

## مدل سازی ریاضی و آزمون تزریق در یک سامانه آزمایشگاهی سمپاش تزریق مستقیم (DI)

داود محمدزمانی\*، سعید مینایی، رضا علیمردانی، علی رستمی و جلال الدین قضاوتی\*\*

\*نگارنده مسئول، نشانی: تاکستان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، تلفن: ۰۹۱۲۲۸۱۸۸۶۴، پیام‌نگار: dr.dmzamani@gmail.com

\*\*به ترتیب: عضو باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان؛ دانشیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس؛ استاد گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشکده بیوسیستم دانشگاه تهران؛ مربی گروه مکانیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان؛ و عضو باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان دانشگاه آزاد اسلامی واحد بناب  
تاریخ دریافت: ۹۰/۷/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۱/۸/۶

### چکیده

در سمپاش‌های تزریق مستقیم<sup>۱</sup> (DI)، زمان تأخیر برای تغییر غلظت مواد شیمیایی در نوک افشانک‌ها بر کارایی سمپاش تأثیر می‌گذارد. مهم‌ترین متغیر برای بررسی عملکرد سامانه تزریق مستقیم در اعمال علف‌کش‌ها به صورت زمان حقیقی، زمان تأخیر آن است. در این تحقیق، ابتدا یک سامانه تزریق مستقیم روی یک سمپاش بوم‌دار طراحی و نصب شد. پس از آن، به منظور بررسی کمی تأثیر حجم لوله‌های محلول سم از نقطه تزریق تا خروجی افشانک‌ها (V)، دبی ماده مؤثر علف‌کش و دبی سیال حامل بر مشخصات دینامیکی سامانه تزریق مستقیم- از جمله زمان تأخیر، جریان محلول سم از نقطه تزریق تا نوک افشانک‌ها- مدل سازی ریاضی شد. بدین منظور از دو مدل حاکم بر جریان محلول سم در سامانه‌های تزریق مستقیم استفاده شد: مدل "جریان تکه‌ای"<sup>۲</sup> و مدل "اختلاط مناسب"<sup>۳</sup>؛ این دو در این تحقیق ارائه شده‌اند. به منظور بررسی و مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی ریاضی و نتایج حاصل از آزمون سامانه تزریق مستقیم، یک سامانه تزریق مستقیم طراحی و ساخته شد. برای تجزیه، تحلیل و مقایسه نتایج کارگاهی نیز از روش تجزیه واریانس با آزمون دانکن با سطح اطمینان ۵ درصد استفاده شد تا اثر تغییر پارامترهای مختلف بر زمان تأخیر سامانه تعیین شود. برای بررسی برهم‌کنش عوامل مختلف، آزمایش فاکتوریل با طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی به کار برده شد. نتایج آزمون‌های کارگاهی با نتایج حاصل از مدل ریاضی ارائه شده مقایسه شد. با توجه به نتایج مقایسه پاسخ زمانی بین مدل‌ها و آزمون‌ها، مشخص شد که مدل اختلاط مناسب در مقایسه با مدل جریان تکه‌ای پاسخ بهتری ارائه می‌دهد. از این روش می‌توان مدل اختلاط مناسب را برای پیش‌بینی رفتار دینامیکی سامانه تزریق مستقیم به کار برد، گرچه در هر دو مدل، بین مقدار حالت پایا با مقادیر حالت پایای آزمون‌ها اندکی تفاوت مشاهده می‌شود.

### واژه‌های کلیدی

زمان تأخیر، سمپاش تزریق مستقیم (DI)، مدل اختلاط مناسب، مدل جریان تکه‌ای

### مقدمه

تجهیزات بوده است. اخیراً آگاهی از تأثیرات زیست‌محیطی، بررسی موشکافانه عملیات زراعی و ظهور محصولات اصلاح شده ژنتیکی، فرآیند کنترل آفت‌کش‌ها

موضوع کنترل اعمال نهاده‌های شیمیایی، سال‌های مدید چالش اصلی کشاورزان و تولیدکنندگان این

1- Direct Injection  
3- Well-Mixed

2- Plug-Flow

برای بهبود سامانه‌های مبتنی بر فشار به منظور کاهش تأخیر زمانی در کنترل میزان اعمال مواد شیمیایی، تغییر دبی کل به روش‌های دیگری را گیلز و کمینو (Giles & Comino, 1990)، کو و کولمن (Koo & Kuhlman, 1993)، گوپالاپیلای و همکاران (Gopala Pillai *et al.*, 1999) و تیان و ژانگ (Tian & Zheng, 2000) بررسی کرده‌اند.

سامانه‌های سرعت متغیر تزریقی به منظور اختلاط ماده مؤثر<sup>۴</sup> (آفت‌کش‌ها یا علف‌کش‌ها) با سیال حامل (که غالباً آب است) قبل از رسیدن به افشانک‌ها طراحی می‌شوند. میزان تزریق ماده مؤثر درون سیال حامل، غلظت محلول سم و در نتیجه میزان کاربرد آن را تعیین می‌کند. در این سامانه، تغییر میزان تزریق ماده شیمیایی مؤثر متناسب با موقعیت حرکت سمپاش درون مزرعه و نیز سرعت پیشروی سمپاش، موجب می‌شود که دبی کل در واحد سطح مزرعه ثابت باقی بماند. این سامانه اجازه تغییرات لحظه‌ای (آنی) نوع علف‌کش (یا هر نوع ماده شیمیایی دیگر) و نیز غلظت آن را می‌دهد (Stone *et al.*, 1999).

یکی از مهم‌ترین انواع سامانه‌های تزریقی، سامانه تزریق مستقیم (DI) است که در آن ماده مؤثر با یک پمپ جداگانه به درون سیال حامل<sup>۵</sup> تزریق، و به سمت بوم هدایت می‌شود. موقعیت نقطه تزریق ماده مؤثر درون سیال حامل بر زمان تأخیر، یکنواختی اختلاط، تعداد تزریق‌کننده‌ها و میزان محلول سم باقیمانده در خطوط انتقال سم بعد از عملیات سمپاشی تأثیرگذار است. طول خطوط تغذیه افشانک‌ها، زمان تأخیر سامانه را تعیین می‌کند. لذا به منظور اعمال موضعی و در حین حرکت علف‌کش باید بتوان طول خطوط انتقال محلول سم را از محل تزریق تا نوک افشانک‌ها به کمینه رساند.

را بیش از پیش بر اهمیت کرده است. پیدایش مدیریت موضعی محصولات زراعی را که در آن میزان اعمال نهاده‌های تولید از جمله آفت‌کش‌ها بر اساس نوع محصول، تغییرپذیری ویژگی‌های خاک و آفات تعیین می‌شود، نیز باید به موارد فوق افزود.

