

مطالعه سرعت پیشروی جبهه رطوبتی در سامانه آبیاری قطره‌ای پالسی به کمک مدل‌های رگرسیون غیر خطی

بختیار کریمی^{۱*}، نظیر کریمی^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۹/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۱

چکیده

تخمین سرعت پیشروی جبهه در خاک یکی از پارامترهای مهم در طراحی و مدیریت سامانه آبیاری قطره‌ای می‌باشد. به منظور انجام این تحقیق داده‌های آزمایشی در یک مدل فیزیکی از جنس پلی‌کربنات به ابعاد $3 \times 1 \times 0.5$ و بر روی سه نوع بافت خاک (سبک، متوسط و سنگین)، با سه نوع دبی قطره چکان (۴، ۶ و ۸ لیتر در ساعت)، در سه عمق مختلف نصب قطره‌چکان (صفر، ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری) به انجام رسید. همچنین این آزمایشات برای دو نوع سیستم آبیاری پیوسته و پالسی صورت گرفت که در آبیاری پالسی، زمان قطع و وصل پالس‌ها مقادیر ۳۰-۳۰، ۴۰-۲۰ و ۲۰-۴۰ دقیقه در نظر گرفته شد. با در نظر گرفتن متغیرهای زمان آبیاری، دبی قطره‌چکان، هدایت هیدرولیکی اشباع، درصد شن و سیلت و رس، چگالی ظاهری خاک، رطوبت اولیه خاک، عمق نصب قطره‌چکان و همچنین نسبت زمان آبیاری در هر چرخه به زمان کل یک چرخه روابطی برای تخمین سرعت پیشروی جبهه رطوبتی با استفاده از رگرسیون غیرخطی ارائه گردید. نتایج مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده نشان داد که مدل رگرسیون غیر خطی با دقت بالایی سرعت پیشروی جبهه رطوبتی را برآورد می‌کند. مقادیر شاخص‌های میانگین ریشه دوم خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) برای پیش‌بینی سرعت پیشروی جبهه رطوبت به ترتیب بین ۰/۰۶۷ تا ۰/۲۷۵ و ۰/۰۳۱ تا ۰/۱۰۸ سانتی‌متر بر دقیقه نوسان می‌کند.

واژه‌های کلیدی: آبیاری قطره‌ای زیر سطحی، پیاز رطوبتی، رگرسیون غیر خطی، مدیریت آبیاری

مقدمه

قطع و وصل می‌شود. هر دوره زمانی دارای یک زمان وصل جریان (مدت زمانی که آب در خاک جریان دارد) و زمان قطع (مدت زمانی بین پایان جریان ارسالی و شروع دوره زمانی جریان بعدی) می‌باشد که می‌تواند به صورت ثابت و یا متغیر باشد؛ بنابراین دوره زمانی هر جریان آب، برابر با مجموع زمان قطع و وصل می‌باشد (محمد بیگی و همکاران، ۱۳۹۵). زمانی که جریان آب وصل می‌شود، جریان با سرعت بیشتری در داخل خاک پیشروی می‌نماید. دلیل این امر آن است که آب در دوره قبلی پیشروی، خاک را مرطوب کرده و باعث کاهش نفوذپذیری در این مناطق شده است؛ بنابراین جریان زیادتری برای پیشروی به سمت خاک خشک پیش‌رو قابل دسترس می‌باشد. علیرزاده (۱۳۷۶) آبیاری پالسی (آبیاری نبضی) را این‌گونه بیان کرده‌اند: آبیاری پالسی نوعی خرد آبیاری است که در آنها وسایل خروج آب (مانند قطره‌چکان یا آبپاش) بطور دایم کار نمی‌کنند، بلکه هر کدام به مدت چند دقیقه با دبی نسبتاً زیاد کار کرده و سپس متوقف می‌شوند. زمان توقف معمولاً ۲ الی ۳ برابر زمان کار قطره‌چکان یا آبپاش است. به این ترتیب آب امکان ذخیره شدن در خاک را پیدا می‌کند. دبی خروجی از قطره‌چکان‌ها در این سیستم ۴ تا ۱۰ برابر دبی در

آبیاری قطره‌ای پالسی یا متناوب یکی از روش‌های آبیاری می‌باشد که کاربرد حجم پایین آب را به همراه دارد. آبیاری پالسی مجموعه‌ای از چرخه‌ها معرفی شده است که هر کدام از چرخه‌ها از یک فاز آبیاری و یک فاز استراحت تشکیل شده است (Karmeli and Peri, 1974). آبیاری قطره‌ای پالسی با مدیریت خوب، پتانسیل زیادی در بهبود توزیع یکنواختی آب در خاک و افزایش جذب آب توسط ریشه گیاه را به صورت توأمان به همراه دارد. این روش در خاک‌هایی با نفوذپذیری نسبتاً زیاد تأثیر بیشتری دارد. در آبیاری قطره‌ای پالسی به جای اینکه از ابتدا تا انتهای آبیاری جریان پیوسته-ای از آب در داخل خاک برقرار باشد، جریان آب به دفعات متناوب

۱- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
(* - نویسنده مسئول: Email: bakhtiar.karimi@gmail.com)

(V_h) عمودی (V_V) و عمودی رو به بالا (V_{up}) در خاک بر حسب سانتی‌متر در دقیقه است. همچنین کریمی و محمدی (۱۳۹۷) مدل‌هایی را برای برآورد سرعت حرکت آب در جهات مختلف در سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی ارائه کردند. نتایج حاصل از آنالیزهای آماری نشان داد که این مدل‌ها عملکرد مناسبی در تخمین سرعت جبهه رطوبتی دارند و مقادیر خطا نیز اندک است. همچنین نتایج مدل شبکه عصبی با مدل کریمی و همکاران (a ۱۳۹۴) که با استفاده از آنالیز ابعادی روابطی را محاسبه سرعت تخمین کرده بود، مقایسه شد. نتایج مقایسه‌های آماری نشان داد که در اکثر تیمارهای مورد بررسی مدل‌های شبکه عصبی عملکرد بهتری نسبت به مدل آنالیز ابعادی دارند. دلیل آن نیز بدین خاطر است مدل‌های شبکه عصبی در مقایسه با مدل‌های آنالیز ابعادی متغیرهای ورودی بیشتری را در نظر می‌گیرند که این به نوبه خود شناخت بیشتر مدل را از محیط پیچیده خاک فراهم می‌کند. و همچنین این مدل دارای مقبولیت بیشتری می‌باشد و برای طیف وسیعی از نوع خاک و دبی قابل تعمیم است. سرعت پیشروی جبهه رطوبتی در جهات مختلف در خاک نیز همانند الگوی توزیع جبهه رطوبتی اهمیت دارد (کریمی و همکاران a ۱۳۹۴). مطالعات صورت گرفته در زمینه پیاز رطوبتی نشان می‌دهد که اکثر تحقیقات صورت گرفته در زمینه تخمین ابعاد پیاز رطوبتی می‌باشد و مطالعات اندکی به منظور شبیه‌سازی سرعت پیشروی آب در خاک صورت گرفته است و بیشتر این مطالعات در زمینه سیستم آبیاری پیوسته می‌باشد. پس با توجه به اینکه هنوز مطالعات جامع و کاملی در زمینه سیستم آبیاری پالسی صورت نگرفته است لذا در این تحقیق سعی بر این است روابطی برای تخمین سرعت پیشروی جبهه حرکت آب در سیستم آبیاری پالسی ارائه گردد. همچنین با توجه به اینکه در اکثر روابط ارائه شده از پارامترهای ورودی محدودی برای شبیه‌سازی استفاده شده است و این به نوبه خود از جامعیت مدلها می‌کاهد. لذا هدف اصلی در این پژوهش، ارائه روابطی جامع و کامل با در نظر گرفتن متغیرهای ورودی بیشتر به منظور تخمین سرعت پیشروی جبهه رطوبت در خاک در جهات مختلف در سیستم‌های قطره‌ای سطحی و زیرسطحی با جریان‌های پیوسته و پالسی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

به منظور انجام آزمایشات، یک مدل مکعب مستطیل شکل با ابعاد $(۱۰ \times ۳ \times ۵)$ متر) مشخص در دانشکده کشاورزی دانشگاه کردستان ساخته شد. به منظور مشاهده و اندازه‌گیری جبهه پیشروی رطوبت، صفحه جلویی مدل از جنس پلی‌کربنات تخت و سایر قسمت‌های آن از جنس فلز ساخته شد. برای راحتی انجام آزمایش، این مدل به سه بخش مساوی تقسیم گردید و همزمان سه آزمایش

قطره‌چکان‌های معمولی است، لذا خطر گرفتگی روزه‌ها در آن کاهش می‌یابد.

