

شبیه‌سازی و بررسی توزیع رطوبت و جبهه رطوبتی در یک خاک رسی تحت آبیاری قطره‌ای با مدیریت پالسی

ساناز محمدی^۱، سید مجید میرلطیفی^{۲*}، حسین دهقانی سانجیح^۳، ایمان حاجی‌راد^۴ و مهدی همایی^۵

چکیده

الگوی خیس‌شدگی اطراف قطره‌چکان آبیاری عامل مهمی است که باید در طراحی و مدیریت سامانه‌های آبیاری قطره‌ای مورد توجه قرار گیرد. در سال‌های اخیر، استفاده از مدیریت پالسی در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای به لحاظ تأثیری که بر توزیع رطوبت در خاک و در نتیجه رشد و توسعه ریشه گیاه دارد، افزایش یافته‌است. در پژوهش حاضر اثر مدیریت‌های مختلف آبیاری قطره‌ای پالسی با زمان قطع و وصل مختلف بر روی ابعاد پیاز رطوبتی و توزیع رطوبت در یک خاک رسی مورد بررسی قرار گرفت و عملکرد مدل عددی HYDRUS-2D در شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک تحت شرایط مدیریت پالسی نیز ارزیابی شد. بدین‌منظور تیمارهای آزمایشی شامل سه تیمار مختلف مدیریت پالسی و دو تیمار مختلف زمان قطع جریان بین پالس‌های آبیاری در داخل یک جعبه خاک آزمایشگاهی اجرا شدند. نتایج نشان داد که افزایش تعداد پالس‌های آبیاری باعث افزایش ۸ و ۱۲ درصدی عمق و عرض جبهه رطوبتی شد. همچنین افزایش سه برابری زمان قطع جریان نیز باعث افزایش ۵/۱۳ و ۲۰ درصدی عمق و عرض جبهه رطوبتی شکل‌گرفته اطراف قطره‌چکان آبیاری در یک خاک رسی شد. باتوجه به سنگین‌بودن بافت خاک، بررسی نحوه تغییرات رطوبت خاک در زمان‌های مختلف پس از شروع آبیاری نشان داد که اعمال مدیریت پالسی و تقسیم عمق آبیاری باعث شد رطوبت لایه سطحی خاک به بیش از حد ظرفیت زراعی نرسد؛ بنابراین می‌تواند شرایط مطلوب‌تری از لحاظ رشد در مزرعه برای گیاه فراهم کند. هم‌چنین مقایسه آماری مقادیر شبیه‌سازی‌شده توزیع رطوبت در خاک و ابعاد پیاز رطوبتی توسط مدل عددی با مقادیر اندازه‌گیری‌شده نشان داد که مدل عددی HYDRUS-2D دقت مناسبی در برآورد ابعاد پیاز رطوبتی ($R^2=0.95, 0.97$) و شبیه‌سازی توزیع رطوبت در یک خاک رسی ($RMSE=0.018$) تحت سامانه آبیاری قطره‌ای پالسی دارد؛ بنابراین می‌توان از مدل عددی HYDRUS-2D برای شبیه‌سازی جبهه رطوبتی و توزیع رطوبت در خاک به‌منظور طراحی، مدیریت و برنامه‌ریزی آبیاری قطره‌ای با مدیریت پالسی استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: الگوی خیس‌شدگی، شبیه‌سازی توزیع رطوبت، مدل هایدروس، مدیریت آبیاری

ارجاع: محمدی س. میرلطیفی س. م. دهقانی سانجیح ح. حاجی‌راد ا. و همایی م. ۱۴۰۱. شبیه‌سازی و بررسی توزیع رطوبت و جبهه رطوبتی در یک خاک رسی تحت آبیاری قطره‌ای با مدیریت پالسی. مجله پژوهش آب ایران. ۴۵: ۵۷-۶۹.

1- دکتری گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.
2- دانشیار گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.
3- دانشیار موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، کرج.
4- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.
5- استاد گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

