



دانشگاه گواران، دانشکده مهندسی آب و خاک

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و هشتم، شماره اول، ۱۴۰۰

۸۹-۱۰۸

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2021.18753.3426

مقاله کامل علمی - پژوهشی

## شبیه‌سازی الگوی توزیع مجدد رطوبتی در اراضی شیب‌دار تحت سامانه آبیاری قطره‌ای

شلیخ صولت<sup>۱</sup>، عیسی معروف‌پور<sup>۲</sup> و بختیار کریمی<sup>۳\*</sup>

<sup>۱</sup>دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه کردستان، <sup>۲</sup>دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه کردستان،

<sup>۳</sup>استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه کردستان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۱۸

### چکیده

**سابقه و هدف:** یکی از شاخص‌های مهم در طراحی سامانه‌های آبیاری قطره‌ای، تخمین دقیق ابعاد پیاز رطوبتی است که از تلفات عمقی آب و هزینه‌های اضافی طراحی سامانه آبیاری جلوگیری می‌نماید. ابعاد پیاز رطوبتی تحت تأثیر الگوی توزیع رطوبت در دو مرحله زمان آبیاری و پس از آبیاری است. مطالعات فراوانی در خصوص الگوی توزیع رطوبت در اراضی شیب‌دار انجام شده، اما مطالعات اندکی در خصوص الگوی توزیع مجدد رطوبت در این اراضی انجام شده و یا گزارش نشده است. بنابراین هدف اصلی پژوهش حاضر، بررسی و شبیه‌سازی الگوی توزیع مجدد رطوبت در اراضی شیب‌دار است. همچنین در مطالعات مشابه، بیش‌تر به شبیه‌سازی ابعاد پیاز رطوبتی در سطح خاک پرداخته شده، اما در این پژوهش علاوه بر ابعاد و مساحت خیس شده، شکل کامل پیاز رطوبتی شبیه‌سازی شده است.

**مواد و روش‌ها:** آزمایش‌ها در دو مدل فیزیکی به شکل مکعب مستطیل با ابعاد  $۱/۲ * ۱/۲ * ۰/۶$  متر و  $۱/۴ * ۱/۲ * ۰/۷$  متر، به ترتیب عرض، ارتفاع و طول انجام شد. آزمایش‌ها در سه بافت خاک سبک، متوسط و سنگین، با سه دبی قطره‌چکان، ۲، ۴ و ۶ لیتر در ساعت و در چهار شیب، ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد انجام شد. مدت زمان آبیاری ۳ ساعت و جبهه پیشروی رطوبت در فاز توزیع مجدد در زمان‌های ۳، ۶، ۲۴ و ۴۸ ساعت بر روی صفحه پلی‌کربنات ترسیم گردید. سپس با استفاده از روش رگرسیون غیرخطی، معادلاتی به منظور پیش‌بینی الگوی توزیع مجدد رطوبت در اراضی شیب‌دار ارائه گردید. در مدل‌های پیشنهاد شده از شاخص‌های دبی قطره‌چکان، حجم آب کاربردی، مدت زمان آبیاری، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، جرم ویژه ظاهری خاک، شیب زمین، رطوبت اولیه و درصد شن، سیلت و رس استفاده گردید. همچنین با استفاده از یک مدل پیشنهادی ارتقا یافته، شکل کامل پیاز رطوبتی برآورد گردید.

**یافته‌ها:** در خاک سنگین مدل‌های پیشنهادی با متوسط مقدار RMSE، ۰/۳۴ و MAE، ۰/۲۸ برای شاخص شعاع خیس شده و مقادیر ۰/۰۰۱۸ و ۰/۰۰۱۴ برای شاخص مساحت خیس شده، از بالاترین دقت برخوردار بودند. خاک سبک با مقادیر ۰/۴۴ و ۰/۳۷ شاخص‌های مذکور برای شعاع خیس شده و ۰/۰۰۲۹ و ۰/۰۰۲۲ برای شاخص مساحت

\* مسئول مکاتبه: bakhtiar.karimi@gmail.com

خیس شده کم‌ترین دقت را داشت. مقادیر شاخص‌های آماری محاسبه شده برای عمق خیس شده جبهه توزیع مجدد رطوبتی برای تمامی تیمارهای مورد بررسی مشابه بود و متوسط مقادیر RMSE خاک‌ها در محدوده ۰/۴۳ تا ۰/۵ و MAE آن‌ها در محدوده ۰/۳۱ تا ۰/۳۹ قرار داشت. هم‌چنین در تمامی تیمارهای مورد بررسی، مقادیر CRM مدل‌ها غالباً مثبت و NS آن‌ها در حدود ۰/۹۹ بود.

**نتیجه‌گیری:** نتایج این پژوهش نشان داد که مدل‌های پیشنهادی در خاک‌های سنگین از دقت بالاتری نسبت به خاک‌های سبک برخوردار هستند. هم‌چنین توانایی آن‌ها در برآورد شعاع خیس شده و مساحت متناظر آن در بالادست و پایین دست قطره‌چکان و هم‌چنین عمق خیس شده قطره‌چکان و شکل کامل پیاز رطوبتی مطلوب و قابل قبول می‌باشد. مقادیر پیش‌بینی مدل‌ها بیشتر در حالت کم برآوردی بود. بنابراین استفاده از مدل‌های مذکور برای تعیین محل قطره‌چکان در اراضی شیب‌دار، به منظور کاهش تلفات عمقی و استفاده بهینه گیاه از آب توصیه می‌گردد.

**واژه‌های کلیدی:** الگوی توزیع رطوبت، پیاز رطوبتی، رگرسیون غیرخطی، مساحت خیس شده

#### مقدمه

کمبود منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک موجب شده، تا تقاضا برای آن در بخش‌های مختلف کشاورزی، صنعت و گردشگری در حال افزایش باشد. با توجه به این‌که درصد قابل‌توجهی از منابع آب سطحی و زیرسطحی در بخش کشاورزی به مصرف می‌رسد، پس استفاده از یک روش مناسب آبیاری با راندمان بالا در این مناطق امری ضروری است (۹، ۱۸، ۱۲). سامانه آبیاری قطره‌ای به دلیل کاهش تلفات آب آبیاری بیش‌تر مورد استقبال کارشناسان و کشاورزان است. از شاخص‌های مهم در طراحی سامانه آبیاری قطره‌ای تخمین الگوی توزیع رطوبت می‌باشد که متناسب با آن فاصله بین قطره‌چکان‌ها و لوله‌های فرعی تعیین و از اتلاف آب جلوگیری می‌شود (۳، ۷، ۱۷، ۳۰). ویژگی‌های فیزیکی مختلف خاک، مانند هدایت هیدرولیکی خاک، جرم ویژه ظاهری خاک، شیب زمین، رطوبت اولیه خاک، درصد شن، سیلت و رس و نیز برخی ویژگی‌های سامانه آبیاری، مانند دبی قطره‌چکان، حجم آب آبیاری، مدت زمان آبیاری، عمق نصب قطره‌چکان (سطحی یا زیرسطحی) و نوع آبیاری

(موجی یا پیوسته) روی شکل پیاز رطوبتی تأثیر می‌گذارد (۲، ۱۱، ۲۴، ۲۵، ۲۷).

ابعاد پیاز رطوبتی تحت تأثیر الگوی توزیع رطوبت در دو مرحله زمان آبیاری و پس از آبیاری است. پس از قطع جریان، فرآیند توزیع مجدد رطوبت روی می‌دهد که اهمیت ویژه‌ای دارد (۴، ۶، ۱۵) و درصد قابل‌توجهی از ابعاد پیاز رطوبتی مربوط به این مرحله است (۱۶، ۲۰). مدل‌های تخمین ابعاد پیاز رطوبتی شامل مدل‌های تحلیلی، عددی و تجربی می‌باشند (۲۸). مدل‌های تحلیلی و عددی با توجه به این‌که فرضیات و ساده‌سازی‌های متعددی در آن‌ها انجام می‌شود و زمان‌بر هستند، کم‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرند. اما مدل‌های تجربی به دلیل سادگی کاربرد و هم‌چنین در نظر گرفتن اکثر شاخص‌های تأثیرگذار در مدل‌سازی، توسط پژوهشگران بسیاری استفاده می‌شود (۱۴، ۱۸). مطالعات متعددی عملکرد مناسب مدل‌های شبکه هوشمند (۱۴، ۲۶)، رگرسیون غیرخطی (۲) و روش ابعادی (۱۹) را در تخمین ابعاد پیاز رطوبتی در اراضی مسطح گزارش کرده‌اند. شیب زمین یکی از فاکتورهای تأثیرگذار در الگوی توزیع رطوبت می‌باشد. در اراضی شیب‌دار نیروی ثقل و ماتریک

