

مدلسازی ریاضی ابر باردار قطرات در سمپاشی الکترواستاتیکی

محمد رضا جهان نما

چکیده

باردارسازی الکترواستاتیکی سم و تولید قطرات باردار راهکاری است که بهبود نشست سم را بر روی اهداف گیاهی با ایجاد میدان جاذبه الکتریکی میان ابر پاشش و سطح گیاه به دنبال دارد. تاثیر دینامیکی این میدان جاذبه در تمایل سینماتیکی قطرات باردار به سوی هدف بروز می‌یابد که انبساط ابر باردار قطرات را به دنبال دارد. بهره‌گیری از مفهوم واگرایی (دیورژانس) میدان سرعت، شاخصی از نسبت تغییر حجم به حجم اولیه سیال، امکان مدلسازی پدیده انبساط و دستیابی به جرم نشست قطرات را بر روی هدف و بر حسب تغییر غلظت قطرات در ابر پاشش میسر می‌سازد. اعمال قانون گوس نیز میدان الکتریکی میان قطرات باردار و هدف، و به تبع آن توزیع گذرای غلظت را برای قطرات فراهم می‌سازد. تلفیق نتایج حاصل از میدان سرعت و میدان الکتریکی در ابر باردار، ثابت زمانی نشست قطرات را بر روی هدف به دست می‌دهد. وابستگی ریاضی این ثابت به بار الکتریکی قطره حاکی از نقش مثبت باردارسازی در افزایش کمی نشست قطرات باردار بر روی هدف در بازه زمانی کوتاهتری می‌باشد. نتایج همچنین نشان می‌دهند که ازدیاد غلظت و استفاده از قطرات بزرگتر نیز با تقویت کمی بار الکتریکی اسپری موجب بهبود نشست قطرات می‌گردند.

واژه‌های کلیدی: سمپاشی، الکترواستاتیک، نشست، مدل ریاضی، ثابت زمانی، غلظت قطرات، میدان الکتریکی

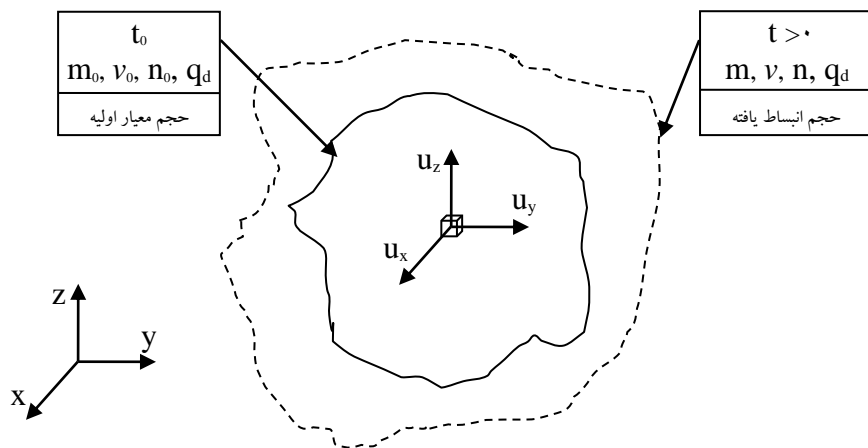
۱- مقدمه

توسعه و کاربرد سمپاش‌های الکترواستاتیکی در کشاورزی روشی است که برای رفع یا کاهش نارسایی‌های موجود در مجموعه‌های سنتی و متداول سمپاشی طی دو دهه اخیر مورد توجه قرار گرفته است. افزایش جذب و بهبود نشست سموم باردار شده الکتریکی بر روی اهداف گیاهی از طریق کاهش سم مصرفی (در مقایسه با سمپاش‌های معمولی)، صرفه‌جویی اقتصادی عظیمی را در یک مقیاس کلان (ملی یا بین‌المللی) در پی دارد [۱]. این مزیت از یک سو (در راستای منافع تولیدکنندگان محصولات کشاورزی) سبب تقلیل هزینه تولید و از سوی دیگر (در جهت منافع مصرف‌کننده) باعث پایین آمدن قیمت محصول می‌گردد. راندمان بالای سمپاشی الکترواستاتیکی همچنین می‌تواند به عنوان ابزاری مؤثر در حفظ نباتات در مقابل امراض، حشرات و علف‌های هرز ایفای نقش نماید که نتیجه نهایی آن در کاهش ضایعات تولید و افزایش کمی محصولات زراعی و باغی بروز می‌یابد [۲]. کاربرد سمپاش‌های الکترواستاتیکی دارای دو تاثیر غیر مستقیم ولی مهم بر محیط زیست نیز می‌باشند. تاثیر نخست به صیانت از منابع طبیعی به دلیل کاهش مواد خام مورد نیاز در تولید سموم مربوط می‌شود و تاثیر دیگر به کاهش آلودگی محیط زیست به دلیل جذب و نشست بیشتر سم بر روی هدف گیاهی و طبعاً تعلیق مقدار کمتری از سم پاششی در اتمسفر زیستی باز می‌گردد [۳].

