

## ارائه و ارزیابی یک مدل تجربی برای بادبردگی نازل‌های بادبزی در تونل باد به کمک پردازش

### تصویر

سیدحسین فتاحی<sup>۱\*</sup> - شمس‌اله عبدالله‌پور<sup>۲</sup> - اسماعیل اسماعیل‌زاده<sup>۳</sup> - محمد مقدم‌واحد<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۹۲/۱/۱۹

تاریخ پذیرش: ۹۲/۷/۲۱

### چکیده

سالانه، میلیون‌ها لیتر محلول سم، برای مبارزه با آفات و بیماری‌های گیاهی در مزارع استفاده می‌شود. استفاده‌ی گسترده از سموم شیمیایی، خطرات زیست محیطی زیادی را ایجاد می‌کند. بادبردگی ذرات یکی از مهم‌ترین معضلات در سم‌پاشی است، که باعث آلودگی زمین‌های اطراف مزرعه، انسان‌ها و سایر جانداران می‌شود. مدیریت اندازه‌ی ذره، عامل اصلی در کنترل بادبردگی است. در این تحقیق عوامل مؤثر در اندازه‌ی قطرات (قطرمیانه‌ی حجمی) نشسته در نواحی غیر هدف با استفاده از روش‌های آماری مورد مطالعه قرار گرفت. اثرات نوع نازل (نازل بادبزی با سطح مقطع خروجی متفاوت)، فشار سم‌پاشی، ارتفاع بوم سم‌پاشی و سرعت باد به‌عنوان فاکتورهای مؤثر در بادبردگی، روی اندازه‌ی ذرات مورد بررسی قرار گرفتند. یک تونل باد افقی، با ابعاد ۰/۴۷ متر عرض، ۰/۷۵ متر ارتفاع و ۵/۵ متر طول برای انجام آزمایش‌ها طراحی و ساخته شد. آزمایش‌ها به‌صورت فاکتوریل اسپلیت‌پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با دو تکرار انجام شد. اندازه‌گیری قطرات در ترکیب‌های تیماری با نازل بادبزی در سه سطح مقطع خروجی (۱۱۰۰۳-۰/۸۷ میلی‌متر مربع، ۱۱۰۰۴-۱/۱۸ میلی‌متر مربع و ۱۱۰۰۶-۱/۸ میلی‌متر مربع)، فشار پاشش (۱۵۰، ۲۷۵ و ۴۰۰ کیلوپاسکال)، سرعت باد (۱، ۲ و ۳ متر بر ثانیه) و ارتفاع پاشش بوم (۰/۳۵، ۰/۵۵ و ۰/۷۵ متر) انجام شد. کاغذهای حساس به آب در فواصل ۰/۸، ۱/۶ و ۲/۴ متری از انتهای پاشش نازل برای آشکارسازی اندازه‌ی قطرات استفاده شدند. در این تحقیق فاکتورهای فشار، سرعت باد و ارتفاع بر اندازه‌ی قطره در فاصله‌ی مورد نظر اثر افزایشی داشتند. ولی اثر نازل کاهش‌ی بود. با توجه به ضرایب مدل رگرسیونی اثر سرعت باد قابل ملاحظه بود.

**واژه‌های کلیدی:** اندازه‌ی قطره، بادبردگی، تونل باد، قطر میانه‌ی حجمی، مدل تجربی

### مقدمه

پاشش یکنواخت است (Afshari, 1992). اندازه‌ی قطرات به این علت حائز اهمیت است که اگر قطرات کوچک‌تر از حد مطلوب باشند دچار بادبردگی<sup>۵</sup> شده و اگر بزرگ‌تر از حد مطلوب باشند از روی سطح برگ گیاهان سر خورده و روی زمین می‌افتند. از طرفی دیگر موجب مصرف بیش از حد سم خواهد شد (Shafii, 1992). سالانه در ایران سطحی حدود ۱۲ میلیون هکتار مبارزه‌ی شیمیایی صورت می‌پذیرد که با این وسعت مبارزه، کنترل بادبردگی اهمیت پیدا می‌کند (Statistical Letter, 2009).

بادبردگی سموم شیمیایی به معنای حرکت قطرات سم به طرف مناطق، محصولات و موجودات زنده‌ی غیرهدف می‌باشد (Wolf, 2000) شدت افت سم، ارتفاع اولیه و سایر اثرات اصلی از ماشین مورد استفاده، سرعت و جهت باد، ثابت شرایط جوی و سایر عوامل محیطی از جمله عوامل تأثیرگذار بر بادبردگی هستند (Shafii, 1992). افزایش فشار سم‌پاشی باعث ریزش شدن قطرات سم می‌شود (Klein

با توجه به رشد روز افزون جمعیت، نیاز به تولیدات کشاورزی و مواد غذایی در جهان روز به روز بیشتر می‌شود و این در حالی است که هر سال مقادیر زیادی از گیاهان زراعی مورد هجوم حشرات زیان‌آور، عوامل بیماری‌زا و خسارت علف‌های هرز قرار می‌گیرند. از این رو حفاظت گیاهان کشت شده از گزند عوامل مخرب اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند (Rakhshani, 2002). برای بهره‌برداری بیشتر از سموم و کاهش مقدار مصرف آن‌ها که برای محیط زیست زیان‌آور هستند، لازم است تدابیری اتخاذ شود. یکی از اقدامات مؤثر و عملی در این زمینه، واسنجی سم‌پاش‌ها جهت ایجاد قطرات با اندازه‌ی مناسب و

۱- دانشجوی دکتری گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تبریز  
(\*- نویسنده مسئول: Email: s.hosseini\_fattahi@tabrizu.ac.ir)

۲- دانشیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تبریز

۳- استاد گروه سیالات مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز

۴- استاد گروه به‌نژادی و بیوتکنولوژی گیاهی دانشگاه تبریز

نمودند. سه نازل AI<sup>۵</sup>، XR<sup>۶</sup>، TT<sup>۷</sup> از سیستم‌های سم‌پاشی نوع تی‌جت و DR<sup>۸</sup> از نوع ویلگر بودند. با استفاده از پردازش تصویر کارت‌های اسکن شده، سطح پوشش هر کارت تعیین شد. مقدار سطح پوشش هر کارت برای بیان میزان بادبردگی استفاده شد. نازل XR بادبردگی قابل توجهی نسبت به نازل‌های دیگر AI، TT و DR داشت. در کل، استفاده از نازل‌های کاهنده‌ی بادبردگی برای کاهش بادبردگی مفید خواهند بود.