* نویسنده مسئول: Mirlat_m@modares.ac.ir

مقدمه

کشور ایران از لحاظ اقلیمی و شرایط آب‌وهوایی جزو مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان محسوب می‌شود و با مشکل کمبود منابع آبی مواجه است. در شرایط محدودیت منابع آب و فراوانی نسبی اراضی قابل‌کاشت، که شرایط حاکم بر اکثر مناطق ایران است، باید بر بالابردن تولید به‌ازای واحد آب مصرفی و استفاده بهینه از این منابع متمرکز شد. استفاده از سامانه‌های آبیاری نوین مانند آبیاری قطره‌ای یکی از راهکارهای مؤثر در جهت استفاده بهینه از منابع آبی کشور است (افراسیاب و همکاران، ۱۳۹۵). از مزایای سامانه‌های آبیاری قطره‌ای می‌توان به بالابودن راندمان مصرف آب، نیاز کمتر به انرژی نسبت به دیگر سامانه‌های آبیاری تحت فشار و بالابودن میزان عملکرد و کیفیت محصول اشاره کرد (ویرلاس و ساکلاریو، ۲۰۰۵). پتانسیل راندمان آبیاری در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای در حدود ۹۰ درصد است؛ البته باید در نظر داشت که این راندمان بالا ناشی از ویژگی ذاتی این سامانه‌ها نبوده، بلکه تابعی از مدیریت صحیح در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای است. دبی خروجی، زمان و دور آبیاری از پارامترهای مدیریتی مهم در این زمینه هستند. همه روش‌های آبیاری و از جمله روش آبیاری قطره‌ای تنها در صورتی که مطابق با وضعیت و شرایط خاک و گیاه به‌طور صحیح طراحی شده باشند، امکان افزایش بهره‌وری آب را خواهند داشت. طراحی صحیح یک سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی نیازمند اطلاع از الگوی توزیع آب اطراف قطره‌چکان‌ها است تا با الگوی رشد ریشه در خاک مطابقت داشته باشد (کندلوس و همکاران، ۲۰۱۱). ابعاد پیاز رطوبتی اطراف یک قطره‌چکان آبیاری قطره‌ای به دو فاکتور مهم ویژگی‌های خاک و برنامه‌ریزی آبیاری وابسته است. ویژگی‌های خاک شامل بافت، ساختمان، هدایت هیدرولیکی، وجود لایه نفوذناپذیر، سطح آب زیرزمینی و متغیرهای دیگر (پلتیر و تان، ۱۹۹۳)، و برنامه‌ریزی آبیاری شامل موقعیت قرارگیری قطره‌چکان‌ها (سطح خاک یا زیر خاک، فاصله بین قطره‌چکان‌ها)، دبی، دور و مدت زمان آبیاری و نوع سامانه آبیاری قطره‌ای است (النصر و آلازبا، ۲۰۱۵). در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای در صورتی که عرض پیاز رطوبتی کم باشد، به‌منظور مرطوب‌شدن بستر کاشت و تأمین نیاز آبی در منطقه توسعه ریشه گیاه می‌توان از تعداد قطره‌چکان‌های بیشتری در طول لترال استفاده کرد

که باعث افزایش هزینه سامانه می‌شود. همچنین می‌توان از قطره‌چکان‌هایی با دبی بالاتر استفاده کرد که باعث گسترش ابعاد پیاز رطوبتی می‌شود؛ اما باید توجه داشت که این گسترش در هردو جهت عمودی و افقی خواهد بود که خصوصاً در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای زیرسطحی به لحاظ افزایش تلفات نفوذ عمقی به زیر منطقه توسعه ریشه گیاه و در نتیجه تلفات مواد غذایی و آلودگی آب‌های زیرزمینی نامطلوب است (اسکاگز و همکاران، ۲۰۱۰). از طرفی در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای سطحی افزایش نرخ دبی قطره‌چکان می‌تواند با توجه به نوع بافت خاک موجب افزایش رواناب سطحی شود (گاردنز و همکاران، ۲۰۰۵) و زمانی که آب بر روی سطح خاک تجمع یابد تلفات تبخیر از سطح خاک افزایش می‌یابد (اسکاگز و همکاران، ۲۰۱۰)؛ بنابراین استفاده از قطره‌چکان با دبی بالاتر نیز نمی‌تواند راهکار مناسبی برای تصحیح ابعاد پیاز رطوبتی در خاک باشد. با توجه به نتایج مثبتی که در مطالعات مربوط به آبیاری غرقایی با رژیم متناوب در زمینه بهبود یکنواختی توزیع آب در خاک و افزایش محصول گزارش شده بود، برخی محققان تصمیم به استفاده از این مفهوم در آبیاری قطره‌ای گرفتند و این روش را آبیاری قطره‌ای متناوب^۱ یا پالسی^۲ نامیدند (ویرلاس و ساکلاریو، ۲۰۰۵؛ المالگلو و دیامانتوپولوس، ۲۰۰۸؛ باکیر و همکاران، ۲۰۰۹؛ عید و همکاران، ۲۰۱۳). اصول آبیاری قطره‌ای پالسی اولین بار توسط کارملی و پری (۱۹۷۴) مطرح شد. تناوب یا پالس شامل یک سری چرخه‌های آبیاری است که هر چرخه شامل یک فاز آبیاری^۳ (وصل) و یک فاز استراحت^۴ (قطع) است (کارملی و پری، ۱۹۷۴). محققان اظهار داشتند که استفاده از روش آبیاری پالسی، توزیع رطوبت در خاک تحت سامانه‌های آبیاری قطره‌ای را بهبود می‌بخشد؛ زیرا کاربرد متناوب آب اجازه توزیع مجدد رطوبت در خاک قبل از شروع تناوب بعدی آبیاری را می‌دهد که انتظار می‌رود باعث تسریع حرکت افقی و رو به بالای آب در خاک شود (النصر و آلازبا، ۲۰۱۵).

