بسم الله الرحمن الرحیم

مؤسسه تحقیقات فنّی و مهندسی کشاورزی

دستورالعمل فنّی:
معیارهای انتخاب و ارزیابی پهپادسمپاش

تهیه و تدوین:
محمود صفری و نیکروز باقری

اعضای هیئت علمی مؤسسه تحقیقات فنّی و مهندسی کشاورزی

سال انتشار:
۱۴۰۰

وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
مؤسسه تحقیقات فنّی و مهندسی کشاورزی

نوع نوشتار: دستورالعمل فنّی
عنوان نوشتار: معیارهای انتخاب و ارزیابی پهپادسمپاش
نگارنده: محمود صفری و نیکروز باقری
ویراستار ادبی: فؤاد تاجیک
صفحه‌آرا: سمیه وطن‌دوست
ناشر: مؤسسه تحقیقات فنّی و مهندسی کشاورزی
شمارگان: محدود
نوبت چاپ: اول
سال انتشار: ۱۴۰۰

مسئولیت صحت مطالب با نگارندگان است.

شماره ثبت ٥٩٤٧٤ در مرکز فناوری اطلاعات و اطلاع‌رسانی کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی به تاریخ ۱٤۰۰/۰۲/۰٤

مخاطبان نشریه:

ارائه‌دهندگان خدمات پهپادسمپاش، ارزیابـان پهپادسـمپاش، کارشناسـان و تـرویج‌گـران کشاورزی

اهداف آموزشی:

شما خوانندگان گرامی در این دستورالعمل فنّی با:

- معیارهای فنّی و اقتصادی لازم برای انتخاب و ارزیابی پهپادسمپاش
- روش اندازه‌گیری و محاسبه معیارها

آشنا خواهید شد.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۱- مقدمه	۱
۲- معیارهای فنّی انتخاب و ارزیابی پهپادسمپاش	۲
۲-۱ ارزیابی آزمایشگاهی	۲
۲-۱-۱ سرعت پرواز	۲
۲-۱-۲ ارتفاع پرواز	۲
۲-۱-۳ وزن بار قابل‌حمل	۳
۲-۱-۴ مداومت پروازی	۳
۲-۱-۵ عرض کار مؤثر	۴
۲-۱-۶ بده پمپ	۵
۲-۱-۷ بده افشانک‌ها	۶
۲-۱-۸ واسنجی (کالیبراسیون)	۷
۲-۱-۹ بادبردگی	۸
۲-۱-۱۰ یکنواختی پاشش	۱۰
۲-۲- ارزیابی مزرعه‌ای	۱۲
۲-۲-۱ بادبردگی	۱۲
۲-۲-۲ مقدار پوشش‌دهی و نفوذ محلول سم در محصول	۱۸
۲-۲-۳ بازده مزرعه‌ای	۱۹
۲-۲-۴ انرژی مصرفی در هکتار	۲۰
۲-۲-۵ یکنواختی پاشش	۲۱
۲-۲-۶ اثربخشی سمپاشی	۲۳
۳- ارزیابی اقتصادی	۲۴
۴- ویژگی‌های فنّی ضروری پهپادسمپاش	۲۵
۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها	۲۶
۶- فهرست منابع	۲۷

۱- مقدمه

مبارزه با آفت‌ها و بیماری‌های گیاهی در تولید محصولات کشاورزی بسیار مهم است. طبق آمار فائو، حدود ۳۰ درصد از تلفات سالانه محصول در جهان، ناشی از علف‌های هرز، بیماری‌ها و آفات است (Lan *et al*., 2017). سمپاشی، همچنان مؤثرترین روش برای کنترل آفت‌ها و بیماری‌های گیاهی است. روش‌های متداول سمپاشی زمینی مانند استفاده از سمپاش‌های پشتی و تراکتوری در اراضی شیبدار و ارتفاع زیاد محصول، ناکارآمد است و هزینه‌های سمپاشی را افزایش می‌دهد.

سمپاشی هوایی با هواپیما به‌طور گسترده‌ای در ترکیب با سمپاش‌های زمینی در آمریکای شمالی، اروپا و برخی مناطق دیگر برای مزارع بسیار بزرگ استفاده می‌شود. این سمپاش‌ها برای مزرعه‌های کوچک یا باغ‌ها، کارایی ندارند و در این مناطق، فناوری پرنده بدون سرنشین (UAV)، کاربردهای ویژه‌ای دارد. در مناطق صعب‌العبور مانند شالیزارها، تپه‌ها و کوه‌ها، می‌توان از پهپادها به‌صورت انعطاف‌پذیر و مؤثر و بدون‌نیاز به باند پرواز و فرود، برای کنترل گسترش آفات، علف‌های هرز و بیماری‌ها استفاده کرد (Huang *et al*., 2018).

اثربخش بودن سمپاشی با پهپاد، وابسته به انتخاب درست و استفاده مناسب از آن‌ها با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی، نوع محصول و معیارهای فنّی و اقتصادی است. دانستن این معیارها در انتخاب و استفاده از پهپادسمپاش دارای اهمیت فراوانی است. از همین رو، در این دستورالعمل، عوامل تأثیرگذار، معیارهای فنّی و اقتصادی لازم برای انتخاب پهپادسمپاش معرفی و روش اندازه‌گیری این معیارها بیان شده است. این دستورالعمل به‌گونه‌ای تدوین‌شده است که مخاطبان، به‌راحتی بتوانند بامطالعه آن و انجام آزمون‌ها، از ویژگی‌های فنّی سمپاش آگاه شوند و نوع مناسب آن را انتخاب کنند.

۲- معیارهای فنّی انتخاب و ارزیابی پهپادسمپاش

برای انتخاب و ارزیابی پهپادسمپاش مناسب و همچنین مقایسه کارایی آن‌ها، شناسایی درست معیارهای فنّی لازم است. تعدادی از معیارها درآزمایشگاه و تعدادی از آن‌ها در مزرعه ارزیابی می‌شود.

۲-۱ ارزیابی آزمایشگاهی

مهم‌ترین معیارهایی که در شرایط آزمایشگاه ارزیابی می‌شود عبارتند از: سرعت و ارتفاع پرواز، حداکثر وزن قابل‌حمل، مداومت پرواز، عرض کار مؤثر، یکنواختی پاشش، بده خروجی پمپ، بده خروجی افشانک‌ها و واسنجی (کالیبراسیون) پهپادسمپاش.

۲-۱-۱ سرعت پرواز

به طور معمول، محدوده سرعت پروازی پرنده در دفترچه راهنمای سازنده نوشته می‌شود. برای بررسی درستی ادعای شرکت سازنده، یک سرعت‌سنج بر روی پهپاد نصب کنید و با پرواز دستگاه با حداقل و حداکثر سرعت، عدد سرعت‌سنج را ثبت کنید. برای اطمینان از نتایج، آزمون را سه بار تکرار کنید و از اعداد سرعت میانگین بگیرید. عدد به‌دست آمده را با عدد اعلام‌شده شرکت سازنده مقایسه کنید (Bagheri, 2016).

