بهبود قابلیت نشست آن‌ها، خطر پَرش آن‌ها از سطح برگ را کاهش می‌دهد (Wang *et al*., 2024). با این حال، افزایش بیش از حد گرانروی می‌تواند مشکلاتی را در فرآیند پاشش از جمله کاهش جریان در سیستم پاشش، انسداد نازل و ایجاد الگوی نامنظم در تشکیل و توزیع قطرات پاشش روی سطح گیاه ایجاد کند (Liu *et al*., 2020; Berninger, 2021; Zhang & Xiong, 2021).

جدول ۲- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر افزودن صمغ بر گرانروی محلول پاشش علف‌کش کلودینافوپ-پرپارژیل

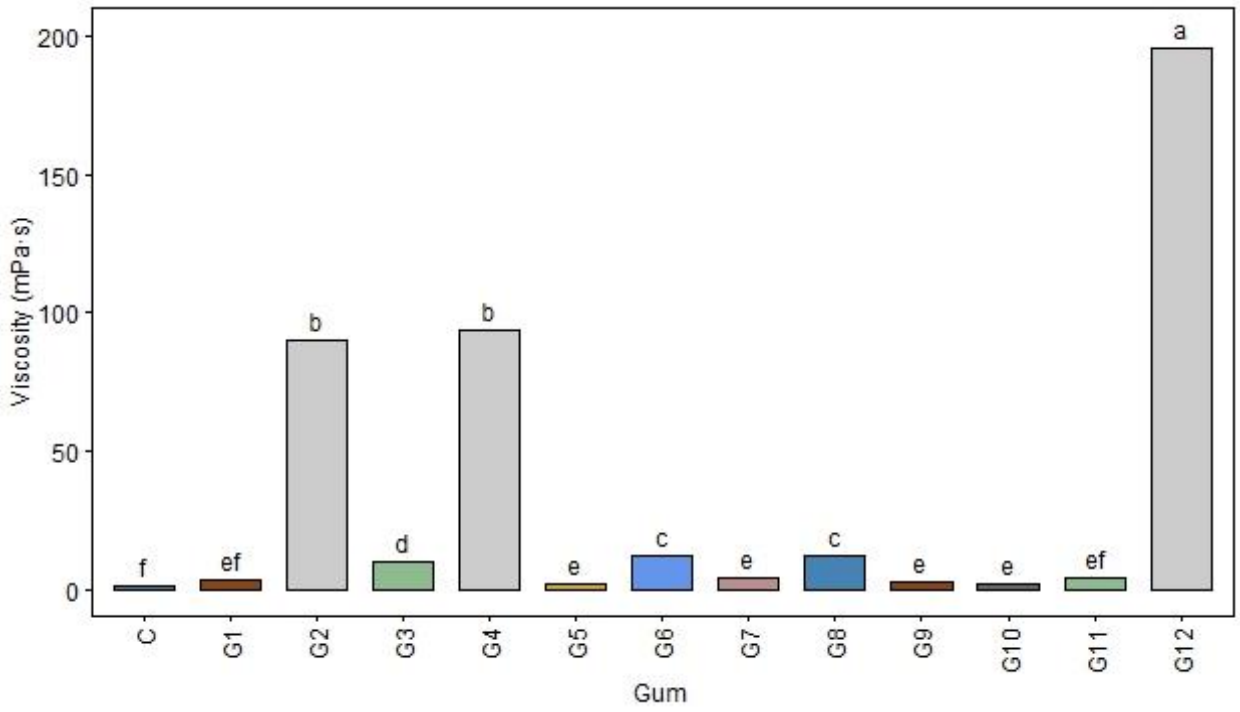
Table 2 – Analysis of variance (mean squares) for the effect of adding gum on the viscosity of clodinafop-propargyl spray solution

Source of variation	df	Viscosity
Gum	12	2.474**
Error	26	0.001
Coefficient of variation (%)	-	1.27

** نشان دهنده معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد می‌باشد.

** indicates significance at the 1% probability level.

[1]Endo-drift



شکل ۲- گرانروی محلول پاشش کلودینافوپ-پروپارژیل بدون صمغ (C) و حاوی صمغ‌های پکتین (G1)، سلولز (G2)، گوار (G3)، کنجاک (G4)، دکستران (G5)، گزانتان (G6)، کاراگینان (G7)، آلژینات سدیم (G8)، فارسی (G9)، کتیرا (G10)، عربی (G11) و ژلان (G12). وجود حروف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح احتمال یک درصد طبق آزمون توکی است.

Figure 2– Viscosity of clodinafop-propargyl spray solution whitout gum (C) and with gums of pectin (G1), CMC (G2), guar (G3), konjac (G4), dextran (G5), xanthan (G6), carrageenan (G7), sodium alginate (G8), persian (G9), tragacanth (G10), arabic (G11), and gellan (G12). Means followed by similar letters don't show a significant difference based on Tukey's test at the 1% probability level.

تأثیر صمغ‌ها و سطح برگ یولاف وحشی زمستانه بر زمان تبخیر قطره حاوی علف‌کش

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر ساده صمغ و سطح برگ و نیز اثر متقابل بین آن‌ها بر مدت زمان تبخیر قطره حاوی کلودینافوپ-پروپارژیل در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). مدت زمان تبخیر قطره حاوی کلودینافوپ-پروپارژیل بدون صمغ (شاهد) از سطح رویین و زیرین برگ به ترتیب برابر ۱۰/۲ و ۱۱/۲ دقیقه ثبت شد (شکل ۳). به‌طورکلی، مدت زمان تبخیر قطره از سطح زیرین برگ در اکثر تیمارها بیشتر از سطح رویین برگ بود (شکل۳). افزودن صمغ‌های کاراگینان و ژلان به محلول پاشش موجب کاهش مدت زمان تبخیر قطره از سطح زیرین برگ شد، در حالی که افزودن سایر صمغ‌ها سبب افزایش معنی‌دار مدت زمان تبخیر قطره شدند. در هر دو سطح برگ، صمغ‌های سلولز، کنجاک و گزانتان بیشترین افزایش مدت زمان تبخیر قطره را ایجاد کردند. به‌طوری‌که زمان تبخیر در این تیمارها در بین ۱۹ تا ۲۸ دقیقه در نوسان بود. افزایش مدت زمان تبخیر قطره می‌تواند فرصت بیشتری برای نفوذ ماده مؤثره علف‌کش به داخل بافت برگ فراهم کرده و در نتیجه جذب و کارایی علف‌کش را افزایش دهد. صمغ‌هایی که افزایش قابل توجهی در زمان تبخیر ایجاد کردند شامل سلولز، کنجاک و گزانتان احتمالاً با نگهداری طولانی‌مدت آب درون قطره قادرند سرعت تبخیر آب را

کاهش دهند. چنین ویژگی می‌تواند با تبلور آهسته‌تر ماده مؤثره همراه باشد؛ لذا، ماده مؤثره درون قطره زمان بیشتری را برای جذب توسط بافت علف هرز خواهد داشت (Polli *et al*., 2021; Basílio *et al*., 2024). علاوه بر این، افزایش زمان تبخیر می‌تواند از تبخیر زود هنگام قطرات پاشش، به ویژه در شرایط گرم و خشک جلوگیری کرده و کارایی محلول پاشش را بهبود دهد (Hasanuzzaman *et al*., 2018). مدت زمان تبخیر طولانی‌تر قطره روی سطح زیرین برگ احتمالاً به تفاوت‌های ساختاری دو سطح برگ مربوط است. به‌طور معمول سطح زیرین برگ نسبت به سطح رویین آن دارای موم و کرک کمتر ولی تراکم روزنه بیشتری است؛ لذا، خیس‌شوندگی بهتر و تبخیر قطره آهسته‌تری را نشان می‌دهد (Brewer, & Nunez., 2007; Hasanuzzaman *et al*., 2018; Meng *et al*., 2025).

