

ساخت و ارزیابی سمپاش هدف‌دار باغی با استفاده از فناوری ماشین‌بینایی

هاییل آسائی^۱ - عبدالعباس جعفری^{۲*} - محمد لغوی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۴/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۱/۰۷

چکیده

در روش‌های معمول سم‌پاشی در باغ‌ها، سم‌پاشی هدف‌دار انجام نمی‌شود. بررسی آمار مصرف سموم شیمیایی در باغ‌ها نشان‌دهنده مصرف بیش از حد مورد نیاز گیاه بوده و از این مقدار سم مصرف‌شده، تنها ۳۰ درصد آن به تاج درخت می‌رسد و باقی‌مانده آن از دست‌رفته و باعث خسارت می‌شود. سم‌پاش‌های نرخ متغیر با استفاده از سیستم‌های کنترل هوشمند تا حد زیادی در کاهش استفاده از آفت‌کش‌ها و کاهش آلودگی محیط‌زیست در باغ‌ها کارایی دارند. در این تحقیق نمونه اولیه سم‌پاش باغی مبتنی بر فناوری ماشین‌بینایی ارزیابی شد. سم‌پاش ساخته‌شده براساس ساختار تاج درخت و میزان سبزینه، عمل سم‌پاشی را به‌صورت بی‌درنگ انجام می‌دهد و بهره‌وری از سمپاشی در باغ را بهبود می‌بخشد. عملکرد سم‌پاش در باغ زیتون در دو حالت مختلف سم‌پاشی به‌صورت سراسر پاشی و سم‌پاشی منقطع هدف‌دار مبتنی بر سایه‌انداز درخت و فناوری ماشین‌بینایی مقایسه شد. این عملکرد در سه سرعت پیشروی مختلف (۲، ۳/۵ و ۵ کیلومتر بر ساعت) و چهار تکرار با استفاده از طرح کاملاً تصادفی انجام شد. نتایج نشان داد در کاربرد سم‌پاش طراحی‌شده جدید، برای باغ زیتون، مصرف سم تقریباً ۵۴ درصد کاهش یافت. با توجه به عدم پاشش سم در فضای خالی بین درختان، در باغ‌های جوان، که دارای درختان کوچک‌تر هستند و فاصله بین تاج درختان زیادتر است، میزان کاهش مصرف سم، از این مقدار فراتر خواهد رفت.

واژه‌های کلیدی: پردازش تصویر، سم‌پاش هوشمند، کاهش مصرف سم، کنترل خودکار

مقدمه

کاهش ایمنی و راندمان پایین سم‌پاشی می‌شوند (Deveau, 2009). از آنجایی که در سم‌پاش‌های معمول تنظیمات به‌صورت دستی است، مقدار سم با توجه به نیاز و به مقدار مناسب استفاده نمی‌شود و خروجی سم‌پاش‌های معمول را پس از روشن کردن نمی‌توان تنظیم کرد و تا انتهای کار به‌صورت ثابت باقی می‌ماند. با توجه به این که تاج درخت، در درختان مختلف، از نظر شکل ساختار و تراکم پوشش متفاوت است، در سم‌پاش‌های معمول مقدار سم خروجی در تمام حالات یکسان است و این حالت بدون در نظر گرفتن این‌که آیا در مسیر سم‌پاشی، درخت وجود دارد یا نه، ارتفاع درخت بلند است یا کوتاه، عرض درخت پهن است یا باریک (شکل ۱)، صورت می‌گیرد. بنابراین مقدار معنی‌داری سم بین دو درخت و در فضای آزاد بالای درخت و پایین درخت هدر می‌رود.

با استفاده از تجهیزات سم‌پاشی معمول و به‌دست آوردن نرخ جریان خروجی دیده می‌شود که محصولات در گلخانه و باغ بیش از حد مورد نیاز سم‌پاشی می‌شوند. این در حالی است که تنها ۳۰ درصد از سم‌پاشیده شده به تاج درخت می‌رسد و باقی‌مانده آن از دست‌رفته و باعث خسارت می‌شود (Zhu et al., 2006).

با در نظر گرفتن افزایش تقاضا برای تولید بیشتر محصولات کشاورزی و در پی آن تلاش در جهت افزایش تولید محصول، باید نگران افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی بود. کشاورزی دقیق، نوعی کاربرد فناوری و مفاهیم اساسی را ترسیم می‌کند که با در نظر گرفتن همه جنبه‌ها و برای رسیدن به تولید مناسب و با رعایت مسائل زیست‌محیطی تغییرات مکانی و زمانی را مدیریت می‌کند (Pierce and Nowak, 1999). در کشاورزی دقیق، نهاده‌ها براساس نیاز واقعی‌شان در هر قسمت از مزرعه که اطلاعات آن موجود باشد توزیع می‌شوند (Plant, 2001). هدف از کاربرد آفت‌کش‌ها ارائه غلظت مؤثر و یکنواخت از مواد شیمیایی به مناطق هدف به‌صورت امن و در زمان موردنیاز است. تجهیزات سم‌پاشی معمولی مورد استفاده در گلخانه‌ها و باغ‌ها دارای برخی از مشکلات هستند که باعث

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شیراز

۲- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شیراز

(Email: ajafari@shirazu.ac.ir)

*- نویسنده مسئول:

۳- استاد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شیراز



شکل ۱- پاشش بیش از اندازه سم‌پاش باغی هنگام سراسر پاشی متداول (Chen *et al.*, 2013)
Fig.1. Over spraying of an orchard sprayer during conventional overall spraying

گزارش شد (Giles *et al.*, 1989). در نوعی دیگر از سم‌پاشی هدفمند، از یک اسکنر لیزری برای اسکن درختان مرکبات و برآورد تاج پوشش درخت، عرض و حجم استفاده شد که تخمین عرض در حدود ۱۵ سانتی‌متر خطا داشت و حداقل خطا ۰/۰۹ برای تخمین حجم گزارش شد (Lee and Ehsani, 2008). براساس مطالعات انجام‌شده (Giles *et al.*, 1988; Lee and Ehsani, 2008; Rosell Polo *et al.*, 2009; Solanelles *et al.*, 2006; Wei and Salyani, 2004; Wei and Salyani, 2005) می‌توان نتیجه گرفت که یک اسکنر لیزری با دقت بیشتری نسبت به سنسورهای اولتراسونیک، اطلاعات و مشخصات درخت و محصول را به‌دست می‌آورد. با این حال، تحقیقاتی با استفاده از سنسورهای اولتراسونیک و انواع دیگر سنسور برای اندازه‌گیری تراکم و ساختار تاج درخت و محصول و ویژگی‌های آن در حال اجرا و توسعه است، که گام بسیار مهمی در توسعه سم‌پاش نرخ متغیر برای تشخیص ویژگی‌های درخت است (Chen *et al.*, 2013).