بررسی دینامیک آب در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای از مهمترین پارامترها در طراحی، مدیریت و اجرای آن‌ها به حساب می‌آید. از عوامل مهم تأثیر گذار بر این پارامتر می‌توان به دبی قطره‌چکان، نوع خاک (بافت و ساختمان خاک)، خصوصیات شیمیایی خاک، کیفیت آب آبیاری و نیاز آبی گیاهان اشاره نمود (ال‌اگیدی و همکاران ۲۰۱۷، کریمی و همکاران b ۱۳۹۴، کریمی و همکاران a,b ۲۰۱۲). علی‌رغم اهمیت سرعت حرکت آب در خاک، بیشتر مدل‌های ارائه شده به منظور شبیه‌سازی قطر و عمق خیس شده پیاز رطوبتی در سامانه آبیاری قطره‌ای می‌باشند (شوارتزمن و زور ۱۹۸۶، کریمی ۱۳۹۲، امین و اخماج ۲۰۰۶، سینگ و همکاران ۲۰۰۶، میرزایی و همکاران ۱۳۸۴، کوک و همکاران ۲۰۰۶، کیاشنگ و همکاران ۲۰۰۷، کریمی و همکاران a ۱۳۹۴، لی و همکاران ۲۰۰۴، لازارویچ و همکاران ۲۰۰۷، الکینا و ابو‌آواد ۲۰۰۱، ال‌اگیدی و همکاران ۲۰۱۶). از بین این روابط معادله ال‌اگیدی و همکاران (۲۰۱۶) دارای اهمیت بوده که با ارائه یک مدل تجربی با استفاده از هشت پارامتر ورودی و به روش رگرسیون توزیع افقی و عمودی در سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی را شبیه‌سازی نمود. مزیت این رابطه به این دلیل است که برخلاف روابط تجربی قبلی، متغیرهای ورودی مختلفی برای تخمین استفاده شده است (از جمله چگالی ظاهری، درصد شن، سیلت و رس) که با داشتن این پارامترها مدل می‌تواند شناخت بهتری از محیط پیچیده خاک داشته باشد. از اندک مطالعات صورت گرفته در زمینه شبیه‌سازی سرعت می‌توان به معادله کریمی و همکاران (a ۱۳۹۴) اشاره کرد که به کمک قضیه π باکینگهام و با استفاده از آنالیز ابعادی و با در نظر گرفتن سه متغیر هدایت هیدرولیکی اشباع، دبی خروجی از قطره‌چکان و زمان آبیاری روابطی را برای تخمین سرعت پیشروی جبهه حرکت آب در سه جهت افقی، عمودی (رو به پایین) و عمودی (رو به بالا) در سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی ارائه دادند. نتایج مقایسه بین مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده نشان دادند که این مدل‌ها با دقت بالایی سرعت پیشروی جبهه حرکت آب در خاک را در جهات مختلف برآورد می‌کنند.

$$V_h = 3.243 K_S^{0.025} q^{0.325} t^{-0.65} \quad (۱) \text{ سطحی}$$

$$V_h = 1.735 K_S^{0.085} q^{0.305} t^{-0.61} \quad (۲) \text{ زیرسطحی}$$

$$V_V = 1.672 K_S^{0.175} q^{0.275} t^{-0.55} \quad (۳) \text{ سطحی}$$

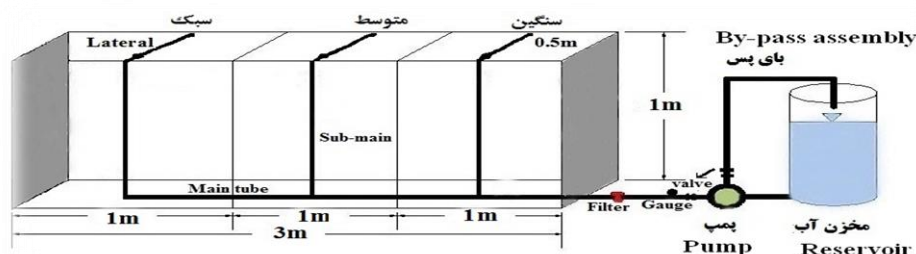
$$V_V = 1.635 K_S^{0.1} q^{0.3} t^{-0.6} \quad (۴) \text{ زیرسطحی}$$

$$V_{up} = 1.382 K_S^{0.1} q^{0.3} t^{-0.6} \quad (۵) \text{ زیرسطحی}$$

که در آن‌ها: زمان آبیاری (t) بر حسب دقیقه، دبی خروجی از قطره‌چکان‌ها (q) بر حسب لیتر در ساعت، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (K_S) بر حسب متر بر ساعت و سرعت حرکت آب در جهت افقی

فیزیکی آن‌ها در جدول ۱ آمده است، با سه نوع دبی قطره چکان (۲)، ۴ و ۶ لیتر در ساعت)، در سه عمق مختلف نصب قطره چکان (صفر، ۱۵ و ۳۰ سانتی متری) به انجام رسید. با توجه به رایج بودن نوع قطره چکان در بازار منطقه، از قطره چکان تتافیم استفاده گردید که مشخصات فنی آن در جدول ۲ آمده است. همچنین این آزمایشات برای دو نوع سیستم آبیاری پیوسته و پالسی صورت گرفت که در آبیاری پالسی، زمان قطع و وصل پالس‌ها (۳۰-۳۰، ۲۰-۴۰ و ۴۰-۲۰ دقیقه) که عدد اول زمان آبیاری و عدد دوم زمان استراحت سیستم در هر چرخه خواهد بود. در این پژوهش به منظور تعیین سرعت پیشروی جبهه رطوبتی در جهات مختلف، در زمان‌های مختلف تا انتهای آبیاری (مدت زمان ۴ ساعت) جبهه پیشروی آب بر روی صفحه پلی کربنات تخت با استفاده از ماژیک وایت‌بورد ترسیم گردید. در پایان هر آزمایش با تهیه عکسی از صفحه جلویی مدل و به کمک نرم‌افزار گرافر مقدار توزیع جبهه پیشروی در جهات مختلف محاسبه شد و همچنین با داشتن مسافت طی شده و زمان پیشروی آن از ابتدای آبیاری، سرعت پیشروی جبهه رطوبتی در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری شد. در نهایت با استفاده از روش رگرسیون غیر خطی روابطی برای تخمین سرعت پیشروی جبهه رطوبتی در جهات مختلف شبیه‌سازی گردید که با استفاده از مقادیر مشاهده و پیش‌بینی شده و به کمک شاخص‌های ارزیابی آماری روابط ارائه شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

صورت می‌گرفت. همچنین، به منظور محاسبه جبهه پیشروی رطوبت در جهات مختلف، قسمت جلویی مدل به وسیله متر و به صورت کاملاً تراز در دو جهت افقی و عمودی مدرج‌بندی گردید. همچنین به منظور جلوگیری از جریانات ترجیحی در حین آزمایش، با استفاده از مالیدن جلا رنگ بر روی سطح پلی کربنات تخت و سپس پاشیدن شن‌های زبر بر روی آن یک سطح نسبتاً زبر ایجاد گردید به گونه‌ای که جلا رنگ شفافیت صفحه جلویی مدل را حفظ کرده بود. کلیه لوازم و تجهیزات یک سیستم آبیاری قطره‌ای متناسب با شرایط واقعی مزرعه در مدل فیزیکی شبیه‌سازی گردید. بطوریکه آب به وسیله پمپ و از طریق لوله‌های پلی اتیلن (لوله اصلی با قطر ۳۲ میلیمتر لوله نیمه اصلی و لاترال به ترتیب با قطره‌ای ۲۰ و ۱۶ میلیمتر) از یک مخزن ۲۰۰ لیتری به قطره‌چکان‌ها منتقل گردید. همچنین در مسیر انتقال آب از شیر فلکه (به منظور هدایت جریان)، فیلتر توری (به منظور جلوگیری از گرفتگی قطره‌چکان‌ها و عدم یکنواختی توزیع)، فشارسنج (به منظور اعمال یک فشار ثابت در کلیه آزمایشات) و شیر قطع و وصل جریان (به منظور کنترل جریان به داخل هر محفظه) استفاده گردید. کلیه آزمایشات در فشار ثابت ۲ بار به انجام رسید و با توجه به اینکه مقدار دبی خروجی خیلی کم بود به منظور کاهش فشار وارده به سیستم یک مجموعه بای‌پس نیز طراحی گردید (کریمی، ۱۳۹۲). در شکل ۲ نمای کاملی از موقعیت قرارگیری کلیه تجهیزات مورد استفاده در این تحقیق آورده شده است. آزمایشات این تحقیق بر روی سه نوع بافت خاک (سبک، متوسط و سنگین) که مشخصات



شکل ۱- طرح شماتیک از مدل فیزیکی به همراه اتصالات مربوطه

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی خاک‌های مورد استفاده در این تحقیق