به دلیل این که میزان سم مصرفی در دنیا و به‌ویژه در ایران زیاد است، بنابراین بادبردگی سم و اثرات زیان‌بار آن روی اکوسیستم‌های طبیعی اهمیت می‌یابد. با توجه به بررسی منابع انجام گرفته لزوم ارائه‌ی یک مدل که بتواند اندازه‌ی قطره را در فواصل مختلف از انتهای پاشش نازل بر اساس چهار متغیر مستقل تأثیرگذار بر روی بادبردگی (نوع نازل به کار رفته، فشار سم‌پاشی، ارتفاع بوم و سرعت باد) بیان کند، احساس می‌شود. نازل‌های بادبزی به دلیل استفاده بیشتر کشاورزان در آزمایش‌ها مدنظر قرار گرفت. مطالعات تجربی قبلی تأثیر متغیرهای مستقل کمتری را بررسی کرده بودند که از این جهت مدل جامع و کاملی ارائه نشده بود. با استفاده از این مدل می‌توان هم اثر پارامترهای مختلف روی بادبردگی را تعیین کرد و همچنین با بهینه‌کردن اندازه‌ی قطرات با تغییر متغیرهای مستقل تأثیرگذار بر آن از اثرات مضر بادبردگی سم بر روی محیط کاست.

### مواد و روش‌ها

بررسی بادبردگی به سه صورت انجام می‌شود: (۱) شرایط مزرعه‌ای که در آن کنترل جریان هوا به دلیل اغتشاش بالا مشکل است. (۲) شرایط آزمایشگاهی که از یک دمنده برای مدل سازی اثر سرعت باد روی قطرات استفاده می‌شود. (۳) شرایط کنترل شده در تونل باد که هوا با کمترین اغتشاش به قطرات سم برخورد می‌کند که از این روش به دلیل دقیق بودن، برای مدل کردن استفاده شد. برای انجام آزمایش‌ها دو مورد در دستور کار قرار گرفت: (۱) ساخت تونل باد افقی و (۲) ساخت سیستم هیدرولیکی برای ایجاد پاشش.

### طراحی و ساخت تونل باد مادون صوت باز<sup>۹</sup>

برای داده‌برداری و تعیین اثر فاکتورهای مختلف روی بادبردگی قطرات، یک تونل باد مادون صوت باز افقی (شکل ۱)، با مقطع کاری ۰/۴۷ متر عرض، ۰/۷۵ متر ارتفاع و ۵/۵ متر طول در آزمایشگاه

(*et al.*, 2007). کوچک‌تر شدن سطح مقطع روزنه‌ی نازل به‌خاطر ایجاد قطرات ریزتر، رطوبت نسبی کم و دمای بالاتر محیط بادبردگی را زیادتر می‌کند (Storrie, 2004). بادبردگی به هندسه‌ی نازل، ویسکوزیته و کشش سطحی محلول وابسته است. هر چه کشش سطحی محلول کمتر باشد ذرات ریزتری به‌وجود می‌آید (Afshari, 1992). پدیده‌ی وارونگی<sup>۱</sup> هوا زمانی اتفاق می‌افتد که یک لایه هوای سرد در زیر یک لایه هوای گرم به دام افتاده و آمیختگی هوا اتفاق می‌افتد، که در این حالت ذرات سم با قرار گرفتن در لایه هوای سرد، می‌توانند با یک نسیم آرام به نقاط دور دست هدایت شوند (Wolf, 2000). در حالی که از لحاظ پوشش و مؤثر بودن معمولاً قطرات کوچک‌تر ارجحیت دارند، در عوض قطرات بزرگ از نقطه نظر کاهش بادبردگی مزیت پیدا می‌کنند. وضعیت ایده‌ال ایجاد حالتی از پاشش سم است که در برگ‌برنده‌ی قطراتی هم اندازه یا دارای طیفی باریک اندازه باشد (Shafii, 1992).

محققان بسیاری، از کاغذهای حساس به آب<sup>۲</sup> برای تعیین طیف قطرات سم استفاده می‌کنند (Syngenta, 2002). کاغذ با تماس قطرات آب به آن آبی رنگ می‌شود. این کاغذها با توجه به این که شمارش و ارزیابی قطرات روی برگ‌ها خیلی سخت است، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در برخی مطالعات کاغذها به برگ‌ها تماس داده شده و مورد هدف قطرات واقع می‌شوند (Matthews, 2000). قطر میانه، شاخصی برای بررسی طیف اندازه‌ی قطرات است که آن‌ها را برحسب کمیت مورد مطالعه به دو نیمه‌ی مساوی تقسیم می‌نماید. قطر میانه‌ی حجمی<sup>۳</sup>، یعنی قطر ذره‌ای که حجم ذرات بزرگ‌تر از این قطره با حجم ذرات کوچک‌تر از آن برابر باشد. به عبارتی قطرات پاشیده شده را از نظر حجم به دو قسمت مساوی تقسیم می‌کند و بیشتر بودن آن نشانگر درشت بودن قطره می‌باشد (Srivastava *et al.*, 2006).