یکی از اهداف طراحان و محققان آبیاری افزایش ابعاد پیاز رطوبتی در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای است. در زمینه تطبیق الگوی خیس‌شدگی حاصل از یک سامانه آبیاری

1- Intermittent Drip Irrigation

2- Pulsed Drip Irrigation

3- On-Times

4- Off-Times

خارج از منطقه توسعه ریشه کاهش می‌دهد (کوت و همکاران، ۲۰۰۳). فوگات و همکاران (۲۰۱۲) نیز جبهه رطوبتی حاصل از سیستم آبیاری قطره‌ای با مدیریت پالسی و پیوسته را در یک باغ بادام مورد بررسی و مقایسه قرار دادند. تیمار آبیاری پالسی به صورت یک ساعت زمان آبیاری و یک ساعت زمان استراحت اعمال شد. نتایج نشان داد که گسترش پیاز رطوبتی در جهت افقی در تیمار آبیاری پالسی بیش از تیمار آبیاری پیوسته بوده است.

همچنین در تحقیقی دیگر تأثیر اعمال سطوح مختلف آبیاری قطره‌ای (۸۰ درصد، ۱۰۰ درصد و ۱۲۰ درصد تبخیر-تعرق گیاه) تحت مدیریت‌های مختلف پالسی (یک، دو، سه و چهار پالس) بر توزیع رطوبت خاک مورد بررسی قرار گرفت. بررسی نحوه توزیع رطوبت در خاک دو ساعت بعد از اتمام آبیاری نشان داد که در تیمار آبیاری کامل (۱۰۰ درصد) با اعمال مدیریت چهار پالسی توزیع رطوبت خاک به نحوی بود که شرایط مطلوبی را از لحاظ دسترسی به آب در محدوده توسعه ریشه برای رشد گیاه در مراحل حساس فراهم کرده بود (مدن و همکاران، ۲۰۱۸). در پژوهش دیگری توزیع رطوبت اطراف قطره‌چکان آبیاری تحت شرایط مدیریت پالسی (اعمال یک ساعت زمان استراحت پس از هر یک ساعت زمان آبیاری) داخل جعبه خاک برای سه بافت خاک مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مؤلفه عمودی و افقی پیاز رطوبتی برای همه بافت‌های خاک مورد بررسی در مدیریت پالسی بیش از مدیریت پیوسته بوده است (محمدبیگی و همکاران، ۱۳۹۵). مطالعه دیگری نیز در زمینه شبیه‌سازی مساحت خیس‌شده پیاز رطوبتی تحت سه مدیریت مختلف آبیاری پالسی توسط پژوهشگران انجام شد. تیمارهای آبیاری پالسی شامل زمان قطع و وصل ۳۰-۳۰، ۴۰-۲۰ و ۴۰-۲۰ دقیقه بودند. نتایج نشان داد که مساحت خیس‌شدگی پیاز رطوبتی پایین قطره‌چکان در کاربرد آبیاری قطره‌ای پالسی ۳۰-۳۰ بیشتر از سایر تیمارهای پالسی و پیوسته بوده است (کریمی و کریمی، ۱۳۹۸).