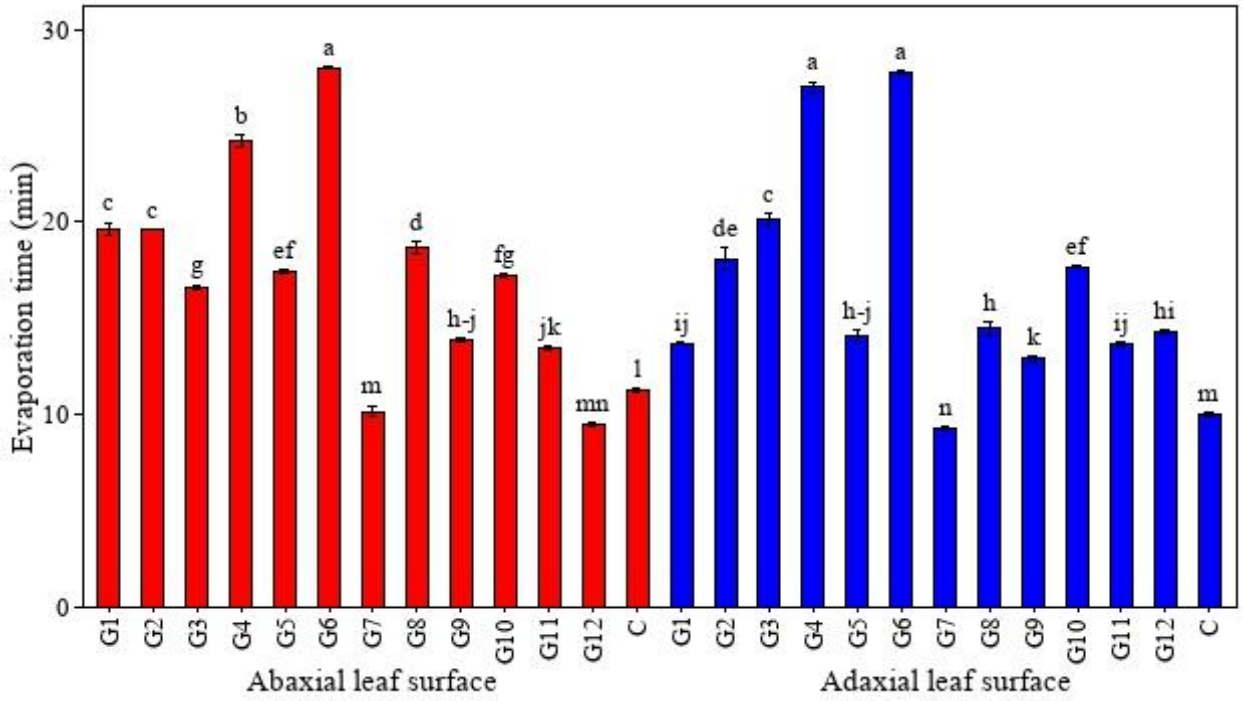
جدول ۳- جدول تجزیه واریانس (میانگین مربعات) ویژگی قطره پاشش کلودینافوپ-پروپارژیل قرار گرفته روی برگ یولاف وحشی زمستانه

Table 3 – Analysis of variance (mean squares) for the traits of clodinafop-leaf propargyl spray droplet placed on winter wild oat

Source of variation	df	Evaporation time	Contact angle	Wetted area
Gum	12	0.579**	453.3**	10.10**
Leaf surface	1	0.020**	196.77**	0.01^{ns}
Gum × Leaf surface	12	0.060**	132.21**	4.34**
Error	52	0.001	7.38	0.45
Coefficient of variation (%)	-	11.45	5.73	8.50

ns و ** به ترتیب نشان دهنده عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد است.

ns and ** indicate non-significant and significant at the 1% probability level, respectively.

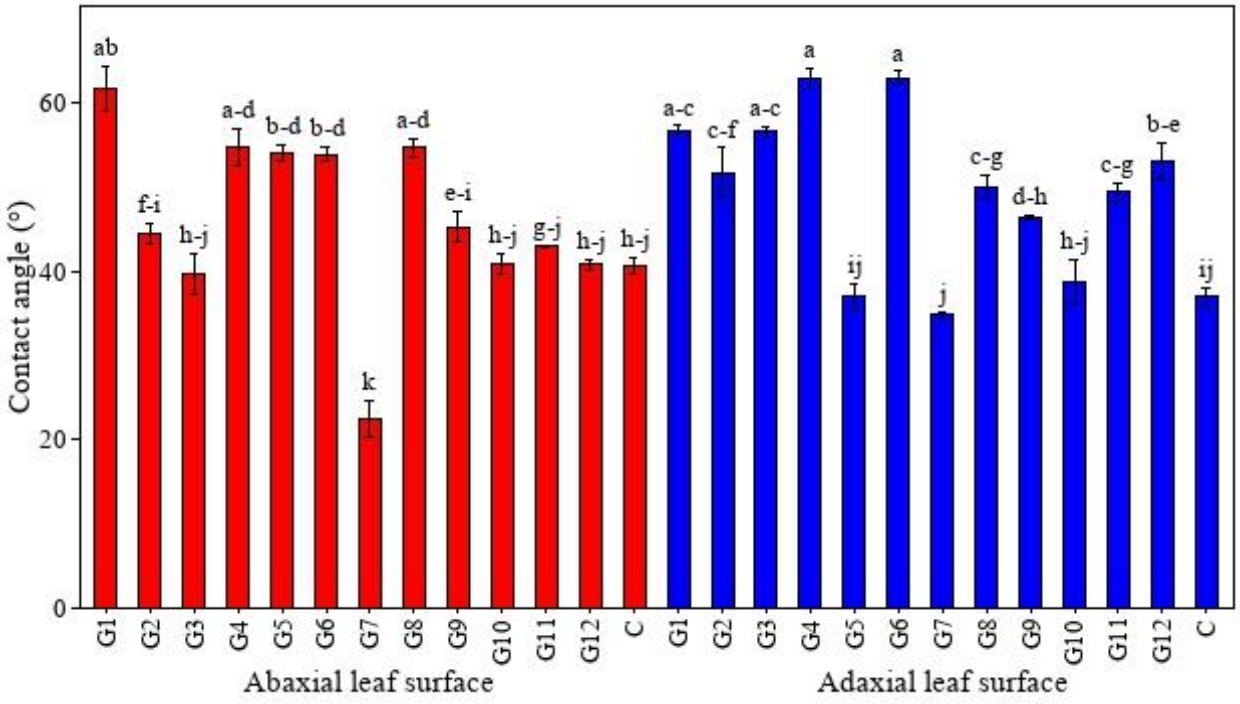


شکل ۳- مدت زمان تبخیر قطره محلول پاشش علف‌کش کلوینافوپ-پروپارژیل حاوی صمغ‌های پکتین (G1)، سلولز (G2)، گوار (G3)، کنجاک (G4)، دکستران (G5)، گزانتان (G6)، کاراگینان (G7)، آلژینات سدیم (G8)، فارسی (G9)، کتیرا (G10)، عربی (G11)، ژلان (G12) و شاهد بدون صمغ (C) که بر روی سطح رویین و زیرین برگ یولاف وحشی زمستانه قرار داده شده است. میله‌های روی ستون‌ها نشان دهنده خطای استاندارد هستند. وجود حروف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح احتمال یک درصد طبق آزمون توکی است.

Figure 3– Evaporation time of clodinafop-propargyl herbicide spray drop containing gums of pectin (G1), CMC (G2), guar (G3), konjac (G4), dextran (G5), xanthan (G6), carrageenan (G7), sodium alginate (G8), persian (G9), tragacanth (G10), arabic (G11), gellan (G12), and control without gum (C), which placed on the adaxial and abaxial leaf surfaces of winter wild oat. Bars represent standard errors. Means followed by similar letters don't show a significant difference based on Tukey's test at the 1% probability level.