رطوبتی و همچنین به منظور استفاده بهینه گیاه از رطوبت ایجاد شده، موقعیت استقرار گیاه باید به نسبت پایین تر از وضعیت قطره چکان باشد (۱۳). یکی دیگر از شاخص‌های مهم که در طراحی سامانه‌های آبیاری قطره‌ای اهمیت ویژه‌ای دارد و پژوهش‌های متعددی در این زمینه انجام شده است بحث الگوی توزیع مجدد رطوبتی است (۴، ۱۵، ۱۶، ۲۰). کریمی و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی الگوی توزیع مجدد رطوبتی در سامانه آبیاری سطحی و زیرسطحی پرداختند و نتایج آن‌ها نشان داد درصد قابل توجهی از الگوی توزیع رطوبت مربوط به فاز توزیع مجدد است. همچنین آن‌ها با استفاده از روش تحلیل ابعادی به شبیه‌سازی الگوی توزیع مجدد رطوبتی پرداختند و نتایج آن‌ها نشان داد که این روش عملکرد مناسبی در تخمین الگوی توزیع افقی و عمودی جبهه رطوبتی در فاز توزیع مجدد دارد (۱۶). محمدیگی و همکاران (۲۰۱۶) نیز در پژوهشی نشان دادند که در سامانه آبیاری پیوسته و پالسی درصد قابل توجهی از الگوی خیس‌شدگی به فاز توزیع مجدد مربوط می‌شود و همچنین آن‌ها الگوی خیس‌شدگی را در فاز توزیع مجدد به کمک روش تحلیل ابعادی شبیه‌سازی نمودند و نتایج آن‌ها نشان داد که این روش عملکرد مناسبی در برآورد الگوی توزیع مجدد افقی و عمودی دارد (۲۰). بررسی کلی پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد که مطالعات زیادی در زمینه الگوی توزیع الگوی خیس‌شدگی در آبیاری قطره‌ای انجام شده است ولی پژوهش‌های محدودی در زمینه الگوی توزیع مجدد رطوبتی به انجام رسیده است. همچنین با توجه به پژوهش‌های انجام شده مشخص است که مطالعاتی در زمینه اراضی شیب‌دار در فاز توزیع رطوبتی به انجام رسیده است ولی در مورد فاز توزیع مجدد پژوهش مشخصی صورت نگرفته است. همچنین یکی از محدودیت‌های مطالعات قبلی این است که فقط ابعاد پیاز رطوبتی را در سطح خاک شبیه‌سازی می‌کنند، اما

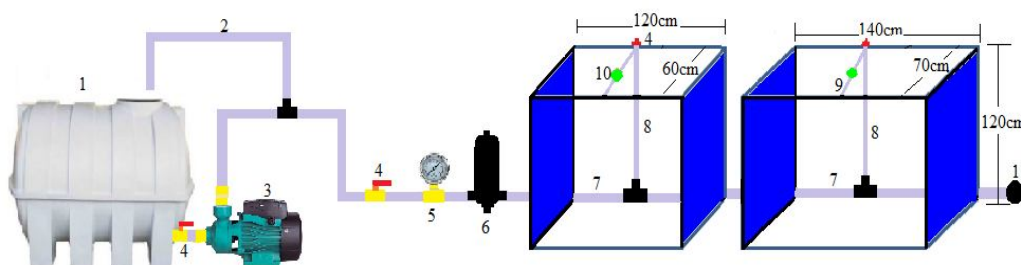
به ترتیب سبب پیشروی جبهه رطوبتی در جهت پایین‌دست و بالادست قطره‌چکان می‌گردند (۲۱، ۲۲، ۲۹) و با افزایش شیب الگوی توزیع افقی رطوبت افزایش و از توزیع عمودی آن کاسته می‌شود (۵، ۸، ۱۳). مطالعات فراوانی در خصوص الگوی توزیع رطوبت در اراضی شیب‌دار انجام شده، ولی مطالعات اندکی در خصوص الگوی توزیع مجدد رطوبت در این اراضی انجام شده و یا گزارش نشده است. در این اراضی نیروی ثقل و ماتریک به ترتیب باعث پیشروی جبهه رطوبتی در جهت پایین‌دست و بالادست قطره‌چکان می‌گردد (۲۱، ۲۲، ۲۹). نتایج پژوهش‌های حیدری و همکاران (۲۰۱۶) و اسماعیلی و همکاران (۲۰۱۶) نشان داد الگوی توزیع رطوبت در اراضی مسطح و شیب‌دار تفاوت زیادی با هم دارند. نتایج پژوهش‌های آن‌ها نشان داد که با افزایش شیب الگوی توزیع افقی رطوبت افزایش و از توزیع عمودی رطوبت کاسته می‌شود. با توجه به تفاوت‌های عمده‌ای که بین اراضی مسطح و شیب‌دار وجود دارد، به‌کارگیری روابط ارائه شده برای اراضی مسطح برای تخمین پیاز رطوبتی در اراضی شیب‌دار امری غیرمنطقی به نظر می‌رسد (۵، ۸). نوروزیان و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهشی به بررسی عملکرد پیاز رطوبتی در یک خاک مشخص در اراضی شیب‌دار پرداختند و نتایج آن‌ها نشان داد که مدل هایدروس با عملکرد قابل‌قبولی الگوی پیاز رطوبتی را شبیه‌سازی می‌کند (۲۳). کریمی و علی نظری (۲۰۲۰) به بررسی الگوی توزیع رطوبت در اراضی شیب‌دار برای سه نوع خاک با بافت مختلف، سه نوع شیب و سه مقدار دبی خروجی از قطره‌چکان پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که در اراضی مسطح الگوی خیس‌شدگی در دو طرف قطره‌چکان به شکل متقارن است و با افزایش شیب درصد قابل‌توجهی از الگوی رطوبتی به سمت پایین‌دست قطره‌چکان منتقل می‌گردد. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که با توجه به عدم تقارن شکل پیاز

به صورت افقی و عمودی مدرج گردید (شکل ۱). سامانه آبیاری شامل یک مخزن با گنجایش ۲۰۰ لیتر، الکتروپمپ، لوله‌های انتقال، رابط و فرعی از جنس پلی اتیلن و با قطر ۳۲، ۲۰ و ۱۶ میلی‌متر، شیرفلکه، فشارسنج و لوله کنارگذر برای تنظیم نقطه کار پمپ بود. تمام آزمایش‌ها در فشار ۲ بار انجام شد. از قطره‌چکان تنظیم‌شونده فشار نتافیم استفاده گردید. پر کردن مدل‌ها از خاک متناسب با جرم ویژه ظاهری هر بافت و به صورت لایه‌لایه انجام می‌شد. پس از اتمام هر آزمایش، خاک داخل مدل‌ها تخلیه و جهت خشک شدن در فضای آزاد قرار داده می‌شد. اعمال شیب در مدل‌ها از طریق شیب‌دار کردن سطح خاک داخل مدل‌ها انجام شد. بافت خاک سبک، متوسط و سنگین، دبی قطره‌چکان ۲، ۴ و ۶ لیتر در ساعت و شیب‌های مورد مطالعه ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد بود. ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. مدت زمان آبیاری ۳ ساعت و جبهه پیشروی رطوبت در مرحله توزیع مجدد در زمان‌های ۳، ۶، ۲۴ و ۴۸ ساعت پس از قطع آبیاری ترسیم گردید. سپس با فراهم کردن تصاویر الگوی خیس‌شدگی و با استفاده از نرم‌افزار گرافر الگوی ابعاد خیس‌شده، مساحت خیس‌شده و همچنین شکل کامل پیاز رطوبتی مطابق با شکل ۲ محاسبه و ترسیم گردید.

در این پژوهش علاوه بر ابعاد و مساحت خیس‌شده به شبیه‌سازی شکل کامل پیاز رطوبتی پرداخته می‌شود. بنابراین هدف اصلی این پژوهش بررسی و شبیه‌سازی الگوی توزیع مجدد رطوبتی در اراضی شیب‌دار می‌باشد. همچنین در این پژوهش با استفاده روش‌های رگرسیون غیرخطی ابعاد خیس‌شده پایین‌دست و بالادست قطره‌چکان، مساحت خیس‌شده پایین‌دست و بالادست قطره‌چکان و همچنین عمق خیس‌شده پیاز رطوبتی در فاز توزیع مجدد رطوبت شبیه‌سازی گردید.