نمونه خاک	درصد شن	درصد سیلت	درصد رس	بافت خاک	$\rho_b (\frac{gr}{cm^3})$	$K_s (\frac{cm}{hr})$
بافت سنگین	۲۶	۲۶	۴۸	Clay	۱/۳	۰/۸۵
بافت متوسط	۵۰	۱۸	۳۲	Sandy clay loam	۱/۳۶	۰/۹۲
بافت سبک	۸۲	۶	۱۲	Loamy sand	۱/۵۳	۳/۹۵

جدول ۲- خصوصیات فنی قطره‌چکان‌های مورد استفاده در این تحقیق

پارامتر	قطره‌چکان نتافیم با دبی ۲ لیتر در ساعت	قطره‌چکان نتافیم با دبی ۴ لیتر در ساعت
ضریب یکنواختی توزیع	۹۸	۹۹
درصد ضریب تغییرات ساخت قطره چکان	۰/۰۳۲	۰/۰۱۷

مدل پیشنهادی

یکی از روش‌هایی که در شبیه‌سازی حرکت جبهه پیشروی آب مطرح است و اخیراً مطالعاتی نیز در این خصوص صورت گرفته است، روش تجربی رگرسیون غیرخطی است. مزیت این روش به این دلیل است که بر خلاف روابط تجربی دیگر، متغیرهای ورودی بیشتری برای تخمین استفاده شده است که با داشتن این پارامترها مدل می‌تواند شناخت بهتری از محیط پیچیده خاک داشته باشد. عوامل بسیاری بر روی سرعت جبهه پیشروی خاک موثر هستند. بخشی از این عوامل با مشخصات فیزیکی خاک مرتبط هستند از جمله: هدایت هیدرولیکی اشباع، مقدار رطوبت اولیه، چگالی ظاهری و درصد‌های شن، سیلت و رس می‌باشد. در حالیکه بخشی دیگر از این عوامل با پارامترهای سیستم آبیاری قطره‌ای وابسته هستند مانند: دبی قطره-چکان، زمان سپری شده، موقعیت قطره‌چکان (سطحی یا زیرسطحی)

و روش کاربرد آبیاری (پیوسته یا پالسی). با توجه به عوامل تاثیر گذار ذکر شده در این تحقیق یک مدل تجربی به منظور تخمین سرعت پیشروی جبهه رطوبت و با در نظر گرفتن پارامترهای دبی قطره‌چکان، هدایت هیدرولیکی اشباع، زمان کاربرد آبیاری، وزن مخصوص ظاهری خاک، عمق نصب قطره‌چکان، رطوبت اولیه، عمق نصب قطره‌چکان در سیستم‌های زیرسطحی و نسبت پالس آبیاری (نسبت زمان آبیاری در یک چرخه به زمان کل در هر چرخه) در سیستم‌های پالسی است و درصد شن و سیلت و رس پیشنهاد گردید که فرم کلی معادله پیشنهادی در جدول ۳ آورده شده است. در این پژوهش ۱۴ مدل تجربی برای مدل‌سازی سرعت پیشروی جبهه رطوبتی در جهات مختلف در آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی با کاربرد پیوسته و پالسی با استفاده از رگرسیون غیر خطی شبیه‌سازی گردید.

جدول ۳- فرم کلی مدل‌های تجربی پیشنهادی برای مدل‌سازی سرعت پیشروی جبهه رطوبت در آبیاری پیوسته و پالسی

1) $V_{h-line} = a_1 \cdot t^{a_2} \cdot Q^{a_3} \cdot K_S^{a_4} \cdot S^{a_5} \cdot Si^{a_6} \cdot C^{a_7} \cdot \rho_b^{a_8} \cdot \theta_0^{a_9}$	سطحی- پیوسته
2) $V_{h-max} = a_1 \cdot t^{a_2} \cdot Q^{a_3} \cdot K_S^{a_4} \cdot S^{a_5} \cdot Si^{a_6} \cdot C^{a_7} \cdot \rho_b^{a_8} \cdot \theta_0^{a_9}$	
3) $V_V = a_1 \cdot t^{a_2} \cdot Q^{a_3} \cdot K_S^{a_4} \cdot S^{a_5} \cdot Si^{a_6} \cdot C^{a_7} \cdot \rho_b^{a_8} \cdot \theta_0^{a_9}$	
4) $V_{h-line} = a_1 \cdot t^{a_2} \cdot Q^{a_3} \cdot K_S^{a_4} \cdot S^{a_5} \cdot Si^{a_6} \cdot C^{a_7} \cdot \rho_b^{a_8} \cdot \theta_0^{a_9} \cdot \left(\frac{T_{on}}{T_{tot}}\right)^{a_{10}}$	سطحی- پالسی
5) $V_{h-max} = a_1 \cdot t^{a_2} \cdot Q^{a_3} \cdot K_S^{a_4} \cdot S^{a_5} \cdot Si^{a_6} \cdot C^{a_7} \cdot \rho_b^{a_8} \cdot \theta_0^{a_9} \cdot \left(\frac{T_{on}}{T_{tot}}\right)^{a_{10}}$	
6) $V_V = a_1 \cdot t^{a_2} \cdot Q^{a_3} \cdot K_S^{a_4} \cdot S^{a_5} \cdot Si^{a_6} \cdot C^{a_7} \cdot \rho_b^{a_8} \cdot \theta_0^{a_9} \cdot \left(\frac{T_{on}}{T_{tot}}\right)^{a_{10}}$	
7) $V_{h-line} = a_1 \cdot t^{a_2} \cdot Q^{a_3} \cdot K_S^{a_4} \cdot S^{a_5} \cdot Si^{a_6} \cdot C^{a_7} \cdot \rho_b^{a_8} \cdot \theta_0^{a_9} \cdot Z^{a_{10}}$	زیرسطحی- پیوسته
8) $V_{h-max} = a_1 \cdot t^{a_2} \cdot Q^{a_3} \cdot K_S^{a_4} \cdot S^{a_5} \cdot Si^{a_6} \cdot C^{a_7} \cdot \rho_b^{a_8} \cdot \theta_0^{a_9} \cdot Z^{a_{10}}$	
9) $V_V = a_1 \cdot t^{a_2} \cdot Q^{a_3} \cdot K_S^{a_4} \cdot S^{a_5} \cdot Si^{a_6} \cdot C^{a_7} \cdot \rho_b^{a_8} \cdot \theta_0^{a_9} \cdot Z^{a_{10}}$	
10) $V_{V-UP} = a_1 \cdot t^{a_2} \cdot Q^{a_3} \cdot K_S^{a_4} \cdot S^{a_5} \cdot Si^{a_6} \cdot C^{a_7} \cdot \rho_b^{a_8} \cdot \theta_0^{a_9} \cdot Z^{a_{10}}$	
11) $V_{h-line} = a_1 \cdot t^{a_2} \cdot Q^{a_3} \cdot K_S^{a_4} \cdot S^{a_5} \cdot Si^{a_6} \cdot C^{a_7} \cdot \rho_b^{a_8} \cdot \theta_0^{a_9} \cdot Z^{a_{10}} \cdot \left(\frac{T_{on}}{T_{tot}}\right)^{a_{11}}$	زیرسطحی- پالسی
12) $V_{h-max} = a_1 \cdot t^{a_2} \cdot Q^{a_3} \cdot K_S^{a_4} \cdot S^{a_5} \cdot Si^{a_6} \cdot C^{a_7} \cdot \rho_b^{a_8} \cdot \theta_0^{a_9} \cdot Z^{a_{10}} \cdot \left(\frac{T_{on}}{T_{tot}}\right)^{a_{11}}$	
13) $V_V = a_1 \cdot t^{a_2} \cdot Q^{a_3} \cdot K_S^{a_4} \cdot S^{a_5} \cdot Si^{a_6} \cdot C^{a_7} \cdot \rho_b^{a_8} \cdot \theta_0^{a_9} \cdot Z^{a_{10}} \cdot \left(\frac{T_{on}}{T_{tot}}\right)^{a_{11}}$	
14) $V_{V-UP} = a_1 \cdot t^{a_2} \cdot Q^{a_3} \cdot K_S^{a_4} \cdot S^{a_5} \cdot Si^{a_6} \cdot C^{a_7} \cdot \rho_b^{a_8} \cdot \theta_0^{a_9} \cdot Z^{a_{10}} \cdot \left(\frac{T_{on}}{T_{tot}}\right)^{a_{11}}$	

(Q) بر حسب لیتر در ساعت، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (K_S) بر حسب سانتی‌متر در ساعت، درصد‌های شن و سیلت و رس (S ، Si و C) بر حسب درصد، چگالی ظاهری خاک (ρ_b) بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب، رطوبت اولیه خاک (θ_0) بر حسب درصد جرمی، عمق نصب قطره‌چکان در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (Z) بر حسب