در سمپاش‌های مرسوم دامنه میزان به کارگیری مواد شیمیایی محدود است و به همین دلیل برای راهبردهای کنترل موضعی مناسب نیستند. یکی از محدودیت‌های سمپاش‌های مرسوم، ناممکن بودن اعمال همزمان چندین آفت‌کش یا علف‌کش یا کود شیمیایی در آن‌هاست. این محدودیت از آن جاست که در این سمپاش‌ها محلول سم درون یک مخزن بزرگ تهیه و با پمپ به افشانک‌ها ارسال می‌شود که در این حالت امکان تغییر غلظت محلول در حین حرکت درون مزرعه فراهم نمی‌شود. با توجه به نبود سامانه کنترلی در این سمپاش‌ها، با تغییر سرعت پیشروی، میزان محلول اعمال شده متناسب با آن تغییر نمی‌کند. از این‌رو، میزان پاشش محلول سم در نقاط مختلف مزرعه متفاوت خواهد بود. توسعه فناوری رایانه‌ها، حسگرها و عملگرها امکان افزایش دقت و کارایی سمپاش‌های مزرعه را در کاربرد مواد شیمیایی فراهم کرده است (Al-Gaadi, 1992). بسیاری از سمپاش‌های میزان متغیر<sup>۱</sup> (VRA)، بر اساس دو رهیافت میزان اعمال مواد شیمیایی را کنترل می‌کنند: یکی سامانه‌های میزان متغیر مبتنی بر فشار<sup>۲</sup> و دیگری سامانه‌های میزان متغیر تزریقی<sup>۳</sup>.

محدودیت دیگر این روش وابستگی الگوی پاشش افشانک‌ها به فشار پاشش آن‌هاست. برای مثال، میزان پاشش یک افشانک با اندازه روزه ثابت را می‌توان فقط در محدوده ۲۵ درصد دبی اسمی آن تغییر داد (Paice *et al.*, 1996).

1- Variable Rate Application  
3- Injection VRA  
5- Carrier Fluid

2- Pressure-Based VRA  
4- Active Ingredient

مهم‌ترین متغیر برای بررسی عملکرد سامانه تزریق مستقیم در اعمال علف‌کش‌ها به صورت زمان حقیقی، زمان پاسخ ( $T_R$ ) یا زمان تأخیر آن است. سمپاش‌های تزریق مستقیم در اعمال علف‌کش‌ها بر اساس نیاز هر بخش از مزرعه و نیز بر اساس تغییر سرعت پیشروی همواره قبل از این‌که غلظت محلول سم در افشانک‌ها به حالت پایدار برسد، دارای تأخیر زمانی هستند.

ژو و همکاران (Zhu et al., 1998) یکنواختی غلظت محلول سم و نیز الگوی پاشش سم را به صورت تابعی از عدد رینولدز بررسی کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان می‌دهد که بین متوسط غلظت محلول سم اندازه‌گیری شده از ۱۰ افشانک مستقر روی بوم از دیدگاه آماری تفاوت معنی‌داری وجود ندارد. عدد رینولدز در این آزمایش، در محدوده ۱۵۰۰ تا ۱۷۰۰ و متوسط ضریب تغییرات (CV)، ۴/۲۲ درصد بوده است. در بررسی مهم‌ترین عوامل مؤثر بر عملکرد سامانه‌های تزریق مستقیم به طور تحلیلی مدل‌سازی تزریق ماده مؤثر علف‌کش درون سیال حامل، روشی ساده و دقیق است که در تحلیل و طراحی این‌گونه سامانه‌هایی می‌تواند مفید باشد. هدف اصلی این تحقیق مدل‌سازی ریاضی تزریق ماده مؤثر علف‌کش درون سیال حامل است تا بدین‌وسیله عوامل مهم و مؤثر بر مشخصات دینامیکی سامانه‌های تزریق مستقیم نظیر زمان تأخیر، زمان پاسخ و یکنواختی غلظت محلول سم به طور تحلیلی مشخص شود.

### مواد و روش‌ها

#### مدل‌سازی ریاضی تزریق ماده مؤثر علف‌کش درون

#### سیال حامل

به منظور بررسی کمی تأثیر حجم لوله‌های محلول سم از نقطه تزریق تا خروجی افشانک‌ها (V)، دبی ماده

در بسیاری از سامانه‌های تزریق مستقیم که به صورت تجاری تولید و عرضه می‌شوند، زمان واکنش (پاسخ) سامانه از ۱۰ تا ۴۰ ثانیه متغیر است (Anon, 2002). با چنین زمان واکنشی بسیاری از نواحی مورد نظر در سطح مزرعه مقادیری غیر از مقادیر مطلوب محلول سم را دریافت خواهند کرد. برای مثال، با در نظر گرفتن سرعت پیشروی ۸ کیلومتر در ساعت و با زمان پاسخ ۳۰ ثانیه، سمپاش تا رسیدن غلظت محلول سم در نوک افشانک به مقدار مطلوب، به میزان ۶۶ متر پیشروی کرده است. حال این سؤال مطرح خواهد شد که با این وضع، می‌توان باز هم از کاربرد فناوری موضعی در اعمال نهاده‌های زراعی صحبت کرد؟

بر اساس تعریف، زمان تأخیر ( $T_{lag}$  یا  $T_{delay}$ ) مدت زمانی است که طول می‌کشد تا سامانه کنترلی به حداکثر ۱۰ درصد ورودی پله‌ای پاسخ دهد. در سمپاش‌های تزریق مستقیم (DI)، زمان تأخیر برای تغییر غلظت مواد شیمیایی در نوک افشانک‌ها بر کارایی سمپاش تأثیرگذار خواهد بود.

دقت مزرعه‌ای یک اعمال‌کننده میزان متغیر، با زمان واکنش آن نسبت عکس دارد. هر اندازه مدت زمان واکنش سمپاش کمتر باشد، می‌توان میزان مطلوبی از مواد شیمیایی را با دقت بالا در نقاط مورد نظر در مزرعه اعمال کرد. در اعمال مواد شیمیایی در سامانه‌های تزریق مستقیم، به دلیل یکسان نبودن تأخیر در انتقال بین افشانک‌های هر بوم همواره مقداری خطا وجود خواهد داشت (Rockwell & Ayers, 1996). اگر چه همه خطاها در اعمال مواد شیمیایی را نمی‌توان حذف کرد، ولی کاهش در زمان تأخیر در انتقال، بر اعمال دقیق‌تر مواد شیمیایی تأثیر بسزایی خواهد داشت و در نتیجه عملکرد محصول نیز افزایش خواهد یافت.

کامل در نقطه تلاقی آن دو فرض شد. پس از آن، محلول سم به صورت تکه<sup>۱</sup> با غلظت ثابت، که آن را Plug می‌گویند در حجم  $V$  جریان می‌یابد (شکل ۲). هرگونه تغییر در دبی سیال حامل و نیز در دبی ماده مؤثر علف کش منجر به تغییر غلظت محلول در نقطه تزریق خواهد شد (Lovich et al., 2005) (شکل ۳).