۲-۱-۲ ارتفاع پرواز

مانند روش تعیین سرعت، کمترین و بیشترین ارتفاع پروازی پرنده در دفترچه راهنمای سازنده ارائه‌شده است. به کمک ثبت داده‌های مربوط به حسگرهای راداری نصب‌شده روی پرنده، حداقل و حداکثر ارتفاع پروازی پرنده را

به‌دست آورید (باقری، ۱۳۹۴). حسگرهای راداری طوری طراحی‌شده‌است که پهپاد، حداقل فاصله را باهدف رعایت کند و از صدمه به دستگاه در برخورد با هدف جلوگیری می‌کند. پهپاد، باید توانایی پرواز در محدوده ارتفاعی موردنیاز برای سمپاشی را در انواع محصولات زراعی و باغی داشته باشد. ارتفاع مناسب پرواز برای سمپاشی محصول‌های مختلف، متفاوت است (Zhang *et al.*, 2020).

۲-۱-۳ وزن قابل‌حمل

بیشترین وزن قابل‌حمل در یک پهپادسمپاش، برابر با وزن مخزن پر از محلول سمِ نصب‌شده بر روی پرنده است. در دفترچه راهنمای سازنده نیز بیشترین وزن قابل‌حمل اعلام می‌شود (Bagheri, 2016). برای دستیابی به عملکرد مطلوب، تأکید می‌شود پهپاد با بار بیش از وزن قابل حمل تعیین‌شده، پرواز نکند.

۲-۱-٤ مداومت پروازی

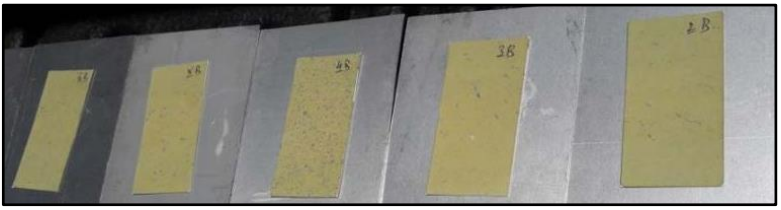
مداومت پروازی، مدت‌زمانی است که پهپاد می‌تواند تا اتمام شارژ باتری‌ها به پرواز ادامه دهد. مداومت پروازی به تعداد و ظرفیت باتری‌ها و شرایط پرواز بستگی دارد. توان باتری‌ها در شرایط متفاوت مانند سرعت زیاد باد، حرکت در خلاف جهت باد، افزایش وزن بار و...، بیشتر مصرف شده و باعث زودتر خالی‌شدن باتری می‌شود. بنابراین، برای پرواز بهتر و جلوگیری از آسیب به پهپاد، باید توجه شود که مداومت پروازی اعلام‌شده توسط سازنده، حداکثر مداومت پروازی پهپاد در شرایط معمولی است و بسته به شرایط، این مقدار می‌تواند

کـاهش یابـد (بـاقری، ۱۳۹۴). بـرای مثـال، در پهپـاد مـدل High Sky 1805 مداومت پرواز، ۱۸–۱۵ دقیقه در شرایط عادی است.

۲-۱-۵ عرض کار مؤثر

عـرض کـار مـؤثر در پهپادسـمپاش بـر اسـاس فاصـله بـین دورتـرین افشـانک‌هـا اندازه‌گیری می‌شود. ارتفاع پرواز پهپـاد و نـوع افشـانک نیـز بـر عـرض کـار مـؤثر تـأثیر مـی‌گـذارد. عـرض کـار مـؤثر در دفترچـه راهنمـای سـازنده نوشـته‌شـده اسـت. بـرای اندازه‌گیری عرض کار مؤثر، کـارت‌هـای حسـاس بـه آب را در فاصـله‌هـای یـک متـری (در صـورت امکـان، ۰/۵ متـر) و عمـود برجهـت حرکـت پهپـاد قـرار دهیـد. روی کـارت‌هـای حسـاس بـه آب، در هـر سـانتی‌متـر مربـع، بایـد ۳۰–۲۰ قطـره بـرای حشره‌کش‌ها و ۷۰–۵۰ قطـره بـرای قـارچ‌کـش‌هـا وجـود داشـته باشـد. ایـن محـدوده، بـه‌عنـوان عـرض کـار مـؤثر در نظـر گرفتـه مـی‌شـود. در صـورت پـایین بـودن تـراکم قطرات، می‌توان دو افشـانک دیگـر بـه دسـتگاه اضـافه کـرد؛ بـه‌طـوری‌کـه در قسـمت وسـط عـرض کـار، قسـمت کـم تـراکم را پوشـش دهـد. مقـدار عـرض کـار مـؤثر در واسنجی سـمپاش اسـتفاده مـی‌شـود. اسـتفاده از پهپـاد بـرای علـف‌هـای هـرز، توصـیه نشـده اسـت. عـرض کـار پهپادسـمپاش هـای موجـود در کشـور (مـدل High Sky 1805) بـا ۲ افشـانک بـه فاصـله ۱/۵ متـر، در ارتفـاع ۱/۵–۱ متـری، بـین ۴–۳ متـر اسـت. عـرض مـؤثر پاشـش ۳ متـر و در ارتفـاع یـک متـری از محصـول بـه ۴ متـر می‌رسد. در شکل‌هـای ۱ و ۲ نحـوه انـدازه‌گیـری عـرض مـؤثر پاشـش نشـان داده‌شـده است.

شکل ۱- روش اندازه‌گیری عرض کار مؤثر پهپادسمپاش



شکل ۲-کارت‌های حساس به آب حاوی قطرات لازم برای هدف موردنظر

۲-۱-٦ بده پمپ

برای اندازه‌گیری بده پمپ، ابتدا مخزن را از آب پرکنید. سپس شیلنگ خروجی از پمپ به افشانک‌ها را جدا کنید و سر شیلنگ‌ها را درون استوانه مدرج قرار دهید (شکل ۳). حجم محلول جمع‌شده در استوانه را در مدت یک دقیقه ثبت کنید. این کار را سه بار تکرار و و داده‌های بده و میانگین داده‌ها را در

جدول ۱ ثبت کنید. اگر بده پمپ در تکرارهای مختلف عدد ثابتی نبود، لازم است پمپ را تعویض کنید (سیدین، ۱۳۹۸).

جدول ۱- اندازه‌گیری بده پمپ

ردیف	حجم محلول (ml)	زمان (min)	بده (ml/min)
۱			
۲			
۳			
۴			
۵			
متوسط			

شکل ۳- اندازه‌گیری بده پمپ

۲-۱-۷ بده افشانک‌ها

برای اندازه‌گیری مقدار بده افشانک‌ها، مخزن را از آب پر کنید. زیر هر یک از افشانک‌ها یک استوانه مدرج قرار دهید و سپس با خروج محلول از مخزن، بده

افشانک‌ها را به‌طور همزمان اندازه‌گیری کنید (شکل ۴). برای یکسان‌سازی بده افشانک‌ها، مقدار خروجی از هر افشانک را توسط شیر کنترل تنظیم کنید.