تأثیر صمغ‌ها و سطح برگ یولاف وحشی زمستانه بر زاویه تماس و سطح پخش قطره حاوی علف‌کش

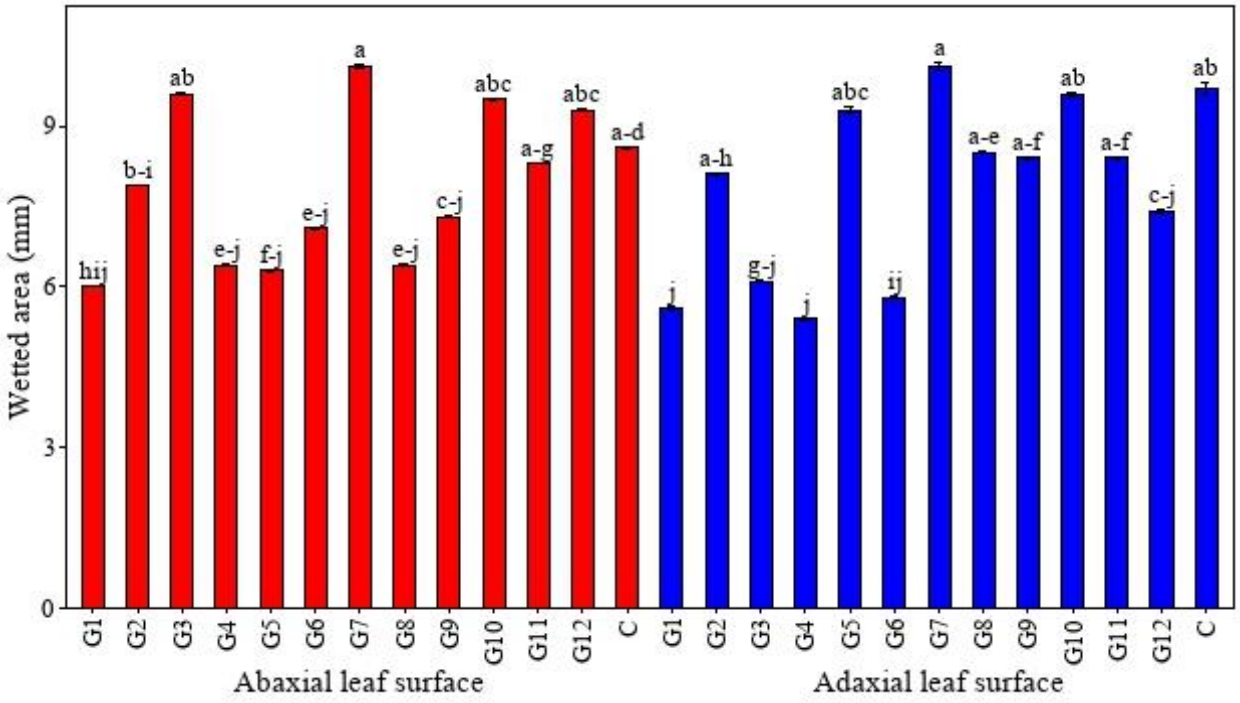
نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر ساده صمغ و سطح برگ و همچنین اثر متقابل آن‌ها بر زاویه تماس قطره حاوی کلودینافوپ–پروپارژیل با سطح برگ یولاف وحشی زمستانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). زاویه تماس قطره حاوی علف‌کش بدون صمغ با سطح برگ رویین و زیرین به ترتیب برابر ۳۶/۹ و ۴۰/۶ درجه ثبت شد (شکل ۴). به‌طورکلی، زاویه تماس قطره با سطح زیرین برگ در اغلب تیمارها کمتر از سطح رویین برگ بود که بیانگر خیس‌شوندگی بهتر سطح زیرین برگ است. در بین صمغ‌ها، کاراگینان کمترین زاویه تماس قطره با سطح زیرین برگ را ایجاد کرد (۲۲/۴ درجه)؛ از اینرو، بیشترین خیس‌کنندگی برگ را فراهم کرد. در سطح زیرین برگ، صمغ‌های پکتین، کنجاک، دکستران، گزانتان و آلژینات سدیم باعث افزایش زاویه تماس قطره با سطح برگ شدند. در حالی که در سطح رویین برگ، صمغ‌های پکتین، سلولز، گوار، کنجاک، گزانتان، آلژینات سدیم، فارسی، عربی و ژلان باعث افزایش زاویه تماس قطره با سطح برگ شدند. صمغ ژلان با وجود ایجاد بالاترین گرانروی قطره (شکل ۲)، زاویه تماس قطره با سطح زیرین برگی برابر ۴۰/۸ درجه ایجاد کرد که اختلافی با زاویه تماس قطره بدون صمغ با سطح زیرین برگ نداشت. زاویه تماس قطره شاخصی از میزان خیس‌شوندگی سطح برگ است، به‌طوری‌که کاهش زاویه تماس به معنای افزایش پخش‌شوندگی قطره و افزایش سطح تماس آن با سطح برگ است که می‌تواند جذب بهتر ماده مؤثره را تسهیل کند (Berninger, 2021; Sorze *et al*., 2023). تفاوت مشاهده شده بین دو سطح برگ احتمالاً به ویژگی‌های ساختاری آن‌ها مربوط است که در بالا به آن اشاره شد. این ویژگی در گیاهانی مانند یولاف وحشی زمستانه که برگ‌های افقی دارند، اهمیت زیادی دارد، زیرا پوشش مناسب سطح زیرین برگ می‌تواند جذب علف‌کش را افزایش دهد (Polli *et al*., 2021; Wang *et al*., 2024). براساس نتایج بدست آمده می‌توان استنتاج کرد که گرانروی بالا به تنهایی عامل اصلی کاهش زاویه تماس قطره با سطح برگ نیست و احتمالاً سایر ویژگی‌های فیزیکی صمغ‌ها از جمله کاهندگی در کشش سطحی و توانایی تشکیل فیلم در بهبود قدرت پخش‌کنندگی قطره نقش تعیین‌کننده‌تری دارند (Xu *et al*., 2010).



شکل ۴- زاویه تماس قطره محلول علف‌کش کلوینافوپ-پروپارژیل حاوی صمغ‌های پکتین (G1)، سلولز (G2)، گوار (G3)، کنجاک (G4)، دکستران (G5)، گزانتان (G6)، کاراگینان (G7)، آلژینات سدیم (G8)، فارسی (G9)، کتیرا (G10)، عربی(G11)، ژلان (G12) و شاهد بدون صمغ (C) که بر روی سطح رویین و زیرین برگ یولاف وحشی زمستانه قرار داده شده است. میله‌های روی ستون‌ها نشان دهنده خطای استاندارد هستند. وجود حروف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح احتمال یک درصد طبق آزمون توکی است.

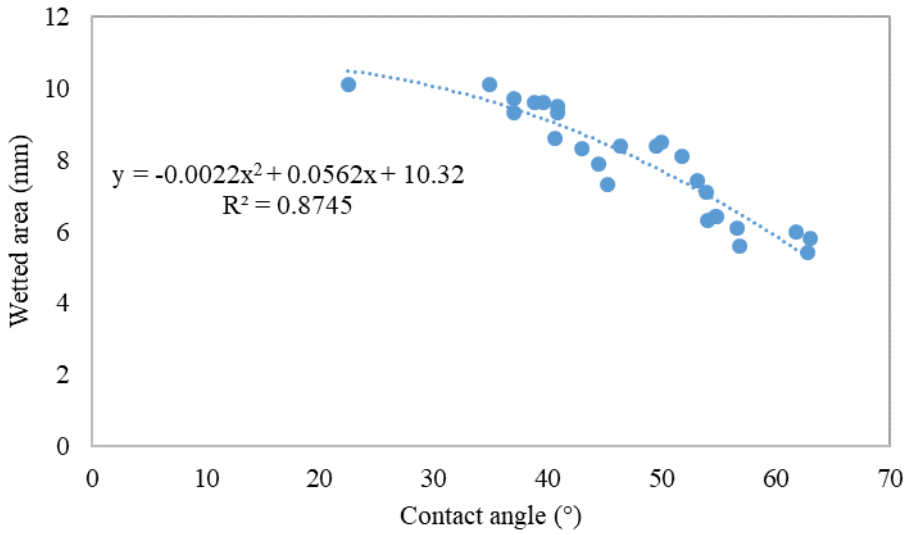
Figure 4– Contact angle of clodinafop-propargyl herbicide spray drop containing gums of pectin (G1), CMC (G2), guar (G3), konjac (G4), dextran (G5), xanthan (G6), carrageenan (G7), sodium alginate (G8), persian (G9), tragacanth (G10), arabic (G11), gellan (G12), and control without gum (C) which placed on the adaxial and abaxial leaf surfaces of winter wild oat. Bars represent standard errors. Means followed by similar letters don't show a significant difference based on Tukey's test at the 1% probability level.