با ایجاد تغییر در دبی سیال حامل یا دبی ماده مؤثر علف کش تغییری ناگهانی (پله‌ای) در غلظت محلول سم خروجی از حجم  $V$  (نوک افشانک) حاصل می‌شود. زمان مورد نیاز ( $t$ ) برای این که محلول سم با غلظت جدید، حجم  $V$  را به طور کامل پر کند از رابطه<sup>۳</sup> محاسبه می‌شود (Lovich et al., 2005):

$$t = \frac{V}{Q_c + Q_a} \quad (3)$$

که در آن،

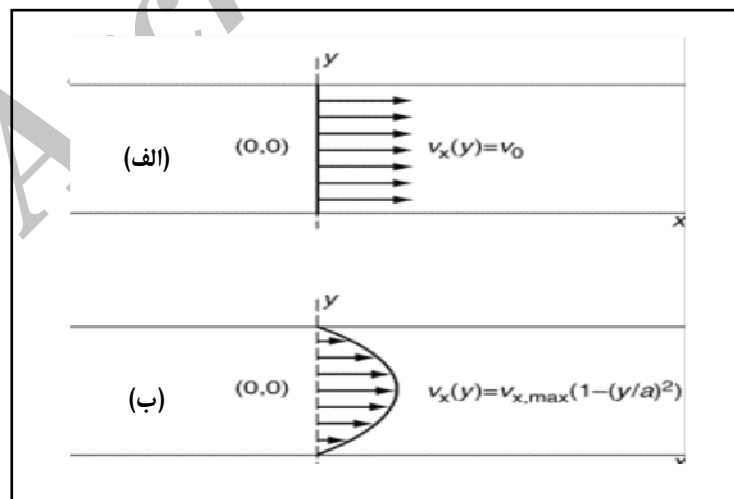
$Q_c =$  دبی سیال حامل و  $Q_a =$  دبی ماده مؤثر علف کش است.

مؤثر علف کش و دبی سیال حامل بر مشخصات دینامیکی سامانه تزریق مستقیم، جریان محلول سم از نقطه تزریق تا نوک افشانکها مدل سازی ریاضی شد. بدین منظور، از دو مدل حاکم بر جریان محلول سم در سامانه های تزریق مستقیم استفاده شد. مدل جریان تکه‌ای و مدل اختلاط مناسب، دو مدل ارائه شده در این پژوهش هستند که قواعد و روابط ریاضی حاکم بر این مدل ها ارائه خواهد شد.

### مدل جریان تکه‌ای

در مکانیک سیالات، جریان تکه‌ای مدل ساده‌ای از پروفیل سرعت سیال در حال عبور از لوله است. در مدل جریان تکه‌ای، فرض می‌شود که سرعت سیال در عرض هر مقطعی از جریان درون لوله ثابت است. فرض ساده‌سازی این مدل، بر مبنای نبود لایه مرزی در مجاورت جداره داخلی لوله است. شکل ۱ پروفیل سرعت در مدل جریان تکه‌ای و نیز پروفیل سرعت در حالت واقعی را نشان می‌دهد.

با کاربرد مدل جریان تکه‌ای برای اختلاط ماده مؤثر علف کش با سیال حامل، اختلاط این دو به طور آنی و

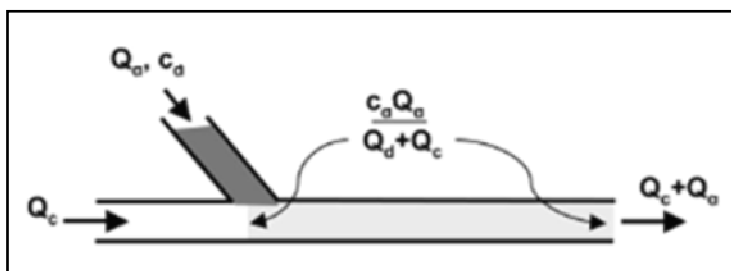


شکل ۱- الف) پروفیل سرعت در مدل جریان تکه‌ای که در آن سرعت سیال در مقطع عرضی جریان ثابت فرض می‌شود و

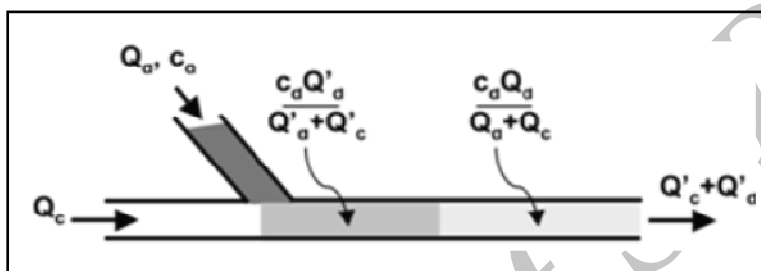
ب) پروفیل سرعت در حالت واقعی که در آن رابطه سرعت در مقطع عرضی جریان به صورت یک سهمی بیان می‌شود

(Lovich et al., 2005).

مدل‌سازی ریاضی و آزمون تزریق در یک...



شکل ۲- مدل جریان تکه ای در حالت پایدار در اختلاط ماده مؤثر علف کش با دبی  $Q_a$  و غلظت  $c_a$  و سیال حامل با دبی  $Q_c$  (Lovich et al., 2005).

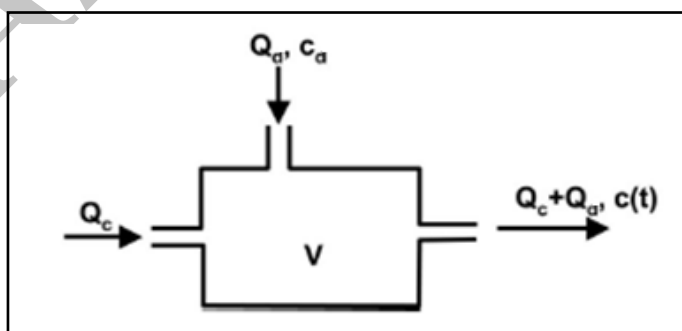


شکل ۳- در مدل جریان تکه‌ای در مدت زمانی کوتاه بعد از تغییر در دبی سیال حامل ( $Q_c$ ) و نیز دبی ماده مؤثر علف‌کش ( $Q'_a$ )، غلظت محلول سم به مقدار جدید  $\frac{c_a Q'_a}{Q'_c + Q'_a}$  خواهد رسید (Lovich et al., 2005).

### مدل اختلاط مناسب

هرگونه تغییر در دبی سیال حامل یا در ماده مؤثر، بلافاصله بر غلظت محلول خروجی از حجم کنترل  $V$  تأثیر خواهد گذاشت. اما مدت زمانی طول خواهد کشید تا غلظت محلول سم خروجی از حجم کنترل  $V$  به مقدار ثابت (حالت پایا) برسد.

یکی از مدل‌های رایج دیگر در زمینه سامانه‌های تزریقی، مدل اختلاط مناسب است. در این مدل، فرض می‌شود که غلظت محلول سم درون حجم کنترل  $V$  همواره یکنواخت است (Lovich et al., 2005) (شکل ۴).



شکل ۴- حجم کنترل در مدل اختلاط مناسب که در آن سیال حامل و ماده مؤثر به طور یکنواخت در حجم کنترل  $V$  با یکدیگر مخلوط می‌شوند.

با توجه به این که غلظت مربوط به سیال حامل (آب) صفر فرض می‌شود، پس رابطه ۱۱ حاصل می‌شود:

$$(Q_a C_a) - C(Q_c + Q_a) = V \frac{dc}{dt} \quad (11)$$

رابطه ۱۱ تغییرات غلظت محلول سم خروجی از حجم کنترل  $V$  را نسبت به زمان نشان می‌دهد. تغییر غلظت محلول سم در حجم کنترل  $V$  با کاربرد معادله بقای جرم به صورت رابطه ۱۲ بازنویسی شد:

$$V \frac{dc}{dt} = C_a \cdot Q_a - C(Q_a + Q_c) \quad (12)$$

به منظور محاسبه زمان تأخیر در انتقال محلول سم از نقطه تزریق ماده مؤثر علف‌کش تا افشانک‌ها، باید بتوان غلظت محلول سم را به صورت تابعی از زمان به دست آورد. بدین منظور، معادله دیفرانسیل اخیر که یک معادله دیفرانسیل خطی مرتبه اول غیرهمگن است با اعمال شرایط اولیه حل گردید.