این پژوهش با هدف ساخت و ارزیابی سم‌پاش باغی ویژه مکانی به‌منظور کاهش مصرف سم، صورت پذیرفت. به این صورت که با استفاده از فناوری ماشین بینایی سم به‌صورت هدف‌دار روی درخت پاشش می‌شود. همچنین تأثیر سرعت پیشروی بر دقت و میزان سم مصرف‌شده نیز بررسی شد.

مواد و روش‌ها

تجهیزات مورد‌استفاده در این پژوهش به‌طور کلی از ۳ بخش عمده تشکیل شده است که عبارت‌اند از:
 (۱) بخش مکانیکی دستگاه

امروزه برای کاهش آلودگی محیط‌زیست و زیان‌های ناشی از آن و همچنین صرفه‌جویی در مقدار پاشش سم از روش‌های جدیدی مانند استفاده از امواج التراسونیک^۱ برای تشخیص فاصله درختان (Solanelles *et al.*, 2006)، تشخیص موقعیت درخت با استفاده از GPS^۲ (Subramanian *et al.*, 2006)، استفاده از لیزر و اسکنرهای لیزری برای شناسایی ویژگی‌های درخت (Chen *et al.*, 2013) استفاده می‌شود.

در تحقیقی، از یک سم‌پاش مه افشان – دمنده هوایی^۳ به کمک پردازش تصویر و براساس شناسایی ساختار تاج درختان استفاده شد. تصویربرداری در این پژوهش با استفاده از یک دوربین دیجیتال در جلوی تراکتور و به ارتفاع ۱ متر از زمین صورت می‌گرفت. ابتدا از تصاویر به‌دست‌آمده توسط دوربین خصوصیات رنگ، مقدار اشباع و روشنایی (HSL)^۴ استخراج شد و بر این اساس سم‌پاشی اعمال می‌شد. در این پژوهش مقدار صرفه‌جویی در مصرف سم در باغ گلابی ۲۳/۷ درصد گزارش شد (Hoçevær *et al.*, 2010). وجود درختان در ردیف‌های کناری و دیده شدن در تصاویر گرفته‌شده توسط دوربین، باعث کاهش دقت می‌شد.

از تبدیل سم‌پاش باغی دمنده هوایی معمولی به یک سیستم سم‌پاش کنترلی برای اندازه‌گیری حجم شاخ و برگ و پس از آن کنترل خروجی سم‌پاش با کمک سیستمی مبتنی بر میکروکنترلر با استفاده از فناوری سنسورهای آلتراسونیک، صرفه‌جویی در مقدار سم‌پاشی از ۲۸ تا ۳۵ برای باغ هلو و ۳۶ تا ۵۲ برای باغ سیب

- 1- Ultrasonic waves
- 2- Global positioning system
- 3- Air-assisted sprayer
- 4- Hue – Saturation - Luminance



شکل ۲- بوم نازل‌ها (۱ و ۲- به ترتیب برای سم‌پاشی ردیف‌های سمت چپ و راست تراکتور)
Fig.2. Nozzle booms (1&2. For spraying left and right rows of the tractor, respectively)

افشانک‌ها^۳ (نازل‌ها): نوع نازل استفاده شده، تی جت^۴ قرمز و با شماره ۱۱۰۰۴ بود. در این پژوهش برای تعیین زاویه پاشش از نازل‌های در حال پاشش در شرایط فشار پمپ ۱۰ بار، عکس‌برداری شد، سپس زاویه پاشش توسط نرم‌افزار Solidwork 2013 (نرم افزار طراحی و تحلیل مکانیکی) برابر با ۹۱ درجه اندازه‌گیری شد (شکل ۳).

شیر برقی^۵: به منظور کنترل پاشش یا عدم پاشش نازل‌ها از شیر برقی (Gevax, 0.5-16bar, DC12V) استفاده شد. شیرهای برقی استفاده شده در حالت عادی به صورت باز بودند، یعنی در حالت عادی جریان سیال را از خود عبور می‌دادند که در اصطلاح به این نوع شیرهای در حالت عادی باز^۶ می‌گویند. محل قرارگیری شیرهای برقی در مدار هیدرولیک بعد از پمپ و قبل از نازل‌ها بود.

کد کننده دورانی افزایشی^۷: با توجه به اینکه مکان قرارگیری دوربین‌ها نسبت به موقعیت اعمال سم توسط نازل‌ها، جلوتر بود، از کد کننده نوری (Autonics 5-24 VDC) با پالس بر دور ۵۰۰ و قطر شافت ۸ میلی‌متر استفاده شد. به همین منظور برای پاشش در زمان مناسب در سرعت‌های مختلف و به‌دست آوردن سرعت پیشروی، کد کننده روی شافت چرخ پنجم استفاده شد، که با توجه به فاصله و پالس عبوری زمان مناسب پاشش در سرعت‌های مختلف مشخص می‌شد.

(۲) سامانه جمع‌آوری داده‌ها^۱ و پردازش تصویر
 (۳) سیستم کنترل الکترونیکی

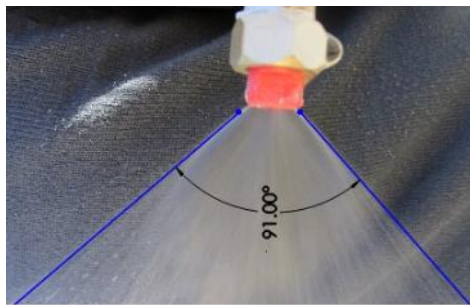
بخش مکانیکی دستگاه:

بوم^۲ (بال‌ها): دو بوم برای نصب نازل‌ها و با قابلیت تغییر نازل‌ها در راستای عمودی برای پاشش مناسب به هدف موردنظر طراحی و ساخته شدند. بوم شماره ۱ در شکل ۲ وظیفه سم‌پاشی ردیف درختان رو به‌روی خود را داشت و بوم شماره ۲ ردیف مقابل را سم‌پاشی می‌کرد. نازل‌های نصب‌شده روی هر کدام از بوم‌ها وظیفه سم‌پاشی نیمی از هر درخت را بر عهده داشت. به این صورت که نیمی از هر درخت با طی کردن مسیر رفت تراکتور در بین دو ردیف و نیمه دیگر همان درخت، در مسیر بازگشت سم‌پاشی می‌شد. هر بوم شامل دو قسمت عمودی و زاویه‌دار بود، قسمت عمودی بوم برای سم‌پاشی قسمت کناری درخت در سمت حرکت تراکتور و قسمت زاویه‌دار برای سم‌پاشی نیمه بالایی تاج از خط مرکزی درخت در سمت مسیر حرکت تراکتور در نظر گرفته شد تا سم‌پاشی هر درخت به‌صورت کامل اجرا گردد. قسمت عمودی شامل یک قسمت ثابت و یک قسمت تلسکوپی بود که قسمت تلسکوپی برای تنظیم ارتفاع بوم برای شرایط مختلف در نظر گرفته شد.