گالر و همکاران (۲۰۰۷) پتانسیل بادبردگی را در نازل‌های بادبزی القایی با هوا<sup>۴</sup> و متداول (بادبزی) مورد مقایسه قرار دادند. برای تعیین میزان بادبردگی هوایی و روی زمین از کاغذهای حساس به آب در یک تونل باد استفاده شد. آزمایش‌ها در دو سطح سرعت ۲/۵ و ۵ متر بر ثانیه انجام شد. در این تحقیق نازل‌های القایی با هوا، بادبردگی را نسبت به نازل‌های متداول کاهش دادند. در کل، این نازل‌ها با داشتن محفظه‌ی پیش‌رونده می‌توانند قطرات نسبتاً درشت‌تری را تولید کنند و در مقایسه با نازل‌های بادبزی میزان بادبردگی را کاهش دهند. وولف و همکاران (۲۰۰۲) چهار نوع نازل بادبزی مخصوص کاهش بادبردگی را در تونل باد با استفاده از کاغذهای حساس به آب ارزیابی

- 5- Venturi flat-fan
- 6- Extended range flat-fan
- 7- Turbo flat-fan
- 8- Combo-jet flat-fan
- 9- Subsonic open wind tunnel

- 1- Inversion
- 2- Water sensitive paper
- 3- Volume median diameter
- 4- Air-injection nozzle (air-induction nozzle)

نیز مورد بررسی قرار داد. با تغذیه مواد جامد از محل پاشش به داخل تونل با مدار پنوماتیکی این کار امکان‌پذیر است. از مهم‌ترین مزیت این دستگاه بهینه‌کردن روش کار سم‌پاش‌ها به منظور حفظ سلامتی انسان‌ها و سایر جانداران از سم‌بردگی در زمین‌های زراعی است. شکل ۳ تصویر کاملی از تونل مادون صوت باز را در آزمایشگاه نشان می‌دهد.

### انجام آزمایش‌ها

بعد از طراحی و ساخت تونل باد، ترکیبات تیماری تشکیل شده از متغیرهای مستقل (نوع نازل، فشار سم‌پاشی، ارتفاع نازل و سرعت باد) تأثیرگذار بر بادبردگی تشکیل شدند. معیار بادبردگی خارج شدن قطره از زیر نازل پاشش می‌باشد. از جمله نازل‌های متداول برای سم‌پاشی، نازل‌های بادبزی (تی‌جت) هستند که در مواردی که باید تمام سطح مزرعه پوشانده شود و نیازی به نفوذ سم به داخل شاخ و برگ‌ها نیست از این نوع نازل‌ها استفاده می‌شود. الگوی پاشش این نازل‌ها پهن بوده و کناره‌های مورب دارد. در تیمارها از سه نوع نازل با دبی مختلف (با سه سطح سوراخ متفاوت) با زاویه‌ی پاشش ۱۱۰ درجه استفاده شد.

اندازه‌گیری قطرات در ترکیب‌های تیماری با نازل بادبزی در سه سطح مقطع روزنه، فشار پاشش، سرعت باد و ارتفاع پاشش بوم در سه سطح انجام شد (جدول ۱). آزمایش‌ها به صورت فاکتوریل اسپلیت پلات بر مبنای طرح بلوک‌های کامل تصادفی در دو تکرار انجام شدند. در این طرح نوع نازل و فشار سم‌پاشی به عنوان فاکتورهای اصلی و ارتفاع نازل و سرعت باد نیز به عنوان فاکتورهای فرعی به کار برده شدند. ۱۶۲ تیمار در کل آزمایش‌ها انجام شد.

برای داده‌برداری از کاغذهای حساس به آب استفاده شد که زرد رنگ هستند و حاوی محلول برموفنول آبی بوده که به محض برخورد آب به علت یونیزه شدن رنگ اصلی، آبی رنگ می‌شوند (شکل ۴). این کاغذها در فواصل ۰/۸، ۱/۶ و ۲/۴ متری از انتهای پاشش هر نازل در داخل کانال تونل باد قرار داده شدند. در هر فاصله، ۳ کاغذ قرار می‌گرفت که در مجموع در هر تیمار ۹ کاغذ حساس به آب نمونه‌برداری می‌شد (شکل ۵).

### پردازش تصویر کاغذها و به دست آوردن قطر میانه‌ی

#### حجمی

کاغذهای حساس به آب با اسکنر HP Scanjet 3800 با قدرت تفکیک<sup>۵</sup> ۶۰۰ dpi اسکن شدند.