برای حل معادله ۱۲ فرض شد که تزریق ماده مؤثر به درون سیال حامل با دبی ثابت برای سیال حامل و ماده مؤثر آغاز شده و درون حجم  $V$  هیچ‌گونه ماده مؤثری وجود نداشته باشد. رابطه ۱۲ به شکل معادله دیفرانسیل زیر است:

$$\frac{dy}{dx} + P(X)Y = q(X) \quad (13)$$

جواب عمومی معادله ۱۳ به شکل رابطه ۱۴ بیان می‌شود:

$$y e^{\int p(x) dx} - \int e^{\int p(x) dx} q(x) dx = A \quad (14)$$

شدت تغییرات غلظت ماده مؤثر علف‌کش درون سیال حامل در مدل اختلاط مناسب را می‌توان از طریق موازنه جرم محلول در حجم کنترل  $V$  به صورت زیر محاسبه کرد. برای هر حجم کنترلی نظیر  $V$  می‌توان رابطه موازنه جرم (قانون بقای جرم) را بر اساس رابطه ۴ نوشت:

$$\sum m_i - \sum m_o = \sum m_{SYS} \quad (4)$$

پس:

$$\int_{t_o}^{t_o + \Delta t} [m_i - m_o] dt = [m_{SYS}]_{t_o + \Delta t} - [m_{SYS}]_{t_o} \quad (5)$$

با نوشتن رابطه فوق برای حجم کنترل  $V$  رابطه ۶ حاصل می‌شود:

$$C_i Q_i t - \frac{[CQ]_t + [CQ]_{t-\Delta t}}{2} \cdot \Delta t = [CV]_{t+\Delta t} - [CV]_t \quad (6)$$

با فرض:

$$[CQ]_t \equiv [CQ]_{t+\Delta t} \quad (7)$$

و با مشتق‌گیری از طرفین رابطه ۶، رابطه به صورت رابطه ۸ درمی‌آید:

$$C_i Q_i - CQ = \frac{d[CV]}{dt} \quad (8)$$

اگر حجم مربوط به حجم کنترل ( $V$ ) ثابت باشد، رابطه ۹ به دست می‌آید:

$$C_i Q_i - CQ = V \frac{dc}{dt} \quad (9)$$

و در شرایط مسئله مربوط، به شکل رابطه ۱۰ خواهد بود:

$$(Q_c C_c + Q_a C_a) - C(Q_c + Q_a) = V \frac{dc}{dt} \quad (10)$$

مدل سازی ریاضی و آزمون تزییق در یک...

$$C = \frac{-\frac{C_a Q_a}{Q_a + Q_c}}{e^{\frac{Q_a + Q_c}{V} t}} + \frac{C_a Q_a}{Q_a + Q_c} \quad (22)$$

و در نتیجه:

$$C(t) = \frac{C_a Q_a}{Q_a + Q_c} (1 - e^{-\frac{Q_a + Q_c}{V} t}) \quad (23)$$

رابطهٔ اخیر در حالتی صادق است که دبی سیال حامل و مادهٔ مؤثر ثابت و شرایط اولیهٔ  $C(0)=0$  برقرار باشد. حال هر گونه تغییر در دبی سیال حامل یا مادهٔ مؤثر منجر به تغییر غلظت محلول سم در خروجی حجم کنترل  $V$  خواهد شد. برای به دست آوردن رابطهٔ تغییر غلظت محلول سم در این حالت، فرض شد که دبی سیال حامل از مقدار  $Q_c$  به مقدار جدید  $Q_c^t$  و دبی مادهٔ مؤثر علف کش از مقدار  $Q_a$  به مقدار جدید  $Q_a^t$  تغییر یابد. در این حالت شرایط اولیه به صورت رابطهٔ ۲۴ تعریف شد:

$$C(0) = \frac{C_a Q_a}{Q_a + Q_c} \quad (24)$$

با جایگذاری رابطهٔ ۲۴ در رابطهٔ ۲۳، رابطهٔ ۲۵ حاصل می‌شود:

$$\frac{C_a Q_a}{Q_a + Q_c} = \frac{A}{1} + \frac{C_a Q_a^t}{Q_a^t + Q_c^t} \quad (25)$$

و از آنجا:

$$A = \frac{C_a Q_a}{Q_a + Q_c} - \frac{C_a Q_a^t}{Q_a^t + Q_c^t} \quad (26)$$

با جایگذاری  $A$  از رابطهٔ اخیر در رابطهٔ ۱۹، رابطهٔ ۲۷ به دست می‌آید:

حال با جایگذاری پارامترهای هم ارز از رابطهٔ ۱۲ در رابطهٔ ۱۴، رابطهٔ ۱۵ حاصل می‌شود:

$$C e^{\int \frac{Q_a + Q_c}{V} dt} - \int e^{\int \frac{Q_a + Q_c}{V} dt} \cdot \frac{C_a Q_a}{V} dt = A \quad (15)$$

با حل انتگرال فوق، رابطهٔ ۱۶ حاصل خواهد شد:

$$C e^{\frac{Q_a + Q_c}{V} t} - \int e^{\frac{Q_a + Q_c}{V} t} \cdot \frac{C_a Q_a}{V} dt = A \quad (16)$$

و از آن:

$$C e^{\frac{Q_a + Q_c}{V} t} - \frac{C_a Q_a}{V} \cdot \frac{V}{Q_a + Q_c} e^{\frac{Q_a + Q_c}{V} t} = A \quad (17)$$

و

$$C = \frac{A + \frac{C_a Q_a}{Q_a + Q_c} \cdot e^{\frac{Q_a + Q_c}{V} t}}{e^{\frac{Q_a + Q_c}{V} t}} \quad (18)$$

و

$$C = \frac{A}{e^{\frac{Q_a + Q_c}{V} t}} + \frac{C_a Q_a}{Q_a + Q_c} \quad (19)$$

با در نظر گرفتن شرایط اولیهٔ  $C(0)=0$  رابطهٔ ۲۰ به دست می‌آید:

$$0 = \frac{A}{1} + \frac{C_a Q_a}{Q_a + Q_c} \quad (20)$$

و از آن رابطهٔ ۲۱ نتیجه می‌شود:

$$A = -\frac{C_a Q_a}{Q_a + Q_c} \quad (21)$$

با جایگذاری رابطهٔ ۲۱ در رابطهٔ ۱۹، رابطهٔ ۲۲ به دست می‌آید:

$$C = \frac{\frac{C_a Q_a}{Q_a + Q_c} - \frac{C_a Q'_a}{Q'_a + Q'_c}}{e^{\frac{Q_a + Q_c t}{V}}} + \frac{C_a Q'_a}{Q'_a + Q'_c} \quad (27)$$

و در نتیجه:

$$C(t) = \frac{C_a Q_a}{Q_a + Q'_c} \left( e^{-\frac{Q_a + Q_c t}{V}} \right) + \frac{C_a Q'_a}{Q'_a + Q'_c} \left( 1 - e^{-\frac{Q_a + Q_c t}{V}} \right) \quad (28)$$

که در این روابط،  $C_a$  علف کش ( در مخزن مربوطه، دبی ماده مؤثر علف کش ( $Q_a$ ))، دبی سیال حامل ( $Q_c$ ) و حجم ( $V$ ) مربوط به مجاری انتقال محلول سم را از نقطه تزریق تا محل اندازه گیری غلظت محلول سم به عنوان مقادیر معلوم دانست که در این تحقیق مقادیر مذکور به ترتیب با اندازه گیری به وسیله حسگر هدایت الکتریکی، حسگر اختلاف فشار و دبی سنج تعیین شد و حجم نیز با اندازه گیری طول و سطح مقطع مجاری انتقال محلول سم به دست آمد.