با توجه به اهمیت ابعاد پیاز رطوبتی تشکیل‌شده در اطراف یک قطره‌چکان آبیاری به منظور مطابقت هرچه بیشتر آن با الگوی رشد ریشه در خاک که می‌تواند منجر به دسترسی راحت‌تر ریشه گیاه به آب و مواد غذایی و در نتیجه بهبود رشد و نمو گیاه شود، نیاز به بررسی راه‌کارهای مختلف در

قطره‌ای با الگوی رشد ریشه تحقیقات زیادی انجام شده است. محققان نشان داده‌اند که پیاز رطوبتی در اطراف یک نازل دفن شده در زیر سطح خاک را می‌توان با تنظیم دور آبیاری مدیریت کرد؛ به طوری که کوتاه‌شدن دور آبیاری همراه با کاهش حجم آب در هر نوبت آبیاری باعث حرکت الگوی رطوبتی به سمت سطح خاک می‌شود (فن و همکاران، ۱۹۸۶). برخی محققان برای اطمینان از یکنواختی نرخ جوانه‌زنی برای عمق‌های مختلف نصب نازل‌ها در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی کاربرد آب بیشتر را توصیه کرده‌اند تا خاک اطراف بذر کاملاً مرطوب شود (بوردوسکی و پوتر، ۲۰۰۳)؛ اما افزایش عمق آبیاری باعث افزایش نفوذ عمقی می‌شود که می‌تواند آب‌های زیرزمینی را تحت تأثیر قرار داده و از طرفی منجر به تراکم‌ترشدن خاک شود که مشکل تهویه خاک و کاهش عملکرد محصول را در پی خواهد داشت (کولایزی و همکاران، ۲۰۰۴). همچنین افزایش عمق آبیاری می‌تواند باعث کاهش دمای خاک و تأخیر در جوانه‌زنی محصول شود (لیو و همکاران، ۲۰۱۵). یکی از مواردی که باید در طراحی و مدیریت سامانه‌های آبیاری قطره‌ای مورد توجه قرار گیرد، کاهش نرخ دبی قطره‌چکان‌ها برای مطابقت هرچه بیشتر الگوی توزیع رطوبت در خاک با الگوی رشد ریشه گیاه است تا بتوان الگوی خیس‌شدگی اطراف قطره‌چکان را بهبود بخشید (بچلر و همکاران، ۱۹۹۶). به دلیل محدودیت‌های فنی، استفاده از نرخ دبی کم می‌تواند مشکل‌ساز باشد؛ اما با استفاده از روش آبیاری پالسی می‌توان علی‌رغم استفاده از نرخ دبی بالا، الگوی رطوبتی مشابه با آنچه از آبیاری پیوسته با دبی کم حاصل می‌شود، به دست آورد (آسولین و همکاران، ۲۰۰۶). پژوهشگران نحوه شبیه‌سازی مدل HYDRUS2D را برای جریان آب و انتقال املاح در خاک تحت سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در شرایط پالسی (نیم‌ساعت فاز آبیاری و نیم‌ساعت فاز استراحت) مورد بررسی قرار دادند. دو سناریوی تزریق کود شامل تزریق در ابتدا و انتهای پالس‌های آبیاری تعریف شد. شبیه‌سازی‌ها نشان داد که علاوه بر تأثیر پارامترهای هیدرولیکی خاک بر روی شکل و ابعاد پیاز رطوبتی خاک، روش آبیاری پالسی نیز تا حدودی باعث افزایش ابعاد پیاز رطوبتی شد. همچنین نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که تزریق کود در ابتدای دوره آبیاری احتمال شست‌وشوی املاح (نیترات) را به

شفاف پلکسی‌گلس و دو وجه دیگر از جنس ورقه‌های فلزی ساخته شد. دیواره شفاف جعبه با استفاده از چسب شفاف و شن استاندارد زبر شد تا از ایجاد جریان ترجیحی در محل تماس خاک با بدنه جعبه جلوگیری شود. به‌منظور ایجاد چگالی ظاهری یکنواخت در کل پروفیل خاک، پرکردن جعبه به‌صورت اضافه‌کردن لایه‌های پنج‌سانتی‌متری از خاک وزن‌شده انجام شد. همچنین به‌منظور جلوگیری از تبخیر، سطح جعبه خاک با استفاده از پلاستیک پوشانده شده بود. بافت خاک مورد استفاده رسی (شن ۳۸/۶ درصد، رس ۴۴/۴ درصد و سیلت ۱۷ درصد) با چگالی ظاهری ۱/۴۹ گرم بر سانتی‌مترمکعب بود که به روش هیدرومتری تعیین شد. نتایج آنالیز نمونه آب مورد استفاده در پژوهش نیز در جدول ۱ ارائه شده‌است.