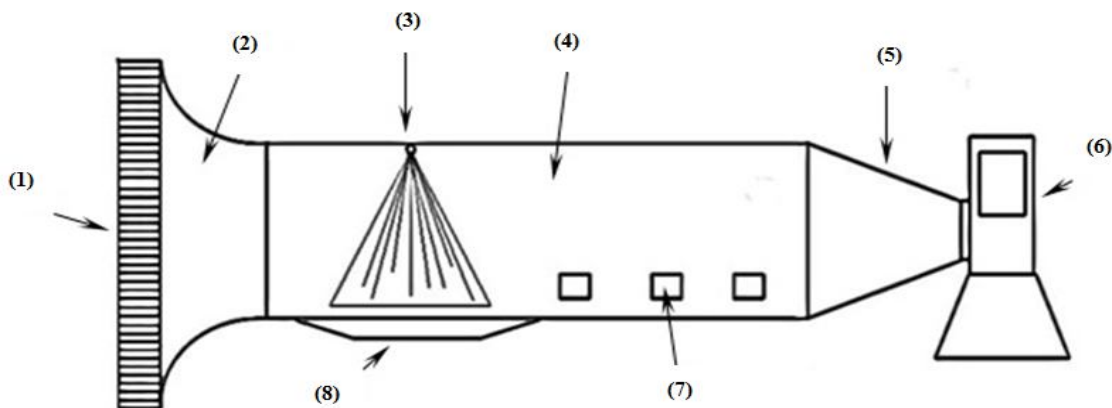
سیالات دانشکده‌ی مکانیک طراحی و ساخته شد. از یک فن (۶) با قدرت سه کیلووات برای این کار استفاده شد. کانال تونل باد به خط مکش این فن وصل شده بود. از یک لانه زنبوری<sup>۱</sup> (۱) برای ایجاد حرکت مستقیم هوا در داخل تونل باد و کاهش توربولانس آن بهره گرفته شد. هوا بعد از عبور از لانه زنبوری به نازل (۲) می‌رسید که یکنواخت کردن سیال قبل از ورود هوای ورودی به منطقه‌ی کاری وظیفه‌ی این قسمت بود. کانال و منطقه‌ی کاری (۴) شامل: محل پاشش (۳)، محل ذوزنقه‌ای خروج آب (۸) و محل قرارگیری کاغذهای حساس به آب (۷) می‌باشد. در اینجا جریان هوا با سرعتی که دارد به قطرات پاشش شده از نازل برخورد کرده و این قطرات از زیر نازل تغییر مسیر داده و در کف کانال روی کاغذهای حساس به آب نشست می‌کنند که این پدیده، بادبردگی قطرات را نشان می‌دهد. هوا از قسمت مبدل (۵) رد شده و به خط مکش فن رسیده و از خط دمش آن خارج می‌شود. طول تقریبی تونل از ابتدا تا انتها در حدود ۸/۵ متر بود. برای اندازه‌گیری سرعت هوا از سرعت‌سنج سیم داغ<sup>۲</sup> مدل yk-2004ah استفاده شد، که سرعت هوا را بعد از یکنواخت شدن آن در نزدیکی محل پاشش می‌سنجید. در کنار محل پاشش سیستم تغییر دور (اینورتر<sup>۳</sup>) با توان ۳/۷ کیلووات برای تغییر دور فن کار گذاشته شده بود که امکان بررسی بادبردگی قطرات سم (آب) در سرعت‌های مختلف را فراهم می‌کرد.

### سیستم هیدرولیکی برای ایجاد پاشش

سیستم هیدرولیکی برای ایجاد پاشش قطرات مایع که از یک پمپ پنتاکس JMC با هد ۵۰ متر بهره می‌برد، به کار برده شد (شکل ۲). مقدار فشار از طریق فشارسنج دستگاه قابل رؤیت بود. برای دستیابی به سطوح مختلف فشار، از یک شیر کنترل دبی استفاده شد. سیال از طریق قسمت توری شکل زیر محل پاشش (قسمت ذوزنقه‌ای در شکل ۱) به مخزن باز می‌گشت تا از این طریق مدار هیدرولیکی کامل شود. با توجه به اینکه تونل از جنس پلکسی گلس ساخته شده و حالت شیشه‌ای داشت، امکان تصویر برداری از بیرون و چگونگی حرکت قطرات بادبرده شده با استفاده از دوربین با دقت بالا را نیز امکان‌پذیر می‌ساخت. جامع بودن دستگاه امکان استفاده در سایر زمینه‌ها از جمله توان تحلیل نیروی پسای<sup>۴</sup> ذره برای مدل سازی جداکردن مواد اصلی از مواد اضافی و تحلیل حرکت انواع ذرات از جمله مواد پودری شکل، قطرات آب و سم، دانه‌های روغنی را نیز به آن می‌دهد.

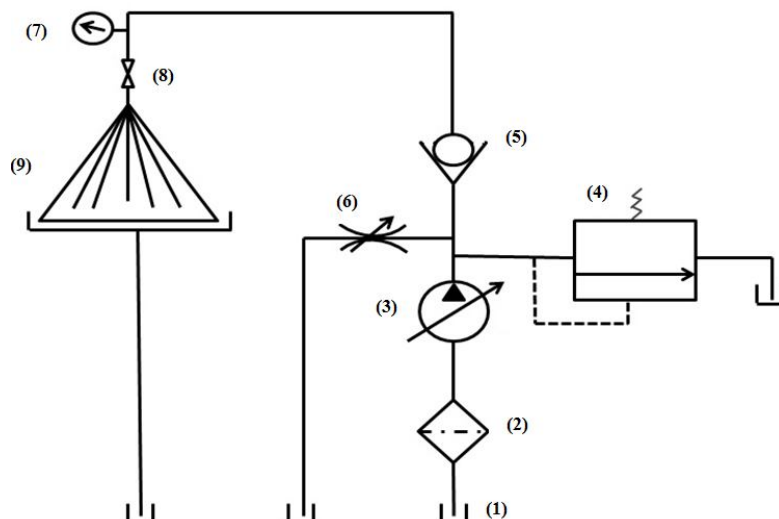
با تغییر مدار هیدرولیکی به مدار پنوماتیکی می‌توان ذرات جامد را

- 1- Honeycomb
- 2- Hot wire
- 3- Inverter
- 4- Drag



شکل ۱- طرحواره‌ای از تونل باد مادون صوت باز ساخته شده با تمامی جزئیات؛ (۱) لانه زنبوری، (۲) نازل انقباضی، (۳) محل پاشش، (۴) کانال و منطقه‌ی کاری، (۵) مبدل، (۶) فن، (۷) محل قرارگیری کاغذهای حساس به آب، (۸) محل خروج آب

Fig.1. A schematic of the subsonic open wind tunnel, built with all the details; (1) Honeycomb, (2) Contraction nozzle, (3) Site of injection, (4) Test section, (5) Converter, (6) Fan, (7) The place of water sensitive paper, (8) Exit of water



شکل ۲- سیستم هیدرولیکی برای ایجاد پاشش که اجزای داخلی آن عبارت‌اند از؛ (۱) مخزن، (۲) فیلتر خط مکش، (۳) پمپ هیدرولیک جابه‌جایی متغیر (سانتریفوژ)، (۴) شیر کنترل فشار، (۵) شیر یک‌طرفه، (۶) شیر کنترل دبی، (۷) فشارسنج، (۸) شیر قطع و وصل، (۹) محل ایجاد پاشش