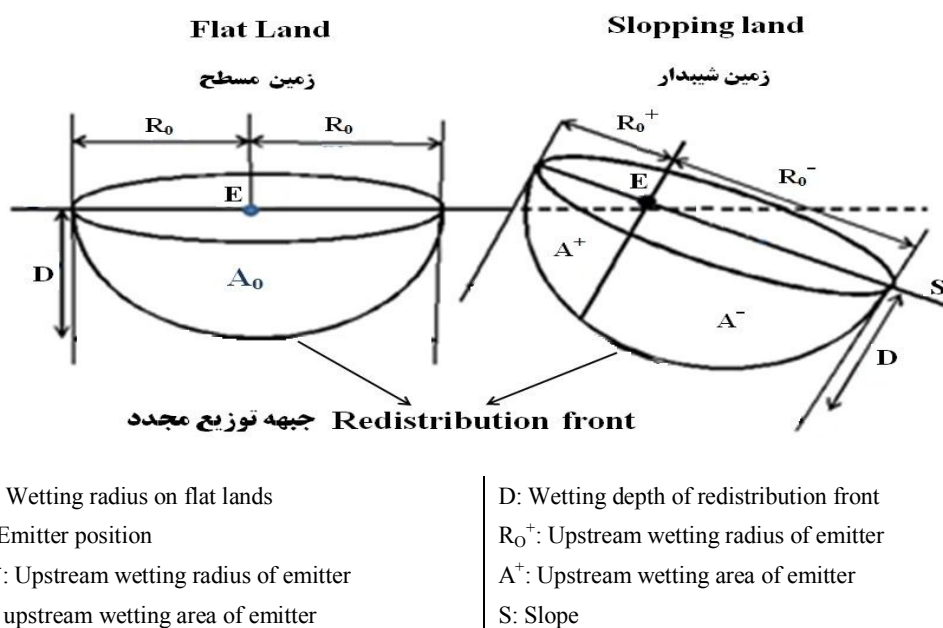
### مواد و روش‌ها

مطالعات آزمایشگاهی این پژوهش در آزمایشگاه مرکزی علوم و مهندسی آب دانشگاه کردستان و در فاصله زمانی بین اردیبهشت ۹۶ تا شهریور ۹۷ انجام شد. به منظور بررسی و شبیه‌سازی الگوی توزیع مجدد رطوبت در اراضی شیب‌دار آزمایش‌هایی در دو مدل فیزیکی به شکل مکعب مستطیل با ابعاد  $1/4^*1/2^*0/7$  متر و  $1/6^*1/1^*0/6$  متر، به ترتیب عرض، ارتفاع و طول انجام شد. مدل بزرگ‌تر برای انجام آزمایش‌های با دبی‌های بزرگ‌تر (مثلاً دبی ۶ لیتر در ساعت) و خاک رسی و مدل کوچک‌تر جهت انجام آزمایش‌های با دبی کوچک‌تر (مثلاً دبی ۲ لیتر در ساعت) و خاک شنی انتخاب شد. دیوارهای جانبی و کف مدل از جنس فلز و جداری رویه‌رویی از جنس پلی‌کربنات شفاف بود. صفحه بیرونی آن با استفاده از متر



شکل ۱- نمایی از مدل آزمایشگاهی، ۱- مخزن، ۲- لوله کنارگذر، ۳- الکتروپمپ، ۴- شیرفلکه، ۵- فشارسنج، ۶- فیلتر توری، ۷- لوله انتقال، ۸- لوله رابط، ۹- لوله فرعی، ۱۰- قطره‌چکان، ۱۱- درپوشش انتهایی.

Figure 1. Schematic of laboratory set up, 1- Reservoir, 2- By-pass pipe, 3- Electro pump, 4- Gate valve, 5- Gauge, 6- Screen Filter, 7- Convince pipe, 8- Manifold Pipe, 9- Lateral Pipe, 10- Emitter, 11- End Cap.



شکل ۲- نمایی از شاخص‌های مورد بررسی در اراضی مسطح و شیب‌دار (۱۳).

Figure 2. View of investigated parameters in flat and sloping lands.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های مورداستفاده در این پژوهش.

Table 1. Some physical properties of soil samples in this research.

نمونه خاک	درصد ماسه	درصد سیلت	درصد رس	بافت خاک	$\rho_b (\frac{gr}{cm^3})$	$K_s (\frac{cm}{hr})$
Samples	Sand%	Silt%	Clay%	Soil texture	density	Hydraulic conductivity
بافت سبک Light	79	10	11	لومی شنی Sandy Loam	1.52	3.35
بافت متوسط Medium	55	15	30	لومی رسی شنی Sandy Clay Loamy	1.4	1.04
بافت سنگین Heavy	27	28	45	رسی Clay	1.34	0.7

قطره‌چکان، حجم آب آبیاری، موقعیت قطره‌چکان (قطره‌چکان سطحی یا زیرسطحی)، حالت آبیاری (آبیاری پیوسته یا پالسی) و زمان سپری شده می‌باشد (۲، ۹، ۲۴، ۱۳، ۲۳). با توجه به سادگی کاربرد مدل‌های تجربی و عملکرد خوب این مدل‌ها در پژوهش‌های قبلی، در این پژوهش از روش رگرسیون غیرخطی برای مدل‌سازی الگوی توزیع مجدد رطوبت استفاده شد (۲، ۱۳، ۱۴).

مدل رگرسیون غیرخطی توزیع مجدد رطوبت در خاک: پژوهش‌های متعددی در زمینه الگوی پیاز رطوبتی انجام شده است که نشان می‌دهد برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک و سامانه آبیاری در این زمینه نقش دارند. ویژگی‌های فیزیکی خاک، شامل هدایت هیدرولیکی، جرم ویژه ظاهری خاک، رطوبت اولیه، درصد شن، سیلت و رس و شیب خاک می‌باشد. ویژگی‌های سامانه آبیاری شامل دبی

شکل کلی معادلات پیشنهادی برای مدل‌سازی پارامترهای مختلف الگوی توزیع مجدد در روابط ۱ تا ۱۰ ارائه شده است

$$R_0 = \alpha_1 \times t^{\alpha_2} \times q^{\alpha_3} \times v^{\alpha_4} \times k_s^{\alpha_5} \times sa^{\alpha_6} \times si^{\alpha_7} \times c^{\alpha_8} \times \rho_b^{\alpha_9} \times \theta_i^{\alpha_{10}} \quad (۱)$$

$$D = \alpha_1 \times t^{\alpha_2} \times q^{\alpha_3} \times v^{\alpha_4} \times k_s^{\alpha_5} \times sa^{\alpha_6} \times si^{\alpha_7} \times c^{\alpha_8} \times \rho_b^{\alpha_9} \times \theta_i^{\alpha_{10}} \quad (۲)$$

$$A_0 = \alpha_1 \times t^{\alpha_2} \times q^{\alpha_3} \times v^{\alpha_4} \times k_s^{\alpha_5} \times sa^{\alpha_6} \times si^{\alpha_7} \times c^{\alpha_8} \times \rho_b^{\alpha_9} \times \theta_i^{\alpha_{10}} \quad (۳)$$

$$R_{0-} = \alpha_1 \times t^{\alpha_2} \times q^{\alpha_3} \times k_s^{\alpha_4} \times v^{\alpha_5} \times sa^{\alpha_6} \times si^{\alpha_7} \times c^{\alpha_8} \times \rho_b^{\alpha_9} \times \theta_i^{\alpha_{10}} \times s^{\alpha_{11}} \quad (۴)$$

$$R_{0+} = \alpha_1 \times t^{\alpha_2} \times q^{\alpha_3} \times k_s^{\alpha_4} \times v^{\alpha_5} \times sa^{\alpha_6} \times si^{\alpha_7} \times c^{\alpha_8} \times \rho_b^{\alpha_9} \times \theta_i^{\alpha_{10}} \times s^{\alpha_{11}} \quad (۵)$$

$$A_- = \alpha_1 \times t^{\alpha_2} \times q^{\alpha_3} \times k_s^{\alpha_4} \times v^{\alpha_5} \times sa^{\alpha_6} \times si^{\alpha_7} \times c^{\alpha_8} \times \rho_b^{\alpha_9} \times \theta_i^{\alpha_{10}} \times s^{\alpha_{11}} \quad (۶)$$

$$A_+ = \alpha_1 \times t^{\alpha_2} \times q^{\alpha_3} \times k_s^{\alpha_4} \times v^{\alpha_5} \times sa^{\alpha_6} \times si^{\alpha_7} \times c^{\alpha_8} \times \rho_b^{\alpha_9} \times \theta_i^{\alpha_{10}} \times s^{\alpha_{11}} \quad (۷)$$

$$D = \alpha_1 \times t^{\alpha_2} \times q^{\alpha_3} \times k_s^{\alpha_4} \times v^{\alpha_5} \times sa^{\alpha_6} \times si^{\alpha_7} \times c^{\alpha_8} \times \rho_b^{\alpha_9} \times \theta_i^{\alpha_{10}} \times s^{\alpha_{11}} \quad (۸)$$

$$R_z = \alpha_1 \times t^{\alpha_2} \times q^{\alpha_3} \times v^{\alpha_4} \times k_s^{\alpha_5} \times sa^{\alpha_6} \times si^{\alpha_7} \times c^{\alpha_8} \times \rho_b^{\alpha_9} \times \theta_i^{\alpha_{10}} + \alpha_{11} \quad (۹)$$

$$R_z = \alpha_1 \times t^{\alpha_2} \times q^{\alpha_3} \times v^{\alpha_4} \times k_s^{\alpha_5} \times sa^{\alpha_6} \times si^{\alpha_7} \times c^{\alpha_8} \times \rho_b^{\alpha_9} \times \theta_i^{\alpha_{10}} \times s^{\alpha_{11}} + \alpha_{12} \quad (۱۰)$$

و با استفاده از منوی Solver toolbar در نرم‌افزار Excel 2010 به دست آمده‌اند. در این پژوهش مطابق با برخی پژوهش‌های قبلی (۱۳، ۲۵)، ۷۰ درصد داده‌های مورد مطالعه برای آموزش و ۳۰ درصد داده‌های برای صحت‌سنجی استفاده گردید و هم‌چنین روش انتخاب داده‌ای آموزش و صحت‌سنجی به صورت تصادفی بود.