شکل ۱- مدل فیزیکی ساخته‌شده در آزمایشگاه

این زمینه است. بررسی پژوهش‌های پیشین حاکی از تأثیر مدیریت پالسی بر الگوی خیس‌شدگی اطراف قطره‌چکان آبیاری است و باتوجه به عدم بررسی تأثیر زمان‌بندی قطع جریان در مدیریت پالسی بر توزیع رطوبت خاک در پژوهش‌های قبلی، هدف مطالعه حاضر علاوه بر بررسی اثر تیمارهای مختلف مدیریت پالسی در آبیاری قطره‌ای، اثر زمان‌بندی قطع جریان در مدیریت پالسی نیز به‌عنوان نوآوری پژوهش حاضر بر ابعاد پیاز رطوبتی و توزیع رطوبت در یک خاک رسی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین توانایی مدل عددی HYDRUS-2D برای شبیه‌سازی ابعاد پیاز رطوبتی و توزیع رطوبت در خاک رسی تحت شرایط مختلف آبیاری قطره‌ای پالسی ارزیابی شد.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی مدل فیزیکی

به‌منظور بررسی توزیع رطوبت در خاک یک مدل فیزیکی شامل جعبه مکعب‌مستطیلی به ابعاد ۱۲۰×۹۰×۹۰ سانتی‌مترمکعب در آزمایشگاه آبیاری و زهکشی گروه مهندسی و مدیریت آب دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس تهران ساخته شد (شکل ۱). به‌منظور فراهم‌کردن امکان مشاهده نحوه پیش‌روی جبهه رطوبتی خاک در زمان‌های مختلف انجام آزمایش، دو وجه جعبه از ورقه‌های

جدول ۱- نتایج آنالیز نمونه آب

Anion (mg/l)		Cation (mg/l)			EC (ds/m)	PH	منبع آب
Cl ⁻	HCO ³⁻	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺			
۴۴/۳	۱۲۴	۶	۳۴	۸۸/۵۷	۰/۵۱۵	۸	چاه

کاهش فشار وارده بر سیستم از یک لوله برگشت جریان مازاد^۱ نیز استفاده شد. با فرض متقارن بودن پیاز رطوبتی تشکیل شده در اطراف قطره‌چکان آبیاری، در پژوهش حاضر نصف پیاز رطوبتی تشکیل شده در خاک شبیه‌سازی شد (لی و همکاران، ۲۰۰۴).

تیمارهای آزمایشی

تیمارهای مورد بررسی شامل شش تیمار آبیاری قطره‌ای با مدیریت پالسی بود. تیمارهای آبیاری پالسی در سه سطح شامل دو، سه و چهار پالس آبیاری (P2, P3, P4) و

همه لوازم و تجهیزات آبیاری قطره‌ای متناسب با شرایط واقعی مزرعه در مدل فیزیکی شبیه‌سازی شد. آب به‌وسیله پمپ و از طریق لوله‌های نیمه‌اصلی به قطر ۴۰ میلی‌متر و لترال به قطر ۲۰ میلی‌متر به قطره‌چکان منتقل شد. در مسیر انتقال آب از شیرفلکه برای هدایت جریان، فشارسنج برای کنترل فشار ثابت در سیستم، کنتور حجمی برای کنترل حجم آب ورودی در هر آزمایش و شیر قطع و وصل جریان برای کنترل جریان به داخل جعبه استفاده شد. قطره‌چکان مورد استفاده در این پژوهش دارای دبی ۳/۴ لیتر در ساعت و از نوع تنظیم‌کننده فشار بود. با توجه به کم‌بودن دبی مورد استفاده در این پژوهش، به‌منظور

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k(h) \frac{\partial h}{\partial y} + k(h) \right] \quad (1)$$

در این معادله θ رطوبت حجمی خاک (cm^3/cm^3)، K هدایت هیدرولیکی خاک (cm/min)، h پتانسیل فشاری آب موجود در خاک (cm)، t زمان (min) و x و y به ترتیب مختصات افقی و عمودی (cm) هستند. برای به دست آوردن پارامترهای هیدرولیکی خاک در مدل از معادله معلم-وان گنوختن^۱ به صورت زیر استفاده می شود:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |ah|^n)} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$k(h) = k_s s_e^1 \left[1 - (1 - s_e^{1/m})^m \right]^2 \quad (3)$$

$$s_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, \quad m = 1 - \frac{1}{n} \quad (4)$$

که در این معادلات θ_s رطوبت اشباع خاک (cm^3/cm^3)، θ_r رطوبت باقی مانده خاک (cm^3/cm^3)، k_s هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (cm/min)، α ، n و l پارامترهای شکل^۲ هستند. مدل عددی HYDRUS-2D از روش اجزای محدود گالرکین برای حل معادلات مذکور استفاده می کند. سیمونک و همکاران روش حل معادلات را با جزئیات کامل تشریح کرده اند (سیمونک و همکاران، ۱۹۹۹).