Fig.2. Hydraulic system for spray the internal components include; (1) Reservoir, (2) Suction line filter, (3) Variable displacement hydraulic pump (centrifugal), (4) Pressure control valve, (5) One-way valve, (6) Flow control valve, (7) Barometer, (8) Shut off valve, (9) Site of injection

شد، که در پردازش تصویر از ضریب  $1/8$  برای کل قطرات استفاده شد (Syngenta, 2002). اساس کار نرم افزار بر این اصل استوار بود که سطح هر قطره را معادل با  $\frac{\pi D^2}{4}$  می‌گرفت و از این طریق به قطر معادل آن قطره دست می‌یافت (Daneshjoo, 2008). خروجی نرم افزار شامل قطر میانه‌ی حجمی، قطر میانه‌ی عددی، تعداد قطرات و قطر آن‌ها برای هر تصویر بود که از قطر میانه‌ی حجمی به‌عنوان معیاری برای اندازه‌ی قطرات بادبرده استفاده شد.

تصاویر اسکن شده برای پردازش و به‌دست‌آوردن قطر میانه‌ی حجمی، وارد نرم افزار سنجش تراکم و اندازه‌ی قطرات سم SIBA<sup>۱</sup> شدند (Daneshjoo, 2008). نرم افزار ابتدا تصاویر را به حالت باینری تبدیل می‌کرد تا رنگ زرد از پس‌زمینه حذف شده و فقط قطرات نشسته روی کاغذ معلوم باشند. به‌دلیل پخش شدگی قطرات آب روی کاغذ از یک ضریب پخش<sup>۲</sup> برای کاغذهای حساس به آب استفاده

1- Scientific image blob analyzer  
2- Spread factor



شکل ۳- تونل باد مادون صوت باز برای مدل سازی تجربی بادبردگی قطرات سم در شرایط کنترل شده‌ی جریان هوا  
**Fig.3.** Subsonic open wind tunnel for experiments modeling of toxin droplet drift in controlled conditions of air flow

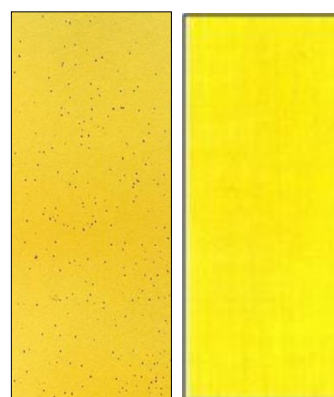
جدول ۱- متغیرهای مستقل به کار رفته در آزمایش‌ها و سطح آن‌ها

**Table 1-** The independent variables used in the experiments and their levels

سطح متغیرها Level of variables	متغیر Variable
$P_1= 150$ kPa	فشار Pressure
$P_2= 275$ kPa	
$P_3= 400$ kPa	
$H_1= 35$ cm	ارتفاع از سطح زمین Height on the ground
$H_2= 55$ cm	
$H_3= 75$ cm	
$V_1= 1$ m s <sup>-1</sup>	سرعت باد Wind velocity
$V_2= 2$ m s <sup>-1</sup>	
$V_3= 3$ m s <sup>-1</sup>	
Teejet 11003 – 0.87 mm <sup>2</sup>	نازل بادبزی (سطح روزنه نازل) Flat-fan nozzles (nozzle orifice area)
Teejet 11004 – 1.18 mm <sup>2</sup>	
Teejet 11006 – 1.8 mm <sup>2</sup>	



شکل ۵- نحوه‌ی قرارگیری کاغذهای حساس به آب در داخل کانال تونل باد  
**Fig.5.** The placement of water-sensitive paper in the wind tunnel



شکل ۴- کاغذهای حساس به آب قبل و بعد از استفاده  
**Fig.4.** Water sensitive paper before and after use

### نتایج و بحث

برای مطالعه‌ی اثر چهار متغیر مستقل انتخاب شده بر بادبردگی

در هر فاصله از نازل سه قطر میانه‌ی حجمی از ۳ کاغذ به دست می‌آید، که میانگین آن‌ها به عنوان قطر میانه‌ی حجمی در آن فاصله از نازل، گزارش می‌شد.

میان‌ه‌ی حجمی در نازل با روزه‌های کوچک‌تر (نازل ۱۱۰۰۳) به‌دست آمد و با افزایش اندازه‌ی سوراخ نازل‌ها، قطر میان‌ه‌ی حجمی در فاصله‌ی مورد نظر از انتهای پاشش کاهش پیدا کرد (نازل ۱۱۰۰۶). اندازه‌ی روزه به‌طور مستقیم حجم سم‌پاشی (لیتر بر هکتار) را تحت تأثیر قرار می‌دهد. پس در روزه‌های بزرگ‌تر (حجم سم‌پاشی بیشتر) قطرات با اندازه‌ی بزرگ‌تر ایجاد می‌شود و میزان بادبردگی و نشست قطرات در فواصل مورد بررسی از انتهای پاشش نازل، کاهش می‌یابد. افزایش اندازه‌ی روزه‌ی خروجی نازل‌های فشاری (بادبزی، مخروطی) باعث کاهش میزان ذرات ریز نازل می‌شود. به این دلیل بادبردگی این ذرات کاهش می‌یابد (Shafii, 1992). وولف و همکاران (۲۰۰۲) نیز با بررسی نازل‌های بادبزی در دو حجم سم‌پاشی ۴۷ و ۹۴ لیتر در هکتار در تونل باد با سرعت ۴/۶ متر بر ثانیه به این نتیجه رسیدند که با افزایش سطح مقطع روزه‌ی نازل، به‌دلیل درشت‌تر شدن قطرات تولیدی نازل، میزان اندازه‌ی قطر قطرات در فواصل دورتر از نازل کاهش می‌یابد (Wolf et al., 2002).