وجه غالب فعالیت‌های پژوهشی انجام یافته در خصوص سمپاش‌های الکترواستاتیکی مبتنی بر نتایجی است که افزایش نشست سم بر روی هدف و تقویت باردارسازی الکتریکی را به عنوان توابع هدف معرفی می‌کنند. مقاله حاضر نیز در این راستا روشی را پیش روی قرار می‌دهد که با ابتنابر دو مفهوم میدان سرعت و میدان الکتریکی به ارایه مدلی ریاضی برای نشست یک ابر باردار سم مبادرت می‌ورزد. نتیجه حاصل از این مدل ضمن ارایه توزیع گذرای نشست عبارتی را برای ثابت زمانی این پدیده معرفی می‌کند که به کمیت‌های بار و تحرک پذیری الکتریکی قطره سم و غلظت اولیه ابر اسپری وابسته است. نتایج حاصل از این مدل نشان می‌دهند که بهره‌گیری از قطرات باردار سم با افزایش بار الکتریکی انتقال یافته به قطرات سبب کاهش ثابت زمانی و در نتیجه ازدیاد درصد نشست می‌گردند. این موضوع تاییدی بر پیدایش میدان جاذبه الکتریکی میان قطرات باردار و هدف می‌باشد که به بهبود نشست قطرات بر روی هدف منتهی می‌شود.

۲- روش بررسی و فرمولاسیون

یک ابر اسپری متشکل از مجموعه‌ای از قطرات باردار مایع مطابق شکل (۱) مفروض است. این ابر اسپری پس از اتمیزاسیون و باردارسازی الکتریکی در داخل یک نازل، به سوی یک هدف (با پتانسیل الکتریکی صفر) پاشش می‌شود. واقع شدن ابر باردار در مجاورت هدف، میدانی الکتریکی ایجاد می‌کند که موجب تمایل



شکل (۱): تصویری شماتیک از انبساط ابر باردار قطرات در بازه زمانی $(t, 0)$.

سینماتیکی ابر برای نشست بر روی هدف گردیده و انبساط آن را به دنبال خواهد داشت. فرآیند انبساط ناشی از تغییر سرعت نسبی قطرات باردار درون ابر می‌باشد که مبین حرکت قطرات به سوی هدف و شاخصی از نشست آنها بر روی گیاه است. بنابر این در حالتی که ابر اسپری در مجاورت یک هدف صلب (گیاه) قرار می‌گیرد، انبساط ابر و خروج جرم از حجم معیار اولیه به صورت نشست جرم خروجی بر روی هدف تبلور می‌یابد.

ابر باردار قطرات، مطابق شکل (۱)، در لحظه اولیه $(t_0=0)$ دارای جرم m_0 ، حجم v_0 و غلظت حجمی (تعداد قطره در واحد حجم ابر اسپری) n_0 بوده و هر یک از قطرات پس از باردارسازی الکتریکی در داخل نازل حاوی بار الکتریکی q_d می‌شوند. ابر قطرات پس از گذشت زمان $t > 0$ انبساط یافته، حجم آن به v افزایش و غلظت آن به n کاهش می‌یابد. همچنین در این بازه زمانی به اندازه m_1 از جرم موجود در حجم معیار اولیه (v_0) کاسته می‌شود (این جرم خروجی، با توجه به شکل ۱، معادل جرم قطرات مستقر در فضای میان حجم معیار اولیه اسپری v_0 و حجم انبساط یافته v می‌باشد). با توجه به مفهوم واگرایی (دیورژانس) میدان سرعت $(\vec{\nabla} \cdot \vec{u})$ که بیانگر نرخ تغییر حجم (یک حجم معیار) به حجم اولیه آن می‌باشد [۴]، می‌توان تغییر حجم ابر اسپری را مطابق رابطه زیر به دست آورد:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = v \frac{dv}{dt} \Rightarrow \frac{v-v_0}{v_0} = \frac{1}{v_0} \int_0^t (\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) v dt \quad (1)$$