که سرعت جبهه پیشروی افقی در راستای قطره‌چکان (V_{h-line})، حداکثر سرعت جبهه پیشروی افقی (V_{h-max})، سرعت جبهه پیشروی عمودی رو به پایین (V_V) و سرعت جبهه پیشروی عمودی رو به بالا (V_{V-UP}) همگی بر حسب سانتی‌متر در دقیقه هستند. همچنین زمان آبیاری (t) بر حسب دقیقه، دبی قطره‌چکان

همکاران (a ۱۳۹۴)). همچنین نتایج جدول ۵ که برای سرعت پیشروی آب در جهت افقی می‌باشد، نشان می‌دهد که برای آبیاری قطره‌ای سطحی با کاربرد پیوسته و پالسی مقادیر RMSE و MAE برای بافت‌های مورد بررسی به ترتیب بین مقادیر ۰/۱۲۷ تا ۰/۴۰۴ و ۰/۴۷ تا ۰/۱۷۴ سانتیمتر بر دقیقه نوسان دارد و ضریب همبستگی نیز ۰/۹۳۲ تا ۰/۹۹۴ متغیر می‌باشد. همچنین مقادیر RMSE و MAE در آبیاری زیرسطحی با کاربرد پیوسته و پالسی به ترتیب بین مقادیر ۰/۴۳ تا ۰/۰۷۳ و ۰/۰۲۳ تا ۰/۰۳ سانتیمتر بر دقیقه نوسان دارد و ضریب همبستگی نیز ۰/۹۹۳ تا ۰/۹۹۹ متغیر می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد که عملکرد مدلها بسیار مطلوب می‌باشد. مشابهاً نتایج جدول ۶ برای حداکثر توزیع سرعت افقی هم نشان می‌دهد که پارامترهای آماری خطا در دامنه قابل قبولی می‌باشد (کریمی و همکاران، ۱۳۹۷). همچنین نتایج جدول ۷ که برای سرعت پیشروی آب در جهت عمودی (رو به پایین) می‌باشد، نشان داد می‌دهد که برای سیستم آبیاری سطحی با کاربرد پیوسته و پالسی عملکرد مدل قابل قبول می‌باشد و مقادیر RMSE و MAE برای بافت‌های مورد بررسی به ترتیب بین مقادیر ۰/۰۳۶ تا ۰/۱۵۳ و ۰/۰۲۳ تا ۰/۰۶ سانتیمتر بر دقیقه نوسان دارد و ضریب همبستگی نیز ۰/۹۶۲ تا ۰/۹۶۲ متغیر می‌باشد. همچنین مقادیر RMSE و MAE در سیستم آبیاری زیرسطحی با کاربرد پیوسته و پالسی به ترتیب بین مقادیر ۰/۰۸ تا ۰/۱۳۷ و ۰/۰۳۹ تا ۰/۰۶۲ سانتیمتر بر دقیقه نوسان دارد و ضریب همبستگی نیز ۰/۹۱۲ تا ۰/۹۹۵ متغیر می‌باشد. نتایج جدول ۸ نیز برای سرعت پیشروی آب در جهت عمودی (رو به بالا) و پارامترهای آماری خطا نیز در دامنه قابل قبولی می‌باشد. همچنین شکل‌های ۳، ۴، ۵ و ۶ به ترتیب مقایسه داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده سرعت پیشروی افقی خطی، حداکثر سرعت پیشروی افقی، سرعت پیشروی عمودی (رو به پایین) و سرعت پیشروی عمودی (رو به بالا) را نشان می‌دهد (با خط ۱:۱) که این مدلها برای تمامی خاکهای مورد بررسی و برای هر دو روش کاربرد آب (پالسی و پیوسته) دارای عملکرد مناسبی می‌باشد و مقادیر سرعت پیشروی حرکت آب را در جهات مختلف با دقت بالای تخمین می‌زند. همچنین به منظور ارزیابی کارایی، مدلهای مذکور با مدل کریمی و همکاران (a ۱۳۹۴) (این مدلها برای آبیاری قطره‌ای پیوسته توسعه داده شده است) مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاصل از این مقایسه در جدول ۹ نشان می‌دهد که در مدل کریمی و همکاران (a ۱۳۹۴) مقادیر R^2 ، RMSE و MAE برای تخمین سرعت افقی به ترتیب ۰/۹۵۲، ۰/۴۲۷ و ۰/۱۵۳ می‌باشد در حالی که این مقادیر برای مدل پیشنهادی به ترتیب ۰/۹۷۴، ۰/۲۷۵ و ۰/۱۰۸ می‌باشد که نشان از برتری مدل پیشنهادی دارد.

سانتی‌متر و نسبت پالس آبیاری یا نسبت زمان آبیاری در یک چرخه بر زمان کل چرخه در سیستم قطره‌ای پالسی ($\frac{T_{on}}{T_{tot}}$) بر حسب درصد هستند. همچنین a_1, a_2, \dots, a_n ضرایب تجربی معادلات هستند که با استفاده از نرم‌افزار اکسل و به کمک Tool box solver بهینه‌سازی و محاسبه گردید.

معیارهای ارزیابی

برای مقایسه عملکرد رگرسیون غیرخطی در مقایسه با مقادیر مشاهداتی سرعت از پارامترهای آماری میانگین خطای مطلق (MAE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تبیین در سطح پنج درصد (R^2) به ترتیب از روابط ۶، ۷ و ۸ استفاده شد.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n |O_i - P_i| \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{N}} \quad (7)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \quad (8)$$

که در آن‌ها: O_i و \bar{O} به ترتیب مقادیر مشاهداتی و میانگین مقادیر مشاهداتی، P_i مقادیر محاسباتی، \bar{P} میانگین مقادیر محاسباتی و N تعداد داده‌هاست.

نتایج و بحث

در این تحقیق برای شبیه‌سازی سرعت پیشروی جبهه رطوبت، با استفاده از داده‌های بدست آمده از مطالعات آزمایشگاهی و با استفاده از آنالیز رگرسیون غیرخطی (به کمک نرم افزار اکسل ۲۰۱۰، Toolbar Solver) ضرایب α_1 تا α_{11} برای تمامی ۱۴ مدل پیشنهادی بهینه گردید (جدول ۴). در جدول ۴ ضرایب هر ردیف مربوط به یک مدل می‌باشد و هر مدل توسط شاخص‌های ارزیابی آماری R^2 ، RMSE و MAE مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. با ارزیابی توسط شاخص‌های آماری مشخص شد که عملکرد معادله‌های پیشنهادی در سطح مطلوب قرار داشته و نتایج آن‌ها از اعتبار قابل ملاحظه‌ای برخوردار می‌باشند، به گونه‌ای که مقدار R^2 در کلیه مدل‌های پیشنهادی بین ۰/۹۷۴ تا ۰/۹۹۷ خواهد بود. همچنین مقادیر شاخص‌های میانگین ریشه دوم خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) برای پیش‌بینی سرعت پیشروی جبهه رطوبت به ترتیب بین ۰/۰۶۷ تا ۰/۲۷۵ و ۰/۰۳۱ تا ۰/۱۰۸ سانتی‌متر بر دقیقه نوسان می‌کند و این نتایج نشان می‌دهد که در مدل‌های پیشنهادی پارامترهای آماری خطا در دامنه قابل قبولی می‌باشد (کریمی و

جدول ۴- ضرایب بهینه شده مدل‌های پیشنهادی برای تخمین سرعت پیشروی یاز رطوبتی در جهات مختلف در سیستم آبیاری پالسی و پیوسته