به منظور شبیه سازی رطوبت پروفایل خاک یک محدوده مستطیل شکل به ابعاد 90×120 سانتی متر به عنوان محدوده توزیع رطوبت با ۲۵۹۹ گره انتخاب شد. شدت جریان معرفی شده در مدل HYDRUS-2D در طول مدت زمان آبیاری در محل قرارگیری قطره چکان از رابطه زیر محاسبه شد (سیمونک و همکاران، ۲۰۰۸):

$$q = \frac{Q}{L} \quad (5)$$

در این معادله q شار مرزی جریان در محل قطره چکان (cm/hr)، Q دبی قطره چکان در واحد طول لترال (cm^2/hr) و L محیط دور قطره چکان (cm) است.

شرایط اولیه برای مدل عددی به صورت رطوبت اولیه خاک تعریف شد. با توجه به اینکه سطح جعبه خاک با پلاستیک پوشانده شده بود و تبخیر-تعرق نداشت، سطح پروفیل خاک به صورت مرز بدون جریان در مدل تعریف شد. محل قرارگیری قطره چکان به صورت جریان متغیر با زمان به مدل معرفی شد که در پایان هر پالس آبیاری شرایط مرزی جریان در محل قطره چکان صفر لحاظ شد. دیواره های جعبه خاک به صورت مرز بدون جریان و کف

تیمارهای مدیریت زمان بندی قطع جریان در دو سطح یک برابر و سه برابر زمان وصل جریان ($T1$, $T2$) اعمال شد. مدت زمان اجرای آزمایش برای تمامی تیمارها سه ساعت منظور شد؛ بنابراین حجم آب کاربردی برای همه تیمارها یکسان بود؛ به عنوان مثال در تیمار $T1P3$ سه پالس آبیاری به مدت هر پالس یک ساعت اعمال شد که زمان قطع جریان بین پالس های آبیاری یک ساعت بود؛ بنابراین کل مدت زمان آبیاری در این تیمار پنج ساعت است. در تیمار $T2P3$ سه پالس آبیاری به مدت هر پالس یک ساعت منظور شد که زمان قطع جریان بین پالس های آبیاری سه برابر، یعنی سه ساعت بود؛ بنابراین کل مدت زمان آبیاری در این تیمار ۹ ساعت است.

اندازه گیری رطوبت خاک

برای اندازه گیری رطوبت خاک در محدوده جبهه رطوبتی، از بلوک های گچی استفاده شد. اندازه گیری ها هر نیم ساعت پس از شروع آزمایش در هر تیمار توسط دستگاه قرائت کننده ثبت شد. بلوک های گچی قبل از کارگذاری در جعبه آزمایشی واسنجی شد. بدین منظور بلوک های گچی داخل گلدان پر از خاک نصب شد سپس با اضافه کردن آب به داخل گلدان و اندازه گیری رطوبت وزنی از طریق توزین گلدان و قرائت هم زمان عدد مربوط به دستگاه در زمان های مختلف در طول یک دوره خشک شدن خاک گلدان، واسنجی بلوک های گچی در خاک مورد آزمایش انجام شد.

مدل عددی HYDRUS-2D

مدل HYDRUS-2D یکی از مدل های پیشرفته برای شبیه سازی حرکت آب، املاح و گرما در خاک است که توسط سیمونک و همکاران در آزمایشگاه شوری خاک آمریکا توسعه داده شده است. این مدل شامل حل عددی معادله ریچاردز برای بررسی حرکت آب در خاک و معادلات انتقال-انتشار برای بررسی حرکت املاح و گرما در خاک است. این مدل قادر به شبیه سازی در شرایط اشباع و غیر اشباع بوده و توانایی تخمین خصوصیات خاک به روش معکوس را دارد. در این مدل حرکت دو بُعدی آب در خاک با فرض خاک هم روند و یکنواخت با استفاده از حل عددی معادله ریچاردز به صورت زیر بیان می شود (سیمونک و همکاران، ۲۰۰۸):

1- Mualem-Van Genuchten

2- Shape factors

جعبه خاک به صورت زهکشی آزاد به مدل معرفی شد. برای تخمین اولیه پارامترهای هیدرولیکی خاک، از مدل رزتا^۱ استفاده شد و سپس مقادیر پارامترها با استفاده از روش مدل‌سازی معکوس بهینه شد. عملیات واسنجی و صحت‌سنجی مدل عددی HYDRUS-2D به روش مدل‌سازی معکوس با استفاده از ابعاد پیاز رطوبتی و رطوبت اندازه‌گیری‌شده خاک توسط بلوک‌های گچی که داخل جعبه خاک کار گذاشته شده بودند، انجام شد (محمدی و همکاران، ۱۴۰۰).