با توجه به تراکم ناپذیری قطرات مایع (دانسیته ثابت)، نسبت تغییر جرم ابر اسپری $(m_1=m-m_0)$ به جرم اولیه (m_0) متناسب با نسبت تغییر حجم ابر اسپری $(v-v_0)$ به حجم اولیه (v_0) آن می‌باشد. ضریب این تناسب معادل نسبت غلظت حجمی قطرات در حجم انبساط یافته (n) به غلظت اولیه (n_0) می‌باشد. بدین ترتیب با لحاظ کردن این نسبت در رابطه (۱)، درصد نسبی نشست (نسبت کاهش جرم در حجم معیار اولیه به جرم اولیه آن) بر حسب دیورژانس میدان سرعت به شکل زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{m_1}{m_0} \times 100 = \frac{n}{n_0} \frac{100}{v_0} \int_0^t (\vec{\nabla} \cdot \vec{u})_v dt \quad (2)$$

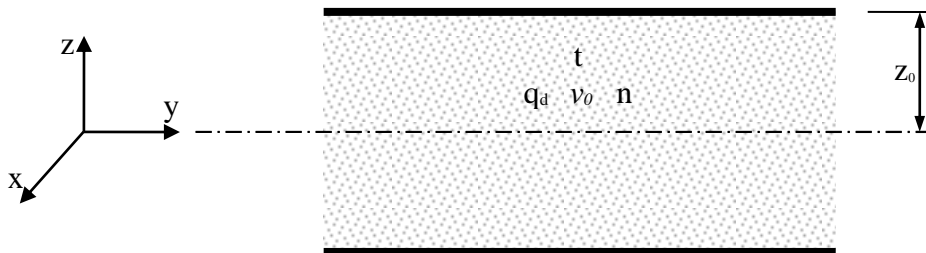
از طرفی با استفاده از ارتباط میان حجم و غلظت حجمی قطرات می‌توان دیورژانس میدان سرعت را به صورت زیر نوشت:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = \frac{1}{\frac{N}{n}} \frac{d\left(\frac{N}{n}\right)}{dt} = -\frac{1}{n} \frac{dn}{dt} \quad (3)$$

که N تعداد قطرات موجود در ابر اسپری می‌باشد. جایگزینی رابطه (3) در رابطه (2)، درصد نشست را بر حسب تغییر غلظت حجمی قطرات در ابر اسپری به شرح زیر به دست می‌دهد:

$$\frac{m_1}{m_0} \% = \frac{n}{n_0} \frac{100}{N} \int_0^t \left(-\frac{1}{n} \frac{dn}{dt}\right) \frac{N}{n} dt = -100n \int_{n_0}^n \frac{dn}{n^2} = \frac{n_0 - n}{n_0} \times 100 \quad (4)$$

رابطه (4) نشان می‌دهد که دستیابی به درصد نسبی نشست مستلزم تعیین تغییرات غلظت حجمی قطرات می‌باشد. بدین منظور ابر اسپری (مفروض در شکل 1) به صورت لایه‌ای از قطرات به ضخامت z_0 محصور در فضای میان دو صفحه تخت مطابق شکل (2) در نظر گرفته می‌شود. در حالتی که فاصله میان این دو صفحه در مقایسه با ابعاد دیگر صفحات قابل اغماض باشد، می‌توان از انبساط ابر اسپری در جهات x و y صرف‌نظر نموده و این انبساط را در راستای z بررسی نمود.



شکل (2): ابر اسپری قطرات باردار در فضای میان دو صفحه تخت موازی.