شکل ٤- اندازه‌گیری بده افشانک‌ها

۲-۱-۸ واسنجی (کالیبراسیون)

پیش از سمپاشی، پهپادسمپاش باید ازنظر مقدار محلول مصرفی واسنجی شود. در واسنجی، به‌جای محلول سم از آب استفاده می‌شود. برای واسنجی پهپادسمپاش، ابتدا پهپاد را روی یک سطح صاف قرار دهید. سپس یک ظرف مدرج زیر هر یک از افشانک‌ها بگذارید. مقدار آب جمع‌شده را در هر یک از ظرف‌ها در زمان یک دقیقه اندازه‌گیری کنید. برای افزایش دقت، حداقل سه بار این کار را انجام داده و میانگین داده‌ها را محاسبه کنید. مقدار آب جمع‌شده در هریک از افشانک‌ها را باهم جمع بزنید. با این روش، مقدار محلول مصرفی برحسب لیتر در دقیقه به‌دست می‌آید (باقری و صفری، ۱۳۹۹).

برای پاشش مقدار معینی محلول در هکتار، بده خروجی مجموع افشانک‌ها، سرعت پیشروی و عرض پاشش را تعیین کنید. سپس مقدار محلول مصرفی (لیتر بر دقیقه) را از رابطه ۱ محاسبه کنید. چنانچه مقدار به‌دست‌آمده با مقدار توصیه

شده متفاوت بود، با تغییر مقدار بده و سرعت پیشروی می‌توان به مقدار لیتر در هکتار موردنظر رسید (Chen *et al*., 2020).

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

که در آن

V= سرعت پیشروی (کیلومتر در ساعت)

Q= بده برحسب لیتر در دقیقه

Q= مقدار محلول در هکتار (لیتر در هکتار)

W= عرض کار مؤثر (متر) است.

۲-۱-۹ باد بردگی

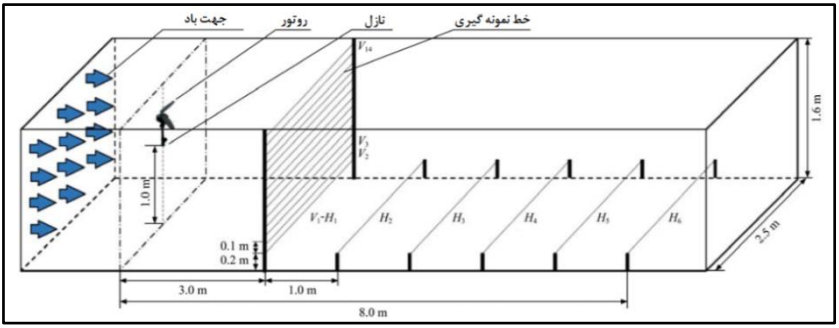
در مقایسه با سمپاش‌های زمینی معمولی، قطرات پاشیده شده از پهپادسمپاش به دلیل پاشش حجم کم[1] (LV) یا حجم بسیارکم[2] (ULV) با قطرات ریز بیشتر و همچنین ارتفاع پرواز بالاتر، بیشتر در معرض خطر بادبردگی هستند. انتخاب نامناسب پارامترهای پرواز و شرایط هواشناسی، منجر به کاهش اثر سموم دفع آفات، مسمومیت گیاهی و افزایش آلودگی محیطزیست می‌شود. بنابراین، ارزیابی مقدار باد بردگی در سمپاشی ضروری است. روش بررسی بادبردگی شامل روش‌های مستقیم و غیرمستقیم (مزرعه‌ای) است.

در روش مستقیم، از تونل باد (شکل ۵) و شرایط کنترل‌شده استفاده کنید (Wang *et al*., 2020). یکی از واحدهای پاشش شامل چرخانه (ملخ)، موتور و افشانک را بر روی یک شاسی با ارتفاع قابل تنظیم نصب کنید. از دمنده‌های کناری (برای ایجاد بادبردگی به‌صورت افقی) و در جهت عمود بر مسیر حرکت

1. Low Volume
2. Ultra Low Volume

ملخ استفاده کنید و اثر عواملی نظیر نوع افشانک، اندازه افشانک و سرعت پرواز را در دو شرایط بادی به سمت پایین و افقی (خارجی) اندازه‌گیری کنید.

شکل ۵- تونل باد برای اندازه‌گیری بادبردگی

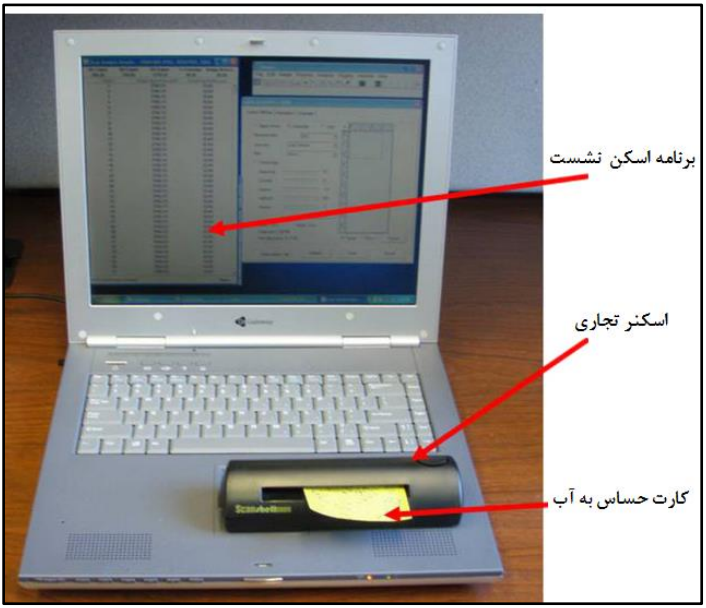


شکل ٦- طرح واره تونل باد

در شکل ۶ ابعاد تونل باد، موقعیت افشانک و چرخانه نشان داده‌شده است. عرض پاشش ۲/۱۳ متر است. در این سامانه اندازه‌گیری بادبرگی آزمایشگاهی که بر اساس استاندارد ایزو (۲۲۸۵۶) ساخته‌شده است، ارتفاع افشانک را ثابت در نظر بگیرید (یک متر). میزان بادبردگی را در یک صفحه عمود بر جریان هوا و به فاصله ۳ متری از افشانک و یک صفحه دیگر به‌موازات زمین و در ارتفاع ۰/۲ متری از سطح افق اندازه‌گیری کنید. محلول روی جمع کننده (کاغذ فیلتر) پاشیده می‌شود. سیزده خط نمونه‌برداری عمودی بافاصله ۰/۱ متر برای تعیین مشخصات عمودی بادبردگی، و ۵ خط نمونه‌برداری افقی برای تعیین بادبردگی افقی با فاصله ۴ ، ۵ ، ۶ ، ۷ و ۸ متر از یکدیگر در نظر بگیرید. در محلول پخش‌شده، از محلول ردیاب قرمزرنگ پیرانین ۱۲۰ درصد با غلظت یک گرم بر لیتر استفاده کنید (Wang *et al*., 2020).