تجزیه و تحلیل آماری و ارزیابی عملکرد مدل عددی HYDRUS-2D

به منظور تجزیه و تحلیل آماری نتایج حاصل از اعمال پالس‌های مختلف آبیاری بر ابعاد پیاز رطوبتی و توزیع رطوبت در خاک از آزمون تی-استیوننت در سطح معنی‌داری ۵ درصد استفاده شد. همچنین برای ارزیابی عملکرد مدل عددی هایدروس به منظور مقایسه مقادیر برآوردی توسط مدل با مقادیر اندازه‌گیری‌شده از معیارهای آماری متداول شامل جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE)، شاخص کارایی مدل (EF) استفاده شد (مالک و همکاران، ۲۰۱۱):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (6)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| \quad (7)$$

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

در این معادلات P_i مقادیر پیش‌بینی‌شده، O_i مقادیر مشاهده‌شده، \bar{O} میانگین مقادیر مشاهده‌شده و n تعداد داده‌هاست. یک مدل بهینه دارای کم‌ترین مقدار RMSE و MAE و بیشترین مقدار EF است.

نتایج و بحث

ابعاد پیاز رطوبتی اندازه‌گیری‌شده تحت آبیاری قطره‌ای با مدیریت پالسی

حداکثر عمق و عرض خیس‌شدگی اندازه‌گیری‌شده در زمان‌های مختلف پس از شروع آبیاری به‌عنوان ابعاد پیاز رطوبتی تشکیل شده اطراف قطره‌چکان آبیاری در تیمارهای مختلف مورد بررسی در شکل ۲ ارائه شده‌است.

عمق و عرض پیاز رطوبتی با افزایش تعداد پالس‌ها و افزایش زمان قطع جریان تا حدودی افزایش یافته‌است که میزان این افزایش در عمق پیاز رطوبتی کم‌تر از عرض آن است. افزایش تعداد پالس‌های آبیاری باعث افزایش ۸ و ۱۲ درصدی عمق و عرض پیاز رطوبتی شده‌است. افزایش سه برابری مدت زمان فاز استراحت در تیمار T2P4 باعث افزایش ۱۳/۵ و ۲۰ درصدی عمق و عرض پیاز رطوبتی نسبت به تیمار T1P4 در خاک مورد آزمایش شد. با توجه به بافت خاک مورد استفاده در این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که در خاک‌هایی با بافت سنگین افزایش تعداد پالس‌ها یا افزایش زمان قطع جریان باعث افزایش هر دو بُعد عمودی و افقی جبهه رطوبتی در خاک می‌شود که میزان افزایش در جهت افقی بیشتر از جهت عمودی است که با نتایج حاصل از مطالعات سایر پژوهشگران در این زمینه مطابقت دارد (فوگات و همکاران، ۲۰۱۲؛ کوت و همکاران، ۲۰۰۳؛ کریمی و کریمی، ۱۳۹۸ و محمدبیگی و همکاران، ۱۳۹۵).