برای هر کدام از بوم‌ها سه نازل برای سم‌پاشی در نظر گرفته شد. در قسمت عمودی دو نازل و در قسمت زاویه‌دار یک نازل قرار می‌گرفت. پایه این نازل‌ها به‌صورت ریلی طراحی و ساخته شد که با توجه به تغییر شرایط مختلف، نظیر ارتفاع متفاوت درختان و نوع پوشش درختان، قابل جابه‌جایی و تنظیم در طول بوم باشند.

- 3- Nozzle
- 4- T-jet nozzles
- 5- Solenoid valve
- 6- Normally open
- 7- Encoder

- 1- Data acquisition system
- 2- Boom



شکل ۳- زاویه و الگوی پاشش نازل در فشار ۱۰ بار برای این پژوهش

Fig.3. Nozzle spray angle and pattern at a pressure of 10 bar for this research

$$G > \frac{R+B}{2} \Rightarrow 2G - R - B > 0 \Rightarrow 3G - I > 0 \quad (1)$$

اگرچه حداکثر سرعت تصویر برداری دوربین ۳۰ تصویر در ثانیه بود، لیکن با توجه به سرعت پیشروی، سرعت تصویربرداری بر ۱۰ تصویر در ثانیه تنظیم شد. با توجه به سرعت‌های پیشروی که کمتر از ۵ کیلومتر بر ساعت بود قسمت زیادی از تصاویر با یکدیگر همپوشانی داشتند لیکن این همپوشانی خللی به برنامه وارد نمی‌کند. چرا که تا زمانی که سیگنال فرستاده شده ۱ باشد یعنی سبزی در تصویر مشاهده می‌شود و همچنان ۱ باقی می‌ماند تا زمانی که دیگر سبزی مشاهده نشود.

محل نصب دوربین‌ها: برای تصویربرداری از تاج درخت و انجام مراحل پردازش تصویر برای هر ردیف کاشت درختان در باغ یک دوربین برای تصویربرداری در فضای بالای تاج درختان در نظر گرفته شد. همچنین به منظور تصویر برداری همزمان دو ردیف کشت، شاسی دوربین‌ها به صورت T شکل طراحی گردید. طرح‌واره‌ای از شاسی طراحی شده در شکل ۴ نشان داده شده است. این شاسی به نحوی در بالای کابین تراکتور نصب گردید که هر دوربین فضای بالای تاج درخت را تصویربرداری کند. ارتفاع دوربین‌ها باید به نحوی انتخاب می‌شد که ردیف‌های کناری در تصویر قرار نمی‌گرفتند و فقط ردیف موردنظر در میدان دید دوربین قرار می‌گرفت. با توجه به لزوم سم‌پاشی درختانی تا بلندی ۳۲۰ سانتی‌متر، ارتفاع مناسب شاسی دوربین‌ها ۳۷۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد.

سیستم کنترل الکترونیکی:

مدار الکترونیکی جهت تبدیل سیگنال‌های خروجی از مرحله پردازش تصویر به سیگنال‌های الکترونیکی جهت راه‌اندازی شیرهای برقی مورد استفاده قرار گرفت. شیرهای برقی به وسیله ولتاژ ۱۲ ولت باتری تراکتور راه‌اندازی می‌شد. پس از دریافت داده‌ها توسط دوربین‌ها و فرستادن آن‌ها برای پردازش تصاویر توسط لب ویو، از طریق رایانه و توسط درگاه سریال، این داده‌ها به مدار کنترل الکترونیکی منتقل می‌شوند.

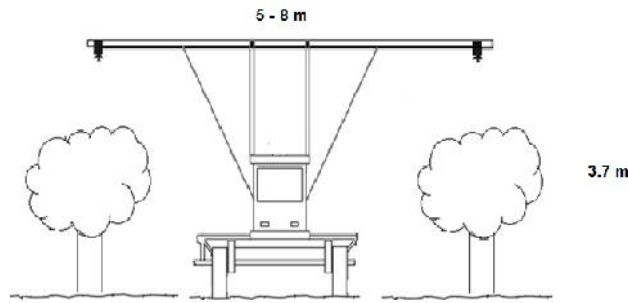
سامانه جمع‌آوری داده‌ها و پردازش تصویر:

در این پژوهش جهت پردازش تصویر به صورت بلادرنگ از نرم‌افزار لب ویو^۱ (نسخه ۲۰۱۱) استفاده شد. به دلیل قابلیت سرعت بالای آنالیزها و ارسال اطلاعات و حساس بودن برنامه به تغییر دینامیکی پارامترها، این نرم‌افزار در اکثر پژوهش‌های بلادرنگ پردازش تصویر استفاده می‌شود (Loni and Loghavi, 2014). برای بالا بردن دقت کار ماشین بینایی، تصویر به دست آمده از دوربین، توسط نوارهایی در برنامه محدود شد. با این تغییر میدان دید دوربین در فاصله ۱۰۰ سانتی‌متری از دوربین ۲۵×۱۰۰ سانتی‌متر مربع می‌شد. تصاویر گرفته شده از گیاه، توسط دوربین (TSCO, VGA) (640×480), 30fps, 10Mega Pixel) از طریق پورت USB به کامپیوتر و سپس به نرم‌افزار لب ویو برای انجام پردازش منتقل می‌شد. برای تفکیک گیاه از خاک، در نرم‌افزار لب ویو رابطه مؤلفه‌های RGB، طبق رابطه (۱) (Ohta et al., 1980) مشخص شد که با قرار دادن مقدار آستانه برابر با ۱ به طور مناسب عمل جداسازی را انجام می‌داد. نتایج حاصل از جداسازی و تفکیک سبزی تصویر، در نرم‌افزار به کدهای (۰ و ۱) تبدیل می‌شوند و برای بسته شدن و یا باز بودن شیرهای برقی برای اعمال سم، طبق روند نمای عملکرد سم‌پاش (شکل ۵) عمل می‌شد.

نتیجه این جداسازی تصویر باینری خواهد بود که گیاهان سبز با رنگ سفید و مقدار عددی ۱ در آن مشخص شده‌اند (شکل ۶). در مرحله بعد، برنامه می‌بایست به گونه‌ای عمل کند که در صورتی که میزان شاخ و برگ‌های دیده شده ناچیز بوده و از یک حد آستانه مشخص کمتر باشند اقدام به پاشش ننماید، لذا در صورتی که میزان سبزی مشاهده شده ۱۰ درصد کل تصویر را شامل شود به عنوان آستانه^۲ پاشش (th) قرار داده شد که قابل تغییر و تنظیم توسط کاربر نیز است.