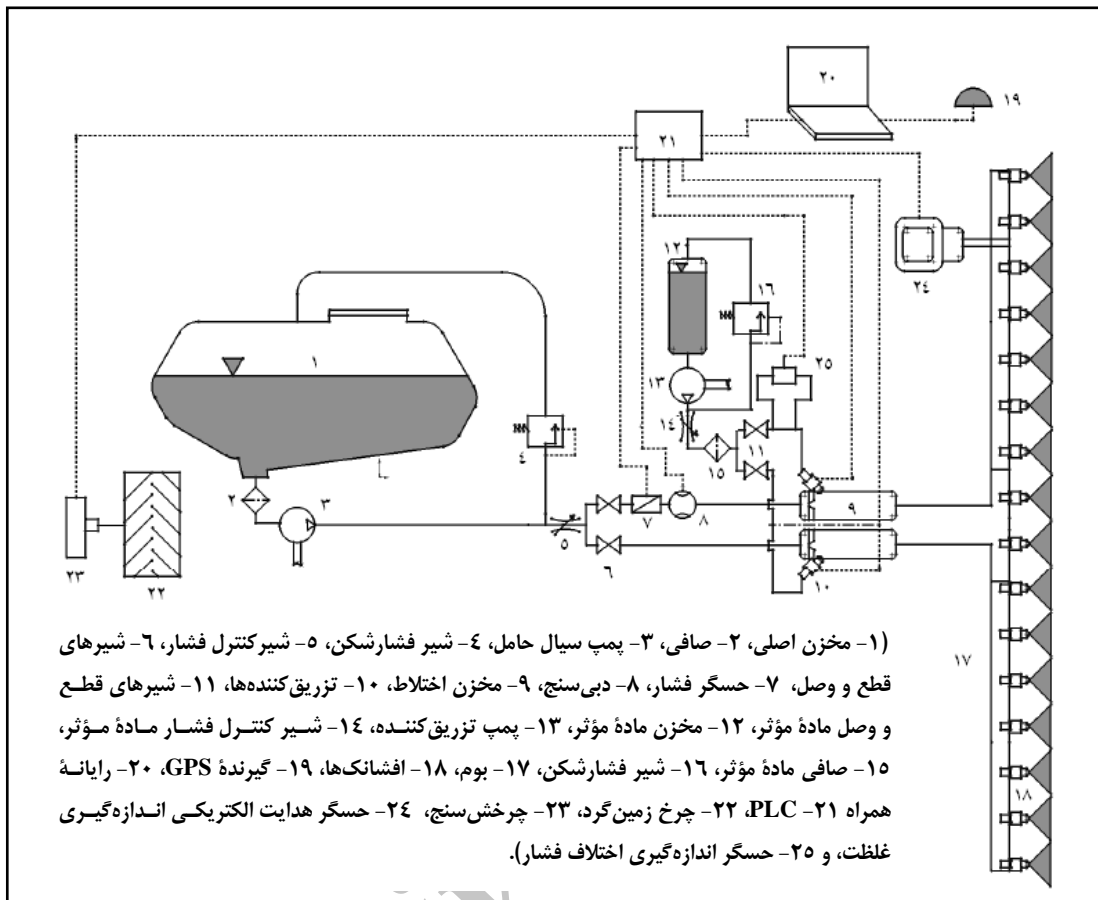
#### آزمون های کارگاهی سامانه تزریق مستقیم

به منظور بررسی و مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی ریاضی و نتایج حاصل از آزمون سامانه تزریق مستقیم، یک سامانه تزریق مستقیم طراحی و ساخته شد که در شکل ۵ تصویر طرحواره و در شکل ۶ تصویر آن نمایش داده شده است. بدیهی است، هر چه زمان پاسخ سامانه در انتقال محلول سم از محل تزریق تا افشانه ها کوتاه تر باشد، سامانه کنترلی بهتر می تواند محلول سم با غلظت مورد نظر را در محل مناسب مزرعه اعمال کند.

که در این روابط،  $m_i$  = جرم ورودی به سیستم (کیلوگرم)؛  $m_o$  = جرم خروجی از سیستم (کیلوگرم)؛  $m_{sys}$  = جرم سیستم (کیلوگرم)؛  $Q_c$  = دبی سیال حامل (لیتر بر دقیقه)؛  $Q_a$  = دبی ماده مؤثر (لیتر بر دقیقه)؛  $C_i$  = غلظت مواد ورودی به حجم کنترل (شامل غلظت ماده مؤثر علف کش و سیال حامل) (گرم بر لیتر)؛  $Q_i$  = دبی مواد ورودی به حجم کنترل (شامل دبی ماده مؤثر علف کش و سیال حامل) (گرم بر لیتر)؛  $C$  = غلظت محلول سم خروجی از حجم کنترل در زمان  $t$  (گرم بر لیتر)؛  $t$  = زمان (ثانیه)؛  $V$  = حجم مربوط به حجم کنترل (مترمکعب)؛ و  $dC/dt$  = تغییرات غلظت محلول سم خروجی از حجم کنترل  $V$  نسبت به زمان است.

رابطه ۲۷ تغییرات غلظت محلول سم خروجی از حجم کنترل  $V$  را نسبت به زمان با تغییر دبی سیال حامل و نیز ماده مؤثر علف کش نشان می دهد. با استفاده از این رابطه می توان تأخیر زمانی در انتقال محلول سم را از نقطه تزریق تا هر نقطه دلخواه از بوم سمپاش محاسبه کرد. برای این منظور باید مقادیر کمیت های غلظت ماده مؤثر





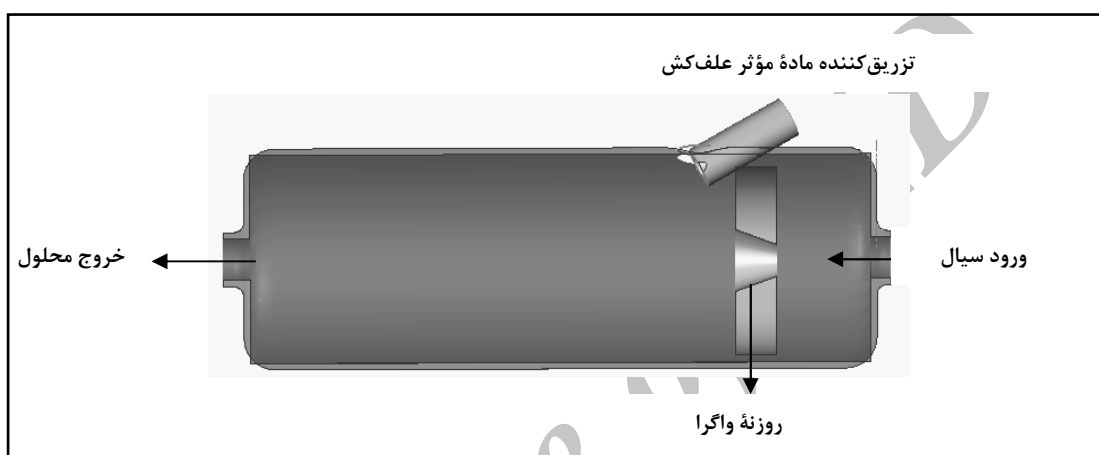
شکل ۵- مدار الکتروهیدرولیکی سامانه سمپاشی میزان متغیر ساخته شده.