**شاخص‌های آماری:** اعتبارسنجی و بررسی میزان دقت مدل‌های پیشنهاد شده بر اساس شاخص‌های آماری، ضریب تبیین ( $R^2$ )، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE)، ضریب جرم باقی‌مانده (CRM) و ضریب توانایی مدل در شبیه‌سازی (NS) انجام شد و به صورت معادلات ۱۵-۱۱ آورده شده است (۲۶).

رابطه‌های ۱ تا ۳ و ۴ تا ۸ ابعاد خیس‌شدگی پیاز رطوبتی در مرحله توزیع مجدد به ترتیب در اراضی مسطح و شیب‌دار اشاره دارند. در رابطه‌های بالا،  $k_s$  هدایت هیدرولیکی خاک (سانتی‌متر بر ساعت)،  $s$  مقدار شیب (درصد)،  $\theta_i$  رطوبت وزنی اولیه خاک (اعشاری)،  $\rho_b$  جرم مخصوص ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب)،  $sa$  درصد ماسه،  $si$  درصد سیلت و  $c$  درصد رس می‌باشد. بخشی دیگر از این عوامل مربوط به ویژگی‌های فنی و هیدرولیکی قطره‌چکان می‌باشد که شامل  $q$  دبی قطره‌چکان (لیتر بر ساعت)،  $t$  زمان سپری شده (دقیقه) و  $v$  حجم آب کاربردی (لیتر) می‌باشد. هم‌چنین رابطه‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب برای تخمین شکل کامل پیاز رطوبتی در عمق‌های مختلف ( $z=1,2,3,\dots$ ) می‌باشد.

در رابطه‌های فوق ضرایب  $\alpha_1$  تا  $\alpha_{12}$  ضرایب تخمینی هستند که از طریق روش رگرسیون غیرخطی

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (x_i^{\text{target}} - \bar{x}^{\text{target}})(x_i^{\text{model}} - \bar{x}^{\text{model}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i^{\text{target}} - \bar{x}^{\text{target}})^2 \sum_{i=1}^n (x_i^{\text{model}} - \bar{x}^{\text{model}})^2}} \right]^2 \quad (11)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i^{\text{model}} - x_i^{\text{target}})^2} \quad (12)$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i^{\text{model}} - x_i^{\text{target}})^2 \quad (13)$$

$$\text{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i^{\text{model}} - x_i^{\text{target}})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i^{\text{target}} - \bar{x}^{\text{target}})^2} \quad (14)$$

$$\text{CRM} = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n x_i^{\text{target}}}{\sum_{i=1}^n x_i^{\text{model}}} \right] \quad (15)$$

شاخص‌های مذکور نشان می‌دهد که توانایی مدل‌ها در شبیه‌سازی شاخص‌های توزیع مجدد رطوبت مطلوب می‌باشد. بر اساس شاخص CRM، نتایج مدل‌ها برای اراضی مسطح بیش‌برآوردی و برای اراضی شیب‌دار به‌استثنای شعاع خیس‌شده بالادست، کم‌برآوردی می‌باشد.

در جدول ۳، شاخص‌های آماری محاسبه‌شده برای شعاع خیس‌شده پایین‌دست و بالادست جبهه توزیع مجدد رطوبتی در مرحله آزمون آورده شده است. نتایج شاخص‌های آماری جدول ۳ نشان می‌دهد که مدل‌های پیشنهادی شعاع خیس‌شده در اراضی مسطح ( $R_0$ )، شعاع خیس‌شده در پایین‌دست قطره‌چکان ( $R^-$ ) و شعاع خیس‌شده در بالادست قطره‌چکان ( $R^+$ ) را در اراضی شیب‌دار با دقت

در رابطه‌های فوق  $x^{\text{model}}$  و  $x^{\text{target}}$  مقادیر داده‌های شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده و همچنین میانگین داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی‌شده را نشان می‌دهد و N تعداد داده‌ها است. آماره CRM نشان‌دهنده تمایل مدل برای بیش‌آوردی یا کم‌برآوردی در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده است. مقادیر مثبت آن نشان‌دهنده کم‌برآوردی و مقادیر منفی نشان‌دهنده بیش‌برآوردی مدل می‌باشد.

### نتایج و بحث

ضرایب معادلات شاخص‌های مختلف توزیع مجدد رطوبت و شاخص‌های آماری آن در مرحله آموزش در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج

در مقایسه با پژوهش‌های قبلی (۱۰، ۱۳، ۱۵) مساحت خیس شده پایین دست قطره‌چکان ( $A^-$ ) و مساحت خیس شده بالادست قطره‌چکان ( $A^+$ ) را در اراضی شیب‌دار با دقت قابل قبولی پیش‌بینی می‌کند. نتایج مقایسه بین داده‌های اندازه‌گیری شده با داده‌های شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد که مقادیر  $RMSE$ ،  $R^2$  و  $MAE$  برای مساحت خیس شده بالادست قطره‌چکان ( $A^+$ ) به ترتیب بین ترتیب  $0/95-0/9$ ،  $0/0008-0/0003$  و  $0/0006-0/0002$  مترمربع می‌باشد و همچنین دامنه تغییرات پارامترهای آماری ذکر شده برای مساحت خیس شده پایین دست قطره‌چکان ( $A^-$ ) به ترتیب  $0/91-0/94$ ،  $0/0004-0/0017$  مترمربع می‌باشد. هم‌چنین نتایج این پژوهش نشان داد که عملکرد این مدل‌ها در خاک سنگین با متوسط مقادیر  $RMSE$  و  $MAE$ ، به ترتیب  $0/0018$  و  $0/0014$  از بالاترین دقت و در خاک سبک با مقادیر  $0/0029$  و  $0/0022$  از کم‌ترین دقت برخوردار بود. هم‌چنین تخمین مدل‌ها در حالت کم‌برآوردی و توانایی مدل‌ها در برآورد مساحت خیس شده پایین دست و بالادست جبهه توزیع مجدد رطوبت مطلوب می‌باشد. برآورد مدل‌ها در خاک سنگین برای شاخص‌های شعاع خیس شده بالادست و پایین دست قطره‌چکان و هم‌چنین مساحت‌های متناظر آن‌ها برای خاک سنگین از دقت بالاتری نسبت به خاک سبک برخوردار بود اما برآورد آن‌ها برای عمق خیس شده از وضعیت کیفی یکسانی برخوردار بود. عمق خیس شده در شرایط توزیع مجدد رطوبت بیش‌تر تحت تأثیر نیروی ثقل است که برای هر دو خاک از وضعیت یکسانی برخوردار بوده و بنابراین دقت مدل‌ها در هر دو خاک مشابه بوده است. اما شعاع خیس شده و مساحت متناظر آن تحت تأثیر نیروهای کاپیلاری بوده و نیروی ثقل برای بالادست قطره‌چکان نقش بازدارنده و برای پایین دست

قابل قبولی پیش‌بینی می‌کند. هم‌چنین نتایج مقایسه بین داده‌های اندازه‌گیری شده با داده‌های شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد که مقادیر  $RMSE$ ،  $R^2$  و  $MAE$  برای شعاع خیس شده در اراضی مسطح ( $R_0$ ) به ترتیب بین  $0/99-0/99$ ،  $0/34-0/43$  و  $0/28-0/35$  متغیر است و هم‌چنین این مقادیر برای شعاع خیس شده در پایین دست قطره‌چکان ( $R^-$ ) به ترتیب بین  $0/89-0/95$ ،  $0/37-0/77$  و  $0/31-0/63$  نوسان دارد. مقادیر شاخص‌های آماری ذکر شده هنگامی که با پژوهش‌های قبلی مرتبط (۱، ۲، ۹، ۱۷) مقایسه شد، عملکرد مناسب این مدل‌ها را نشان می‌دهد. هم‌چنین نتایج این پژوهش نشان داد که خاک سنگین با متوسط مقدار  $RMSE$ ،  $0/34$  و  $MAE$   $0/28$  سانتی‌متر از بالاترین دقت و خاک سبک با مقادیر  $0/44$  و  $0/37$  شاخص‌های مذکور به ترتیب از کم‌ترین دقت برخوردار است. نتایج مدل‌های مذکور در بیش‌تر موارد، در شرایط کم‌برآوردی قرار دارد. به‌طورکلی توانایی مدل‌های مذکور در برآورد شعاع خیس شده جبهه توزیع مجدد رطوبت در خاک‌های انجام شده، قابل قبول و مطلوب می‌باشد. در جدول ۴، مقادیر شاخص‌های آماری محاسبه شده برای عمق خیس شده جبهه توزیع مجدد رطوبتی آورده شده است. نتایج مدل‌ها برای تیمارهای موردبررسی، مشابه بوده و متوسط مقادیر  $RMSE$  خاک‌ها در محدوده  $0/43$  تا  $0/5$  و  $MAE$  آن‌ها در محدوده  $0/31$  تا  $0/39$  قرار دارد. هم‌چنین مدل‌ها بیش‌تر در حالت کم‌برآوردی و توانایی آن‌ها در برآورد عمق خیس شده مطلوب است. در جدول ۵، شاخص‌های آماری برآورد مساحت خیس شده پایین دست و بالادست جبهه توزیع مجدد رطوبتی نشان داده شده است. نتایج شاخص مساحت خیس شده نیز همانند نتایج شاخص شعاع خیس شده جبهه توزیع مجدد رطوبت است. نتایج شاخص‌های آماری جدول ۵ نشان می‌دهد که مدل‌های پیشنهادی