اثر ساده سطح برگ بر سطح پخش قطره در سطح احتمال یک درصد غیر معنی‌دار بود. در مقابل، اثر ساده صمغ و اثر متقابل صمغ و سطح برگ بر سطح پخش قطره در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). افزودن صمغ‌های مختلف اثر متفاوتی بر میزان پخش قطره روی سطح برگ داشت (شکل ۵). تحت شرایط بدون صمغ، به ترتیب مساحت ۹/۷ و ۸/۶ میلی‌متر مربع از سطح برگ رویین و زیرین یولاف وحشی زمستانه توسط قطره خیس شد. در سطح رویین برگ، سطح پخش قطره در تیمارهای مختلف بین ۵/۴ تا ۱۰/۱ میلی‌متر مربع متغیر بود. در حالی که در سطح زیرین برگ، سطح پخش قطره در تیمارهای مختلف بین ۶ تا ۱۰ میلی‌متر مربع متغیر بود. بیشترین میزان خیس شدگی سطح رویین برگ توسط قطره حاوی صمغ‌های سلولز، دکستران، کاراگینان و کتیرا به ترتیب با مساحت ۸/۱، ۹/۳، ۱۰/۱ و ۹/۶ میلی‌متر مربع مشاهده شد. در سطح زیرین برگ، کاراگینان بیشترین سطح پخش قطره با مساحت ۱۰/۱ میلی‌متر مربع ایجاد کرد و پس از آن به ترتیب صمغ‌های گوار، کتیرا و ژلان با مساحت‌های ۹/۶، ۹/۵ و ۹/۳ میلی‌متر مربع باعث افزایش سطح پخش‌شدگی قطره با سطح برگ شدند. صمغ کاراگینان که در آزمایش قبلی موجب کاهش زاویه تماس قطره با سطح برگ شد سطح پخش قطره بیشتری را نیز روی سطح برگ ایجاد کرد.



شکل ۵- سطح پخش قطره محلول علف‌کش کلودینافوپ-پروپارژیل حاوی صمغ‌های پکتین (G1)، سلولز (G2)، گوار (G3)، کنجاک (G4)، دکستران (G5)، گزانتان (G6)، کاراگینان (G7)، آلژینات سدیم (G8)، فارسی (G9)، کتیرا (G10)، عربی(G11)، ژلان (G12) و شاهد بدون صمغ (C) که بر روی سطح رویین و زیرین برگ یولاف وحشی زمستانه قرار داده شده است. میله‌های روی ستون‌ها نشان دهنده خطای استاندارد هستند. وجود حروف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح احتمال یک درصد طبق آزمون توکی است.

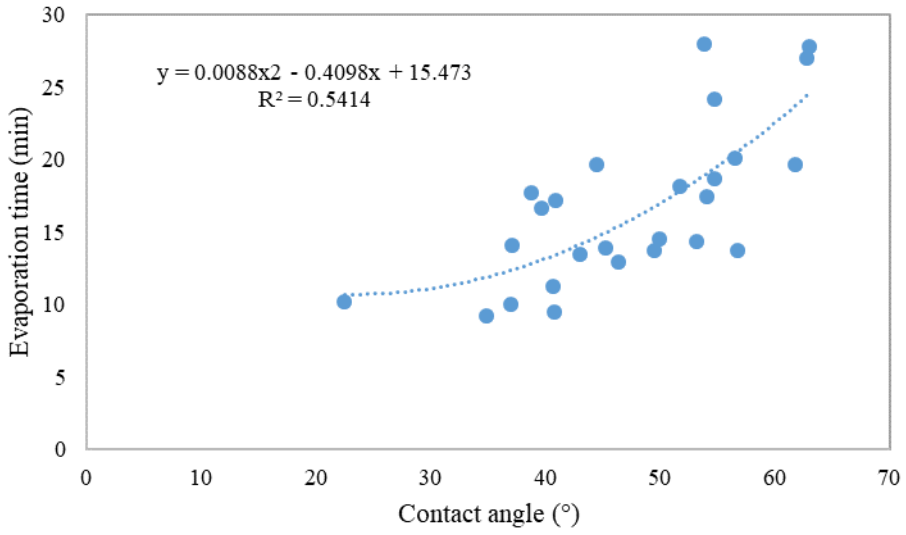
Figure 5– Wetted area of clodinafop-propargyl herbicide spray drop containing gums of pectin (G1), CMC (G2), guar (G3), konjac (G4), dextran (G5), xanthan (G6), carrageenan (G7), sodium alginate (G8), persian (G9), tragacanth (G10), arabic (G11), gellan (G12), and control without gum (C) which placed on the adaxial and abaxial leaf surfaces of winter wild oat. Bars represent standard errors. Means followed by similar letters don't show a significant difference based on Tukey's test at the 1% probability level.



شکل ۶- همبستگی بین زاویه تماس و سطح پخش شده قطره مشاهده شده در این آزمایش

Figure 6– Relationship between contact angle and wetted area of droplet observed in this study

همبستگی بین زاویه تماس و سطح پخش قطره با یک مدل درجه دوم قابل ترسیم و توضیح بود (شکل ۶). این رابطه نشان داد که با افزایش زاویه تماس قطره با سطح برگ، سطح پخش آن کاهش می‌یابد. زاویه تماس پایین (۳۰ تا ۴۰ درجه) موجب سطح پخش قطره‌ای در حدود ۹ تا ۱۰ میلی‌متر مربع شد. در حالی که با افزایش زاویه تماس به ۶۰ درجه، سطح پخش قطره به حدود ۵ تا ۶ میلی‌متر مربع کاهش یافت. قطراتی که زاویه تماس بیشتری دارند، به شکل کروی‌تری روی سطح قرار می‌گیرند. در نتیجه، سطح خیس‌شده کوچک‌تری را ایجاد می‌کنند. افزایش سطح پخش قطره می‌تواند موجب باقی ماندن قطره به‌صورت متمرکزتر روی سطح برگ شود و شرایط مناسب‌تری برای پایداری قطره و نفوذ ماده مؤثره فراهم کند. در این زمینه گزارش شده است که استفاده از پلیمرهای طبیعی مانند صمغ گوار در فرمولاسیون علف‌کش‌ها می‌تواند با ایجاد سامانه‌های پلیمری، رهایش تدریجی ماده مؤثره را نیز فراهم کند. با تهیه فرمولاسیون علف‌کش کارفنترازون–اتیل در ترکیب با صمغ گوار به‌صورت یک ژل مزدوج پلیمر–علف‌کش امکان رهایش تدریجی ماده مؤثره نیز فراهم شده است. این ترکیب پلیمری موجب پوشش بیشتر روزنه‌های برگ علف‌های هرز (بیش از ۹۵ درصد) در مقایسه با محلول‌پاشی متداول شد و در نتیجه باعث مرگ و میر ۹۷ درصدی علف‌هرز سلمه تره[1] شد (Zhang *et al.*, 2023). نتایج پژوهش حاضر با یافته‌های مطالعه‌ای که بر روی صمغ گزانتان انجام شد، همخوانی دارد. در مطالعه قبلی، استفاده از صمغ گزانتان باعث افزایش چسبندگی قطره روی برگ ذرت شد ضمن اینکه مساحت پخش شده آن کاهش یافت. در مطالعه فوق، با افزایش غلظت صمغ گزانتان به گرانروی محلول افزوده شد و در نتیجه پخش‌شدگی قطره نیز محدودتر شد (Wang *et al.*, 2018). بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که نوع صمغ‌های طبیعی تأثیر مستقیم بر رفتار فیزیکی قطره دارند. به‌طوری‌که گرانروی متوسط همراه با سطح پخش‌شدگی بیشتر موجب افزایش زمان ماندگاری قطره و ایجاد فرصت بیشتر برای نفوذ علف‌کش به برگ می‌شود.



شکل ۷– همبستگی بین زاویه تماس و زمان تبخیر مشاهده شده در تیمارهای مختلف در این آزمایش

Figure 7– Relationship between contact angle and evaporation time observed in different treatments in this study

[1] Chenopodiom album

بین زاویه تماس و مدت زمان تبخیر قطره حاوی علف‌کش کلودینافوپ–پروپارژیل همبستگی مثبتی مشاهده شد (شکل۷). به‌طوری‌که با افزایش زاویه تماس قطره با سطح برگ، زمان تبخیر آن نیز افزایش یافت. این رابطه نشان می‌دهد که قطرات با زاویه تماس بیشتر به شکل کروی‌تری روی سطح برگ قرار گرفته و گسترش کمتری پیدا می‌کنند. در نتیجه، سطح تماس قطره با سطح کاهش یافته و سرعت تبخیر آن کمتر می‌شود (Xu *et al*., 2013; Gomiero Polli, 2021). در بین صمغ ها، صمغ‌های گوار و گزانتان که زاویه تماس نسبتاً بزرگتری ایجاد کردند و لذا، بیشترین مدت زمان تبخیر قطره را نیز به خود اختصاص دادند. در مقابل، صمغ کاراگینان که زاویه تماس با سطح برگ زیرین بسیار پایینی ایجاد کرد موجب گسترش بیشتر قطره روی سطح برگ همراه با کاهش زمان تبخیر شد. این نتیجه با گزارش اولیویرا و همکاران همخوانی دارد که نشان دادند بین سطح پخش‌شدگی قطره و زمان تبخیر آن همبستگی منفی وجود دارد، به‌طوری‌که با افزایش سطح گسترش قطره، مدت زمان تبخیر آن کاهش می‌یابد (Oliveira *et al*., 2025).