شکل ۶- تصویر سامانه طراحی شده.

استفاده در ساختار اولیه سمپاش، وجود محفظه اختلاط به منظور اختلاط مؤثر ماده مؤثر علفکش با سیال حامل ضروری است. شکل ۷، تصویر سطح برش خورده روزنه واگرا را همراه با تزریق کننده درون محفظه اختلاط مورد استفاده در این پژوهش نشان می‌دهد.

به منظور اختلاط مناسب ماده مؤثر علفکش با آب (به دلیل به کارگیری یک مبدل هدایت الکتریکی برای اندازه‌گیری زمان تأخیر، به جای ماده مؤثر علفکش از محلول آب نمک استفاده شد)، از یک محفظه اختلاط استوانه‌ای شکل با طول ۳۰ سانتی‌متر و قطر ۸ سانتی‌متر استفاده شد. با توجه به حذف همزن هیدرولیکی مورد



شکل ۷- تصویر محفظه اختلاط و سطح برش خورده روزنه واگرا همراه با تزریق کننده درون محفظه اختلاط.

آزمون‌های کارگاهی دمای محل آزمون در ۲۵ درجه سلسیوس ثابت نگه داشته شد و هدایت الکتریکی آب مورد استفاده (به عنوان سیال حامل) ۲/۱۶ میلی‌زیمنس بود. به منظور اندازه‌گیری هدایت الکتریکی محلول سم، از نمک طعام با خلوص ۹۹/۵ درصد، به جای ماده مؤثر علفکش، استفاده شد. غلظت ماده مؤثر در مخزن ماده مؤثر علفکش به میزان ۳۰ گرم بر لیتر بود.

به منظور تجزیه و تحلیل و مقایسه نتایج کارگاهی از روش تجزیه واریانس با آزمون دانکن در سطح اطمینان ۵ درصد استفاده شد تا اثر تغییر پارامترهای مختلف، بر

در خلال اجرای آزمون‌های کارگاهی که تعداد آن‌ها بالغ بر ۱۵۰ بود، عوامل کنترلی سامانه نظیر چرخه وظیفه<sup>۱</sup>، سرعت پیشروی، فشار سیال حامل، فشار ماده مؤثر علفکش (و در نتیجه دبی آن)، میزان ماده مؤثر مورد نیاز بر اساس نقشه مدیریتی اعمال علفکش (Mohammadzamani et al., 2009) و نیز محل تزریق ماده مؤثر علفکش درون سیال حامل تغییر یافت. هر آزمون کارگاهی در سه تکرار اجرا و منحنی مربوط به داده‌های هر آزمون با استفاده از نرم‌افزار MATLAB ترسیم شد. نکته شایان ذکر این است که هنگام انجام

چرخه وظیفه (Duty Cycle) در یک شکل موج مربعی به صورت نسبت "مدت پالس" به "دوره تناوب پالس" تعریف می‌شود. در واقع چرخه وظیفه میزان روشن بودن موج مربعی را نسبت به خاموش بودن آن به صورت درصد نشان می‌دهد. در این تحقیق این درصد به مفهوم میزان باز بودن تزریق کننده در مدت زمان فعال بودن آن نسبت به میزان بسته بودن آن است. برای مثال، چرخه وظیفه ۸۰ درصد به این مفهوم است که دهانه تزریق کننده در مدت زمان فعالیت خود، در ۸۰ درصد بازه زمانی باز و در ۲۰ درصد آن بسته است.

آزمون، اثر متقابل تغییر سرعت پیشروی، فشار سیال حامل، فشار ماده مؤثر علف‌کش (شبيه‌سازی شده با محلول نمک) و چرخه وظیفه بر زمان پاسخ سامانه بررسی شد. بدین‌منظور، آزمون فاکتوریل با طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی به کار برده شد. به منظور مقایسه نتایج از یک تیمار شاهد نیز استفاده شد؛ که تیمار شاهد دارای چرخه وظیفه ۳۰ درصد، فشار تزریق ۷ بار و فشار آب ۲ بار بود. جدول ۱ نتایج تجزیه واریانس این آزمون را نشان می‌دهد. از جدول ۱ برمی‌آید که از لحاظ آماری تغییر همزمان فشار آب، فشار تزریق ماده مؤثر و موقعیت تزریق تأثیر معنی‌داری بر زمان پاسخ سامانه ندارد. اما تغییر جداگانه موقعیت تزریق و فشار آب بر زمان تأخیر تأثیر معنی‌داری دارد.

زمان تأخیر سامانه تعیین شود. به منظور بررسی برهم‌کنش عوامل مختلف از آزمایش فاکتوریل با طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی استفاده شد و برای تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، نرم‌افزار SPSS 15 به کار برده شد. سرانجام، نتایج آزمون‌های کارگاهی با نتایج حاصل از مدل ریاضی ارائه شده، که شامل دو مدل جریان تکه‌ای و اختلاط مناسب است، مقایسه شد.

## نتایج و بحث

**اثر متقابل تغییر سرعت پیشروی، فشار آب، فشار ماده مؤثر و چرخه وظیفه بر زمان تأخیر**  
به منظور بررسی اثر عوامل مختلف بر زمان پاسخ سامانه، عوامل دارای اثر متقابل ارزیابی شدند. در این

جدول ۱- خلاصه نتایج تجزیه واریانس داده‌های زمان پاسخ سامانه

منابع تغییر	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	سطح معنی‌داری
بلوک	۱۸۰/۶۹	۲	۹۰/۳۴	۳/۶۴ <sup>ns</sup>	۰/۰۵۳
فشار آب	۱۸۴/۵۳	۱	۱۸۴/۵۳	۷/۴۴*	۰/۰۱۶
فشار تزریق	۸۸/۳۵	۱	۸۸/۳۵	۳/۵۶ <sup>ns</sup>	۰/۰۰۸
موقعیت تزریق	۶۴۶/۳۶	۱	۶۴۶/۳۶	۲۶/۰۹*	۰
فشار آب × فشار تزریق	۷۹/۷۵	۱	۷۹/۷۵	۳/۲۱ <sup>ns</sup>	۰/۰۹۴
فشار آب × موقعیت تزریق	۱۶/۷۵	۱	۱۶/۷۵	۰/۶۷ <sup>ns</sup>	۰/۴۲۵
فشار تزریق × موقعیت تزریق	۲/۳۱	۱	۲/۳۱	۰/۰۹ <sup>ns</sup>	۰/۷۶۴
فشار آب × فشار تزریق × موقعیت تزریق	۲۸/۰۵	۱	۲۸/۰۵	۱/۱۳ <sup>ns</sup>	۰/۳۰۵
خطای آزمایش	۳۶۴/۸۴	۱۴	۲۴/۷۷	-	-
کل	۱۱۳۲۰/۲۳	۲۴	-	-	-

\* اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد، ns: نبود اختلاف معنی‌دار