می‌زنند و نتایج مقایسه الگوی توزیع مجدد رطوبتی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در شکل ۴ نشان می‌دهد که مدل‌های پیشنهادی برای شیب‌های مختلف و هم‌چنین برای تمامی بافت‌های خاک مورد بررسی (در دبی ۴ لیتر در ساعت) نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهند. مطابق با پژوهش‌های مرتبط در این زمینه (۱)، به‌کارگیری معادلات پیشنهادی در طراحی شبکه‌های آبیاری و زهکشی منجر به تعیین دقیق فاصله قطره‌چکان از محل استقرار گیاه در اراضی شیب‌دار و متناسب با آن سبب کاهش تلفات رواناب و نفوذ عمقی می‌گردد. هم‌چنین مدل‌های پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان یک دستورالعمل کلی در اراضی شیب‌دار مورد استفاده قرار گیرد.

قطره‌چکان نقش تقویت‌کننده دارد. ذرات خاک با بافت سنگین بیش‌تر از نوع رس و باردار بوده و نیروهای کاپیلاری در این نوع بافت غالب و بنابراین در ابعاد توزیع مجدد رطوبت نقش مؤثرتری نسبت به خاک با بافت سبک دارند. هم‌چنین در شکل ۳ مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با خط نیم ساز ۱:۱ نشان می‌دهد که مدل‌های پیشنهادی برای تمامی شیب‌های مورد بررسی (مسطح، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد) و خاک‌های مورد مطالعه، با دقت قابل قبولی شعاع خیس‌شده، عمق خیس‌شده و مساحت خیس‌شده را پیش‌بینی می‌کند. هم‌چنین ارزیابی رابطه ۹ و ۱۰ به‌ترتیب برای تخمین شکل کامل پیاز رطوبتی در اراضی مسطح و شیب‌دار نشان داد که این معادلات با دقت مناسبی شکل کامل پیاز رطوبتی را تخمین

جدول ۲- ضرایب معادلات ارائه‌شده برای شاخص‌های مورد بررسی در مرحله توزیع مجدد رطوبت خاک.

**Table 2. The coefficients of the developed equations for the investigated parameters in the redistribution phase.**

معادلات	ضرایب معادلات Equations Coefficients											شاخص‌های آماری Statistical Indices			
	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>	a <sub>6</sub>	a <sub>7</sub>	a <sub>8</sub>	a <sub>9</sub>	a <sub>10</sub>	a <sub>11</sub>	RMSE (cm)	CRM	NS	R <sup>2</sup>
مسطح Flat															
Eq. (1): R <sub>0</sub>	0.37	0.03	0.16	0.28	0.08	0.37	0.25	0.22	1.43	-0.07	-	1.39	-0.0005	0.97	0.94
Eq. (2): D	0.5	0.03	0.26	0.18	0.28	0.32	0.32	0.2	0.13	0.05		1.24	-0.0003	0.99	0.97
Eq. (3): A <sub>0</sub>	0.7	0.05	0.29	0.57	0.11	0.49	0.53	0.15	2.78	0.07	-	0.0037	-0.0016	0.99	0.98
شیب‌دار Slope															
Eq. (4): R <sub>0</sub> <sup>-</sup>	0.23	0.03	0.004	0.45	0.005	0.23	0.36	0.18	2.87	0.02	0.21	1.46	0.00003	0.98	0.96
Eq. (5): R <sub>0</sub> <sup>+</sup>	0.019	0.04	0.004	0.4	0.005	0.53	0.25	0.24	2.11	0.12	-0.21	1.34	-0.0005	0.99	0.91
Eq. (6): A <sub>0</sub> <sup>-</sup>	1.76	0.05	0.3	0.51	0.4	0.19	0.25	0.49	2.25	-0.03	0.17	0.007	0.0007	0.99	0.97
Eq. (7): A <sub>0</sub> <sup>+</sup>	0.35	0.07	0.004	0.71	0.005	0.7	0.58	0.23	4.9	0.04	-0.33	0.01	0.0014	0.99	0.82
Eq. (8): D	0.25	0.03	0.004	0.38	0.005	0.34	0.41	0.16	3.63	-0.061	-0.037	1.59	0.00006	0.99	0.74

جدول ۳- شاخص‌های آماری محاسبه شده برای شعاع خیس شده پایین دست و بالادست جبهه توزیع مجدد رطوبتی برای تیمارهای مورد بررسی.

**Table 3. Calculated statistical indices for the upstream and downstream wetting radius of moisture redistribution front for investigated treatments.**

NS	CRM	MAE (cm)	RMSE (cm)	R <sup>2</sup>	شاخص Index	شیب (%) Slope (%)	نمونه خاک Soil Sample
0.99	-0.0001	0.35	0.43	0.99	R <sub>0</sub>	0	
0.99	-0.000001	0.31	0.4	0.95	R-	10	
0.99	0.000009	0.18	0.24	0.92	R+		
0.99	0.000008	0.31	0.37	0.93	R-	20	بافت سنگین Heavy texture
0.99	0.00001	0.25	0.3	0.93	R+		
0.99	0.00001	0.39	0.48	0.89	R-	30	
0.99	0.00002	0.14	0.18	0.94	R+		
0.99	-0.001	0.28	0.34	0.99	R <sub>0</sub>	0	
0.99	0.00005	0.33	0.41	0.91	R-	10	
0.99	-0.000001	0.25	0.31	0.95	R+		
0.99	0.00001	0.33	0.4	0.94	R-	20	بافت متوسط Medium texture
0.99	0.000006	0.19	0.24	0.92	R+		
0.99	0.00001	0.45	0.54	0.92	R-	30	
0.99	0.00005	0.21	0.26	0.93	R+		
0.99	-0.00001	0.33	0.4	0.99	R <sub>0</sub>	0	
0.99	0.00001	0.35	0.42	0.94	R-	10	
0.99	0.00002	0.34	0.41	0.92	R+		
0.99	0.000008	0.43	0.5	0.93	R-	20	بافت سبک Light texture
0.99	0.00005	0.27	0.35	0.9	R+		
0.99	0.00002	0.63	0.77	0.91	R-	30	
0.99	0.00002	0.21	0.26	0.96	R+		

جدول ۴- شاخص‌های آماری محاسبه شده برای عمق خیس شده جبهه توزیع مجدد رطوبتی برای تیمارهای مورد بررسی.

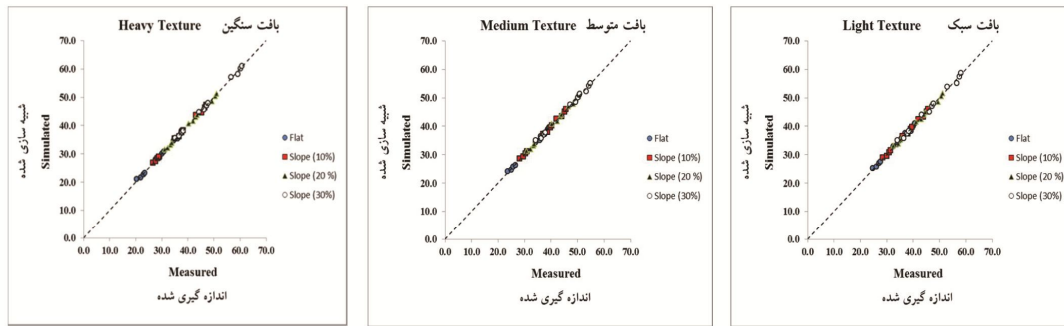
Table 4. Calculated statistical indices for the wetting depth of moisture redistribution front for investigated treatments.

NS	CRM	MAE (cm)	RMSE (cm)	R <sup>2</sup>	شیب (%) Slope (%)	نمونه خاک Soil Sample
0.99	-0.0001	0.72	0.94	0.97	0	
0.99	0.000006	0.21	0.27	0.95	10	بافت سنگین Heavy texture
0.99	0.000008	0.23	0.3	0.92	20	
0.99	0.000002	0.38	0.48	0.93	30	
0.99	-0.00002	0.29	0.36	0.99	0	
0.99	0.00001	0.28	0.35	0.92	10	بافت متوسط Medium texture
0.99	0.00002	0.3	0.4	0.89	20	
0.99	0.00003	0.35	0.44	0.91	30	
0.99	-0.00001	0.29	0.36	0.99	0	
0.99	0.000008	0.33	0.4	0.94	10	بافت سبک Light texture
0.99	0.000001	0.34	0.4	0.96	20	
0.99	0.00001	0.43	0.54	0.94	30	

جدول ۵- شاخص‌های آماری محاسبه شده برای مساحت خیس شده پایین دست و بالادست جبهه توزیع مجدد رطوبتی برای تیمارهای مورد بررسی.