۲-۱-۱۰ یکنواختی پاشش

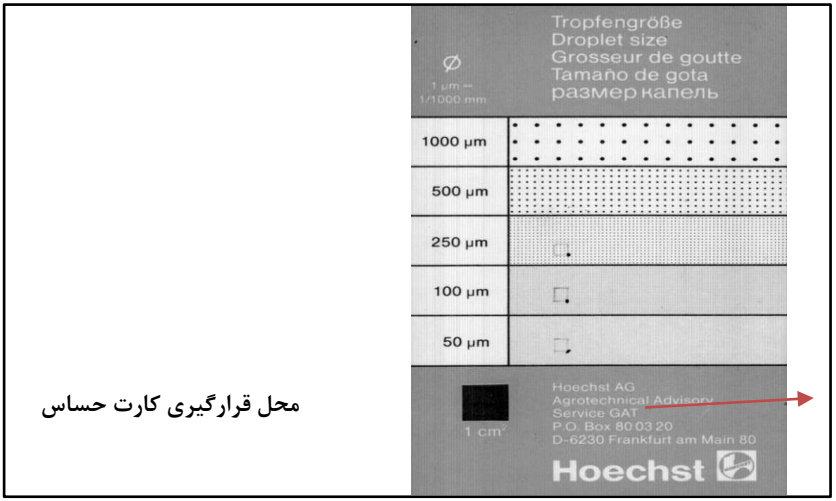
معیار یکنواختی پاشش، ضریب کیفیت پاشش است که از تقسیم قطر میانه حجمی بر قطر میانه عددی به دست می‌آید. برای اندازه‌گیری قطر میانه حجمی و قطر میانه عددی از کارت‌های حساس به آب استفاده می‌شود. در هنگام سمپاشی، کارت‌های حساس به آب طبق شکل ۱، قرار داده می‌شوند. پس از سمپاشی، کارت‌های حساس جمع‌آوری و برای تعیین یکنواختی پاشش، به‌وسیله اسکنر ویژه (شکل ۷) تجزیه‌وتحلیل می‌شود. تعداد قطره‌ها و قطر متوسط حجمی و عددی و در نهایت ضریب کیفیت سمپاشی تعیین می‌شود (Zhua *et al*., 2011).



شکل ۷- دستگاه اسکنر برای تعیین یکنواختی پاشش

بیشتر مواقع کارت حساس با نمونه‌های استاندارد مقایسه می‌شود و قطر قطره‌ها با این روش و با دقت کمتر تعیین می‌شود (شکل ۸).

ضریب کیفیت پاشش آرمانی برابر یک است و هر چه این عدد به یک نزدیک باشد، نشانه کیفیت بهتر سمپاشی است. در عمل، با توجه به شرایط کار، نوع افشانک و سمپاش، دستیابی به این کیفیت غیرممکن است.



شکل ۸- نمونه استاندارد برای تعیین یکنواختی پاشش و اندازه قطره‌ها

۲-۲- ارزیابی مزرعه‌ای

در ارزیابی مزرعه‌ای پهپاد، عواملی مانند بادبردگی، مقدار نشست و نفوذ قطرات سم در داخل محصول، یکنواختی قطره‌ها (اندازه و تعداد قطره‌ها)، اثربخشی، ظرفیت‌های تئوری و مؤثر، انرژی مصرفی و بازده مزرعه‌ای اندازه‌گیری می‌شود.

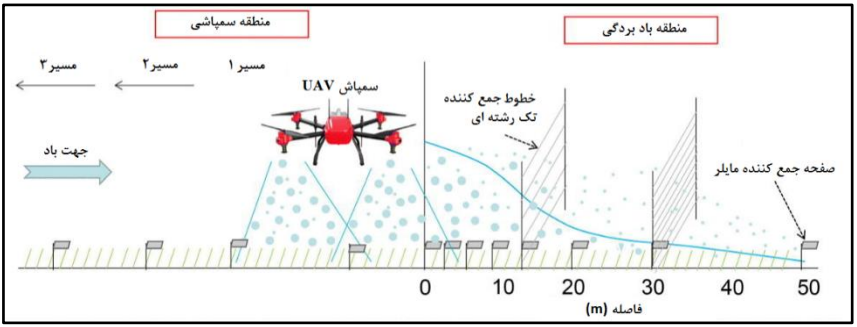
۲-۲-۱ *بادبردگی*

آزمایش مزرعه‌ای برای اندازه‌گیری مقدار واقعی پاشش در فضای باز و در شرایط معمولی مزرعه است و واقعی‌ترین روش اندازه‌گیری بادبردگی محسوب می‌شود.

چندین روش برای اندازه‌گیری بادبردگی وجود دارد. برخی از پرکاربردترین آن‌ها، روش شیمیایی و سامانه‌های LIDAR (تابان‌دن لیزر به هدف و تجزیه‌وتحلیل نور بازتاب شده) هستند.

روش شیمیایی بر اساس استخراج سموم دفع آفات در هوا و توسط روش‌های کروماتوگرافی انجام می‌شود. برای شبیه‌سازی انتقال سموم دفع آفات در هوا، از ردیاب‌ها استفاده می‌شود. رایج‌ترین ردیاب‌ها، عبارت از رنگ‌های قابل‌مشاهده (فلورسنت)، نمک‌های فلزی و ایزوتوپ‌های رادیواکتیو است.

در روش شیمیایی، برای اندازه‌گیری بادبردگی محصول‌های زراعی از جمع‌کننده‌های تک‌رشته‌ای نصب‌شده روی دو ستون عمودی و برای نشست محلول سم از جمع کننده‌های Mylar استفاده کنید (شکل ۹). این جمع‌کننده‌ها تا فاصله ۵۰ متری از مرز مزرعه نصب می شود. هرچه فاصله نصب بیشتر شود، باید فاصله جمع‌کننده‌ها نیز بیشتر شود. جهت سمپاشی را عمود بر مسیر وزش باد انجام دهید. نقطه آغازین مسیر سمپاشی از نقطه صفر و مطابق شکل ۹ باشد. ابتدا، برای حمل تا آزمایشگاه، مواد رنگی جمع‌شده روی کارت‌های فیبری را خشک کنید و سپس در آزمایشگاه با آب مقطر شست‌وشو دهید. در محلول حاصل از شست‌وشو، درصد ماده رنگی را با دستگاه فلوریمتر تعیین و درصد بادبردگی را از رابطه ۳، محاسبه کنید. با توجه به دسترسی نداشتن به جمع‌کننده‌های ذکرشده در داخل کشور، می‌توان از کارت حساس به آب استفاده نمود. این کارت‌ها مطابق شکل ۹ به‌جای جمع کننده‌ها نصب و مقدار نشست محلول سم در داخل مزرعه و بادبردگی در خارج از مزرعه با آن تعیین می‌شود (Xinyu *et al*., 2014).