انبساط ابر اسپری در راستای z (شکل 2) و نشست قطرات بر روی صفحه تخت (به دلیل بارداری قطرات) موجب انتقال یک جریان الکتریکی به صفحه می‌شود. این جریان الکتریکی، با استفاده از میدان الکتریکی در سطح صفحه تخت (E_{z0}) و به ازای تحرک پذیری \square_d برای یک قطره باردار، برابرست با:

$$i = nq_d \kappa_d E_{z0} \quad (5)$$

برای تعیین میدان الکتریکی در سطح صفحه تخت می‌توان از قانون گوس استفاده نمود. قانون گوس برای قطراتی با بار الکتریکی q_d واقع در مساحت A بر روی صفحه تخت و در محیطی با ضریب گذردهی ϵ ، عبارت است از [۵]:

$$\int_A \epsilon E_z dA = \int_v \rho_s dv \Rightarrow \epsilon E_z A = \rho_s v_0 \quad (6)$$

که ρ_s دانسیته حجمی بار الکتریکی ابر اسپری در فضای میان دو صفحه (v_0) بوده و در زمان t معادل nq_d می‌باشد. با جایگذاری ρ_s در رابطه (۶)، و ترکیب آن با رابطه (۵) می‌توان جریان الکتریکی ناشی از نشست را به ازای واحد سطح به شرح زیر نوشت:

$$i = nq_d \frac{v_0}{v_0} \kappa_d \frac{q}{\epsilon} = \frac{\kappa_d}{\epsilon v_0} q^2 \quad (7)$$

که q بیانگر کل بار الکتریکی موجود در فضای میان دو صفحه در لحظه t می‌باشد. از طرفی با توجه به برابری جریان الکتریکی با نرخ تغییر بار الکتریکی در رابطه (۷)، می‌توان معادله دیفرانسیل تغییر بار الکتریکی را در حجم معیار (v_0) مطابق زیر بیان نمود:

$$i = -\frac{dq}{dt} \Rightarrow \frac{dq}{q} = -\frac{\kappa_d}{\epsilon v_0} dt \quad (8)$$

با انتگرال‌گیری از رابطه (۸) و با اعمال شرط اولیه $(t=0, q=q_0=n_0q_d v_0)$ ، تغییرات گذرای کل بار الکتریکی ابر اسپری ($q=q(t)$) حاصل می‌شود. با جایگزینی $q(t)$ بر حسب غلظت حجمی قطرات ($q=nq_d v_0$) می‌توان تغییرات زمانی غلظت حجمی قطرات را مطابق رابطه زیر به دست آورد:

$$n = \frac{n_0}{1 + n_0 \frac{\kappa_d q_d}{\epsilon} t} \quad (9)$$

حال با استفاده از رابطه (۹) در رابطه (۴)، درصد نسبی نشست قطرات اسپری در بازه زمانی $(0, t)$ مطابق رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{m_1}{m_0} \% = 100 \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{n_0 \kappa_d q_d}{\epsilon} t} \right) \quad (10)$$

که معکوس ضریب جمله زمانی در رابطه (۱۰)،

$$\tau = \frac{\epsilon}{n_0 \kappa_d q_d} \quad (11)$$

ثابت زمانی نشست محسوب می‌شود که (به ازای $t = \tau$) در رابطه (۱۰)، بیانگر حالتی است که نشست ۵۰٪ کل قطرات بر روی صفحات حادث شده باشد. از طرفی حداکثر بار الکتریکی یک قطره مایع به شعاع r_d و

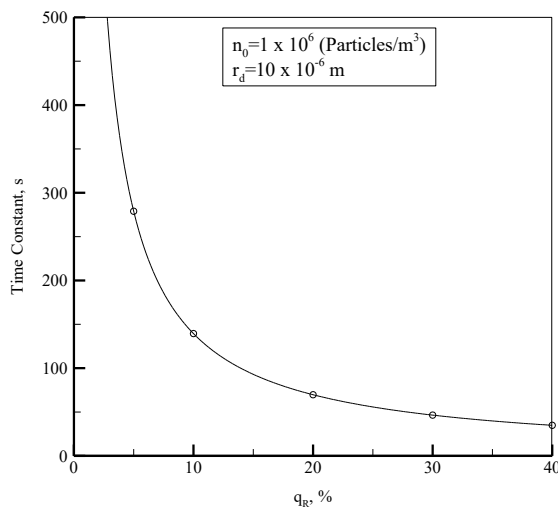
کشش سطحی σ_d محدود به مقداری است که بیش از آن مقدار به شکست قطره و تشکیل قطرات کوچکتر منجر می‌شود، این مقدار (حد ریلی) عبارت است از [۶]:

$$q_R = 8\pi\sqrt{\epsilon_0\sigma_d}r_d^3 \quad (12)$$

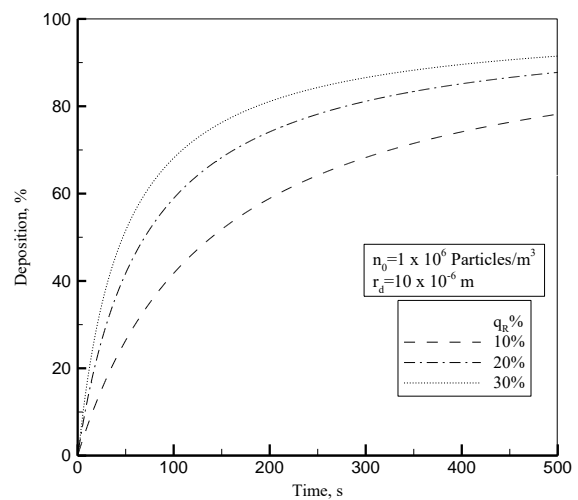
در عمل هر قطره کسری از بار الکتریکی حداکثر (رابطه ۱۲) را حامل می‌باشد. در صورتی که این کسر به صورت $(0 < \beta < 1)$ نمایش داده شود، بار الکتریکی هر قطره (در روابط ۱۰ و ۱۱) معادل $q_R = \beta q_{max}$ خواهد شد.

۳- نتایج و بحث

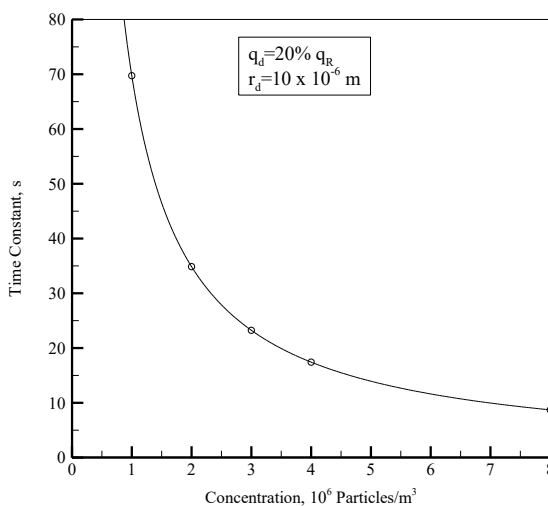
نتایج حاصل از مدلسازی ریاضی ابر باردار قطرات در شکل‌های ۳ الی ۸ و در قالب تغییر درصد نسبی نشست بر حسب زمان (رابطه ۱۰) و تغییر ثابت زمانی نشست (رابطه ۱۱) ارائه گردیده‌اند. بار الکتریکی (بر حسب درصدی از حد ریلی، رابطه ۱۲)، غلظت