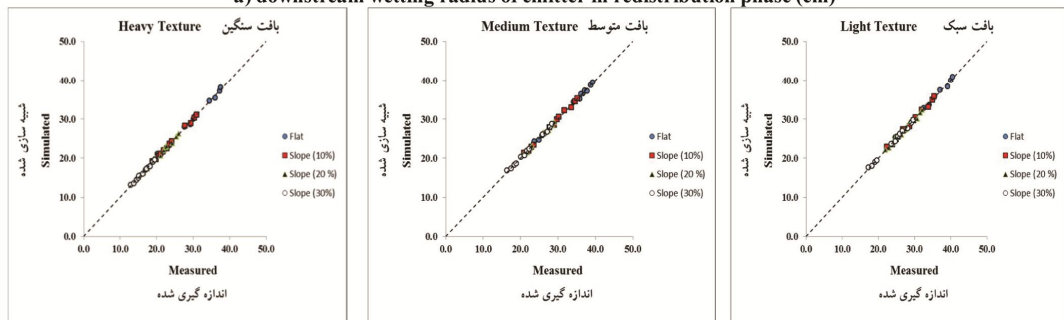
**Table 5. Calculated statistical indices for the upstream and downstream wetting area of moisture redistribution front for investigated treatments.**

NS	CRM	MAE (m <sup>2</sup> )	RMSE (m <sup>2</sup> )	R <sup>2</sup>	شاخص Index	شیب (%) Slope (%)	نمونه خاک Soil Sample
0.99	-0.0002	0.0016	0.002	0.99	A <sub>0</sub>	0	
0.99	0.00002	0.0017	0.002	0.92	A-	10	
0.99	0.00001	0.001	0.0015	0.95	A+	10	
0.99	0.00003	0.0018	0.002	0.92	A-	20	بافت سنگین Heavy texture
0.96	0.00007	0.0008	0.001	0.93	A+	20	
0.99	0.00009	0.0026	0.003	0.91	A-	30	
0.99	0.0001	0.0006	0.0008	0.91	A+	30	
0.99	-0.0002	0.0016	0.0019	0.99	A <sub>0</sub>	0	
0.99	0.0005	0.002	0.0026	0.93	A-	10	
0.96	0.00003	0.001	0.0016	0.91	A+	10	
0.99	0.0003	0.002	0.0028	0.91	A-	20	بافت متوسط Medium texture
0.99	0.00009	0.001	0.0013	0.9	A+	20	
0.99	0.00013	0.002	0.003	0.92	A-	30	
0.99	0.0001	0.0008	0.001	0.9	A+	30	
0.99	-0.0001	0.0019	0.0024	0.99	A <sub>0</sub>	0	
0.99	0.00004	0.0022	0.0027	0.94	A-	10	
0.99	0.00009	0.001	0.002	0.91	A+	10	
0.96	0.00005	0.003	0.0035	0.92	A-	20	بافت سبک Light texture
0.99	-0.00003	0.002	0.003	0.92	A+	20	
0.99	0.00008	0.004	0.005	0.91	A-	30	
0.99	-0.003	0.001	0.002	0.93	A+	30	



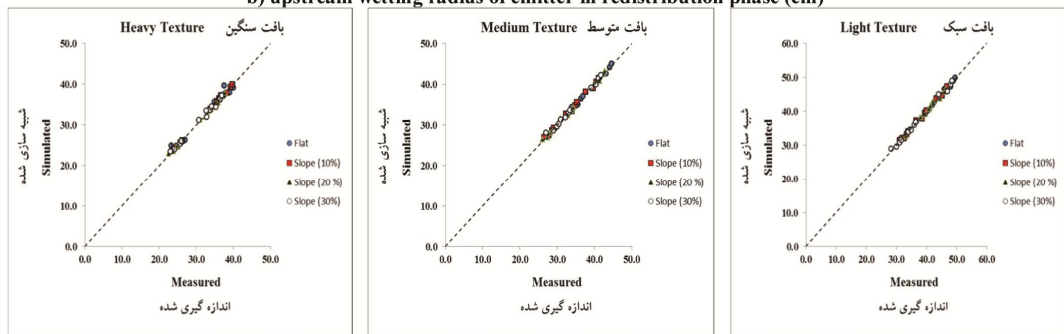
الف) شعاع خیس شدگی جبهه توزیع مجدد در پایین دست (برحسب سانتیمتر)

a) downstream wetting radius of emitter in redistribution phase (cm)



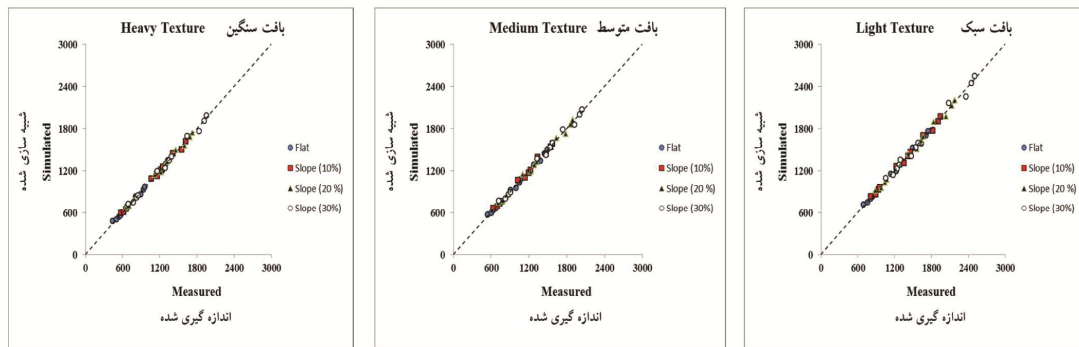
ب) شعاع خیس شدگی جبهه توزیع مجدد در بالادست (برحسب سانتیمتر)

b) upstream wetting radius of emitter in redistribution phase (cm)



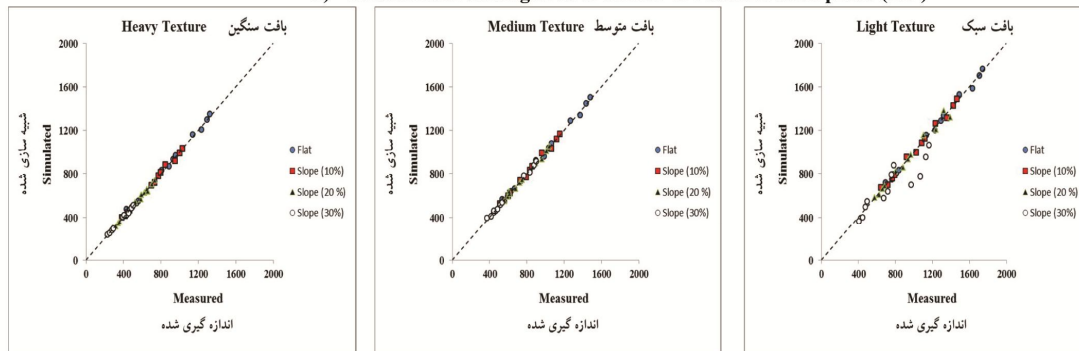
ج) عمق خیس شدگی جبهه توزیع مجدد (برحسب سانتیمتر)

c) wetting depth of emitter in redistribution phase (cm)



د) مساحت خیس‌شدگی در پایین‌دست قطره‌چکان در فاز توزیع مجدد (برحسب سانتی‌مترمربع)

d) downstream wetting area of emitter in redistribution phase (cm<sup>2</sup>)