شکل ۹- بادبردگی در مزرعه و موقعیت جمع کننده‌ها

به‌منظور تعیین درصد بادبردگی از روابط ۲ و ۳ استفاده کنید:

$$\beta_{dep} = \frac{(\rho_{smpl} - \rho_{blk}) \times F_{cal} \times V_{dil}}{\rho_{spray} \times A_{col}} \quad (۲)$$

$$\beta_{dep}(\%) = \frac{\beta_{dep} \times 10000}{\beta_v} \quad (۳)$$

β_{dep}: مقدار نشست ناشی از بادبردگی (میکرولیتر در سانتی‌متر مربع)

$\beta\ dep_{\%}$: درصد بادبردگی

β_v: حجم پاشش (لیتر در هکتار)

ρ_{smpl}: مقدار قرائت‌شده با دستگاه فلوریمتر (نمونه)

ρ_{blk}: مقدار قرائت‌شده با دستگاه فلوریمتر (شاهد–جمع‌کننده+ آب خالص)

F_{cal}: ضریب واسنجی

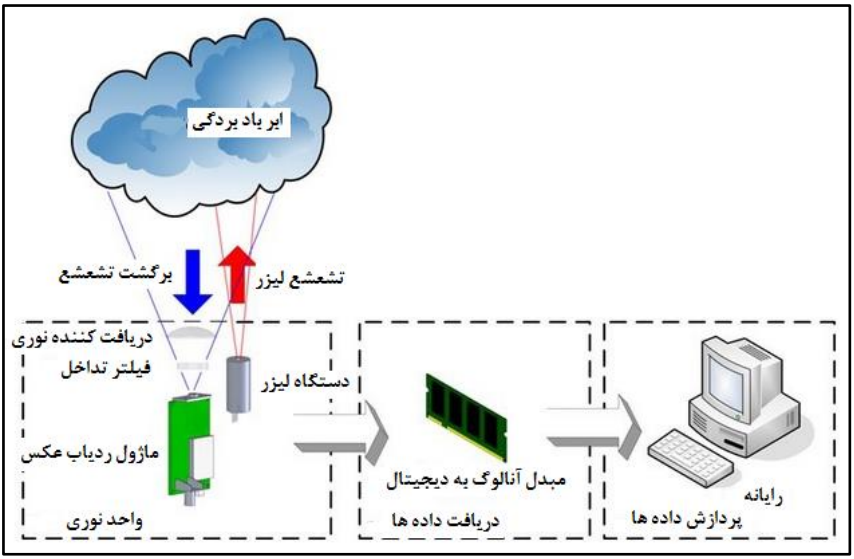
V_{dil}: حجم آب خالص برای رقیق کردن ردیاب (لیتر)

ρ_{spray}: غلظت پاشش (گرم در لیتر)

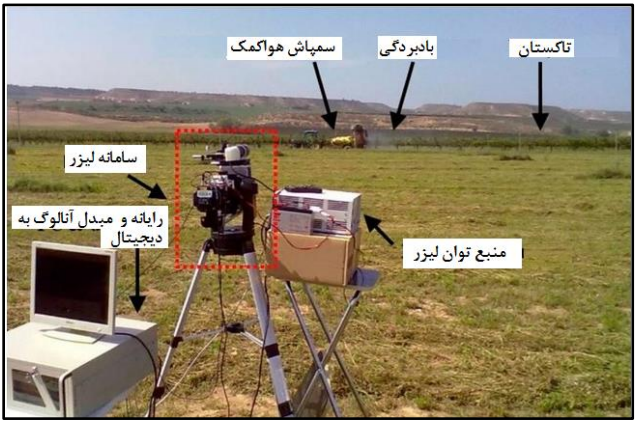
A_{col}: مساحت منظورشده برای جمع‌کننده‌ها (سانتی‌متر مربع).

شکل ۱۰ استفاده از روش LIDAR را برای اندازه‌گیری مقدار بادبردگی نشان می‌دهد. در این روش، به‌وسیله اشعه لیزر مقدار تراکم قطره‌ها در بادبردگی

تعیین می‌شود. پس از برخورد اشعه، پرتو بازگشتی در داخل دستگاه، آنالیز و مقدار بادبردگی تعیین می‌شود (www.grap.udl.cat). در تاکستان برای تعیین مقدار بادبردگی در سمپاش پشت تراکتوری هوا کمک، از روش لیزر استفاده‌شده است که می‌توان از این روش در پهپادسمپاش‌ها نیز استفاده کرد (شکل ۱۱).

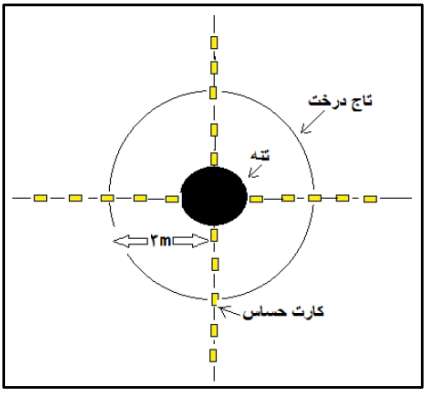


شکل ۱۰- تعیین بادبردگی به‌وسیله لیزر



شکل ۱۱- تعیین بادبردگی به‌وسیله لیزر در تاکستان (www.grap.udl.cat)

یکی دیگر از روش‌های تعیین مقدار بادبردگی، استفاده از کارت‌های حساس به آب است. برای نمونه، اندازه‌گیری مقدار بادبردگی در سمپاشی درختان میوه، با توجه به عرض تاج درخت و عدم یکنواختی شاخه‌ها، کارت‌ها به فاصله ۰/۵ متر بر روی قطرهای دایره تاج درخت طوری قرار داده شود که از طرفین تاج درخت یک متر فاصله داشته باشد (۲ کارت در خارج از محدوده سایه تاج قرار گیرد). پس از سمپاشی، کارت‌ها را جمع‌آوری کنید و درصد کارت‌هایی را که در معرض قطرات محلول سم قرارگرفته‌اند، حساب کنید. عدد به‌دست‌آمده، درصد بادبردگی را نشان می‌دهد (Kharim *et al*., 2019).