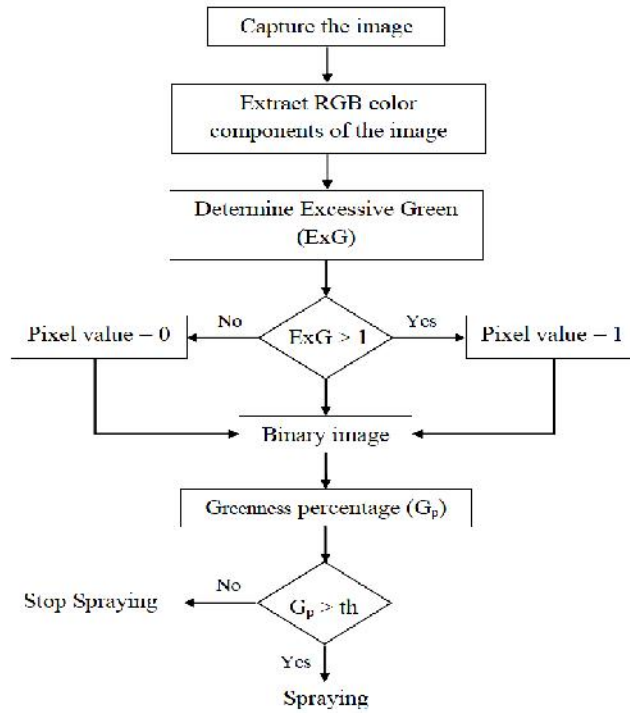
1- Labview

2 -Threshold (th)



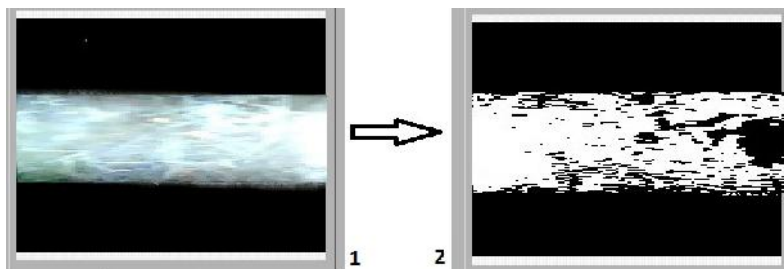
شکل ۴- طرح‌واره شاسی طراحی شده برای دوربین‌ها

Fig.4. Schematic of the frame designed for cameras



شکل ۵- روند نمای عملکرد سم‌پاش

Fig.5. The flowchart of sprayer operation



شکل ۶- تصویر ورودی (۱) و تصویر خروجی (۲) از الگوریتم پردازش تصویر

Fig.6. Input image (1) and output image (2) for image processing algorithms

۵ هدف سم‌پاشی (درخت) و ۴ فضای خالی بین درختان بود. شایان ذکر است در این تحقیق اعمال سم خاصی مورد نظر نبود و هدف بررسی امکان پاشش هر نوع مایع (معمولاً آب) به‌عنوان محیط حاوی هر نوع سم یا مواد شیمیایی دیگر به‌صورت منقطع و خاص مکانی در تحقق کشاورزی دقیق بود. لذا در اجرای آزمون‌ها از آب خالص استفاده گردید. میزان مایع خروجی از یک نازل در فشار ثابت پمپ، در ۳ سطح سرعت (۲، ۳/۵ و ۵ کیلومتر بر ساعت)، در ۴ تکرار و در ۲ حالت سم‌پاشی منقطع هدف‌دار و سم‌پاشی به‌صورت سراسر پاشی و متداول مقایسه شد. این مقایسه با توجه به نسبت پوشش درخت به فضای خالی بین دو درخت در مسیر سم‌پاشی انجام شد. جهت ارزیابی مقدار مصرف سم، در دو روش سم‌پاشی در حالت سراسر پاشی و سم‌پاشی خاص مکانی از آزمون t استیودنت استفاده شد. الگوی کاشت درختان در قسمت کاشت مکانیزه باغ، به صورتی بود که فاصله بین درختان در ردیف کاشت ۵ متر و فاصله بین ردیف درختان در بعضی کرت‌های کاشت ۷ متر و در بعضی کرت‌ها ۱۰ متر بود. در این پژوهش از الگوی کاشت ۷×۵ استفاده شد. الگوی انتخابی و مسیر حرکت در بین درختان در باغ در شکل ۸ قابل مشاهده است.

با توجه به ارتفاع درختان که $11/93 \pm 2/320$ سانتی‌متر بود و همچنین زاویه پاشش نازل‌ها که ۹۱ درجه بود، ارتفاع نازل‌ها روی بوم و نحوه قرارگیری نازل‌ها در شکل ۹ مشخص شده است.

نحوه ارزیابی پاشش: برای ارزیابی پاشش روی درختان و همچنین در فضای خالی بین درختان کاغذهای حساس به آب (WSP) به ابعاد ۲۹×۶۹ میلی‌متر تهیه شد. این کاغذها به نحوی در مسیر سم‌پاشی قرار گرفتند، که روی هر درخت در باغ، ۹ عدد کاغذ حساس به‌صورت ماتریسی قرار می‌گرفت. طریقه قرارگیری به صورتی بود که در پایین هر درخت (در ارتفاع ۱ متری از زمین) ۳ کاغذ حساس، در وسط ۳ کاغذ (در ارتفاع ۲ متری از زمین) و در قسمت بالای درخت (در ارتفاع ۳ متری) نیز ۳ کاغذ نصب شد. همچنین در قسمت‌های فضای خالی بین درختان نیز، ۹ کاغذ حساس به‌صورت ماتریسی قرار گرفت تا در نقاط مختلف فضای خالی، نحوه عملکرد سم‌پاشی ارزیابی شود. تأثیر پاشش در محل نصب کاغذهای حساس به آب روی درختان در ردیف‌های افقی و عمودی و همچنین در سرعت‌های مختلف پیشروی بررسی شد. الگوی قرارگیری کاغذهای حساس روی درخت‌ها و در فضاهای خالی در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

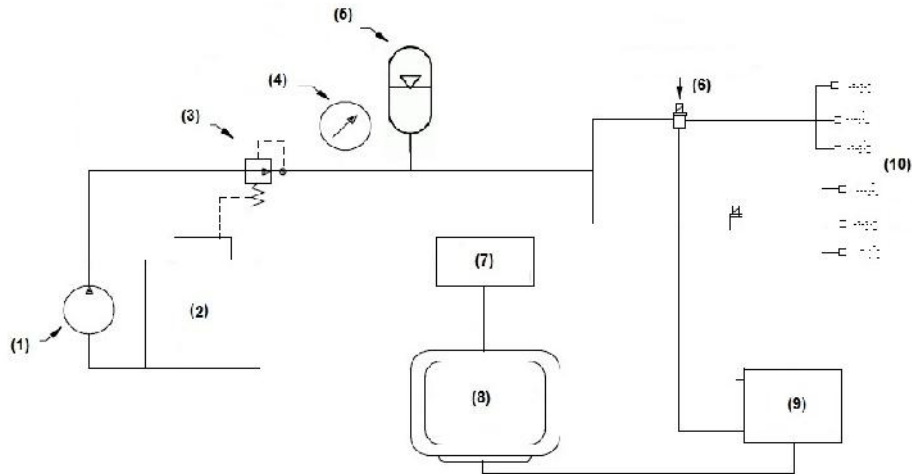
واحد کنترل الکترونیکی با دریافت سیگنال ارسال شده از نتیجه پردازش تصاویر با توجه به فاصله بین دوربین تا نازل‌ها بر اساس پالس‌های دریافتی از انکودر^۱ و سنجش سرعت تراکتور و مسافت طی شده، زمان مناسب برای پاشش و بازنگه‌داشتن شیرهای برقی را تنظیم می‌کند و در مواقع عدم حضور درخت و فاصله بین درختان دستور بسته شدن شیرهای برقی و عدم پاشش توسط نازل‌ها را ارسال می‌نماید. با توجه به امکان تفاوت بین ردیف‌های درختان در دو سوی تراکتور عملیات سم‌پاشی توسط بوم سمت چپ مستقل از بوم سمت راست و توسط مدارهای الکترونیکی جداگانه کنترل می‌گردد. برای دریافت اطلاعات فاصله بین دوربین تا عملگر توسط سیستم الکترونیکی لازم است این فاصله به پالس تبدیل شود و در برنامه میکروکنترلر اعمال شود. پالس معادل این فاصله از رابطه (۲) محاسبه شد.