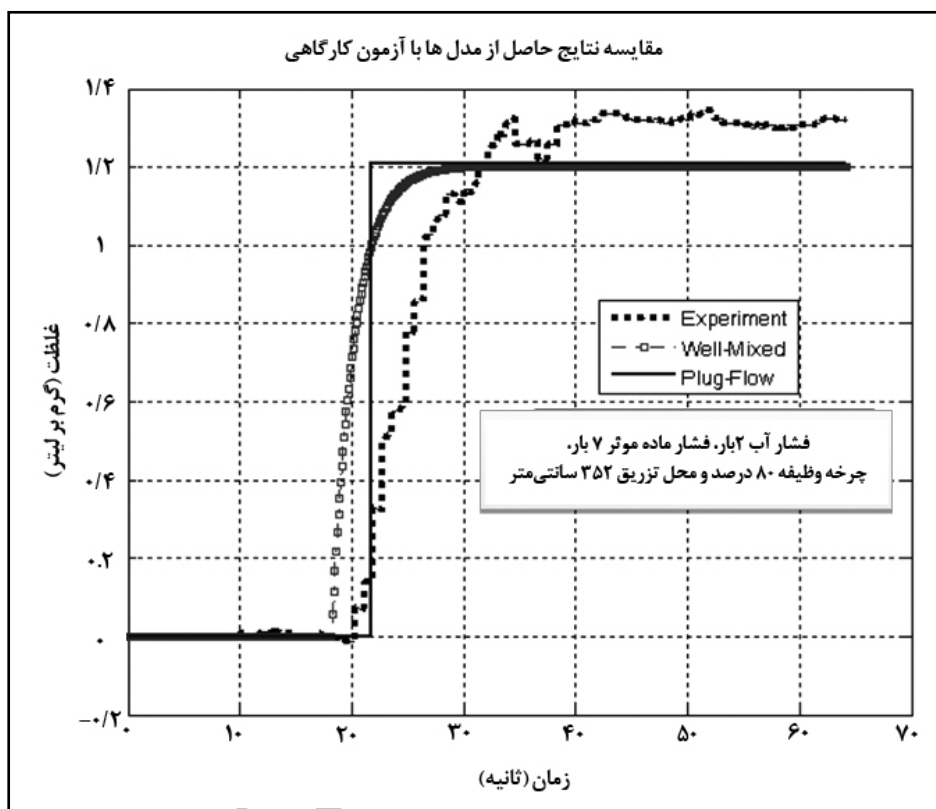
درصد بود، با نتایج حاصل از دو مدل جریان تکه‌ای و اختلاط مناسب مقایسه می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۸ دیده می‌شود هیچ‌یک از دو مدل قادر نیست نوسانات تغییر غلظت را، که ناشی از نوسانات تغییر فشار آب و ماده مؤثر است، شبیه‌سازی کند. نوسانات غلظت در حالت

**مقایسه پاسخ زمانی مدل‌های جریان تکه‌ای و اختلاط مناسب با نتایج حاصل از آزمون‌های کارگاهی**

در این بخش، نتایج حاصل از آزمونی که در آن فشار آب ۲ بار و فشار تزریق ماده مؤثر ۷ بار و چرخه وظیفه ۸۰

گذرا و پایا در نتایج آزمون‌ها به این دلیل به وجود آمد که هر دو پمپ آب و ماده مؤثر از نوع پیستونی و بدون نبض‌گیر بودند و از طرفی فنر مورد استفاده در شیرهای کنترل فشار هر دو پمپ ضریب

ارتجاعی کمی داشتند. از این‌رو عملیات مکش و دهش پمپ‌ها و نیز جابه‌جایی مداوم فنر در شیرهای کنترل فشار باعث ایجاد جریان نوسانی در سامانه شد.



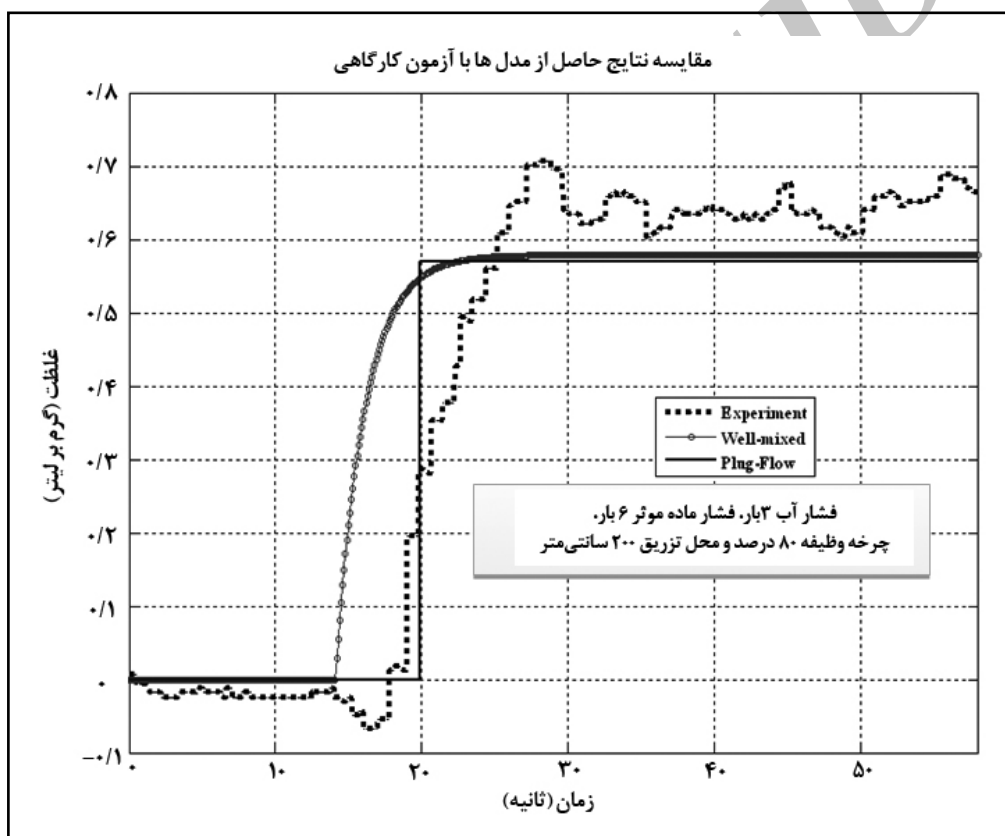
شکل ۸- مقایسه نتایج حاصل از مدل‌های جریان تکه‌ای و اختلاط مناسب با آزمون کارگاهی در فشار آب ۲ بار، فشار ماده مؤثر ۷ بار و چرخه وظیفه ۸۰ درصد و محل تزریق ۳۵۲ سانتی‌متر از حسگر غلظت.