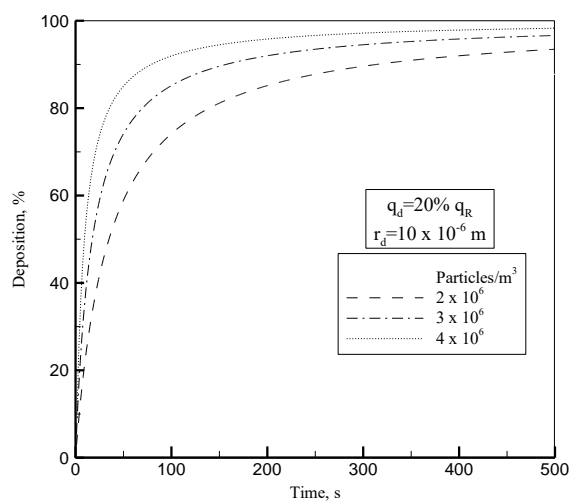
شکل (۴): تغییرات ثابت زمانی نشست بر



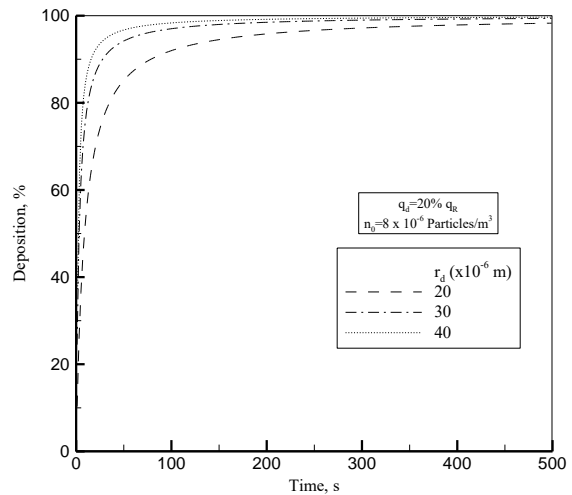
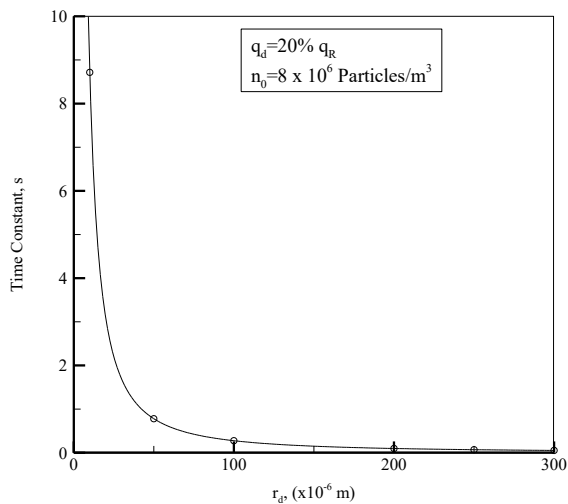
شکل (۳): تاثیر بار الکتریکی بر تغییرات گذرای درصد حساب بار الکتریکی. نسبی نشست.



شکل (۶): تغییرات ثابت زمانی نشست بر



شکل (۵): تاثیر غلظت قطرات بر تغییرات گذرای درصد حساب غلظت. نسبی نشست.



شکل (۷): تاثیر اندازه قطرات بر تغییرات گذرای درصد
 شکل (۸): تغییرات ثابت زمانی نشست بر
 حسب شعاع قطره نسبی نشست.

حجمی قطرات و شعاع قطره پارامترهایی هستند که تاثیر آنها بر درصد نسبی و ثابت زمانی نشست مورد بررسی قرار می‌گیرند. در این راستا ضریب گذردهی محیط (هوا به عنوان محیط حامل ابر اسپری) برابر $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ، و تحرک‌پذیری قطره باردار معادل $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ، به عنوان ثوابت موجود در روابط مطروحه لحاظ شده‌اند.

در شکل (۳) تاثیر باردارسازی ابر اسپری بر تغییرات گذرای (زمانی) درصد نسبی نشست ملاحظه می‌شود. این تاثیر بر حسب درصدهای مختلف حد ریلی ($\text{Re} = 5$ الی 40 درصد) نشان می‌دهد که نشست قطرات با افزایش بار الکتریکی انتقال یافته به ابر اسپری (مستتر در افزایش درصد ریلی) در فاصله زمانی کوتاه‌تری صورت می‌گیرد. این موضوع موید کاهش ثابت زمانی نشست در اثر تقویت باردارسازی قطرات ابر اسپری می‌باشد که روند این کاهش در شکل (۴) نشان داده شده است. توصیف فیزیکی این پدیده را می‌توان با توجه به قانون کولن در وابستگی مستقیم نیروی رانش میان قطرات باردار به مقدار کمی بار الکتریکی هر قطره بیان نمود. افزایش بار الکتریکی موجب تقویت نیروی رانش میان قطرات باردار ابر اسپری و افزایش اختلاف پتانسیل الکتریکی میان هدف (پتانسیل صفر) و قطرات می‌گردد که نتیجه آن در افزایش شتاب حرکت قطرات به سوی هدف بروز می‌یابد. افزایش شتاب مترادف با ازدیاد نرخ انبساط ابر به سوی هدف می‌باشد که افزایش نشست قطرات را بر روی هدف در فاصله زمانی کوتاه‌تری میسر می‌سازد.