$$(2) \quad \text{پالس کد کننده} \times \text{فاصله دوربین تا عملگر} = \text{مقدار پالس معادل محیط چرخ کوپل شده با کد کننده}$$

با توجه به اینکه بسامد خروجی انکودرهای استفاده شده ۵۰۰ پالس بر دور بود و همچنین فاصله دوربین تا نازل ۲۱۷ سانتی‌متر و محیط چرخ پنجم ۱۰۱ سانتی‌متر بود، مقدار پالس معادل فاصله دوربین تا عملگر ۱۰۷۴/۲۵ پالس محاسبه شد و در برنامه میکروکنترلر اعمال شد. همچنین برنامه میکروکنترلر به نحوی کدنویسی شد که چنانچه انکودر پس از مدت‌زمان ۲ ثانیه بدون حرکت بماند، شیر برقی بسته شود. این تدبیر برای جلوگیری از مصرف سم در یک محل در مواقعی که ممکن است به هر دلیلی ماشین سم‌پاش متوقف شود اتخاذ گردید. مدار هیدرولیکی مورد استفاده در سیستم سم‌پاش باغی طراحی شده و اجزای آن، در شکل ۷ قابل مشاهده است.

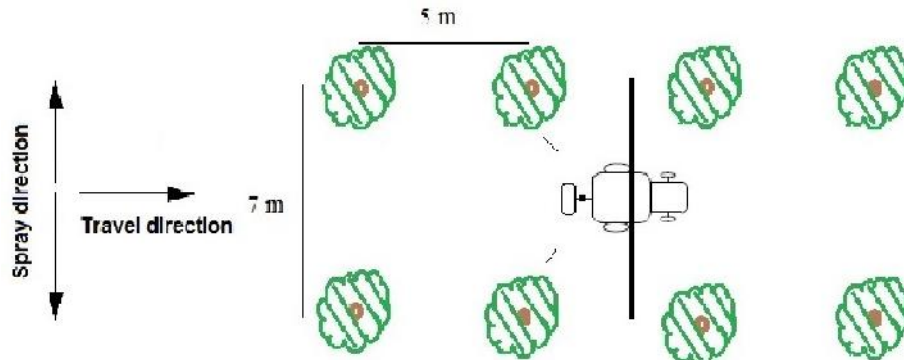
محل و زمان انجام آزمایش در باغ: ارزیابی‌های سم‌پاش طراحی شده برای درخت زیتون در باغ بش دهقان که در کیلومتر ۵ جاده شیراز- اهواز واقع است انجام شد. مساحت باغ ۲۰۱ هکتار بود که درختان زیتون کاشته شده ۶۱ هکتار آن را شامل می‌شدند و ۳۱ هکتار آن به‌صورت مکانیزه کاشت شده بودند. تعداد درختان زیتون در این باغ ۱۲۸۰۰ بود که سن درختان از ۵ تا ۷ سال بود. آزمون‌ها در دی‌ماه ۱۳۹۲ و در شرایط سرعت باد ۲ تا ۷ کیلومتر بر ساعت و دمای ۶ تا ۱۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۱۴ درصد انجام شدند.

نحوه ارزیابی سم‌پاشی در باغ: برای اندازه‌گیری مصرف سم، سم‌پاشی در مسیرهای یکسان انجام شد، که هر مسیر حرکت شامل



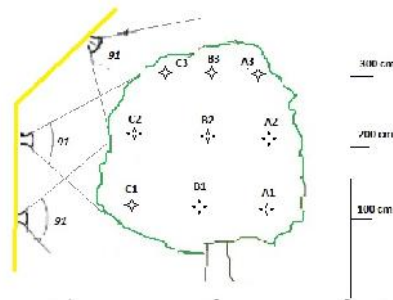
شکل ۷- طرح‌واره اجزای سم‌پاش باغی طراحی شده (۱- پمپ ۲- مخزن ۳- شیر فشارشکن ۴- فشارسنج ۵- آکومولاتور ۶- شیر سولونوئید ۷- عملیات پردازش تصویر ۸- کامپیوتر ۹- واحد کنترل کننده الکترونیکی ۱۰- نازل‌ها)

Fig.7. Schematic of the designed orchard sprayer components (1- Pump 2- Water tank 3- back pressure bypass valve 4- Pressure gauge 5- Accumulator 6- Solenoid valve 7- Image processing 8- Portable computer 9- Control circuits 10- Nozzle)



شکل ۸- الگوی کاشت درختان در باغ و نحوه اجرای آزمایش‌ها (دید از بالای مسیر حرکت)

Fig.8. Tree Pattern in the orchard and conduction of the experiments (Top view)

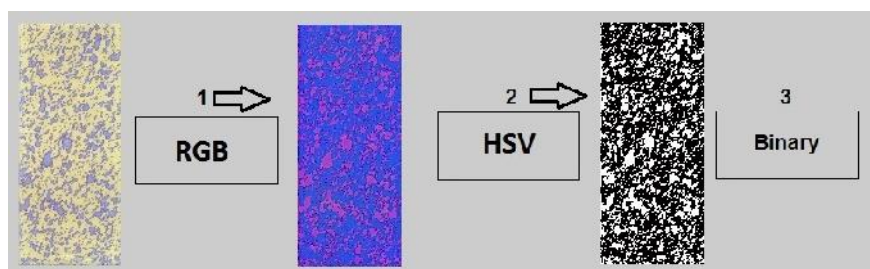


شکل ۹- نحوه قرارگیری و زاویه پاشش نازل‌ها

Fig.9. Nozzle arrangement and spraying angle



شکل ۱۰- نحوه قرارگیری کاغذهای حساس به آب، در مسیر سمپاشی
 Fig.10. Arrangement of water sensitive papers, along the spraying direction



شکل ۱۱- مراحل تبدیل تصویر رنگی WSP به باینری جهت تحلیل
 Fig.11. Conversion process of WSP images to binary for analysis

نتایج و بحث

نتایج حاصل از ارزیابی کاغذهای حساس به آب: نتایج

حاصل از تجزیه واریانس داده‌های درصد پاشش روی کاغذهای حساس به آب در جدول ۱ آمده است. همان‌طور که از نتایج جدول ۱ قابل مشاهده است، تأثیر ردیف‌های افقی، عمودی و سرعت پیشروی بر سطح پاشش روی کاغذهای حساس به آب، در ۳ سطح مختلف سرعت (۲، ۳/۵ و ۵ کیلومتر بر ساعت) در چهار تکرار، دارای تأثیر معنی‌داری در سطح ۱٪ بود.