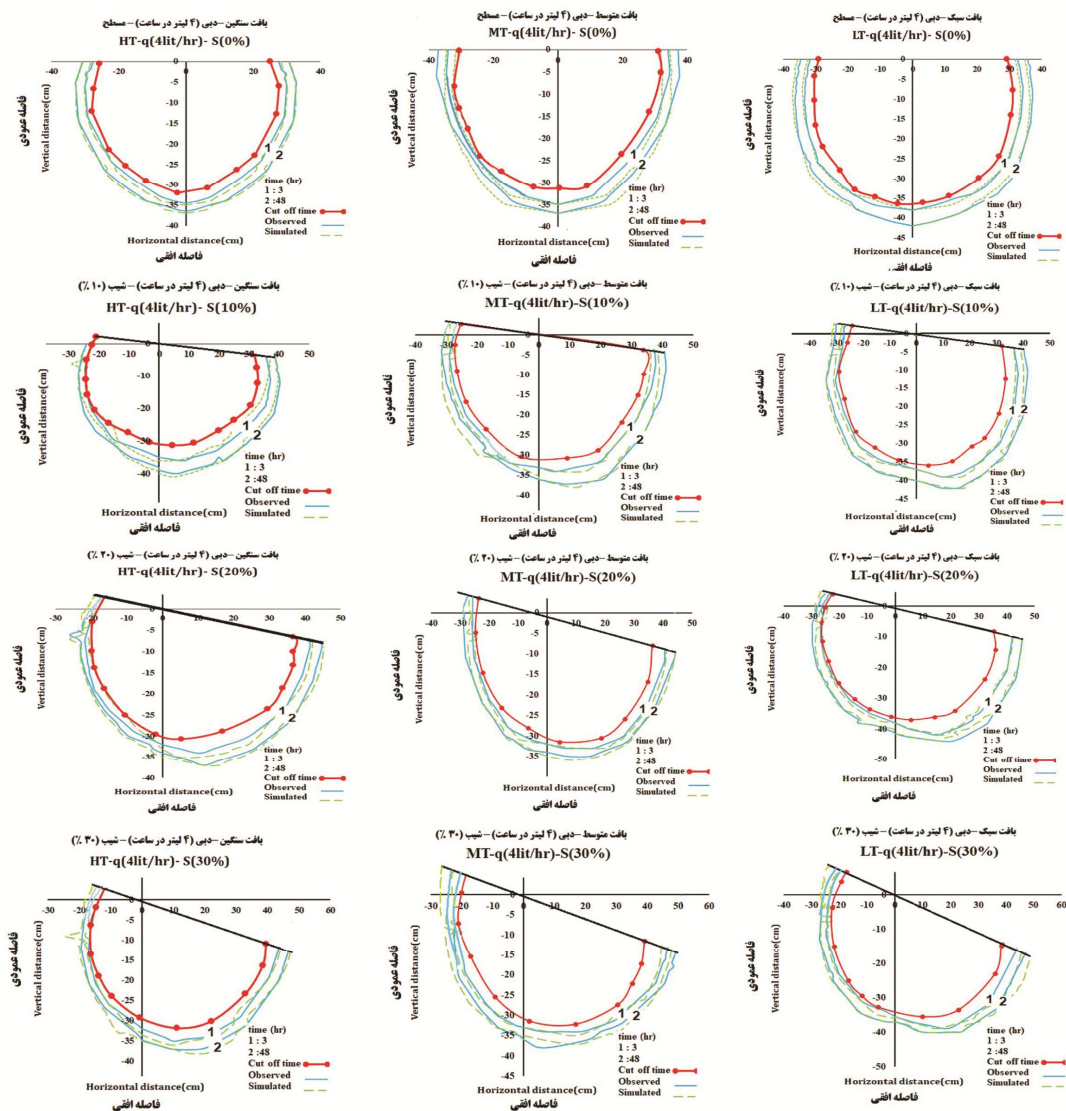


و) مساحت خیس‌شدگی در بالادست قطره‌چکان در فاز توزیع مجدد (برحسب سانتی‌مترمربع)

e) upstream wetting area of emitter in redistribution phase (cm<sup>2</sup>)

شکل ۳- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده برای تیمارهای موردبررسی.

Figure 3. Comparison of measured and simulated value with line 1:1 in investigated treatments.



شکل ۴- مقایسه مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده شکل کامل الگوی رطوبتی برای تیمارهای مورد بررسی در بافت متوسط.

Figure 4. Comparison of measured and simulated related to the full shape of moisture pattern for investigate treatments in medium texture.

الگوی پیاز رطوبتی با در نظر گرفتن فاز توزیع مجدد بوده و همچنین، تعیین محل استقرار گیاه نسبت به موقعیت قطره‌چکان می‌باشد؛ بنابراین، با استفاده از روش رگرسیون غیرخطی، مدل‌های تجربی به منظور تخمین ابعاد توزیع مجدد افقی شعاع و عمق خیس شده پیاز رطوبتی در فاز توزیع مجدد، مساحت خیس شده بالادست و پایین دست قطره‌چکان در اراضی مسطح و شیب‌دار ارائه گردید. این مدل‌ها

### نتیجه‌گیری کلی

با توجه به این‌که اکثر زمین‌های کشاورزی در استان کردستان در دامنه تپه‌ها بوده و دارای شیب نسبتاً زیاد است و در این مزارع عمدتاً از سامانه آبیاری قطره‌ای استفاده می‌شود، بنابراین طراحی دقیق این سامانه‌ها مستلزم آگاهی دقیق از الگوی پیاز رطوبتی است. با توجه به کشیدگی جبهه رطوبتی در این اراضی، هدف اصلی این پژوهش تخمین دقیق

تکنیک‌های مختلف) برای خاک‌های ناهمگن و حالت آبیاری موجی نیز مورد استفاده قرار گیرد و به منظور تقویت بیشتر نتایج انجام مطالعات جامع‌تر با استفاده از ترکیبات مختلف دبی، نوع خاک و درصد شیب انجام شود.

### تقدیر و تشکر

از همه حمایت‌های مادی و معنوی دانشگاه کردستان در انجام مطالعات آزمایشگاهی این مقاله کمال تشکر و قدردانی را داریم.

### داده‌ها و اطلاعات

این مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد در رشته علوم و مهندسی آب بوده و مطالعات آزمایشگاهی این پژوهش در آزمایشگاه مرکزی علوم و مهندسی آب دانشگاه کردستان و در فاصله زمانی بین اردیبهشت ۹۶ تا شهریور ۹۷ انجام شد.

### تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

بر اساس توابعی از مدت زمان آبیاری، دبی قطره‌چکان، حجم آب کاربردی، هدایت هیدرولیکی خاک، جرم ویژه ظاهری خاک، رطوبت اولیه وزنی خاک، شیب زمین و درصدهای شن، سیلت و رس توسعه داده شدند. بر اساس شاخص‌های آماری به‌دست‌آمده مدل‌های پیشنهادی در برآورد شعاع خیس‌شده و مساحت متناظر آن در بالادست و پایین‌دست قطره‌چکان و هم‌چنین عمق خیس‌شده قطره‌چکان و شکل کامل پیاز عملکرد قابل‌قبولی داشته و استفاده از آن‌ها برای تعیین محل قطره‌چکان در اراضی شیب‌دار، به‌منظور کاهش تلفات عمقی و استفاده بهینه گیاه از آب توصیه می‌شود. با توجه به نتایج قابل‌قبول مدل‌های ارائه‌شده پیشنهاد می‌شود که مدل‌سازی الگوی پیاز رطوبتی با استفاده از تکنیک‌های مختلف (مدل‌های تحلیلی، مدل‌های عددی مانند هایدروس و هم‌چنین مدل‌های هوش مصنوعی) نیز مورد ارزیابی قرار گیرد و نتایج این روش‌ها با مدل‌های پیشنهادی مورد مقایسه قرار گیرد. هم‌چنین، با توجه به این‌که مدل‌های پیشنهادی برای یک حالت خاص (برای خاک همگن با حالت آبیاری پیوسته) است، پیشنهاد می‌شود مدل‌های دیگری (با استفاده از

### منابع

- Alinazari, F., and Karimi, B. 2020. Simulation of wetted area in slope lands in drip irrigation system. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 14: 5. 1772-1788.
- Al-Ogaidi, A.A.M., Wayayok, A., Rowshon, M.K., and Abdullah, A.F. 2016. Wetting patterns estimation under drip irrigation systems using an enhanced empirical model. *Agricultural Water Management*, 176: 203-213.
- Amin, M.S.M., and Ekhmaj, A.I.M. 2006. DIPAC- drip irrigation water distribution pattern calculator. In: 7<sup>th</sup> Int. Micro Irrigation Congress PWTC, Kuala Lumpur, Malaysia, Pp: 503-513.
- Elmaloglou, S., and Diamantopoulos, E. 2009. Effects of hysteresis on redistribution of soil moisture and deep percolation at continuous and pulse drip irrigation. *Agric. Water Manag.* 96: 533-538.
- Esmaceli, E., Soltani-Mohammadi, A., and Broomand-Nasab, S. 2016. Investigation of wetting pattern dimensions in T-Tape drip irrigation on sloping Lands. *Journal of Irrigation Science and Engineering (JISE)*. 39: 1. 181-190. (In Persian)
- Fan, Y., Yang, Z., and Wei, H. 2021. Establishment and verification of the prediction model of soil wetting pattern