سیستم	معادله	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	R^2	RMSE	MAE
قطره‌ای سطحی پیوسته	۱	۰/۷۳۹	-۰/۷۲۹	-۰/۴۶۷	-۰/۰۳۵	-۰/۱۵۹	-۰/۷۸۴	۰/۰۱	۲/۱۹۶	۰/۸۱۶			۰/۹۷۴	۰/۲۷۵	۰/۸۰۸
	۲	۰/۹۰۱	-۰/۷۰۶	-۰/۴۱۴	-۰/۰۱۲	-۰/۱۰۷	-۰/۱۹۱	۰/۰۰۵	۲/۰۹۴	۰/۷۰۳			۰/۹۷۹	۰/۳۴۵	۰/۰۹۹
	۳	۱/۰۴۴	-۰/۶۰۸	-۰/۲۵۴	-۰/۲۵۲	-۰/۰۰۸	۰/۲۱	۰/۰۱۹	۱/۳۳۳	-۰/۶۴			۰/۹۹۶	۰/۰۶۷	۰/۰۳۸
قطره‌ای سطحی پالسی	۴	۱/۳۳۳	-۰/۷۳۳	-۰/۳۴۵	-۰/۱۱۶	-۰/۰۲۱	-۰/۰۴۹	-۰/۰۵۶	۲/۲۲۸	۰/۲۲۷	۰/۱۴۷		۰/۹۸۳	۰/۱۵۲	۰/۰۴۹
	۵	۱/۱۹۹	-۰/۷۰۵	-۰/۳۴۲	-۰/۱۱۹	-۰/۰۱۳	-۰/۰۲۲	۰/۰۰۶	۲/۳۰۵	۰/۱۹۶	۰/۰۹۵		۰/۹۸۶	۰/۱۲۸	۰/۰۴۵
	۶	۰/۹۰۵	-۰/۵۹۷	-۰/۳۰۲	۰/۰۷۱	-۰/۰۱۲	۰/۰۵۴	۰/۰۱۱	۱/۸۵۸	۰/۱۱۴	-۰/۱۲۲		۰/۹۷۵	۰/۱۲۲	۰/۰۶۲
قطره‌ای زیرسطحی پیوسته	۷	۰/۹۲	-۰/۶۱۷	-۰/۲۹۷	-۰/۰۵۵	-۰/۰۴	۰/۰۷۸	۰/۰۰۱	۱/۵۷۲	-۰/۱۳۴	-۰/۰۴۲		۰/۹۹۷	۰/۰۷۳	۰/۰۳۲
	۸	۱/۰۵	-۰/۶۷۵	-۰/۳۰۷	-۰/۰۶۴	-۰/۰۷۳	۰/۱۷۵	-۰/۰۰۱	۱/۵۱۴	-۰/۱۷۲	-۰/۰۳۹		۰/۹۹۷	۰/۰۶۷	۰/۰۳۱
	۹	۰/۸۱۳	-۰/۶۱۷	-۰/۲۹۳	۰/۰۸۵	-۰/۰۸۴	۰/۳۳۷	-۰/۰۰۲	۱/۲۸۹	-۰/۴۱۴	۰/۰۳۷		۰/۹۸۶	۰/۱۳۱	۰/۰۶۹
قطره‌ای زیرسطحی پالسی	۱۰	۰/۸۸۱	-۰/۷۱۱	-۰/۲۷۶	-۰/۴۹۸	-۰/۱۵۴	۰/۰۰۸	۰/۰۴۴	۱/۲۶۵	-۰/۲۲	۰/۰۰۴		۰/۹۷۷	۰/۱۶	۰/۰۶۶
	۱۱	۰/۹۳۸	-۰/۶۷۹	-۰/۲۵۲	-۰/۰۰۶	-۰/۰۶۵	۰/۰۹۳	۰/۰۵۴	۱/۵۹۱	-۰/۰۵۶	۰/۰۴۶	-۰/۰۱۶	۰/۹۹۱	۰/۰۸۷	۰/۰۳۴
	۱۲	۰/۸۲۹	-۰/۶۶۶	-۰/۲۷۳	۰/۰۰۹	-۰/۰۴۵	۰/۱۰۴	۰/۰۷۸	۱/۴۱	-۰/۰۳۵	۰/۰۱۸	-۰/۰۰۲	۰/۹۹۱	۰/۰۹	۰/۰۳۶
قطره‌ای زیرسطحی پالسی	۱۳	۱/۲۵	-۰/۶۲۱	-۰/۳۲۶	۰/۱۶۷	-۰/۰۲۳	-۰/۰۶۸	۰/۰۹۵	۰/۶۵۸	۰/۱۸۳	-۰/۰۱۷	۰/۰۲۳	۰/۹۸۳	۰/۱۰۳	۰/۰۴۸
	۱۴	۱/۵۵۷	-۰/۷۱۱	-۰/۳۳	-۰/۰۰۸	-۰/۰۸۳	-۰/۰۵۸	۰/۰۷۷	۰/۷۷۴	۰/۲۱۱	-۰/۱۷۱	۰/۱۳۳	۰/۹۷۹	۰/۱۰۲	۰/۰۳۷

جدول ۵- آماره‌های عملکرد مدل رگرسیون غیرخطی در تخمین سرعت افقی خطی در آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی

شرایط آزمایش	R ²	RMSE(cm/min)	MAE(cm/min)	
پیوسته-سبک	۰/۹۹۴	۰/۱۳۳	۰/۰۶۳	
پیوسته-متوسط	۰/۹۸۷	۰/۲۱۴	۰/۰۸۸	
قطره‌ای سطحی	پیوسته-سنگین	۰/۹۳۲	۰/۴۰۴	۰/۱۷۴
پالسی-سبک	۰/۹۸۸	۰/۱۲۷	۰/۰۴۷	
پالسی-متوسط	۰/۹۸۶	۰/۱۴	۰/۰۴۷	
پالسی-سنگین	۰/۹۷۹	۰/۱۶۳	۰/۰۴۷	
پیوسته-سبک	۰/۹۹۹	۰/۰۴۳	۰/۰۲۳	
پیوسته-متوسط	۰/۹۹۹	۰/۰۵۶	۰/۰۲۸	
قطره‌ای زیرسطحی	پیوسته-سنگین	۰/۹۹۷	۰/۰۷۳	۰/۰۲۹
پالسی-سبک	۰/۹۹۶	۰/۰۵۲	۰/۰۲۸	
پالسی-متوسط	۰/۹۹۵	۰/۰۶۳	۰/۰۳	
پالسی-سنگین	۰/۹۹۳	۰/۰۷۳	۰/۰۳	

جدول ۶- آماره‌های عملکرد مدل رگرسیون غیرخطی در تخمین حداکثر سرعت افقی در آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی

شرایط آزمایش	R ²	RMSE(cm/min)	MAE(cm/min)	
پیوسته-سبک	۰/۹۹۲	۰/۱۵	۰/۰۶۹	
پیوسته-متوسط	۰/۹۸۷	۰/۲۱۵	۰/۰۸۱	
قطره‌ای سطحی	پیوسته-سنگین	۰/۹۵۷	۰/۳۳۵	۰/۱۴۷
پالسی-سبک	۰/۹۹	۰/۱۱۹	۰/۰۳۶	
پالسی-متوسط	۰/۹۸۹	۰/۱۲۷	۰/۰۴۵	
پالسی-سنگین	۰/۹۸۵	۰/۱۴۵	۰/۰۴۸	
پیوسته-سبک	۰/۹۹۹	۰/۰۴۶	۰/۰۲۹	
پیوسته-متوسط	۰/۹۹۷	۰/۰۷۴	۰/۰۳۳	
قطره‌ای زیرسطحی	پیوسته-سنگین	۰/۹۹۶	۰/۰۷۷	۰/۰۳۱
پالسی-سبک	۰/۹۹۵	۰/۰۴۷	۰/۰۲۶	
پالسی-متوسط	۰/۹۹۵	۰/۰۶۷	۰/۰۳	
پالسی-سنگین	۰/۹۹۳	۰/۰۷۵	۰/۰۳۳	

برای آبیاری قطره‌ای زیر سطحی مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج نشان داد که برای سه پارامتر مورد بررسی (سرعت افقی جبهه رطوبتی، سرعت عمودی جبهه (رو به پایین) و سرعت عمودی جبهه (رو به بالا) مدل‌های پیشنهادی علی‌رغم در نظر گرفتن متغیرهای ورودی بیشتر دارای عملکرد بهتری نسبت به مدل کریمی و همکاران (۱۳۹۴ a) می‌باشند.

همچنین مقایسه‌ها برای سرعت عمودی در آبیاری قطره‌ای سطحی مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج نشان داد که پارامترهای آماری خطا برای مدل کریمی و همکاران (۱۳۹۴ a) به ترتیب ۰/۹۷۹، ۰/۹۲۸ و ۰/۵۰۸ می‌باشد در حالی که این مقادیر برای مدل پیشنهادی به ترتیب ۰/۹۹۶، ۰/۰۶۷ و ۰/۰۳۸ می‌باشد که نشان از برتری نسبی مدل پیشنهادی می‌باشد. همچنین این مقایسه‌ها نیز

جدول ۷- آماره‌های عملکرد مدل رگرسیون غیرخطی در تخمین سرعت عمودی رو به پایین در آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی

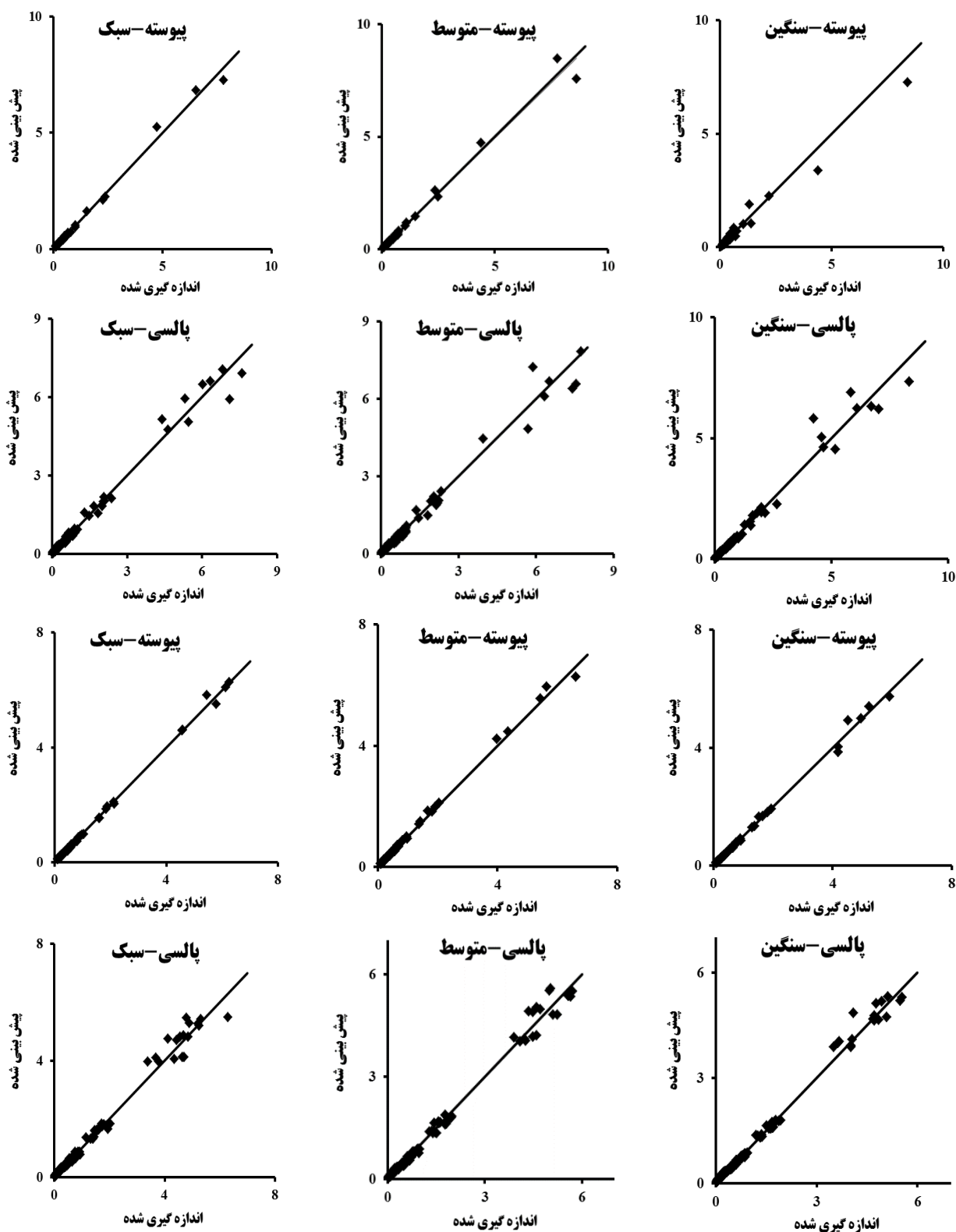
شرایط آزمایش	R^2	RMSE(cm/min)	MAE(cm/min)	
پیوسته-سبک	۱	۰/۰۳۶	۰/۰۳۳	
پیوسته-متوسط	۰/۹۹۹	۰/۰۳۷	۰/۰۲۳	
قطره‌ای سطحی	پیوسته-سنگین	۰/۹۹۲	۰/۰۹۱	۰/۰۴۵
پالسی-سبک	۰/۹۹۱	۰/۰۷۷	۰/۰۵۵	
پالسی-متوسط	۰/۹۸۳	۰/۱۰۴	۰/۰۵۵	
پالسی-سنگین	۰/۹۶۲	۰/۱۵۳	۰/۰۶	
پیوسته-سبک	۰/۹۹۵	۰/۰۸	۰/۰۶۲	
پیوسته-متوسط	۰/۹۹۴	۰/۰۸۲	۰/۰۴۸	
قطره‌ای زیرسطحی	پیوسته-سنگین	۰/۹۸۵	۰/۱۳۷	۰/۰۶
پالسی-سبک	۰/۹۸۳	۰/۱۰۵	۰/۰۶۱	
پالسی-متوسط	۰/۹۸۳	۰/۱۱۴	۰/۰۳۹	
پالسی-سنگین	۰/۹۸۲	۰/۱۱۵	۰/۰۴۳	

جدول ۸- آماره‌های عملکرد مدل رگرسیون غیرخطی در تخمین سرعت عمودی رو به بالا در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی

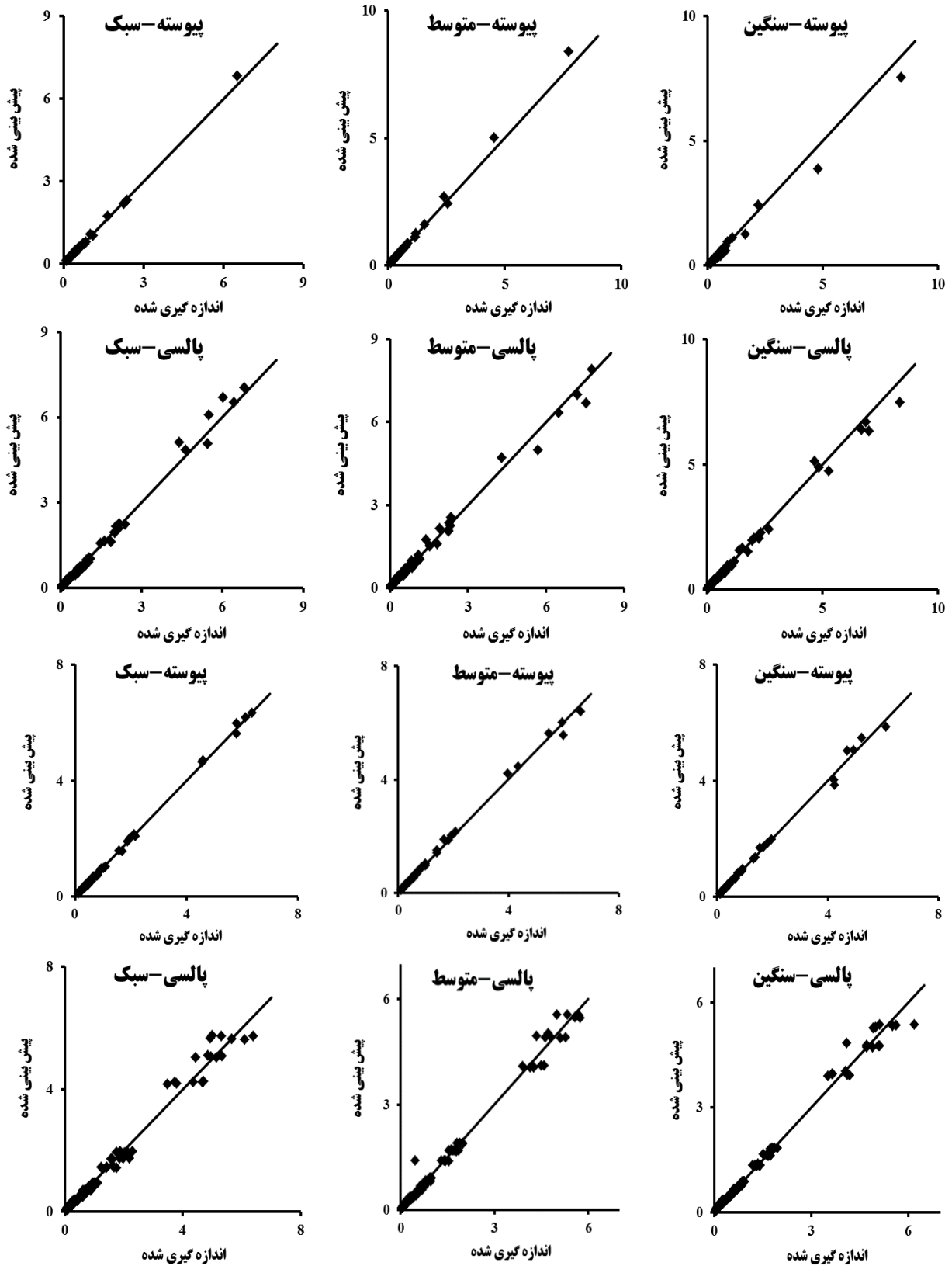
شرایط آزمایش	R^2	RMSE(cm/min)	MAE(cm/min)	
پیوسته-سبک	۰/۹۹۶	۰/۰۶۵	۰/۰۴۲	
پیوسته-متوسط	۰/۹۹۱	۰/۱۲۴	۰/۰۶۱	
قطره‌ای زیرسطحی	پیوسته-سنگین	۰/۹۸۶	۰/۱۳۵	۰/۰۵۵
پالسی-سبک	۰/۹۹۳	۰/۰۵۵	۰/۰۳۲	
پالسی-متوسط	۰/۹۸۴	۰/۰۸۶	۰/۰۳۲	
پالسی-سنگین	۰/۹۸۳	۰/۰۹۶	۰/۰۳۷	