جدول ۲ مقایسه میانگین‌های درصد پاشش روی کاغذهای حساس به آب در چهار تکرار برای سرعت‌های مختلف حرکت را با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵٪ نشان می‌دهد. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهند، بیش‌ترین مقدار سم‌پاشیده شده روی هدف، در کمترین سرعت پیشروی، یعنی سرعت ۲ کیلومتر بر ساعت، بوده است و کمترین سطح پاشش روی کاغذهای حساس به آب و هدف، در بیشترین سرعت مشاهده می‌شود. به‌علت ثابت بودن دبی خروجی نازل‌ها در مسیر حرکت و از آنجایی که در سرعت بیشتر، مسیر طی شده در مدت‌زمان کمتری طی می‌شود، دانسیته سم‌پاشیده شده به شکل معنی‌داری کاهش یافته است.

نحوه ارزیابی کاغذهای حساس به آب: کاغذهای حساس

به آب (WSP)، در کمتر از ۱۰ دقیقه پس از اعمال پاشش در حالت‌های مختلف آزمایش، جمع‌آوری شد و در کیسه‌های نایلونی زیپ‌دار، برای عدم جذب رطوبت از محیط، قرار داده شد. برای به‌دست آوردن درصد پاشش روی هر کاغذ حساس به آب، کاغذها توسط اسکنر مدل HP ۳۷۷۰ با رزولوشن dpi ۶۰۰ و با فرمت PNG اسکن شد. به کمک پردازش تصویر توسط نرم‌افزار متلب^۱ ۲۰۱۳ درصد پاشش بر روی هر کاغذ حساس به آب مشخص شد. برای پردازش، ابتدا تصویر کاغذهای حساس فراخوانی می‌شود، سپس خصوصیات RGB تصویر به HSV^۲ تبدیل شد و پس از آن تصویر باینری به‌دست آمد. از تصویر باینری به‌دست آمده درصد سطح پاشش شده روی کاغذ حساس تعیین و داده‌ها وارد اکسل^۳ شدند. تصویر مراحل تبدیل عکس رنگی به باینری که از نرم‌افزار متلب استخراج شد، در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود.

- 1-MATLAB
- 2- Hue- Saturation- Value
- 3- Excel

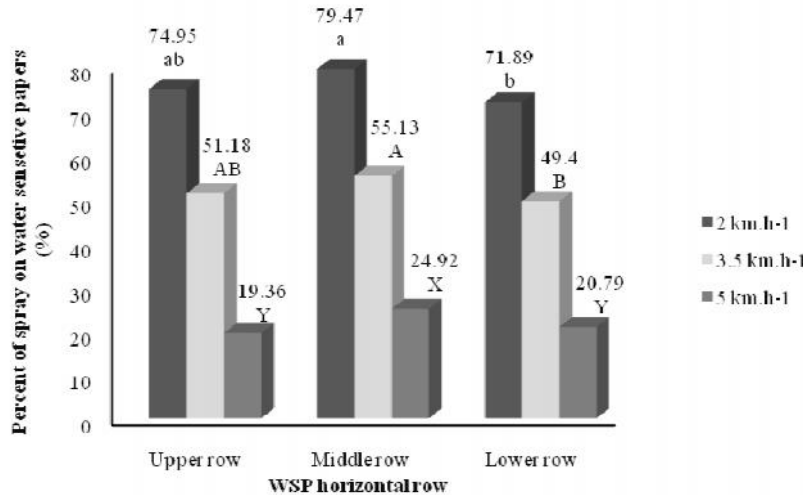
جدول ۱- تجزیه واریانس داده‌های مساحت پاشش شده روی کاغذهای حساس به آب در زمان پاشش دقیق

Table 1- Analysis of variances of data on sprayed area on water sensitive paper for precision spraying

منابع تغییر Source of variation	درجات آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات Mean squares	F
ردیف افقی Horizontal row	2	0.16	9.20**
ردیف عمودی Vertical row	2	1.13	64.27**
سرعت Speed (km h ⁻¹)	2	11.14	634.74**
خطا Error	488	0.02	
جمع Total	494		

** : Significant difference at 1%

** : وجود اختلاف معنی‌دار در سطح ۱٪



شکل ۱۲- میانگین‌های پاشش روی WSP در ردیف‌های افقی مختلف قرارگیری در زمان پاشش دقیق

Fig.12. Means of spraying percentage on WSP on horizontal rows at different positions for precision spraying

در شکل ۱۲ مقدار سم‌پاشیده شده در ردیف‌های افقی مختلف برای سرعت‌های مختلف نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در تمام سرعت‌ها مقدار پاشش بر روی کاغذهای روی درختان در ردیف وسط بیشتر از ردیف بالا و پایین بوده است و این می‌تواند به دلیل محذب بودن درخت در قسمت وسط تاج و نصب کاغذهای حساس ردیف وسط در این قسمت باشد.

در شکل ۱۳ الگوی پاشش بر روی کاغذهای حساس ردیف وسط در مسیر سم‌پاشی مشخص شده است. این شکل‌ها میانگین پاشش در ۲۷ محل نصب کاغذ حساس برای چهار تکرار، در سه سطح سرعت مختلف را نشان می‌دهد. از ابتدای شروع حرکت، کاغذهای حساس ۲ و ۳ روی درخت بوده که به ترتیب در ابتدا، وسط و انتهای درخت

جدول ۲- مقایسه میانگین‌های درصد پاشش روی کاغذهای

حساس به آب در سرعت‌های پیشروی مختلف (پاشش دقیق)

Table 2- Mean comparison of percent of spray on water sensitive papers at different forward speeds (precision spraying)

سرعت پیشروی (km h ⁻¹) Forward speed (km h ⁻¹)	درصد پاشش (%) Percent of spray (%)
2	75.43 ^a
3.5	51.90 ^b
5	21.69 ^c

اعداد با حروف مشابه اختلاف معنی‌دار ندارند (دانکن ۵٪)

Numbers followed by similar letters are not significantly different (Duncan 5%)