تأثیر نوع صمغ و نازل بر پوشش قطرات پاشش روی کاغذ حساس به رطوبت

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر ساده صمغ و نازل و نیز اثر متقابل بین آن‌ها بر پوشش پاشش روی کاغذ حساس به رطوبت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول۴). افزودن صمغ گوار به محلول پاشش پاشیده شده با نازل القاءکننده هوا بیشترین پوشش پاشش (۳۹/۳ درصد) را روی کاغذ حساس به رطوبت ایجاد کرد (شکل ۸). در بین پاشش ها با نازل بادبزنی استاندارد، افزودن صمغ‌های گوار، گزانتان و آلژینات سدیم موجب افزایش پوشش پاشش شدند. در بین پاشش‌ها با نازل ضدبادبردگی، افزودن صمغ‌های گوار، کنجاک، آلژینات سدیم و فارسی سبب بهبود پوشش پاشش شدند. در بین پاشش‌ها با نازل القاءکننده هوا، افزودن صمغ‌های سلولز، گوار، کنجاک، گزانتان و فارسی سبب افزایش پوشش پاشش شدند. در اغلب تیمارها، نازل القاءکننده هوا به‌ویژه در ترکیب با صمغ‌های گوار و گزانتان پوشش پاشش بیشتری نسبت به نازل‌های استاندارد و ضدبادبردگی ایجاد کرد. نازل‌های القاءکننده هوا با تزریق هوا به داخل جریان محلول پاشش، قطرات پاشش بزرگتر ولی پایدارتری را تولید می‌کنند که مقاومت بیشتری در برابر تبخیر و جابه‌جایی در اثر جریان هوا دارند (Jomantas et *al*., 2023; Kannan *et al*., 2024). برای مثال، گزارش شده است که نازل‌های استاندارد در مقایسه با نازل‌های القاءکننده هوا حدود دو تا پنج برابر فرار به بیرون[1] قطرات پاشش را ایجاد می‌کنند (Jomantas *et al*., 2023). از اینرو، نتایج این پژوهش با گزارش‌های پیشین نیز همخوانی دارد. باسیلیو و همکاران (Basílio *et al*. 2024) نشان دادند که افزودن صمغ‌های گوار و گزانتان به محلول پاشش و پاشش آن‌ها با نازل‌های استاندارد و القاءکننده هوا می‌توانند قطرات درشت‌تر و یکنواخت‌تری تولید کرده و سهم قطرات ریز را کاهش دهند. همچنین، ژانگ و شیونگ (Zhang & Xiong, 2021) گزارش کردند که افزودن صمغ‌ها باعث افزایش پایداری محلول پاشش و بهبود توزیع اندازه قطرات می‌شود. همچنین، کانان و همکاران (Kannan *et al*., 2024) گزارش کردند که افزودن صمغ آلژینات سدیم به محلول گلوفوسینات آمونیوم

[1] Exo-drift

که با نازل القاءکننده لبه یکنواخت دامنه گسترده پاشیده شده بود سبب کاهش تراکم قطرات کوچکتر از ۱۵۰ میکرومتر شد. این تغییر در طیف اندازه قطرات می‌تواند با کاهش فرار به بیرون پاشش و بهبود یکنواختی پوشش همراه باشد. در مطالعه‌ای دیگر، استفاده از فرمولاسیون علف‌کش کارفنترازون–اتیل حاوی صمغ گوار موجب پوشش بیش از ۹۵ درصدی روزنه‌های برگ و افزایش قابل توجه کارایی علف‌کش در کنترل گونه‌های مختلف علف‌های هرز شد. به‌طوری‌که با مقادیر کمتری از ماده مؤثره نیز می‌توان کارایی مشابه یا حتی بیشتری در مقایسه با فرمولاسیون‌های رایج مشاهده کرد (Bhardwaj *et al*; 2022). به‌طور مشابه، هوییت (Hewitt, 2024) گزارش کرد که افزودن صمغ گوار به محلول گلایفوسیت موجب بهبود دامنه اندازه قطرات و کاهش سهم قطرات ۱۰۰ تا ۲۰۰ میکرومتر شده و در نتیجه یکنواختی پوشش سطح گیاه هدف افزایش یافته است.

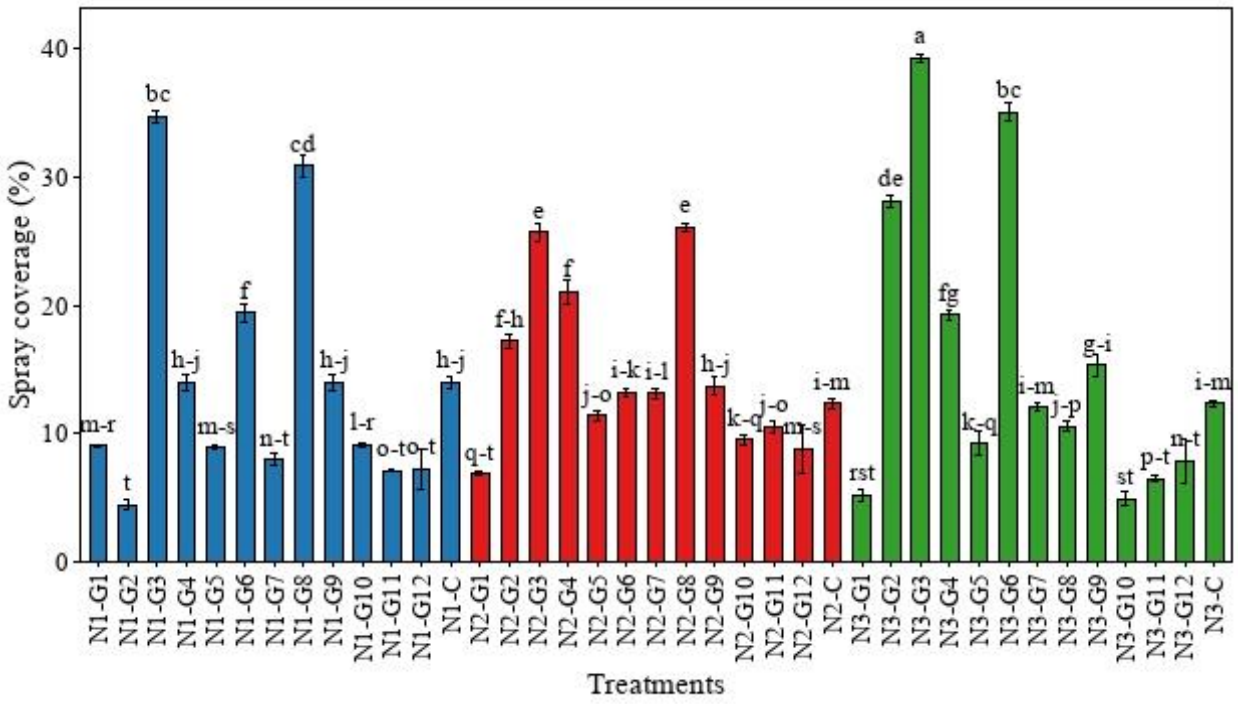
جدول ٤- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر صمغ و نازل بر پوشش پاشش روی کاغذ حساس به رطوبت

Table 4- Analysis of variance (mean squares) for the effects of gum and nozzle on spray coverage on water-sensistive paper

Source of variation	df	Spray coverage
Gum	12	540.2**
Nozzle	2	36.1**
Gum × Nozzle	24	114.9**
Error	78	1.5
Coefficient of variation (%)	-	8.21

** نشان دهنده معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد است.

** indicates significance at the 1% probability level.



شکل ۸- اثر نوع نازل (N1: نازل استاندارد، N2: ضدبادبردگی، N3: القاءکننده هوا) و نوع صمغ (پکتین (G1)، سلولز (G2)، گوار (G3)، کنجاک (G4)، دکستران (G5)، گزانتان (G6)، کاراگینان (G7)، آلژینات سدیم (G8)، فارسی (G9)، کتیرا (G10)، عربی (G11)، ژلان (G12) و شاهد بدون صمغ (C)) بر پوشش پاشش محلول علف‌کش کلودینافوپ-پروپارژیل بر کاغذ حساس به رطوبت. میله‌های روی ستون‌ها نشان دهنده خطای استاندارد هستند. وجود حروف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح احتمال یک درصد طبق آزمون توکی است.