شکل (۵) تاثیر غلظت قطرات اسپری را بر درصد نسبی نشست به نمایش می‌گذارد. مطابق این شکل، افزایش غلظت حجمی (تحت بار الکتریکی و شعاع یکسان قطرات) به ازدیاد درصد نسبی نشست در لحظات اولیه بازه زمانی پاشش منجر می‌شود. دلیل این امر را می‌توان ناشی از ازدیاد بار الکتریکی موجود در یک ابر اسپری در اثر افزایش غلظت دانست که با فراهم نمودن تعداد بیشتری از قطرات باردار موجب ازدیاد بار الکتریکی ابر اسپری می‌شود. بار الکتریکی بیشتر با تقویت رانش الکتریکی قطرات باعث خروج سریع‌تر قطرات از ابر اسپری گردیده و نشست بیشتر آنها را بر روی هدف به دنبال دارد. از سوی دیگر، افزایش سرعت خروج قطرات از ابر اسپری مطابق شکل (۶) مبین ثابت زمانی کوتاه‌تری برای نشست قطرات در یک ابر اسپری با غلظت بالاتر می‌باشد.

تأثیر اندازه (شعاع) قطرات باردار بر روند تغییر درصد نسبی و ثابت زمانی نشست در شکل‌های ۰ (۷ و ۸) ارایه گردیده‌اند. قطرات بزرگتر در ابر پاشش (مطابق شکل ۷) موجب ازدیاد درصد نسبی نشست می‌شوند. دلیل این افزایش را می‌توان در وابستگی مستقیم بار الکتریکی قطره به اندازه (شعاع) آن مطابق رابطه (۱۲) جستجو نمود که بار الکتریکی بیشتری را در ابر اسپری با افزایش شعاع قطره فراهم می‌آورد. افزایش بار الکتریکی نیز (بنا به تشریح شکل‌های ۳ الی ۶) با تقویت نیروی رانش موجب ازدیاد نشست و کاهش ثابت زمانی (شکل ۸) می‌گردد. بدین ترتیب می‌توان دریافت که اندازه و غلظت حجمی قطرات به طور غیر مستقیم در افزایش بار الکتریکی ابر اسپری ایفای نقش می‌کنند که تأثیر غایی آن در افزایش درصد نسبی و کاهش ثابت زمانی نشست ظاهر می‌گردد.

در مجموع، نتایج ارایه شده در این مقاله بر تأثیر مثبت استفاده از پاشش سموم باردار در بهبود نشست تأکید می‌ورزند. بازتاب عملی این نقش مثبت را می‌توان در کاهش باد بردگی و نشست مضر اسپری بر روی خاک، به دلیل تقویت حرکت ابر باردار قطرات سم به سوی هدف گیاهی مشاهده نمود. همچنین این نتایج علاوه بر معرفی صریح پارامترهای موثر بر فرآیند نشست، این امکان را فراهم می‌کنند تا با بهره‌گیری از مدل ارایه شده در مراحل طراحی سمپاش بتوان تخمینی از نتایج منجر به شرایط عملکردی مطلوب (بهبود نشست) را ارایه نمود.

سیاسگزاری

این مقاله پژوهشی در راستای اجرای بخشی از طرح *EPS* در پژوهشکده مهندسی جهاد کشاورزی ارایه شده است. مولف بر خود لازم می‌داند تا بدین وسیله مراتب امتنان خویش را نسبت به حمایت‌های پژوهشکده مهندسی (معاونت پژوهشی) ابراز دارد.

منابع

1. Moon, J.D., Lee D. -H., Kang T. -G. and Yon K.-S., 2003, "A capacitive type of electrostatic spraying nozzle", *J. Electrostatics*, 57 (3), pp. 363-379.
2. Balachandran, W., 1998, "Electrostatic atomization", *Notes in support of the Atomizer and Spray Technology Short Course, UMIST, Manchester, UK*, pp.13.1-13.19.
3. Coffee, R.A., 2001, "Dispensing device and method for forming material", *US Patent*, No. 6252129.
4. White, F.M., 1988, "Fluid Mechanics", *McGraw-Hill, New York*, p. 18.
5. Jonassen, N., 1998, "Electrostatics", *Chapman & Hall, New York*.
6. Bailey, A.G., 1982, "Charged liquid particles", *Proc. Int. Conf. on Charged Particles, Southampton, UK*, pp. 1-7.
7. Fuchs, N.A., 1964, "The mechanics of aerosols", *Macmillan, New York*, p.28.