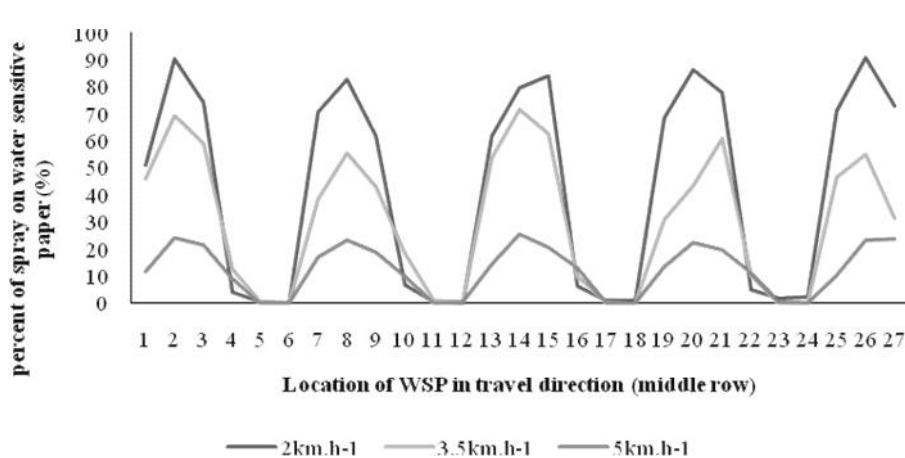
ارزیابی مقدار مصرف سم: نتایج نشان می‌دهد که مقدار سم‌پاشیده شده در سرعت‌های مختلف در دو حالت سم‌پاشی سراسر پاشی و سم‌پاشی خاص مکانی در فضای عبور از ۵ درخت و ۴ فضای خالی بین درخت‌های یکسان دارای اختلاف معنی‌داری است. مقدار کاهش مصرف سم در سرعت‌های مختلف در جدول ۳ آورده شده است.

نتایج نشان می‌دهد که مقدار سم مصرفی در حالت خاص مکانی در سرعت‌های مختلف نسبت به سم‌پاشی در حالت سراسر پاشی حدود ۵۴ درصد کاهش یافته است.

مقدار *t* استیودنت حاصل از مقایسه میانگین‌ها در ۲ حالت آزمایش شده در جدول ۴ قابل مشاهده است.

قرار داشتند و اعداد ۴ و ۵ و ۶ به ترتیب در ابتدا، وسط و انتهای فضای خالی قرار می‌گرفتند و به همین ترتیب در کل ۲۷ کاغذ برای ۵ درخت و ۴ فضای خالی نصب می‌شدند. با توجه به نمودار رسم شده مقدار آب نشسته شده روی کاغذهای حساس در سرعت‌های کمتر، بیشتر بوده است.

چنانکه در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود سیستم در هنگام قطع پاشش، اندکی دارای تأخیر بوده است. از علت‌های تأخیر، فشار باقی مانده در لوله‌های تحت فشار است که پس از دستور قطع، این فشار همچنان موجب خروج مقداری مایع از نازل‌ها می‌شود. با استفاده از سیستم رفع چکه در پشت نازل‌ها می‌توان از خروج مایع اضافی جلوگیری کرد. همچنین با کالیبراسیون می‌توان این زمان را کاهش داد و در واقع قطع پاشش را اندکی زودتر انجام داد و از این خطا کاست.



شکل ۱۳- الگوی پاشش در محل مختلف قرارگیری WSP در مسیر حرکت (ردیف وسط)

Fig.13. Spray pattern at different locations of WSP along the travel direction (middle row)

جدول ۳- میانگین سم مصرف شده از یک نازل (میلی لیتر) در حالت‌های مختلف

Table 3- The mean value of consumed pesticide out of a nozzle at different states

	سرعت (km h ⁻¹) Speed (km h ⁻¹)	سراسر پاشی (میلی لیتر) Overall spraying (ml)	خاص مکانی (میلی لیتر) Site-specific (ml)	کاهش مصرف سم (%) Reduction of pesticide consumption
سم مصرفی از یک نازل (میلی لیتر)	2	996.25	457.50	54.07
Amount of consumed pesticide	3.5	578.75	265.50	54.64
out of a nozzle (ml)	5	408.75	186.25	54.43

جدول ۴- مقدار t استیودنت حاصل از مقایسه میانگین‌ها در ۲ حالت (سم‌پاشی سراسر پاشی در برابر خاص مکانی)

Table 4- T value obtained from the comparison of the two modes (conventional overall spraying versus site-specific spraying)

آزمون t t test	سرعت پیشروی (km h ⁻¹) Forward speed (km h ⁻¹)	سراسر پاشی متداول Conventional overall spraying		
		2	3.5	5
سم‌پاشی خاص مکانی Site specific spraying	2	41.79*		
	3.5		32.39*	
	5			24.53*

*) Significant difference at 5%

(*) وجود اختلاف معنی‌دار در سطح ۵٪

و کمترین سطح پاشش روی کاغذهای حساس به آب در بیشترین سرعت مشاهده گردید که این امر به علت ثابت بودن نرخ خروجی نازل‌ها صورت می‌گیرد و در سرعت‌های بالاتر بهتر است از نازل‌های بیشتری استفاده کرد. با اندازه‌گیری مصرف آب پخش شده توسط نازل‌ها در هر سطح از سرعت پیشروی نتایج نشان داد در استفاده از سم‌پاش باغی نرخ متغیر، در مقایسه با سم‌پاش باغی متداول کاهش حدود ۵۴ درصدی مصرف سم بر روی درختان زیتون به‌دست آمد. میزان کاهش مصرف سم در باغ‌های جوان، که درختان کوچک‌تر هستند و فاصله بین تاج درختان زیادتر است، می‌تواند از این مقدار هم فراتر رود.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک دستگاه سم‌پاش با امکان اعمال سم روی هدف به دو صورت سراسر پاشی و خاص مکانی طراحی، ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. برای تشخیص هدف سم‌پاشی از فناوری ماشین بینایی استفاده شد که با به‌کارگیری نرم‌افزار لب ویو و استفاده از روش RGB این عمل انجام شد. ارزیابی کاغذهای حساس نصب‌شده در مسیر اعمال سم نشان داد سرعت پیشروی در سه سطح مختلف (۲، ۳/۵ و ۵ کیلومتر بر ساعت) و موقعیت نصب آن‌ها در ردیف‌های افقی و عمودی بر روی درخت تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال ۱٪ بود. همچنین بیشترین مقدار سم‌پاشیده شده روی هدف، در کمترین سرعت پیشروی، یعنی سرعت ۲ کیلومتر بر ساعت