Figure 8– Effect of nozzle type (N1: standard, N2: anti-drift, N3: air-induction flat-fan nozzle) and gum type (pectin (G1), CMC (G2), guar (G3), konjac (G4), dextran (G5), xanthan (G6), carrageenan (G7), sodium alginate (G8), persian (G9), tragacanth (G10), arabic (G11), gellan (G12), and control without gum (C)) on spray coverage of clodinafop-propargyl herbicide on water-sensistive paper. Bars represent standard errors. Means followed by similar letters don't show a significant difference based on Tukey's test at the 1% probability level.

تأثیر نوع صمغ و نازل بر کارایی علف‌کش کلودینافوپ-پروپارژیل

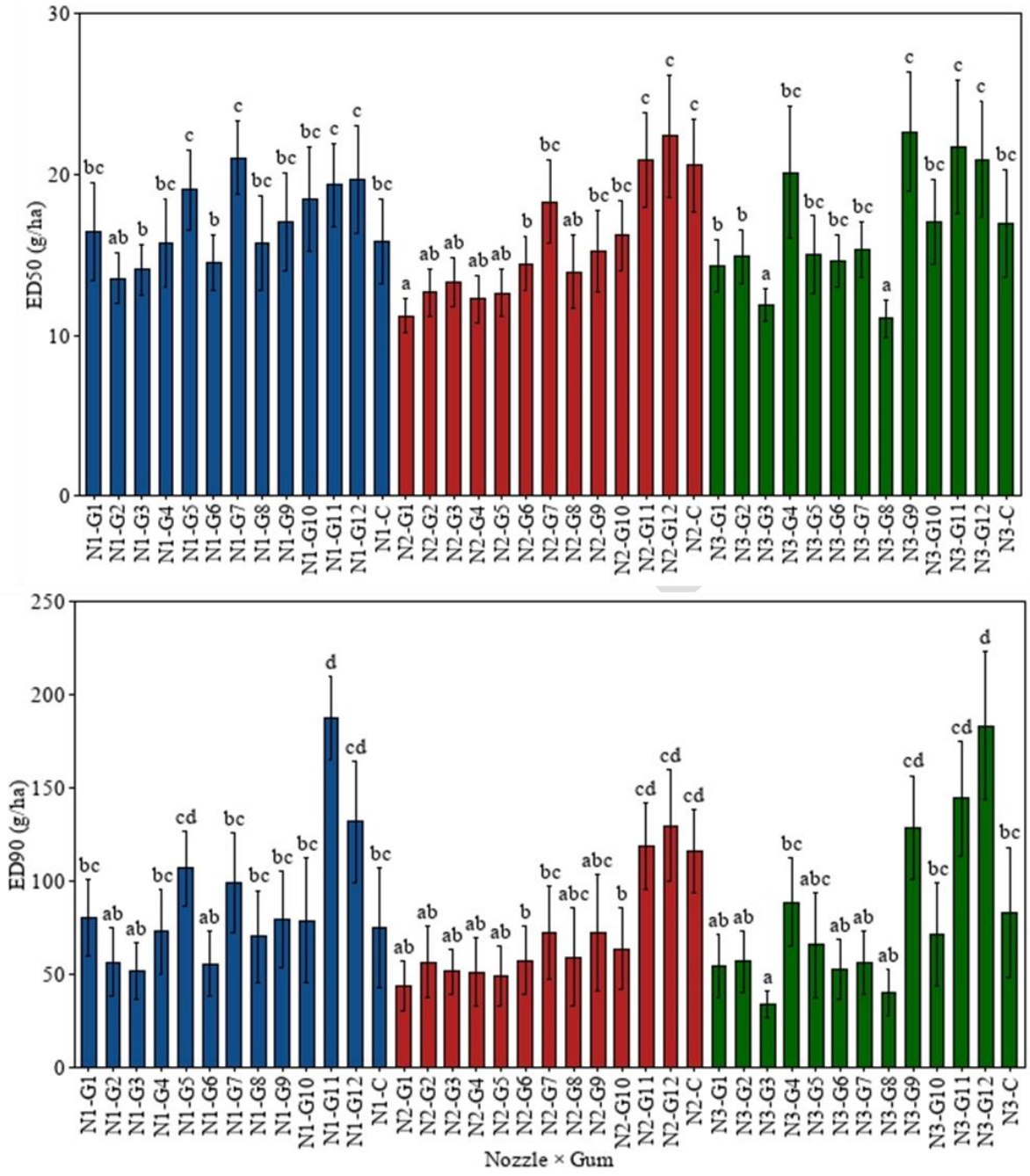
اثر نوع نازل و صمغ بر مقادیر ED_{50} و ED_{90} کلودینافوپ-پروپارژیل در شکل ۹ نشان داده شده است. در پاشش‌ها با نازل‌های استاندارد، ضد بادبردگی و القاءکننده هوا، مقدار ED_{50} در تیمار شاهد بدون صمغ به ترتیب برابر با ۱۵/۸، ۲۰/۵ و ۱۶/۹ گرم ماده مؤثره در هکتار به‌دست آمد. کمترین مقدار ED_{50} با پاشش محلول حاوی صمغ پکتین توسط نازل ضد بادبردگی و محلول حاوی صمغ‌های گوار یا آلژینات سدیم توسط نازل القاءکننده هوا مشاهده شد. با این حال، در مورد ED_{90}، کمترین مقدار تنها در تیمار محلول حاوی صمغ گوار همراه با نازل القاءکننده هوا به دست آمد. در بین پاشش‌ها با نازل استاندارد، بجز در مورد افزودن صمغ عربی، افزودن صمغ‌ها به محلول پاشش تأثیری بر مقدار ED_{50} و ED_{90} نداشت. در بین پاشش‌ها با نازل ضد بادبردگی، افزودن صمغ‌های پکتین، سلولز، گوار، کنجاک، دکستران، گزانتان و آلژینات سدیم سبب کاهش مقدار ED_{50} و افزودن صمغ‌های پکتین، سلولز، گوار، کنجاک، دکستران، گزانتان و گوار سبب کاهش مقدار ED_{90} شد. در بین پاشش‌ها با نازل القاءکننده هوا، افزودن صمغ‌های گوار و آلژینات سدیم سبب کاهش مقدار ED_{50} و افزودن صمغ

گوار سبب کاهش مقدار ED_{90} شد. این نتایج نشان می‌دهد که در پاشش‌ها توسط نازل ضد بادبردگی نیاز بیشتری به حضور صمغ‌ها در محلول احساس می‌شود و از ۱۲ نوع صمغ استفاده شده ۸ نوع صمغ باعث بهبود کارایی علف‌کش شده است.

مطالعات قبلی (Samples *et al*., 2021; Hewitt, 2024) نیز بیانگر آن است که استفاده از مواد افزودنی صمغی مانند گوار همراه با نازل‌های القاءکننده هوا می‌تواند پوشش بهتری بر سطح برگ علف‌های هرز ایجاد کند، به‌طوری که کارایی علف‌کش حتی با وجود قطرات درشت حفظ شد. علاوه بر این، دی کوور و همکاران (De Cauwer *et al*. ,2023) نشان دادند نازل‌های کاهنده فرار از جمله نازل‌های القاءکننده هوا، در صورت دزّ مناسب، قادر به حفظ کارایی علف‌کش‌ها هستند. همچنین، مطالعه‌ی ژانگ و شیونگ (Zhang and Xiong., 2021) نشان داد که صمغ گوار به دلیل ویژگی‌های چسبانندگی خود می‌تواند موجب تشکیل قطرات پایدارتر و کاهش فرار در طی فرآیند قطره‌سازی شود که این امر در نهایت به بهبود یکنواختی پاشش و افزایش کارایی علف‌کش منجر می‌شود.

نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که انتخاب نوع صمغ لزوماً نباید براساس توانایی آن در افزایش گرانروی محلول پاشش علف‌کش انجام گیرد. به‌طوری‌که افزودن صمغ‌های سلولز، کنجاک و ژلان منجر به بالاترین گرانروی محلول پاشش کلودینافوپ–پروپارژیل شد ولی تأثیری بر کارایی آن علیه یولاف وحشی زمستانه نداشت. به‌طور کلی، صمغ‌ها توانایی در کاهش زاویه تماس قطره با سطح برگ را تا حدودی دارند و منجر به پخش شدن قطره روی سطح برگ می‌شوند ولی صمغ های پکتین، کنجاک، دکستران و گزانتان از این قاعده مستثناء هستند و منجر به کاهش پخش‌شدگی قطره روی سطح برگ می‌شوند. افزودن صمغ ژلان به محلول پاشش کلودینافوپ–پروپارژیل تأثیری بر کارایی آن علیه یولاف وحشی زمستانه نداشت ولی با توجه به توانایی آن در افزایش گرانروی محلول پاشش، افزودن آن به محلول پاشش در کاهش فرار قطرات پاشش تحت شرایط وزش باد می‌تواند مفید باشد. همچنین، با توجه به توانایی صمغ گزانتان در افزایش مدت زمان تبخیر قطره، افزودن آن به محلول پاشش در شرایط اقلیمی گرم و خشک می‌تواند مفید باشد. به‌طور کلی، در شرایط پاشش با نازل ضد بادبردگی، نیاز قابل توجهی به افزودن صمغ به محلول پاشش وجود داشت. به عنوان بهترین تیمار پژوهش حاضر، کاربرد محلول پاشش کلودینافوپ–پروپارژیل حاوی صمغ گوار توسط نازل القاءکننده هوا قابل توصیه است. با وجود نتایج مثبت برخی صمغ‌ها در بهبود عملکرد محلول پاشش، ارزیابی اقتصادی کاربرد آن‌ها در شرایط مزرعه برای ارائه توصیه نهایی به کشاورزان ضروری است.



شکل ۹- اثر نوع نازل (N1: نازل استاندارد، N2: ضدبادبردگی، N3: القاءکننده هوا) و نوع صمغ (پکتین (G1)، سلولز (G2)، گوار (G3)، کنجاک (G4)، دکستران (G5)، گزانتان (G6)، کاراگینان (G7)، آلژینات سدیم (G8)، فارسی (G9)، کتیرا (G10)، عربی (G11)، ژلان (G12) و شاهد بدون صمغ (C)) بر کاهش ۵۰ و ۹۰ درصدی وزن خشک یولاف وحشی زمستانه (ED_{50} و ED_{90}). میله‌های روی ستون‌ها نشان دهنده خطای استاندارد هستند. وجود حروف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح احتمال یک درصد طبق آزمون توکی است.

Figure 9– Effect of nozzle type (N1: standard, N2: anti-drift, N3: air-induction flat-fan nozzle) and gum type (pectin (G1), CMC (G2), guar (G3), konjac (G4), dextran (G5), xanthan (G6), carrageenan (G7), sodium alginate (G8), persian (G9), tragacanth (G10), arabic (G11), gellan (G12), and control without gum (C)) required to reduce %50 and %90 of the dry matter of winter wild oat (ED50 , ED90). Bars represent standard errors. Means followed by similar letters don't show a significant difference based on Tukey's test at 1% probability.

References

1. Akbarabadi, A., Ismaili, A., Kahrizi, D., & Nazarian Firouzabadi, F. (2019). Resistance determination of the ACCase-inhibiting herbicide of clodinafop-propargyl in *Avena ludoviciana* (Durieu), and study of their interaction using molecular docking and simulation. *Molecular Biology Reports*, *46*(1), 415-424. https://doi.org/10.1007/s11033-018-4489-9
2. Aliverdi, A. (2023). Biological, surface, and wetting behavior of bio-surfactants tank-mixed with trifloxysulfuron-sodium on Sorghum halepense. *Pest Management Science*, *79*(4), 1578-1584. https://doi.org/10.1002/ps.7330
3. Alves, G.S., Kruger, G.R., & Cunha, J.P.A.R.D. (2018). Spray drift and droplet spectrum from dicamba sprayed alone or mixed with adjuvants using air-induction nozzles. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, *53*(6), 693-702. https://doi.org/10.1590/S0100-204X2018000600005
4. 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
5. Baucom, R.S., Iriart, V., Soble, A., Armstrong, M.R., & Ashman, T.L. (2025). Off-target drift of the herbicide dicamba disrupts plant–pollinator interactions via novel pathways. *New Phytologist*, *247*(2), 850-862. https://doi.org/10.1111/nph.20438
6. 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
7. 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 the mortality of broad leaf weeds. *ACS Omega*, *7*(23), 19964-19978. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c01782
8. Bolwerk, G.A., Cooper, G.A., Leffler, A.J., & Perkins, L.B. (2024). Simulated herbicide drift effects on seed germination, seedling emergence, and seedling growth of native plants of the northern Great Plains. *Environmental Toxicology and Chemistry*, *43*(11), 2387-2397. https://doi.org/10.1002/etc.5982
9. Bird, R. B., Stewart, W. E., & Lightfoot, E. N., (2002). TRANSPORT PHENOMENA. Wiley., New York.
10. Brankov, M., Simić, 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
11. Cedergreen, N., & Olesen, C.F. (2010). Can glyphosate stimulate photosynthesis? *Pesticide Biochemistry and Physiology*, *96*(3), 140-148. https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2009.11.002

12. Chourey, S., & Singh, H. (2023). Drift reduction and environmental impact. *International Journal of Explorin Emerging Trendsin Engineering*, *1*(1), 451-455. https://doi.org/10.5355/kuey.v30i5.3511
13. Constantin, J., Oliveira Júnior, R.S.D., Brandão Filho, J.U., Callegari, O., Pagliari, P.H., & de Arantes, J.G. (2007). Effect of sub-lethal dosages of 2,4-D on tobacco yield and crop susceptibility as a function of its development stage. *Engenharia Agrícola, 27,* 30-34. https://doi.org/10.1590/S0100-69162007000200005
14. Creech, C.F., Henry, R.S., Fritz, B.K., and Kruger, G.R. (2015). Influence of herbicide active ingredient, nozzle type, orifice size, spray pressure, and carrier volume rate on spray droplet size characteristics. *Weed Technology*, *29,* 298–310. https://doi.org/10.1614/WT-D-14-00049.1
15. Dabestani, M., Kadkhodaee, R., Phillips, G. O., & Abbasi, S. (2018). Persian gum: A comprehensive review on its physicochemical and functional properties. *Food Hydrocolloids, 78,* 92-99. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.06.006
16. Dayan, F.E., & Zaccaro, M.L.D.M. (2012). Chlorophyll fluorescence as a marker for herbicide mechanisms of action. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, *102*(3), 189-197. https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2012.01.005
17. De Cauwer, B., De Meuter, I., De Ryck, S., Dekeyser, D., Zwertvaegher, I., & Nuyttens, D. (2023). Performance of drift-reducing nozzles in controlling small weed seedlings with contact herbicides. *Agronomy*, *13*(5), 1342. https://doi.org/10.3390/agronomy13051342
18. Ferguson, J.C., Chechetto, R.G., Adkins, S.W., Hewitt, A.J., Chauhan, B.S., Kruger, G.R., & O'Donnell, C.C. (2018). Effect of spray droplet size on herbicide efficacy on four winter annual grasses. *Crop Protection*, *112,* 118-124. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2018.05.020
19. Fagliari, J.R., Oliveira Jr., R.S.D., & Constantin, J. (2005). Impact of sublethal doses of 2,4-D, simulating drift, on tomato yield. *Journal of Environmental Science and Health, Part B, 40*(1), 201-206. https://doi.org/10.1081/PFC-200034327
20. Gomiero Polli, E. (2021). The influence of adjuvants on physical properties, droplet-size, and efficacy of glufosinate and dicamba plus glyphosate solutions. https://digitalcommons.unl.edu/agronhortdiss
21. Hardi. International A/S. (n.d.) Nozzle product guide. Information website: https://hardi.co.za
22. Hasanuzzaman, M., Zhou, M., & Shabala, S. (2018). Physiological and morphological mechanisms mediating plant tolerance to osmotic stress: balancing tolerance and productivity. In: *Climate Change and Crop Production,* 35-57. CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781315391861-3
23. Hewitt, A.J. (2024). Adjuvant use for the management of pesticide drift, leaching and runoff. *Pest Management Science*. https://doi.org/10.1002/ps.825
24. Kalilian, A., Mandani, M., Bagheri, A., & Khorramivafa, M. (2023). Evaluation of radiation absorption and utilization efficiency in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) and wild oat (*Avena ludoviciana* L.) under nitrogen fertilizer levels and increasing densities of wild oat.