### اثر فشار سم‌پاشی

مقایسه‌ی میانگین مقادیر قطر میان‌ه‌ی حجمی در فشارهای مختلف بیانگر آن است که اختلاف معنی‌داری بین آن‌ها وجود دارد (جدول ۳).

بررسی اندازه‌ی قطرات در یک فاصله از نازل مدنظر قرار گرفت. پس قطرات در فاصله‌ی ۲/۴ متری از انتهای پاشش مبنای تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل از تجزیه واریانس اثر نوع نازل (N)، فشار (P)، ارتفاع (H) و سرعت (V) روی قطر میان‌ه‌ی حجمی قطرات در فاصله‌ی ۲/۴ متری از انتهای پاشش نازل، در جدول ۲ آورده شده است. بررسی آزمون کولموگروف اسمیرینف در نرم افزار SPSS17 حاکی از نرمال بودن داده‌ها بود. همان‌گونه که از جدول تجزیه واریانس نتیجه شد، اثرات اصلی فشار، سرعت، ارتفاع، نوع نازل و همچنین اثرات متقابل دوگانه  $H \times V$  و  $P \times V$  در سطح احتمال ۰/۰۱ معنی‌دار شده‌اند. تجزیه‌ی واریانس با استفاده از نرم افزار SAS9.1 انجام شد. البته نمودارهای مربوط به اثرات دوگانه معنی‌دار، در محدوده سطوح متغیرها، از نوع تغییر در مقدار بودند، بنابراین مقایسه میانگین‌ها بر اساس اثرات اصلی متغیرها و با استفاده از روش Lsd در سطح ۰/۰۱ صورت گرفت (جدول ۳).

### اثر نازل

با توجه به اینکه سطح روزه‌ی نازل‌ها با هم فرق می‌کرد، بنابراین نازل‌ها از طریق تأثیر گذاشتن روی حجم سم‌پاشی می‌توانستند روی قطر میان‌ه‌ی حجمی و در حقیقت بادبردگی تأثیرگذار باشند. با توجه به مقایسه میانگین اثر نازل، بیشترین میانگین قطر

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر نوع نازل، فشار، ارتفاع و سرعت روی قطر میان‌ه‌ی حجمی قطرات در فاصله‌ی ۲/۴ متری

Table 2- Analysis of variance effect of nozzle type, pressure, height and speed on the volume median diameter of the droplets at a distance of 2.4 meter

F	میانگین مربعات Means of square	درجه آزادی df	منبع تغییر Source of variation
0.7611 <sup>ns</sup>	280.056	1	R
9.7019 <sup>**</sup>	3570.137	2	N
48.2723 <sup>**</sup>	17763.400	2	P
0.6218 <sup>ns</sup>	228.800	4	N×P
	367.983	8	Experimental error
33.9882 <sup>**</sup>	5692.824	2	H
1.8718 <sup>ns</sup>	313.520	4	N×H
1.8933 <sup>ns</sup>	317.117	4	P×H
0.7909 <sup>ns</sup>	132.465	8	N×P×H
323.9939 <sup>**</sup>	54267.082	2	V
1.6124 <sup>ns</sup>	270.071	4	N×V
12.2904 <sup>**</sup>	2058.572	4	P×V
1.3824 <sup>ns</sup>	231.551	8	N×P×V
4.3034 <sup>**</sup>	720.789	4	H×V
1.2861 <sup>ns</sup>	215.416	8	N×H×V
1.9023 <sup>ns</sup>	318.621	8	P×H×V
0.7881 <sup>ns</sup>	131.998	16	N×P×H×V
	167.494	72	Experimental error
	-	161	Total

<sup>\*\*</sup> معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد، <sup>ns</sup> غیرمعنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد، <sup>ns</sup> Non. Significant at the 5% level. N, P, H and V, respectively, nozzle type, pressure, boom height and wind speed.

**جدول ۳- میانگین مقدار قطر میانه‌ی حجمی در سطوح مختلف هر کدام از متغیرهای مستقل در فاصله‌ی ۲/۴ متری از نازل**

**Table 3- The mean of value volume median diameter in difference levels of variables at a distance 2.4 meter**

میانگین‌ها	سطح متغیرها	متغیر مستقل
VMD means	Level of variables	Independent variable
106.7 a	Teejet 11003 – 0.87 mm <sup>2</sup>	نوع نازل بادبزی (سطح مقطع روزنه‌ی نازل) Flat-fan nozzles (nozzle orifice area)
99.6 ab	Teejet 11004 – 1.18 mm <sup>2</sup>	
90.44 b	Teejet 11006 – 1.8 mm <sup>2</sup>	
79.52 c	150 kPa	فشار سم‌پاشی Spray pressure
101.7 b	275 kPa	
115.5 a	400 kPa	
89.86 b	35 cm	ارتفاع بوم از سطح زمین Boom height on the ground
96.78 b	55 cm	
110.1 a	75 cm	
65.07 c	1 (m s <sup>-1</sup> )	سرعت باد Wind speed
103.7 b	2 (m s <sup>-1</sup> )	
127.9 a	3 (m s <sup>-1</sup> )	

مختلف نشان می‌دهد که اختلاف معنی‌داری بین آن‌ها وجود دارد (جدول ۳). در کل آزمایش‌ها همیشه سرعت نقش بسیار تأثیرگذاری روی قطر میانه‌ی حجمی قطرات داشت. در اینجا نیز سرعت بالا یعنی ۳ متر بر ثانیه قطره‌های بزرگ‌تری از قطرات را تحت تأثیر قرار داده است، چرا که با افزایش سرعت میزان نیروی وارده به قطرات نیز زیادتر شده و قطرات بزرگ‌تر می‌توانند دچار بادبردگی شوند. ژو و همکاران (۲۰۰۵) نیز طی یک شبیه‌سازی کامپیوتری از متغیرهای مؤثر روی بادبردگی، به این نتیجه رسیدند که با افزایش سرعت باد در یک فشار معین به‌علت بالا رفتن نیروی جلوبرندگی سرعت، میزان فواصل بادبردگی تمامی قطرات افزایش می‌یابد.