جدول ۹- مقایسه پارامترهای خطا در مدل‌های پیشنهادی با مدل ارائه شده توسط کریمی و همکاران (۱۳۹۴ a) در آبیاری قطره‌ای پیوسته

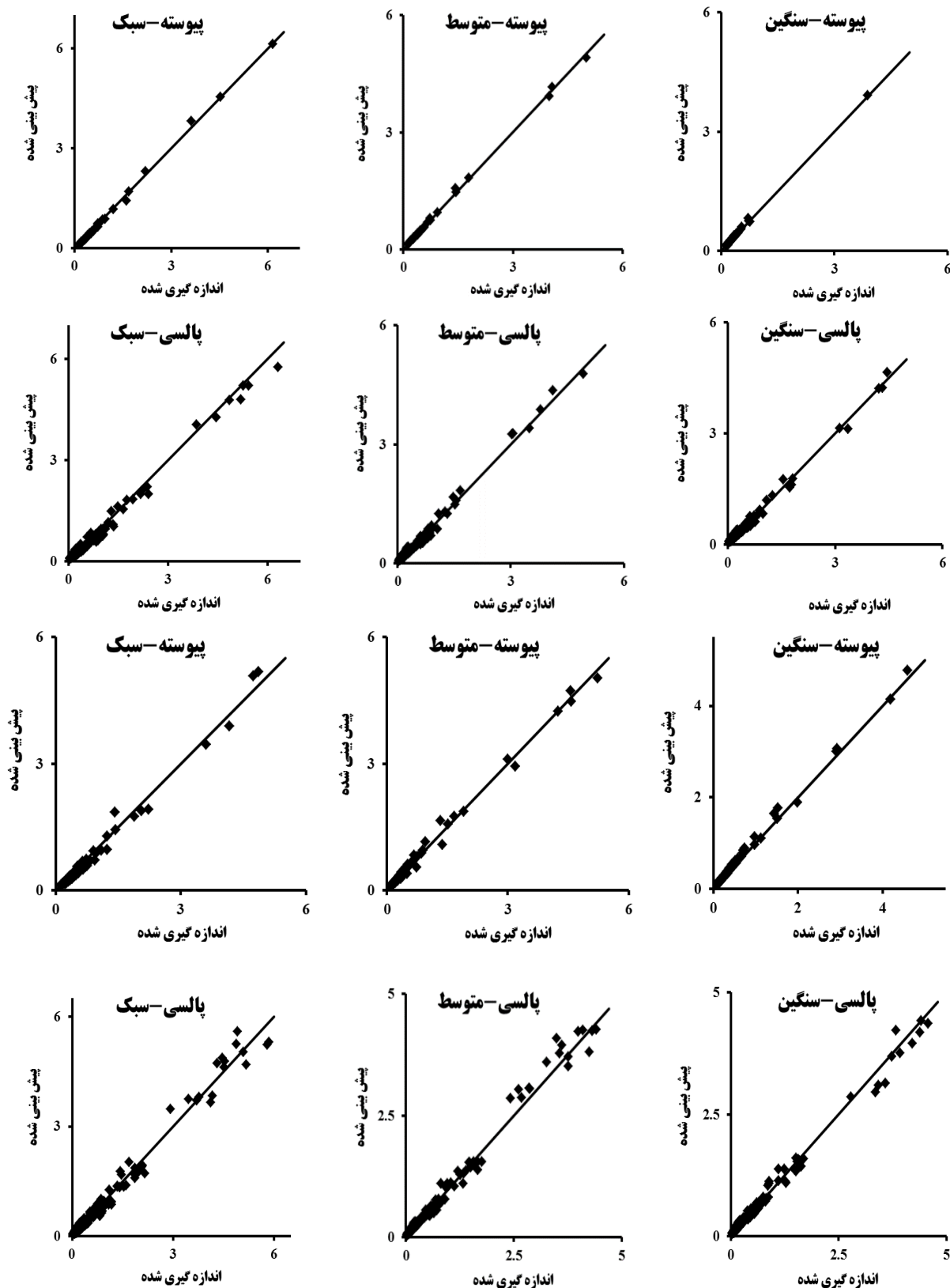
روش آبیاری	پارامتر	R^2		RMSE (cm/min)		MAE (cm/min)	
		کریمی و همکاران	رگرسیون غیر خطی	کریمی و همکاران	رگرسیون غیر خطی	کریمی و همکاران	رگرسیون غیر خطی
قطره‌ای سطحی	V_h	۰/۹۵۲	۰/۹۷۴	۰/۴۲۷	۰/۲۷۵	۰/۱۵۳	۰/۱۰۸
	V_v	۰/۹۷۹	۰/۹۹۶	۰/۹۲۸	۰/۰۶۷	۰/۵۰۸	۰/۰۳۸
قطره‌ای زیر سطحی	V_h	۰/۹۹۲	۰/۹۹۷	۰/۸۸۷	۰/۰۷۳	۰/۴۲۵	۰/۰۳۲
	V_v	۰/۹۸	۰/۹۸۶	۰/۷۳۷	۰/۱۳۱	۰/۳۹۳	۰/۰۶۹
	V_v-up	۰/۹۵۵	۰/۹۷۷	۰/۷۰۹	۰/۱۶	۰/۳۰۱	۰/۰۶۵



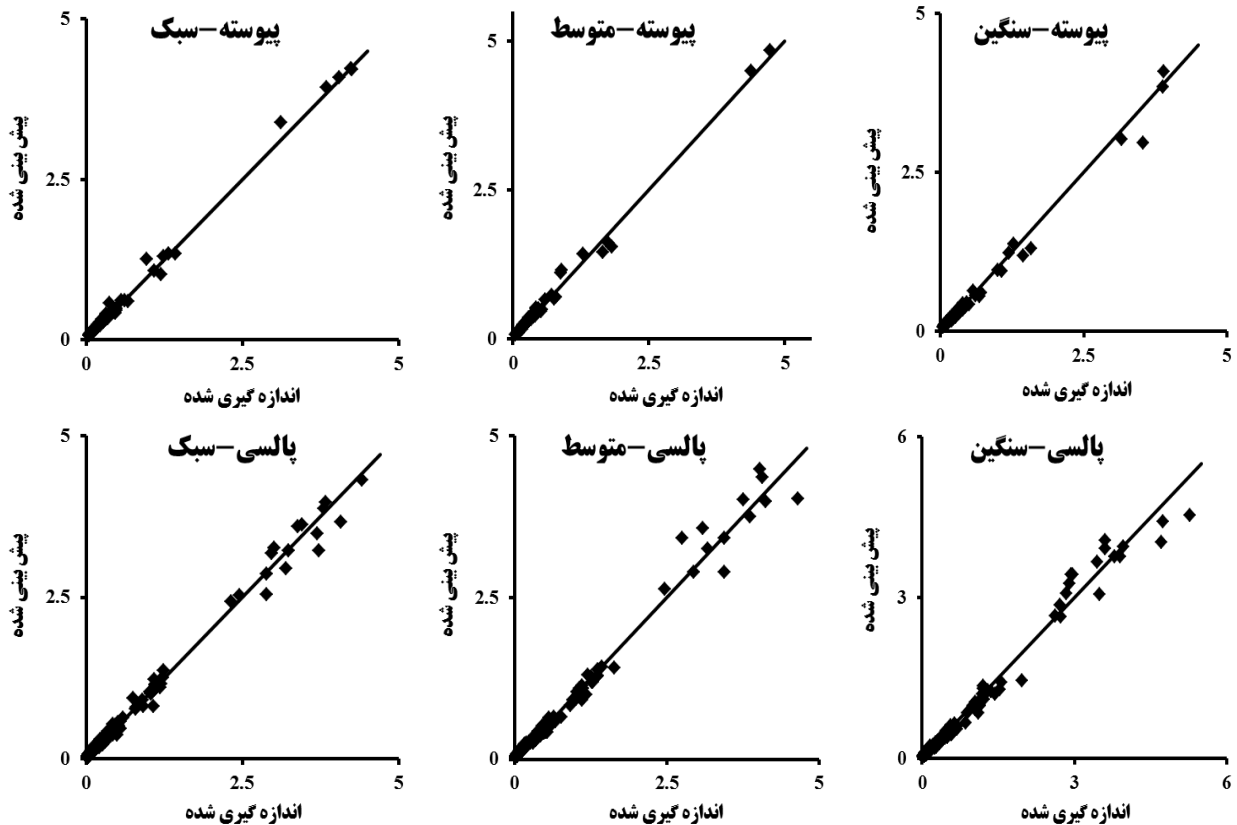
شکل ۲- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده سرعت پیشروی افقی خطی بر حسب سانتی‌متر بر دقیقه در آبیاری قطره‌ای (ردیف ۱ و ۲: سطحی، ردیف ۳ و ۴: زیرسطحی)



شکل ۳- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده حداکثر سرعت پیشروی افقی بر حسب سانتی‌متر بر دقیقه در آبیاری قطره‌ای (ردیف ۱ و ۲: سطحی، ردیف ۳ و ۴: زیرسطحی)



شکل ۴- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده سرعت پیشروی عمودی رو به پایین بر حسب سانتی‌متر بر دقیقه در آبیاری قطره‌ای (ردیف ۱ و ۲: سطحی، ردیف ۳ و ۴: زیرسطحی).