References

- Chen, Y., H. Zhu, H. Ozkan, R. Derksen, and C. Krause. 2013. Spray drift and off-target loss reduction with a precision air-assisted sprayer. Transactions of the ASABE 56: 1273-1281.
- Chen, Y., H. Ozkan, H. Zhu, R. Derksen, and C. Krause. 2013. Spray deposition inside tree canopies from a newly developed variable-rate air assisted sprayer. Transactions of the ASABE 56: 1263-1272.
- Deveau, J. 2009. Six elements of effective spraying in orchards and vineyards. Ontario, Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs.
- Giles, D., M. Delwiche, and R. Dodd. 1988. Electronic measurement of tree canopy volume. Transactions of the ASAE 31: 264-272.
- Giles, D., M. Delwiche, and R. Dodd. 1989. Sprayer control by sensing orchard crop characteristics: Orchard architecture and spray liquid savings. Journal of Agricultural Engineering Research 43: 271-289.
- Hoçevan, M., B. Sirok, V. Jecic, T. Godesa, M. Lesnik, and D. Stajniko. 2010. Design and testing of an automated system for targeted spraying in orchards. Journal of Plant Diseases and Protection (JPDP) 117: 71-79.
- Lee, K., and R. Ehsani. 2008. A laser-scanning system for quantification of tree-geometric characteristics. ASABE Paper No. 083980, ASABE, St. Joseph, MI.
- Loni, R., and M. Loghavi. 2014. Development and evaluation of a gas flamer with the ability of targeted-discrete flaming in locating and eradicating weeds. Journal of Agricultural Machinery 4: 88-97. (In Farsi).
- Ohta, Y. I., T. Kanade, and T. Sakai. 1980. Color information for region segmentation. Computer graphics and image processing 13: 222-241.
- Pierce, F. J., and P. Nowak. 1999. Aspects of precision agriculture. Advances in Agronomy 67: 1-85.
- Plant, R. E. 2001. Site-specific management: the application of information technology to crop

- production. *Computers and Electronics in Agriculture* 30: 9-29.
12. Rosell Polo, J. R., R. Sanz, J. Llorens, J. Arnó, A. Escolà, M. Ribes-Dasi, J. Masip, F. Camp, F. Gràcia, and F. Solanelles. 2009. A tractor-mounted scanning LIDAR for the non-destructive measurement of vegetative volume and surface area of tree-row plantations: A comparison with conventional destructive measurements. *Biosystems engineering* 102: 128-134.
 13. Solanelles, F., A. Escolà, S. Planas, J. Rosell, F. Camp, and F. Gràcia. 2006. An electronic control system for pesticide application proportional to the canopy width of tree crops. *Biosystems Engineering* 95: 473-481.
 14. Subramanian, V., T. F. Burks, and A. Arroyo. 2006. Development of machine vision and laser radar based autonomous vehicle guidance systems for citrus grove navigation. *Computers and electronics in agriculture* 53: 130-143.
 15. Wei, J., and M. Salyani. 2004. Development of a laser scanner for measuring tree canopy characteristics: Phase 1. prototype development. *Transactions of the ASABE* 47: 2101-2107.
 16. Wei, J., and M. Salyani. 2005. Development of a laser scanner for measuring tree canopy characteristics: Phase 2. Foliage density measurement. *Transactions of the ASABE* 48: 1595-1601.
 17. Zhu, H., R. Derksen, H. Guler, C. Krause, and H. Ozkan. 2006. Foliar deposition and off-target loss with different spray techniques in nursery applications. *Transactions of the ASABE* 49: 325-334.

Development and evaluation of a targeted orchard sprayer using machine vision technology

H. Asaei¹ - A. Jafari^{2*} - M. Loghavi³

Received: 14-07-2014

Accepted: 27-01-2015

Introduction

In conventional methods of spraying in orchards, the amount of pesticide sprayed, is not targeted. The pesticide consumption data indicates that the application rate of pesticide in greenhouses and orchards is more than required. Less than 30% of pesticide sprayed actually reaches nursery canopies while the rest are lost and wasted. Nowadays, variable rate spray applicators using intelligent control systems can greatly reduce pesticide use and off-target contamination of environment in nurseries and orchards. In this research a prototype orchard sprayer based on machine vision technology was developed and evaluated. This sprayer performs real-time spraying based on the tree canopy structure and its greenness extent which improves the efficiency of spraying operation in orchards.

Materials and Methods

The equipment used in this study comprised of three main parts generally: 1- Mechanical Equipment 2- Data collection and image processing system 3- Electronic control system

Two booms were designed to support the spray nozzles and to provide flexibility in directing the spray nozzles to the target. The boom comprised two parts, the vertical part and inclined part. The vertical part of the boom was used to spray one side of the trees during forward movement of the tractor and inclined part of the boom was designed to spray the upper half of the tree canopy.

Three nozzles were considered on each boom. On the vertical part of the boom, two nozzles were placed, whereas one other nozzle was mounted on the inclined part of the boom. To achieve different tree heights, the vertical part of the boom was able to slide up and down. Labview (version 2011) was used for real time image processing. Images were captured through RGB cameras mounted on a horizontal bar attached on top of the tractor to take images separately for each side of the sprayer. Images were captured from the top of the canopies looking downward.

The triggering signal for actuating the solenoid valves was initially sent to the electronic control unit as the result of image processing. Electronic control unit was used to adjust the right time of spraying based on the signals received from the encoder to precisely spray the targeted tree. The distance between the camera and spraying nozzles was considered in the microcontroller program. The solenoid would be turned off and stop the spraying when the vision system realized that there was a gap between the trees.

Water sensitive papers (WSP) were used to evaluate the sprayer performance in prompt spraying of the trees and cutting off at hollow spaces between the trees.

Water sensitive papers were attached to three ropes extended along the movement direction of the tractor at top, middle, and bottom of the trees so that each tree comprised 9 WSPs whereas other 9 WSPs were placed at each gap between two successive trees. Three levels of forward speed of 2 km h⁻¹, 3.5 km h⁻¹ and 5 km h⁻¹ was tried in these experiments to evaluate the effect of forward speed on spraying performance. Experiments were conducted in three replications. Liquid consumption of the sprayer designed in this research was compared with the conventional overall spraying.

Results and Discussion

Analysis of variances of data gained from water sensitive paper corresponding to the sprayed areas showed a significant effect of forward speed on prompt spraying.

Comparison of means of spraying coverage on WSPs at different forward speeds with four replications

1- M.Sc, Department of Biosystems Engineering, Shiraz University, Iran

2- Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Shiraz University, Iran

3- Professor, Department of Biosystems Engineering, Shiraz University, Iran

(*- Corresponding Author Email: ajafari@shirazu.ac.ir)

showed that the maximum amount of targeted sprayed pesticide has been achieved at the lowest speed (2 km h^{-1}) while the lowest amount of sprayed was seen at the maximum speed. Although higher forward speed is preferred because it increases the operation capacity of the sprayer, increasing the forward speed of the sprayer reduces the coverage density of the liquids on WSPs because the output rates of the nozzles are constant. Therefore, in cases that higher forward speed is demanded, more nozzles should be added to the sprayer booms

Comparison between the liquid consumptions of the proposed system and conventional overall spraying showed that in this study, up to 54% less material has been used for the experiment in olive orchard.

Conclusions

The sprayer designed in this study was able to detect the gap between the trees in orchards using a machine vision system to stop the spraying on places where no tree exists. Results showed that employing the new sprayer decreased a significant amount of spray liquids which can be important both economically and environmentally. Considering to lack of pesticide spraying in the hollow spaces between the trees, certainly, more significant reduction is expected to achieve in young orchards where trees are small and there are larger gaps between the trees

Keywords: Automatic control, Image processing, Intelligent spraying, Pesticide consumption reduction