- size in vertical moisture irrigation. *Water Supply*, 21: 1. 331-343.
7. Hammami, M., and Zayani, K. 2016. An analytical approach to predict the moistened bulb volume beneath a surface point source. *Agric. Water Manag.* 166: 123-129.
  8. Heidari, Z., Farasati, M., and Gogobadian, R. 2016. Effect of slope on soil wetting pattern under surface drip irrigation and simulation HYDRUS-2D model. *Journal of Water and Irrigation Management.* 5: 2. 277-288. (In Persian)
  9. Kanda, E.K., Senzanje, A., and Mabhaudhi, T. 2020. Soil water dynamics under Moisture irrigation. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 115, p.102836.
  10. Kandelous, M.M., and Šimůnek, J. 2010. Comparison of numerical, analytical, and empirical models to estimate wetting patterns for surface and subsurface drip irrigation. *Irrigation Science*, 28: 5. 435-444.
  11. Karimi, B., Mirzaei, F., and Sohrabi, T. 2015. Developing Equations to Estimate Wetted Area Pattern for Surface and Subsurface Drip Irrigation Systems by Dimensional Analysis. *Iranian Journal of Soil and Water Science.* 25: 3. 241-252. (In Persian)
  12. Karimi, B., Sohrabi, T., Mirzaei, F. and Ababaei, B. 2015. Developing Equations to Estimate the Advance Velocity of the Wetting Front in Surface and Subsurface Drip Irrigation Systems by Dimensional Analysis. *Journal of Water and Soil science*, 25: 1. 101-112. (In Persian)
  13. Karimi, B., and Alinazari, F. 2020. Assessing Different Wetting Front Patterns for Surface Drip Irrigation Systems in Sloping Lands. *Journal of Water Research in Agriculture*, 34: 1. 107-119. (In Persian)
  14. Karimi, B., Mohammadi, P., Sanikhani, H., Salih, S.Q., and Yaseen, Z.M. 2020. Modeling wetted areas of moisture bulb for drip irrigation systems: An enhanced empirical model and artificial neural network. *Computers and Electronics in Agriculture*, 178, p.105767.
  15. Karimi, B., Mirzaei, F., and Sohrabi, T. 2013. Evaluation of Moisture Front Redistribution in Surface and Subsurface Drip Irrigation Systems. *Journal of Water and Soil science*, 23: 3. 183-192. (In Persian)
  16. Karimi, B., Sohrabi, T., Mirzaei, F., and Ababaei, B., 2015. Developing equations to predict the Pattern of soils moisture redistribution in surface and subsurface drip irrigation systems using dimension analysis. *Journal of Water and Soil Conservation*, 21: 6. 223-237. (In Persian)
  17. Kilic, M. 2020. A new analytical method for estimating the 3D volumetric wetting pattern under drip irrigation system. *Agricultural Water Management*, 228, p.105898.
  18. Malek, K., and Peters, R.T. 2011. Wetting pattern models for drip irrigation: new empirical model. *J. Irrig. Drain. Eng.* 137: 530-536.
  19. Mohammadbeigi, A., Mirzaei, F., and Ahraf, N. 2017. Simulation of soil moisture distribution under drip irrigation pulsed and continuous in dimensional analysis method. *Iranian Journal of Water and Soil Conservation.* 23: 6. 163-180. (In Persian)
  20. Mohammadbeigi, A., Mirzaei, F., and Ahraf, N. 2016. Evaluation and comparing of redistribution of moisture in drip irrigation by pulsed flow and continuous flow. *Iranian Journal of Soil and Water Research.* 47: 3. 467-473. (In Persian)
  21. Mohammadi, A., Biglouei, M.H., Khaledian, M.R., Moridnejad, A.R., and Rajabi, J. 2014. Investigation of wetting pattern dimensions on sloping lands. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 17: 66. 109-121. (In Persian)
  22. Mostafazadeh, B., Mousavi, S.F., and Hossain Sharif-Bayanolhagh, M. 1998. Wetting front advance from a point source in sloping fields. *JWSS-Isfahan University of Technology*, 2: 3. 13-23. (In Persian)

23. Norouzian, Z., Sadraddini, A.A., Nazemi, A.H., and Delirhasannia, R. 2017. Experimental and numerical investigations of soil water distribution under subsurface drip Irrigation in level and sloping layered soils. *Journal of Water and Soil Science*. 26: 4. 2. 13-27. (In Persian)
24. Rodríguez-Sinobas, L., Zubelzu, S., Martín-Sotoca, J.J., and Tarquis, A.M. 2021. Multiscaling analysis of Soil Water Content during irrigation events. Comparison between surface and subsurface drip irrigation. *Geoderma*, 382, p.114777.
25. Samadianfard, S., Sadraddini, A.A., Nazemi, A.H., Provenzano, G., and Kisi, O. 2012. Estimating soil wetting patterns for drip irrigation using genetic programming. *Spanish J. Agric. Res.* 10: 1155-1166.
26. Shiri, J., Karimi, B., Karimi, N., Kazemi, M.H., and Karimi, S. 2020. Simulating wetting front dimensions of drip irrigation systems: Multi criteria assessment of soft computing models. *J. Hydrol.* 585, p.124792.
27. Singh, D.K., Rajput, T.B.S., Sikarwar, H., and Ahmad, V.T. 2006. Simulation of soil wetting pattern with subsurface drip irrigation from line source. *Agric. Water Manag.* 83: 130-134.
28. Subbaiah, R. 2013. A review of models for predicting soil water dynamics during trickle irrigation, *Irrig. Sci.* 31: 225-258.
29. Tamjid, M., Biglouei, M.H., Khaledian, M.R., Moridnejad, A., and Mohammadi, A. 2015. Comparison of Linear Regression and Neural Networks to Estimate the Wetting Dimensions on Sloping Lands. *Journal of Water and Soil science*, 24: 4. 237-246. (In Persian)
30. Zur, B. 1996. Wetted soil volume as a design objective in trickle irrigation. *Irrigation Science*, 16: 101-105.



## Simulation of moisture redistribution pattern on sloping lands under drip irrigation system

Sh. Solat<sup>1</sup>, E. Maroufpoor<sup>2</sup> and B. Karimi<sup>\*3</sup>

<sup>1</sup>M.Sc. Graduate, Dept. of Water Science and Engineering, University of Kurdistan,

<sup>2</sup>Associate Prof., Dept. of Water Science and Engineering, University of Kurdistan,

<sup>3</sup>Assistant Prof., Dept. of Water Science and Engineering, University of Kurdistan

Received: 01.12.2021; Accepted: 05.08.2021

### Abstract

**Background and Objectives:** The accurate estimation of the dimensions of the wetting pattern is one of the important parameters in the design of drip irrigation systems, which reduce deep water losses and additional costs of irrigation system design. The wetting dimensions of moisture bulb are affected by the pattern of moisture distribution in the two phases (distribution and redistribution). Various studies have been conducted on the pattern of moisture distribution in sloping lands, but few studies have been carried out or not reported on the pattern of moisture redistribution in these lands. Therefore, the main purpose of this study is to investigate and simulate the pattern of moisture redistribution in sloping lands. Also, in similar studies, the dimensions of the wetting pattern have been usually simulated on the soil surface, but in this research, in addition to the dimensions and wetting area, the full shape of the moisture bulb has been simulated.

**Materials and Methods:** In this research, two physical rectangular cubic models with dimensions of 1.2 \* 1.2 \* 0.6 m and 1.4 \* 1.2 \* 0.7 m were constructed to monitor the soil moisture advance front. These experiments were carried out for four different slopes (0, 10, 20 and 30%), three soil types with different textures (coarse, medium, fine) and three emitter discharges (2, 4, and 6 lit/hour). This study was aimed to simulate the wetting area in a drip irrigation system on slope land. The duration of irrigation was 4 hours and the redistribution wetting front was recorded for different times (e.g., 3, 6, 18, 42, and 66 h) on the Polycarbonate plate. Then, using the nonlinear regression analysis several equations were proposed to predict the redistribution pattern in slopping lands. In the proposed models, emitter flow rate, the volume of applied water, irrigation time, saturated hydraulic conductivity, the soil bulk density, the land slope, the percentage of sand, silt, and clay were utilized. Also, using an enhanced proposed model, the full shape of wetting bulb was estimated.

**Results:** The suggested models had the high accuracy in heavy soils with the average values of RMSE and MAE for the wetted radius equal to 0.34 and 0.28 cm, respectively. RMSE and MAE values for the wetted area were 0.0018 and 0.0014 m<sup>2</sup>, respectively. The suggested models had the low accuracy in light soils and RMSE and MAE statistical indices for wetting radius were 0.44 and 0.37 cm and for wetting area were 0.0029 and 0.0022, respectively. The values of calculated statistical indices for the wetted depth of the moisture redistribution front were similar for all the studied treatments and the values of RMSE and MAE varied between 0.43-0.5 and 0.31-0.39 cm, respectively. Also, the CRM values of the models are mostly positive and their NS is about 0.99 for all the studied treatments.

\* Corresponding Author; Email: bakhtiar.karimi@gmail.com

**Conclusion:** The results of this research showed that the suggested models have higher precision in heavy soils than light soils. Also, the suggested models have acceptable ability to estimate the wetting radius, upstream and downstream area of the emitter, the wetting depth as well as the full shape of the moisture bulb. The prediction values of the models were mostly underestimated. Therefore, the use of these models recommended for determining the exact location of the emitters in sloping lands, to reduce deep percolation losses and optimal use of water via the plant.

**Keywords:** Moisture Distribution Pattern, Nonlinear Regression, Wetting Area, Wetting Bulb