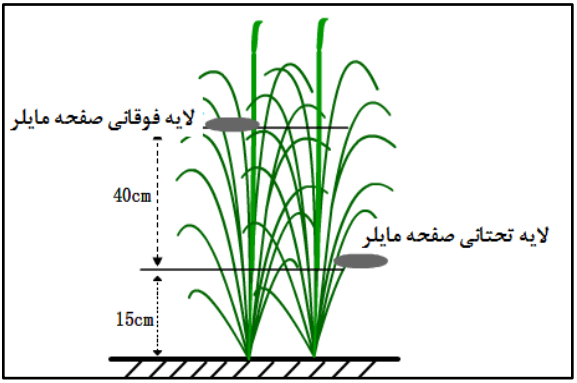
شکل ۱۲- محل قرارگیری کارت‌های حساس برای درختان میوه

سرعت باد از پارامترهای مهم در پخش ذرات است (Chen *et al.*, 2016). برای جلوگیری از بادبردگی، پهپاد باید در ارتفاع کم در محدوده ۵-۲ متر پرواز کند (Chen *et al.*, 2016). در سرعت‌های باد خیلی بالا (بیشتر از ۳ متر در ثانیه) استفاده از پهپاد برای سمپاشی توصیه نمی‌شود. موتورهای پهپاد، جریان هوای رو به پایین تولید می‌کند که می‌تواند نشست قطره‌ها را به سمت پایین تقویت کند و باعث افزایش نفوذ در داخل محصول شود. سرعت پرواز، تأثیر مهمی در میزان بادبردگی دارد. کاهش سرعت پرواز می‌تواند پتانسیل بادبردگی را به‌طور مؤثری افزایش دهد. اگر پهپاد خیلی سریع پرواز کند، جهت جریان هوا در پایین موتور تحت تأثیر حرکت نسبی باد خارجی قرار نمی‌گیرد و اثر باد بر قطره‌ها را ضعیف و میزان بادبردگی را کاهش می‌دهد. مواد افزودنی به محلول، باعث کاهش بادبردگی می‌شود. از طرفی افشانک‌های با اندازه بزرگ‌تر، در برابر بادبردگی عملکرد بهتری نشان داده‌اند. در شرایط یکسان، افشانک‌های مجهز به

جریان هوا[1] نسبت به افشانک‌های مخروطی و بادبزنی عملکرد بهتری نشان داده‌اند (Wang *et al*., 2020).

۲-۲-۲ مقدار پوشش‌دهی و نفوذ محلول سم در داخل محصول

برای تعیین مقدار نفوذ محلول در داخل محصول، سه منطقه تاج، وسط (بین لایه فوقانی و تحتانی) و پایین محصول را در نظر بگیرید (شکل ۱۳). برای تعیین مقدار نشست محلول در این سه منطقه از محلول تبوکو نازول (به دلیل نفوذ سریع در داخل محصول و ماندگاری آثار پاشش) استفاده کنید و مقدار نفوذ را نسبت به منطقه تاج (منطقه تاج ۱۰۰ درصد است) ارزیابی کنید. در یک ارزیابی، در منطقه وسط و پایین محصول برنج، مقدار نفوذ قطره‌های سم ۴۶/۸ و ۱۶/۴ درصد بود. مشابه همین روش را برای سایر محصولات استفاده کنید (Wang *et al*., 2017).



شکل ۱۳- تعیین نفوذ قطره‌ها و موقعیت جمع‌کننده‌ها

1. Air-inclusion

۲-۲-۳ بازده مزرعه‌ای سمپاشی

بازده مزرعه‌ای سمپاشی عبارت است از نسبت ظرفیت مؤثر مزرعه‌ای به ظرفیت تئوری برحسب درصد. برای اندازه‌گیری بازده مزرعه‌ای ابتدا ظرفیت مؤثر مزرعه‌ای (زمان لازم برای سمپاشی یک هکتار زمین) را اندازه‌گیری کنید. سپس ظرفیت تئوری را از رابطه (۴) محاسبه کنید. در پایان، با قرار دادن دو عدد به‌دست‌آمده در رابطه (۵)، بازده مزرعه‌ای را به دست آورید (صفری و شیخی‌گرجان، ۱۳۹۹).

$$C_t=\frac{V*W}{10} \qquad (۴)$$

که در آن:

V= سرعت پیشروی (کیلومتر در ساعت)

W= عرض کار (متر)

C_t= ظرفیت تئوری (هکتار در ساعت) است.

$$E=\frac{C_o}{C_t}*100 \qquad (۵)$$

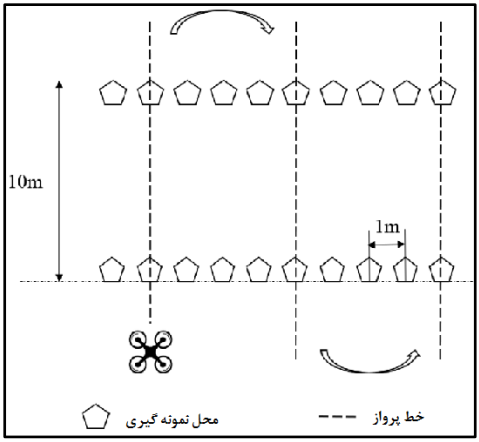
که در آن:

E= بازده مزرعه‌ای (٪)

C_o= ظرفیت مؤثر مزرعه‌ای (هکتار در ساعت) است.

بر اساس پژوهش‌های انجام‌شده در کشور چین، اتلاف وقت ناشی از خرابی در پهپادها زیر ۵ درصد بوده است، ولی زمان آماده‌سازی، برنامه‌ریزی مسیر و سرویس زمینی (۵۰ درصد) بیشترین زمان کار را به خود اختصاص می‌دهد که

باعث می‌شود بازده مزرعه‌ای در این دستگاه‌ها کمتر از ۳۰ درصد باشد (Wang *et al.*, 2017). اگر سرویس‌های زمینی در نظر گرفته نشود، با استفاده از سامانه خلبان خودکار، بازده مزرعه‌ای این دستگاه‌ها بیش از ۹۵ درصد است و مطابق شکل ۱۴ هیچ‌گونه وقت تلف‌شده‌ای در انجام عملیات وجود ندارد (Chen *et al.*, 2020). قبل از شروع به کار با دستگاه، ضریب اطمینان کارکرد آن را افزایش دهید تا میزان سرویس‌های زمینی کاهش یابد. دو عامل اصلی سرویس‌های زمینی، تعویض باتری و پر کردن مخزن است که بیشترین وقت تلف‌شده را به خود اختصاص داده‌اند؛ بنابراین تا حد امکان از باتری‌های با ظرفیت بیشتر و از پهپاد های با مخازن بزرگ‌تر استفاده کنید.



شکل ١٤- مسیر عملیات سمپاشی

۲-۲-٤ *انرژی مصرفی در هکتار*

مقدار انرژی الکتریکی مصرفی برحسب کیلووات ساعت بر هکتار اندازه‌گیری می‌شود. مقدار انرژی الکتریکی برحسب وات‌ساعت برابر با مجموع توان مصرفی

باتری‌های پرنده و باتری‌های رادیو کنترل است. از ضرب این عدد در ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر پهپاد، مقدار انرژی الکتریکی در هکتار را محاسبه نمایید (صفری و شیخی، ۱۳۹۹).