به حجم کنترل (V) به صورت دستی اندازه‌گیری شده است که به دلیل شکل هندسی نامنظم نمی‌توان حجم دقیق را محاسبه و در مدل‌ها از آن استفاده کرد. اما در بررسی زمان پاسخ، مشخص شد که زمان پاسخ مدل جریان تکه‌ای ۱۱/۵ ثانیه، مدل اختلاط مناسب ۱۸/۲ ثانیه و آزمون ۲۰/۶ ثانیه است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود مدل اختلاط مناسب، در مقایسه با مدل جریان

همان‌گونه که انتظار می‌رفت در مدل جریان تکه‌ای غلظت محلول خروجی از حجم کنترل به صورت ناگهانی (پله‌ای) از صفر تا ۱/۲ گرم بر لیتر تغییر کرد در حالی که در مدل اختلاط مناسب این تغییر از یک تابع نمایی تبعیت می‌کند، گرچه هیچ‌یک از دو مدل قادر نیست غلظت حالت پایا (۱/۳ گرم بر لیتر) را با دقت تخمین بزنند. علت این امر آن است که در مدل‌ها مقادیر مربوط

با توجه به سایر نتایج مقایسه‌ی پاسخ زمانی بین مدل‌ها و آزمون‌ها، مشخص شد که مدل اختلاط مناسب در مقایسه با مدل جریان تکه‌ای پاسخ بهتری ارائه می‌دهد. از این‌رو می‌توان مدل اختلاط مناسب را به منظور پیش‌بینی رفتار دینامیک سامانه‌ی تزریق مستقیم به کار برد، گرچه در هر دو مدل، بین مقدار حالت پایا با مقادیر حالت پایای آزمون‌ها اندکی تفاوت مشاهده می‌شود.

تکه‌ای، زمان پاسخ واقعی‌تری را پیش‌بینی کرده است. در نمونه‌ای دیگر، نتایج حاصل از دو مدل و آزمون کارگاهی در حالتی مقایسه شد که فشار آب ۳ بار، فشار تزریق ماده مؤثر ۶ بار، چرخه‌ی وظیفه ۸۰ درصد و محل تزریق ۲۰۰ سانتی‌متر از حسگر غلظت بود (شکل ۹). در این حالت، زمان پاسخ آزمون به تغییر غلظت ۱۲/۸ ثانیه بود و زمان پاسخ مدل جریان تکه‌ای و اختلاط مناسب به ترتیب ۸/۵ و ۱۰/۴ ثانیه به دست آمد.



شکل ۹- مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل‌های جریان تکه‌ای و اختلاط مناسب با آزمون کارگاهی در فشار آب ۳ بار، فشار ماده مؤثر ۶ بار، چرخه‌ی وظیفه ۸۰ درصد و محل تزریق ۲۰۰ سانتی‌متر از حسگر غلظت.

دست یافت:

- یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر عملکرد هر سامانه‌ی تزریق مستقیم، زمان پاسخ آن است. نتایج آزمون‌های

### نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج حاصل از آزمون‌های سامانه‌ی سمپاشی ساخته شده و مدل‌های ارائه شده، می‌توان به نتایج زیر

کارگاهی نشان می‌دهد این مدت زمان بیش از هر چیز به دو عامل بستگی دارد: (۱) حجم بین محل تزریق تا افشانک‌ها و (۲) فشار سیال حامل. - به منظور بررسی رفتار دینامیک سامانه‌های تزریق مستقیم، استفاده از مدل اختلاط مناسب در پیش‌بینی پاسخ زمانی مناسب‌تر از استفاده از مدل Plug Flow است. - به منظور بررسی زمان تأخیر، زمان اوج، زمان پاسخ و نیز بررسی مشخصه‌های دینامیک یک سامانه تزریق مستقیم از سامانه ساخته شده می‌توان به عنوان یک میز کار آزمایشگاهی بهره برد.

## مراجع

- Al-Gaadi, K. A. 1992. Monitoring the performance of a ground sprayer with and without control system. M.Sc Thesis. Department of Agricultural and Chemical Engineering. Colorado State University. USA.
- Anon. 2002. Richtlinien für die Prüfung von Pflanzenschutzmitteln und Pflanzenschutzgeräten: Merkmale für die Prüfung in Gebrauch befindlicher Spritz- und Sprüngeräte für Flächen- und Raumkulturen. Teil VII. Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft (BBA). Berlin. Germany.
- Giles, D. K. and Comino, J. A. 1990. Droplet size and spray pattern characteristics of an electronic flow controller for spray nozzles. J. Agric. Eng. Res. 47, 249-267.
- Gopala Pillai, S., Tian, L. and Zheng, J. 1999. Evaluation of a flow control system for site-specific herbicide applications. T. ASAE. 42(4): 863-870.
- Koo, Y. M. and Kuhlman, D. K. 1993. A variable flow nozzle with consistent spray performance. T. ASAE. 36(3): 685-690.
- Lovich, M. A., Doles, J. and Peterfreund, R. A. 2005. The impact of carrier flow rate and infusion set dead-volume on the dynamics of intravenous drug delivery. Anesth. Analg. 100(4): 1048-1055.
- Mohammadzamani, D., Minaei, S., Alimardani, R., Almassi, M. and Shafikhani, H. R. 2009. Generation a digital management map using gps for herbicide application by VRA spraying. J. Agric. Eng. Res. 10(3): 29-44. (in Farsi)
- Paice, M. E. R., Miller, P. C. H. and Day, W. 1996. Control requirements for spatially selective herbicide sprayers. Comput. Electron. Agric. 14(2-3): 163-177.
- Rockwell, A. D. and Ayers, P. D. 1996. A variable rate, direct nozzle injection field sprayer. Appl. Eng. Agric. 12(5): 531-538.
- Stone, M. L., Giles, D. K. and Dieball, K. J. 1999. Distributed network system for control of spray droplet size and application rate for precision chemical application. American Society of Agricultural Engineers (ASAE). Paper No. 99-3112
- Tian, L. and Zheng, J. 2000. Dynamic deposition pattern simulation of modulated spraying. T. ASAE. 43(1): 5-11.

مدل‌سازی ریاضی و آزمون تزریق در یک...

Zhu, H., Ozkan, H. E., Fox, R. D., Brazee, R. D. and Derksen, R. C. 1998. Mixture uniformity in supply lines and spray patterns of a laboratory injection sprayer. *Appl. Eng. Agric.* 14(3): 223-230.

Archive of SID

## Modeling and Testing of Herbicide Injection into Carriers on Direct Injection Sprayers

D. Mohammad-Zamani\*, S. Minaei, R. Alimardani, A. Rostami and J. Ghezavati

\* Corresponding Author: Young Researchers Club and Elites, Takestan Branch, Islamic Azad University, Takestan, Iran.

E-Mail: dr.dmzamani@gmail.com

Received: 3 September 2011, Accepted: 27 October 2012

In a direct injection sprayer (DI), the delay time to change the concentration of chemicals in the spray tip can have a substantial effect on sprayer performance. Delay time is the most important variable in evaluating the performance of a DI system in real time herbicide application. The flow of solution from the injection point to the nozzles was mathematically modeled to quantitatively evaluate the effect of tube volume and carrier flow rate on dynamic specifications, such as delay time. Plug-Flow and Well-Mixed models were used to model solution flow in DI systems. A DI system was designed and built to allow comparison between the mathematical model and tests results. ANOVA (Duncan test) at a 5% confidence level was used to determine the effect of change of the parameters on the delay time. A factorial completely randomized block design and SPSS 15 software were used for statistical analysis of the data. Comparison of the mathematical model with the test results showed that, for time response, the Well-Mixed model had a more appropriate response time than did the Plug-Flow model. The Well-Mixed model is suggested for predicting the dynamic behavior of a DI system. Both models produced stable state values that were slightly different from test results.

**Keywords:** Delay Time, Direct Injection Sprayer, Plug-Flow Model, Well-Mixed Model