#### مدل رابطه اندازه‌ی قطر میانه‌ی حجمی با متغیرهای مستقل مورد آزمایش

در این تحقیق برای بیان ارتباط بین قطر میانه‌ی حجمی و متغیرهای مستقل شامل نوع نازل، فشار، ارتفاع و سرعت باد در فاصله‌ی ۲/۴ متری انتهای پاشش نازل، از روش رگرسیون چندگانه استفاده شد. با بررسی مدل‌های رگرسیونی دیده شد که مدل‌های خطی و نمایی بیشترین مقدار ضریب تبیین را در سطح احتمال ۱ درصد نشان می‌دهند. البته با توجه به برابری ضرایب تبیین در دو مدل مذکور، مدل خطی انتخاب شد. نتایج تجزیه واریانس مدل در جدول ۴ و ضرایب استاندارد شده و استاندارد نشده در جدول ۵ آورده شدند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ضریب استاندارد شده‌ی سرعت، بیشترین مقدار را دارد.

به‌طوری‌که در فشار ۴۰۰ کیلوپاسکال، بیشترین اندازه‌ی قطره در فاصله‌ی ۲/۴ متری، مشاهده شد. با در نظر گرفتن این نکته که با افزایش فشار، دبی نیز افزایش می‌یابد (Srivastava et al., 2006)، در این حالت میزان و درصد قطرات پاشش شده‌ی نازل نسبت به فشارهای کمتر بیشتر می‌شود. بنابراین سرعت باد خواهد توانست تا کسر حجمی بیشتری از ذرات ریز و درشت را نسبت به فشارهای پایین‌تر، از زیر نازل خارج کند (بادبردگی بیشتر). با افزایش فشار در نازل، میزان انرژی که برای فایق آمدن بر گرانش و کشش سطحی مایع لازم است، بیشتر شده و قطرات کوچک‌تر می‌شوند (Srivastava et al., 2006).

#### اثر ارتفاع

مقایسه‌ی میانگین مقادیر قطر میانه‌ی حجمی در ارتفاع‌های مختلف بیانگر آن است که اختلاف معنی‌داری بین آن‌ها وجود دارد (جدول ۳). ارتفاع ۷۵ سانتی‌متری بیشترین تأثیر را بر بادبردگی داشت. چرا که با افزایش ارتفاع و تأثیر زیاد سرعت روی آن قطرات بزرگ‌تر به مسافت‌های دورتر برده می‌شوند. نیتن و همکاران (۲۰۰۶) نیز در بررسی بادبردگی نازل‌های بادبزی در سه ارتفاع (۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷۵ متری) به این نتیجه رسیدند که با افزایش ارتفاع، سرعت باد گسترده‌ی بیشتری از قطرات را تحت تأثیر قرار داده و مقدار قطرات در فواصل دورتر از نازل بیشتر می‌شود که مطابقت خوبی با نتایج این تحقیق داشت. سرعت در سطح زمین معمولاً کمتر از بقیه مکان‌ها است و در ارتفاع کم تأثیر سرعت روی ذرات کمتر شده و میزان بادبردگی ذرات کاهش می‌یابد. سرعت باد اغلب در ارتفاع‌های بالاتر از زمین بیشتر است. بنابراین قطرات پاشش شده از نازل در ارتفاع پایین‌تر به‌وسیله‌ی باد کمتر متأثر می‌شوند (Srivastava et al., 2006).

#### اثر سرعت

مقایسه‌ی میانگین مقادیر قطر میانه‌ی حجمی در سرعت‌های

**جدول ۴-** تجزیه واریانس مدل رگرسیون خطی برای قطر میانه‌ی حجمی در فاصله‌ی ۲/۴ متری از انتهای پاشش نازل

**Table 4-** Linear regression analysis of variance for the median volume diameter at a distance of 2.4 meter from the end of the spray nozzle

Sig.	میانگین مربعات Mean of square	درجه آزادی df	مدل Model
.000	39902.810	4	رگرسیون Regression
	275.102	157	باقیمانده Residual
		161	کل Total

**جدول ۵-** ضرایب استاندارد نشده و استاندارد شده‌ی مدل رگرسیون خطی در فاصله‌ی ۲/۴ متری از انتهای پاشش نازل

**Table 5-** Unstandardized and standardized coefficients of the linear regression at a distance of 2.4 meter from the end of the spray nozzle

ضرایب استاندارد شده Standardized coefficients	ضرایب استاندارد نشده Unstandardized coefficients	ضرایب رگرسیون Regression coefficient
-	-9.381	عرض از مبدأ Intercept
-0.186	-17.058	نازل Nozzle
0.415	14.378	فشار سم‌پاشی Spray pressure
0.233	50.509	ارتفاع بوم سم‌پاشی Boom height
0.725	31.426	سرعت باد Wind velocity