شکل ۵- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده سرعت پیشروی عمودی رو به بالا بر حسب سانتی‌متر بر دقیقه در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی

نتیجه‌گیری

آگاهی از سرعت جبهه پیشروی رطوبت در خاک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که می‌تواند به عنوان یک پارامتر مهم در طراحی و اجرای سامانه‌های آبیاری قطره‌ای لحاظ شود. در این بررسی روابطی با استفاده از روش رگرسیون غیرخطی برای برآورد سرعت جبهه پیشروی رطوبت در جهات مختلف در سامانه‌های آبیاری ارائه شد. با ارزیابی توسط شاخص‌های آماری مشخص شد که عملکرد معادله‌های پیشنهادی در سطح مطلوب قرار داشته و نتایج آن‌ها از اعتبار قابل ملاحظه‌ای برخوردار می‌باشند. همچنین نتایج مدل رگرسیون غیرخطی با مدل کریمی و همکاران (۱۳۹۴ a) که با استفاده از آنالیز ابعادی روابطی را برای تخمین سرعت ارائه کرده بود، مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج مقایسه‌های آماری نشان داد که در تمامی تیمارهای مورد بررسی مدل‌های رگرسیون غیرخطی عملکرد بهتری نسبت به مدل آنالیز ابعادی دارند. دلیل این است که مدل‌های رگرسیون غیرخطی در مقایسه با مدل‌های آنالیز ابعادی متغیرهای ورودی بیشتری را در نظر می‌گیرند که این امر به نوبه خود شناخت بیشتر مدل را از محیط پیچیده خاک فراهم می‌کند. مدل‌های

رگرسیون غیرخطی ارائه شده به دلیل پارامتر ورودی بیشتر نسبت به مدل آنالیز ابعادی دارای مقبولیت بیشتری می‌باشد و برای رنج‌های گسترده از خصوصیات فیزیکی خاک و دبی قابل تعمیم است. استفاده از مدل‌های پیشنهادی می‌تواند در بهبود مدیریت و طراحی دقیق سیستم‌های آبیاری قطره‌ای نقش بسزایی ایفا کند.

منابع

- علیزاده، الف. ۱۳۷۶. آبیاری قطره‌ای (اصول و عملیات). انتشارات آستان قدس رضوی. ۴۴۱ صفحه.
- کریمی، ب.، محمدی، پ. ۱۳۹۷. ارزیابی شبکه عصبی مصنوعی در برآورد سرعت پیشروی جبهه رطوبتی در سامانه آبیاری قطره‌ای. مجله پژوهش آب در کشاورزی. ۱، ۳۲: ۹۲-۷۹.
- کریمی، ب. ۱۳۹۲. بهینه‌سازی و مدیریت توزیع رطوبت و نیترات در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی به روش آنالیز ابعادی. رساله دکتری آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران.

- and Keith, L. 2006. Modeling trickle irrigation: Comparison of analytical and numerical models for estimation of wetting front position with time. *Journal of Environmental Modeling and Software*. 21: 1353-1359.
- Karimi, B., Sohrabi, T., Mirzaei, F and Rodriguez-Sinobas, L. 2012a. Evaluation of wetting area and water distribution on different soils in subsurface drip irrigation emitters. *European Geosciences Union Conference*. Vienna, Austria. 22-27 April.
- Karimi, B., Sohrabi, T and Mirzaei, F. 2012b. Determining suitable probability distribution for estimating wetting front in surface and subsurface drip irrigation. *Journal of Elixir Agriculture*. 48: 9242-9244.
- Karmelli, D and Peri, G. 1974. Basic principles of pulse irrigation. *American Society of Civil Engineers, Proceedings of the Irrigation and Drainage Division*. 100: 309-319.
- Lazarovitch, N., Warrick, A.W., Furman, A and Simunek, J. 2007. Subsurface Water distribution from drip irrigation described by moment analyses. *Journal of Vadose Zone*. 6.1: 116-123.
- Li, J., Zhang, J and Rao, M. 2004. Wetting patterns and nitrogen distribution as affected by fertigation strategies from a surface point source. *Journal of Agricultural Water Management*. 67:89-104.
- Schwartzman, M and Zur, B. 1986. Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 112.3: 242-253.
- Singh, D.K., Rajput, T.B.S., Sikarwar, H.S and Ahmad, T. 2006. Simulation of soil wetting pattern with subsurface drip irrigation from line source. *Journal of Agricultural Water Management*. 83:130-134.
- Qiaosheng, Sh., Zuoxin, L., Zhenying, W and Haigun, L. 2007. Simulation of the soil wetting shape under porous pipe sub-irrigation using dimensional analysis. *Journal of Irrigation drainage Engineering*. 56: 389-396.
- کریمی، ب، سهرابی، ت، میرزایی، ف، آبابایی، ب. ۱۳۹۴ a. استخراج روابط تخمین سرعت پیشروی جبهه حرکت آب در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی با کمک آنالیز ابعادی. *مجله دانش آب و خاک*. ۷۵،۱: ۱۱۷-۱۰۲.
- کریمی، ب، میرزایی، ف، سهرابی، ت. ۱۳۹۴ b. بسط معادلاتی برای برآورد الگوی سطح خیس شده در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی به روش تحلیل ابعادی. *مجله دانش آب و خاک*. ۲۵،۳: ۲۴۱-۲۵۲.
- محمدبیگی، الف، میرزایی، ف، اشرف، ن. ۱۳۹۵. شبیه‌سازی توزیع رطوبت خاک اطراف قطره‌چکان در آبیاری قطره‌ای پالسی و پیوسته به روش آنالیز ابعادی. *مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*. ۲۳،۶: ۱۸۰-۱۶۳.
- میرزایی، ف، لیاقت، ع، سهرابی، ت، امید، م. ۱۳۸۴. نمون‌سازی جبهه رطوبتی خاک از منبع تغذیه خطی در آبیاری قطره‌ای نواری. *مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی*. ۲۲،۶: ۶۶-۵۳.
- Al-Qinna, M.I and Abu-Awwad, AM. 2001. Wetting patterns under trickle source in arid soils with surface crust. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 80.3: 301-305.
- Al-Ogaidi, A.A.M., Wayayok, A., Rowshona, M.K and Abdullah, A.F. 2016. Wetting patterns estimation under drip irrigation systems using an enhanced empirical model. *Journal of Agricultural Water Management*. 176: 203-213.
- Al-Ogaidi, A.A.M., Wayayok, A., Rowshona, M.K and Abdullah, A.F. 2017. The influence of magnetized water on soil water dynamics under drip irrigation systems. *Journal of Agricultural Water Management*. 180: 70-77.
- Amin, M.S.M and Ekhmaj, A. I. M. 2006. DIPAC-drip irrigation water distribution pattern calculator. In: 7th International Micro Irrigation Congress, 10-16 Sept. PWTC, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Cook F.J., Fitch, P., Thorburn, P.J., Charlesworth, P.B

Simulation of the Advance Velocity of the Moisture Front in Pulse Drip Irrigation Systems Using Nonlinear Regression Model

B. Karimi^{*1}, N. Karimi²

Received: Dec.05, 2019

Accepted: Feb.20, 2019

Abstract

Estimating the advance velocity of the moisture front is one of the important parameters in designing and managing of the drip irrigation system. In this study, experiments were carried out in a transparent plexyglass tank (3*1*0.5 m) using three different soil textures (fine, heavy and medium). The drippers were installed at 3 different soil depths (surface, 15cm and 30cm). The emitter discharge was considered 2.4, 4 and 6 lit/hr. Also, these experiments were carried out for two continuous and pulse irrigation systems. In pulse irrigation, the pulse cycles were considered 30-30, 20-40 and 40-20 min. In this research, using nonlinear regression model, empirical models were developed to predict the advance velocity of the moisture front in different directions. The input parameters of suggested model include emitter discharge, saturated hydraulic conductivity, application time, soil bulk density, emitter installation depth, initial soil moisture content, the ratio of irrigation time to complete period of each cycle and the proportions of sand, silt and clay in the soil. The results of comparison between measured and simulated values of advance velocity indicated that these models have acceptable precision and accuracy in estimating the advance velocity of the wetting front in different directions. The values of the mean absolute error (MAE) and the root mean square error (RMSE) varied between 0.031-0.108 and 0.067-0.275 cm/min, respectively.

Keywords: Irrigation management, Nonlinear regression, Subsurface drip irrigation, Moisture bulb

1 - Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

2 - MSc Student, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

(* - Corresponding Author Email: bakhtiar.karimi@gmail.com)