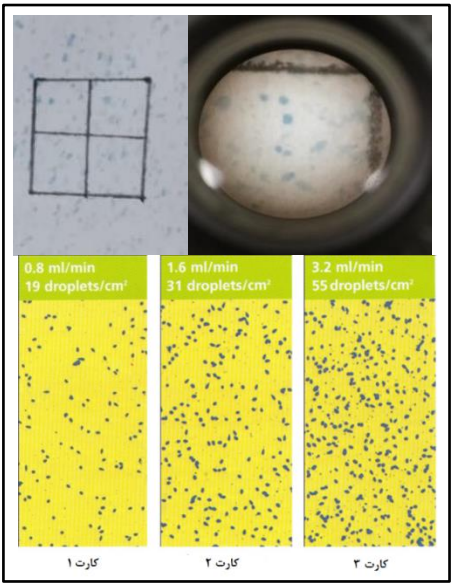
۲-۲-۵ یکنواختی پاشش

کارت‌های حساس به آب را در مسیر پاشش قرار دهید (شکل ۱۵). سپس تراکم قطره‌های سم را در قسمت مرکزی خط عمود بر مسیر حرکت نسبت به طرفین مقایسه کنید. درصورتی‌که تراکم قطرات در قسمت مرکز و طرفین نزدیک به هم باشد، پاشش یکنواخت است (صفری و شیخی، ۱۳۹۹). سرعت پاشش کمتر و همزمان، بده پاشش بیشتر باعث یکنواختی بیشتر در پاشش می‌شود (Kharim, 2019).

شکل ۱۵- تعیین یکنواختی پاشش در مسیر حرکت

برای تعیین یکنواختی پاشش روی کارت‌های حساس، قطر قطره‌هایی که در ۵۰ درصد حجمی قرار دارند، به‌عنوان قطر متوسط حجمی (VMD[1]) در نظر گرفته می‌شود (شکل ۱۶). مقدار قطر متوسط حجمی بر حسب میکرون (میکرومتر) است که در تقسیم‌بندی ASAE[2] در گروه قطرهای ریز قرار می‌گیرد (Zhua *et al.*, 2011). در سمپاشی درختان باید توجه شود که پهپادسمپاش، برای سمپاشی تاج بالایی درختان مناسب است و با این‌که در این روش سمپاشی، سم می‌تواند تا حدی داخل پوشش گیاهی نفوذ کند، ولی هنگامی‌که هدف، رساندن محلول سم به بخش‌های پایینی درخت باشد، استفاده از روش‌های دیگر سمپاشی در کنار این روش توصیه می‌شود (صفری و شیخی، ۱۳۹۹)

.



شکل ۱۶- کارت‌های حساس به آب و روش تعیین تعداد و قطر قطره‌ها با میکروسکوپ

1.Volume Median Diameter
2. American Society of Agricultural Engineering

۲-۲-۶ اثربخشی سمپاشی

در فاصله ۷-۱ روز پس از سمپاشی به‌منظور مبارزه با آفات، میزان اثربخشی را به کمک روابط ۶ و ۷ تعیین کنید (Chen *et al.*,2020):

$$R(\%) = \frac{PT0 - PT1}{PT0} \times 100 \qquad (۶)$$

که در آن:

R: درصد حشرات تلف‌شده

P_{TO}: تعداد حشرات زنده قبل از سمپاشی

P_{T1}: تعداد حشرات زنده بعد از سمپاشی است.

برای دستیابی به نتیجه بهتر، باید اثرات شاهد را از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$E(\%) = \frac{R_{PT} - R_{CK}}{1 - R_{CK}} \times 100 \qquad (۷)$$

که در آن:

E= اثر شاهد (٪)

R_{PT}= تعداد حشرات تلف‌شده در منطقه سمپاشی شده

R_{CK}= تعداد حشرات تلف‌شده در منطقه شاهد است.

تعداد حشرات را در قبل و بعد از سمپاشی با توجه به مساحت پلات آزمایشی، توسط توری‌های مخصوص مطابق شکل ۱۷ تعیین کنید.

شکل ۱۷- جمع‌آوری حشرات در قبل و بعد از عملیات سمپاشی

۳- ارزیابی اقتصادی

یکی از معیارهای مهم در سمپاشی، هزینه‌های اقتصادی است. ممکن است سمپاشی از نظر فنّی توجیه‌پذیر باشد، ولی از نظر اقتصادی برای کشاورز به‌صرفه نباشد. اگر از روش مالکیت سمپاش برای ارزیابی اقتصادی استفاده می‌شود باید برای روش مرسوم (استفاده از تراکتور و سمپاش پشت تراکتوری) براساس استاندارد ASAE، در جدول جداگانه هزینه‌های ثابت (استهلاک، بهره، سایبان، بیمه و مالیات)، هزینه‌های متغیر (سوخت، روغن، روغن هیدرولیک، لاستیک،

تعمیر و نگهداری) و هزینه‌های کارگری در ساعت تعیین شود. برای پهپادسمپاش نیز مجموع هزینه‌های ثابت و متغیر تعیین شود و در نهایت هزینه‌های ساعتی این دو روش مقایسه شود. براساس نتایج یک پژوهش، هزینه سمپاشی یک باغ زیتون برای مبارزه با مگس زیتون با پهپادسمپاش حدود نصف هزینه سمپاشی با سمپاش توربینی بود (Guanter *et al*., 2019).

پیش از سمپاشی با پهپاد که در داخل کشور غالباً به‌صورت اجاره‌ای انجام می‌شود، باید یک ارزیابی نسبی نسبت به روش‌های مرسوم انجام شود. ساده‌ترین روش، مقایسه نرخ اجاره عملیات سمپاشی است. ممکن است، روش پهپاد برای کشاورز ازنظر اقتصادی به‌صرفه نباشد و به‌ناچار از روش مرسوم استفاده کند. ارزیابی اقتصادی تابعی از میزان ضروری‌بودن عملیات سمپاشی از نظر اپیدمی، مقدار اجرت عملیات توسط روش‌های مرسوم و روش پهپاد، توپوگرافی منطقه، و شرایط محصول است.

٤- حداقل مشخصات فنّی موردنیاز برای پهپادسمپاش

در جدول ۲ حداقل مشخصات فنّی موردنیاز برای استفاده از یک پهپادسمپاش برای سمپاشی زمین‌های زراعی و باغی کشاورزی ارائه‌شده است (باقری، ۱۳۹۴؛ صفری و شیخی‌گرجان، ۱۳۹۹).