رگرسیونی قابل درک بود، سرعت بیشترین تأثیر را نسبت به سایر متغیرها بر بادبردگی داشت. در زمان سم‌پاشی باید بیشتر روی سرعت باد و زمان سم‌پاشی مناسب متمرکز شد. تأثیر سرعت می‌تواند از طریق استفاده از محافظ روی بوم که دور تا دور بوم را می‌گیرد و پایین آمدن ارتفاع آن کاهش داده شود. سرعت در سطح زمین معمولاً کمتر از بقیه مکان‌ها است با فاصله گرفتن از سطح زمین سرعت باد نیز بیشتر می‌شود. پس با افزایش ارتفاع بوم سم‌پاش، میزان تأثیر باد روی آن بیشتر شده و بادبردگی افزایش می‌یابد. بهتر است ارتفاع بوم نزدیک زمین باشد. البته پایین بودن ارتفاع طوری نباشد که تداخل زیاد بین پاشش دو تا نازل کنار هم اتفاق بیفتد چرا که باعث کمتر شدن کیفیت پاشش می‌شود. معمولاً نازل با زاویه‌ی پاشش زیاد این امکان را برای پایین نگه داشتن بوم به بار می‌آورد. فشار اندازه‌ی قطرات را تحت تأثیر قرار می‌دهد. با افزایش فشار و افزایش نیروی مقاوم جلوی سیال در خروجی نازل میزان قطرات ریز بیشتر می‌شود و بر مقدار بادبردگی افزوده می‌شود. با افزایش روزنه‌ی نازل نیز چون از میزان نیروی مقاوم در جلوی نازل کم می‌شود، بنابراین ذرات درشت‌تر شده و بادبردگی کمتر می‌شود. بهتر است تغییر حجم سم‌پاشی از طریق تغییر بده (افزایش فشار) انجام نشود و نوع نازل تغییر داده شود.

بنابراین در بررسی تأثیر عوامل مستقل روی قطر میانه‌ی حجمی و در حقیقت اندازه‌ی قطرات بادبرده شده، می‌توان به این نکته اشاره کرد که اثر سرعت نسبت به بقیه‌ی متغیرها قابل ملاحظه است. با توجه به ضرایب استاندارد شده نیز برحسب تأثیر روی اندازه‌ی قطرات هم به ترتیب فشار، ارتفاع و نوع نازل قرار دارند.

مدل رگرسیون خطی برای قطر میانه‌ی حجمی ( $Y-\mu\text{m}$ )، سطح سوراخ نازل ( $X_1-\text{mm}^2$ )، فشار سم‌پاشی ( $X_2-\text{kPa}$ )، ارتفاع بوم ( $X_3-\text{m}$ ) و سرعت باد ( $X_4-\text{m s}^{-1}$ ) با رابطه (۱) بیان می‌گردد.  

$$Y = -0.186(X_1) + 0.415(X_2) + 0.233(X_3) + 0.725(X_4) \quad (1)$$
 ضریب تبیین ( $R^2$ ) برای این معادله برابر ۰/۷۹ به دست آمد که نحوه‌ی تغییرات قطر میانه‌ی حجمی را توسط چهار عامل مورد بررسی، بیان می‌دارد، که با توجه به ضریب تبیین بالا، این مدل قادر به تخمین اندازه‌ی ذرات بادبرده شده در فاصله‌ی مورد نظر است.

### نتیجه گیری

بادبردگی اثرات مضر زیادی دارد. از جمله این اثرات می‌توان به استفاده‌ی بی‌رویه از سم و آلودگی‌های محیطی برای آب و جانداران اشاره کرد. در این تحقیق به وضوح دیده شد که اندازه‌ی ذره مهم‌ترین نقش را در کنترل بادبردگی بازی می‌کند. با کنترل ذره می‌توان بهینه حالت بادبردگی را رقم زد. چنانچه از معادله‌ی



منابع

1. Afshari, M. 1992. Pesticide application methods (translation). First edition. Press Institute of plant pests and diseases. (In Farsi).
2. Daneshjoo, M. A., M. H. Abbaspour-fard, M. H. Aghkhani, and M. Arian. 2008. 5<sup>th</sup> Software designed for toxin particle density and diameter measurement by using image processing. National Congress of Agricultural Machinery Engineering and Mechanization of Iran, Ferdowsi University of Mashhad. (In Farsi).
3. Guler, H., H. Zhu, H. E. Ozkan, R. C. Derksen, Y. Yu, and C. R. Krause. 2007. Spray characteristics and drift reduction potential with air induction and conventional flat fan nozzles. *Transaction of ASABE* 50: 745-754.
4. Klein, R. N., L. Schulze, and C. L. Ogg. 2007. Spray drift of pesticides. NebGuide G1733., University of Nebraska-Lincoln Extension service.
5. Matthews, G. A. 2000. Pesticide application methods, 3rd Ed. Blackwell Science Ltd. p. 432.
6. Nuyttens, D., M. De Schampheleire, T. Steurbaut, K. Baetens, P. Verboven, B. Nicolai, H. Ramon, and B. Sonck. 2006. Experimental study of factors influencing the risk of drift from field sprayers. Part 2. Meteorological conditions. *Aspects of Applied Biology* 77: 179-188.
7. Rakhshani, A. 2002. Principles of toxicology agriculture (pesticides). First edition. Jameh Farhang Publications. (In Farsi).
8. Shafii, S. A. 1992. Principle of agricultural machines (translation). University of Tehran publication. (In Farsi).
9. Srivastava, A. K., C. E. Goering, R. P. Rohrbach, and D. R. Buckmaster. 2006. Engineering principles of agricultural machines. 2<sup>nd</sup> Edition. ASAE Publication 801M0206.
10. Statistical letter of Agricultural Jihad Ministry .2007. Annual Report .Agricultural ministry of Islamic Republic of Iran. (In Farsi).
11. Storrie, A. 2004. Reducing herbicide spray drift. NSW. Agriculture Agnote DPI-477.
12. Syngenta. 2002. Water-sensitive paper for monitoring spray distributions. CH-4002. Basle, Syngenta Crop Protection, Switzerland.
13. Wolf, R. E. 2000. Strategies to reduce spray drift. Kansas state university extension service. Publication MF-2441.
14. Wolf, R. E. 2000. Strategies to reduce spray drift. Kansas state university extension service. Publication MF-2441. ASAE Annual International Meeting / CIGR XVth World Congress, Chicago, Illinois, USA.
15. Zhu, H., and R. D. Fox. 2005. A windows version of DRIFTSIM for estimating drift distances of droplets. T. ASAE., paper number: 051145. 2005 ASAE Annual International Meeting, Tampa, Florida.