Iranian Journal of Crop Sciences, *54*(1), 59–79. (in Persian). http://doi.org/20.1001.1.20084811.1402.54.1.5.5
25. Jomantas, T., Lekavičienė, K., Steponavičius, D., Andriušis, A., Zaleckas, E., Zinkevičius, R., & Kemzūraitė, A. (2023). The influence of newly developed spray drift reduction agents on drift mitigation by means of wind tunnel and field evaluation methods. *Agriculture*, *13*(2), 349. https://doi.org/10.3390/agriculture13020349
26. Kannan, N., Read, Q., & Zhang, W. (2024). An algae-based polymer material as a pesticide adjuvant for mitigating off-target drift. *Heliyon*, *10*(16). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35510
27. Lan, X., Wang, J., Chen, P., Liang, Q., Zhang, L., & Ma, C. (2024). Risk assessment of environmental and bystander exposure from agricultural unmanned aerial vehicle sprayers in golden coconut plantations: effects of droplet size and spray volume. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *282*, 116675. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116675
28. Liu, Z.M., Lin, J.Y., Zheng, H.L., & Pang, Y. (2020). Effect of viscosities on the spray characteristics of pressure swirl nozzle. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, *13*(3), 861-870. https://doi.org/10.29252/jafm.13.03.30010
29. Meng, Y., Liu, X., Wu, Q., Chen, W., Chen, W., Zhang, Y., & Han, Y. (2025). Comprehensive study on the effects of peanut leaf characteristics and tank-mix adjuvant on droplet-spreading behavior. *ACS Omega*, *10*(12), 11994-12001. https://doi.org/10.1021/acsomega.4c09553
30. Moraes, J., Kruger, G., Luck, J., Antuniassi, U., & Hoffmann, W. (2019). Effect of adjuvants on physical properties of glyphosate and PPO-inhibiting herbicide spray mixtures. In: *39th Symposium on Pesticide Formulation and Delivery Systems: Innovative Formulation, Application and Adjuvant Technologies for Agriculture*, 64-74. ASTM International. https://doi.org/10.1520/STP161920180130
31. Moradi, M., Babaei, S., Tahmasebi, I., & Nosrati, I. (2023). Investigation of resistance to clodinafop-propargyl herbicide in wild oat (*Avena ludoviciana*) populations from wheat fields in some western and southwestern regions of Iran. *Applied Research in Plant Protection*, *12*(4), 461–473. (in Persian). https://doi.org/10.22034/arpp.2023.16898
32. Polli, E.G., Alves, G.S., de Oliveira, J.V., & Kruger, G.R. (2021). Physical–chemical properties, droplet size, and efficacy of dicamba plus glyphosate tank mixture influenced by adjuvants. *Agronomy*, *11*(7), 1321. https://doi.org/10.3390/agronomy11071321
33. Oliveira, R.B.D., Assunção, M.C., Theodoro, J.G.C., Paduan, N.A., Tonchi, R., & Ferreira, S.D. (2025). Espalhamento e evaporação de caldas de glufosinato com adjuvantes em diferentes plantas daninhas. *Ciência e Agrotecnologia*, *49*, e021124. https://doi.org/10.1590/1413-7054202549021124
34. Phillips, G.O., & Williams, P.A. (Eds.). (2021). Handbook of hydrocolloids (3rd ed.). Woodhead Publishing.
35. Ravi, S., Rangasami, S.R., Ajaykumar, R., Sathiya, K., Rajanbabu, V., Kumar, D.R., & Infanta, S.C. (2024). Quantitative variables analysis, growth and yield of groundnut (*Arachis hypogaea*

L.) under different weed management practices. *Legume Research*, *47*(8), 1396-1403. https://doi.org/10.18805/LR-5326

36. Ritz, C., Baty, F., Streibig, JC., Gerhard, D. (2015). Dose-response analysis using R. *PLoS One 10*(12): e0146021. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0146021
37. Ronchi, C.P., Silva, A.A., Terra, A.A., Miranda, G.V., & Ferreira, L.R. (2005). Effect of 2,4-D chlorophenoxyacetic acid applied as a herbicide on fruit shedding and coffee yield. *Weed Research*, *45*(1), 41-47. https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2004.00427.x
38. Rostamabadi, H., Demirkesen, I., Colussi, R., Roy, S., Tabassum, N., de Oliveira Filho, J. G., & Falsafi, S. R. (2024). Recent trends in the application of films and coatings based on starch, cellulose, chitin, chitosan, xanthan, gellan, pullulan, Arabic gum, alginate, pectin, and carrageenan in food packaging. *Food Frontiers*, *5*(2), 350-391. https://doi.org/10.1002/fft2.342.
39. 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
40. Silva, F.B., Vital, R.G., Batista, P.F., Costa, A.C., & Jakelaitis, A. (2016). Drift from herbicides application on cultivated and native plants: A review. *Revista Brasileira de Herbicidas*, *15*(1), 79-88. https://doi.org/10.7824/rbh.v15i1.436
41. Sorze, A., Valentini, F., Dorigato, A., & Pegoretti, A. (2023). Development of a xanthan gum based superabsorbent and water retaining composites for agricultural and forestry applications. *Molecules*, *28*(4), 1952. https://doi.org/10.3390/molecules28041952
42. Tuffi Santos, L.D., Iarema, L., Thadeo, M., Ferreira, F.A., & Meira, R.M.S.A. (2006). Características da epiderme foliar de eucalipto e seu envolvimento com a tolerância ao glyphosate. *Planta Daninha*, *24*, 513-520. https://doi.org/10.1590/S0100-83582006000300013
43. Wang, L., Xia, S., Zhang, H., Li, Y., Huang, Z., Qiao, B., & Liu, Y. (2024). Tank-mix adjuvants improved spray performance and biological efficacy in rice insecticide application with unmanned aerial vehicle sprayer. *Pest Management Science*, *80*(9), 4371-4385. https://doi.org/10.1002/ps.8143
44. Wang, X., Liu, Y., Wang, S., & Wang, S. (2024). Effects of spray adjuvants on droplet deposition characteristics in litchi trees under UAV spraying operations. *Agronomy*, *14*(9), 2125. https://doi.org/10.3390/agronomy14092125
45. Wang, X. N., He, X. K., Song, J. L., Wang, Z. C., Wang, C. L., Wang, S. L. (2018). Drift potential of UAV with adjuvants in aerial applications. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. *11*(5): 54-58. https:// 10.25165/j.ijabe.20181105.3185
46. Xu, L.Y., Zhu, H.P., Ozkan, H.E., Bagley, W.E., Derksen, R.C., & Krause, C.R. (2010). Adjuvant effects on evaporation time and wetted area of droplets on waxy leaves. *Transactions of the ASABE, 53*(1), 13-20. https://doi.org/10.13031/2013.29495

47. Xu, W., Leeladhar, R., Kang, Y.T., & Choi, C.H. (2013). Evaporation kinetics of sessile water droplets on micropillared superhydrophobic surfaces. *Langmuir*, *29*(20), 6032-6041. https://doi.org/10.1021/la400452e
48. Zhang, J., Xu, X., Lv, Y., Zhao, X., Song, J., Yu, P., & Zhao, E. (2024). Droplet deposition and efficacy of real-time variable-rate application of herbicides at reduced dose in winter wheat fields. *Agronomy*, *14*(1), 211. https://doi.org/10.3390/agronomy14010211
49. Zhang, X., & Xiong, L. (2021). Effect of adjuvants on the spray droplet size of pesticide dilute emulsion. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *619*, 126557. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126557
50. Zhang, Z., Yang, N., Yu, J., Jin, S., Shen, G., Chen, H., Yuzhen, N., Xiang, D., & Qian, K. (2023). Research progress of a pesticide polymer-controlled release system based on polysaccharides. *Polymers*, *15*(13), 2810. https://doi.org/10.3390/polym15132810
51. Zhong, L., Oostrom, M., Truex, M.J., Vermeul, V.R., & Szecsody, J.E. (2013). Rheological behavior of xanthan gum solution related to shear thinning fluid delivery for subsurface remediation. *Journal of Hazardous Materials*, *244*, 160-170. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.11.028

پیش انتشار