جدول ۲- حداقل مشخصات فنّی لازم برای یک پهپادسمپاش

معیار	دامنه مطلوب
بده پمپ	۱۲۰۰ –۳۰۰ میلی‌لیتر بر دقیقه
وزن محموله قابل‌حمل	حداقل ۱۵ کیلوگرم
حداقل و حداکثر سرعت پرواز	۲۵-۱ کیلومتر در ساعت
محدوده ارتفاع پرواز	۱۰-۱ متر (حداقل یک متر تا محصول)
حجم مخزن	حداقل ۱۵ لیتر
مداومت پروازی	حداقل ۱۵ دقیقه
برد رادیویی پرواز	حداقل ۸۰۰ متر
ظرفیت عملیاتی سمپاشی	۵-۴ هکتار در ساعت
بازه دمایی عملکرد	متناسب با دمای منطقه مورداستفاده باشد (۱۵- الی ۴۵ درجه سانتی‌گراد).
ارتفاع پاشش از محصول	حداقل ۵۰ سانتی‌متر و حداکثر ۲۰۰ متر
دقت GPS	کمتر از نصف عرض کاشت محصول
عرض مؤثر پاشش	حداقل ۳ متر
ضریب کیفیت پاشش	بین ۲-۱
مقدار سم مصرفی در هکتار	با دو افشانک میکرونر، ۱۵-۱۰ لیتر در هکتار

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

پهپادها ابزار مؤثر و مناسبی برای سمپاشی هستند، مشروط بر آنکه عوامل فنّی استفاده از آن درنظر گرفته شود. برای افزایش بازده مزرعه‌ای، عواملی مانند جهت عملیات سمپاشی، زمان عملیات، درصد رطوبت و درجه حرارت، نوع افشانک مورداستفاده، ارتفاع سمپاشی، سرعت سمپاشی، بالا بودن درجه اطمینان قطعات به‌کار رفته در دستگاه (برای کاهش سرویس‌های زمینی)، باید موردتوجه قرار گیرد. استفاده از کارور[1] ماهر می‌تواند اثربخشی عملیات را افزایش دهد. در

1. Operator

کنار عوامل فنّی، به عامل اقتصادی نیز باید توجه شود و هزینه سمپاشی با پهپاد نسبت به روش‌های رایج سمپاشی مقایسه شود.

از سوی دیگر، پهپادها دارای محدودیت‌هایی مانند ممنوعیت استفاده در مناطق نزدیک به فرودگاه‌ها و مناطق نظامی و همچنین محدودیت‌های فنّی (محدودیت مداومت پروازی و حجم مخزن) هستند که کاربرد آن‌ها را محدود می‌کند (باقری، ۱۳۹۹).

با توجه به وجود انواع مختلفی از پهپادسمپاش در داخل کشور، پیشنهاد می‌شود همه پهپادسمپاش‌ها در شرایط مزرعه ارزیابی و با در نظر گرفتن عوامل فنّی و اقتصادی، دستگاه مناسب معرفی شود.

٦- فهرست منابع

باقری، ن. ۱۳۹۹. پهپادها: فرصت‌ها و چالش‌ها. گاهنامه خبری تحلیلی پهپادها و آینده. شرکت صنایع هوایی قدس. شماره ۸۳.

باقری، ن. صفری، م. ۱۳۹۹. شناخت پهپادسمپاش. نشریه فنی. مؤسسه تحقیقات فنّی و مهندسی کشاورزی.

باقری، ن. ۱۳۹۴. توسعه عمودپرواز بدون سرنشین طیف نگار برای تصویربرداری هوایی اراضی کشاورزی. فصلنامه پژوهش‌های جغرافیای طبیعی. دوره ۴۷، شماره ۴.

سیدین، پ. ۱۳۹۸. دستورالعمل کاربرد پهپادهای سمپاش جهت کنترل آفات. سازمان حفظ نباتات، معاونت کنترل آفات، دفتر آفت‌کش‌ها.

شیخی‌گرجان، ع. ۱۳۹۷. ارزیابی پهپادسمپاش در کنترل شیمیایی پوره سن گندم. گزارش نهایی پروژه تحقیقاتی، مؤسسه تحقیقات گیاه‌پزشکی کشور.

صفری، م و شیخی‌گرجان، ع. ۱۳۹۹. بررسی روش‌های مختلف سمپاشی نخیلات برای مبارزه با زنجرک خرما. نشریه ترویجی. مؤسسه آموزش و ترویج کشاورزی. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی.

Bagheri, N. 2016. Development of a high-resolution aerial remote sensing system for precision agriculture. International Journal of Remote Sensing 38 (8-10): 2053-2065.

Chen, S., Lan, Y., Li, J., Zhou, Z., Jin, J and Liu, A., 2016. Effect of spray parameters of small-unmanned helicopter on distribution regularity of droplet deposition in hybrid rice canopy. Transaction of Chinese Society. Agricultural. Engineering 32 (17): 40–46.

Chen,P., Lan,Y., Huang,X., Qi,H., Wang,G., Wang,J .,Wang,L and Xiao, H.2020. Droplet deposition and control of plant hoppers of di_erent nozzles in two-stage rice with a quad rotor unmanned aerial vehicle.Agronomy 10 (303): 1-14.

Guanter, J., Agüera, P., Agüera, J and Ruiz, M.P. 2019. Spray and economics assessment of an unmanned aerial vehicle (UAV)‐based ultra−low−volume application in olive and citrus orchards, Springer Science Business Media, LLC, part of Springer Nature 2019, Precision Agriculture 21: 226–243.

Huang, H., Deng, J., Lan, Y., Yang, A., Deng, X and Zhang, L .2018. A fully convolutional network for weed mapping of unmanned aerial vehicle (UAV). PLoSONE (13), 4: e0196302.

Kharim, M. N. A., Wayayok, A., Sharif, A. R. M., Abdullah, A. F and Husain, E. M. 2019. Droplet deposition density of organic liquid fertilizer at low altitude unmanned aerial vehicle (UAV) aerial spraying in rice cultivation. Computers and Electronics in Agriculture 167 (105045).

Lan, Y.B., Chen, S.D and Fritz, B.K.2017. Current status and future trends of precision agricultural aviation technologies. International Journal of Agricultural & Biological Engineering10 (3), 1– 17.

Wang, C., Zeng, A., He, X., Song, J., Herbst, A., Gao, W. 2020. Spray drift characteristics test of unmanned aerial vehicle spray unit under

wind tunnel conditions. International Journal Agriculture & Biology Engineering 13 (3): 13-21.

Wang, S., Song, J., He, X., Song, Le. Wang, X., Wang, C., Wang, Z and Ling, Y. 2017. Performances evaluation of four typical unmanned aerial vehicles used for pesticide application in China. Internatinal Journal Agriculture & Biology Engineering 10 (4): 22-31.

Xinyu, X., Kang, T., Weicai, Q., Lan, Y and Zhang, H. 2014. Drift and deposition of ultra-low altitude and low volume application in paddy field**.** International Journal Agriculture & Biology Engineering 7 (4): 23-28.

Zhang, X., Song, X., Liang, Y., Qin, Z., Zhang, B., Wei, J., Li, Y& Wu, J. 2020. Effects of spray parameters of drone on the droplet deposition in sugarcane canopy**.** Sugar Technology 22: 583–588**.**

Zhua, H., Salyanib, M and Fox, R. 2011. A portable scanning system for Evaluation of spray deposit distribution. Computers and electronics in Agriculture 76: 38–43.