صحت‌سنجی مدل عددی HYDRUS-2D در برآورد

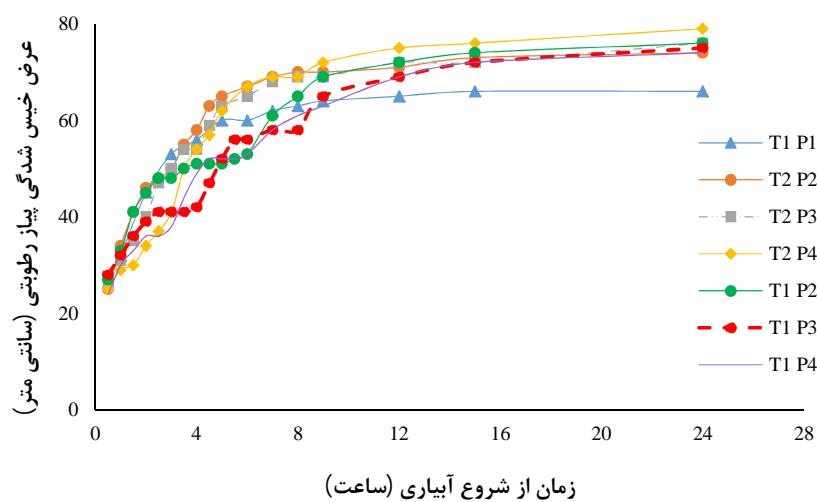
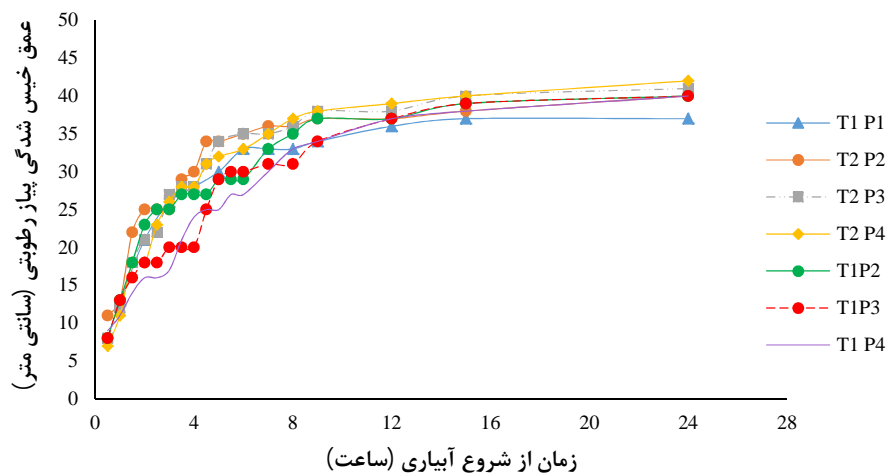
ابعاد پیاز رطوبتی

به منظور صحت‌سنجی مدل عددی، ابعاد پیاز رطوبتی شبیه‌سازی‌شده توسط مدل عددی با ابعاد پیاز رطوبتی اندازه‌گیری‌شده مورد مقایسه قرار گرفت (شکل ۳). با توجه به انطباق خط رگرسیون بر خط (۱:۱) و بالابودن ضریب تعیین محاسباتی می‌توان نتیجه گرفت که مدل عددی HYDRUS-2D ابعاد پیاز رطوبتی اطراف قطره‌چکان در شرایط آبیاری قطره‌ای با مدیریت پالسی را با دقت مناسبی برآورد می‌کند.

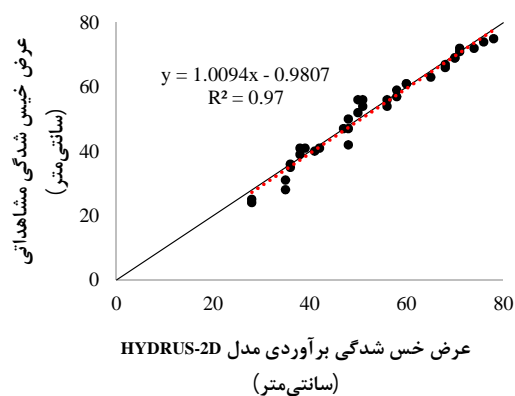
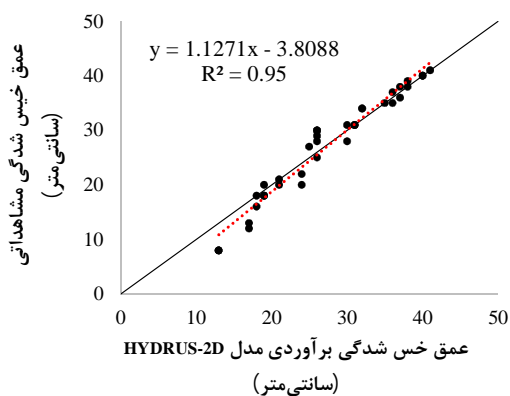
ارزیابی آماری مدل عددی HYDRUS-2D در برآورد

ابعاد پیاز رطوبتی

پس از صحت‌سنجی مدل عددی، تفاوت بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده ابعاد پیاز رطوبتی با استفاده از آزمون تی-استیوننت در سطح معنی‌داری ۵ درصد مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده‌است.



شکل ۲- روند تغییرات عمق و عرض خیس شدگی پیاز رطوبتی تیمارهای مختلف آبیاری در زمان‌های مختلف پس از شروع آبیاری



شکل ۳- رابطه بین مقادیر مشاهده‌ای و برآوردی عمق و عرض خیس شدگی پیاز رطوبتی توسط مدل HYDRUS-2D

با احتمال ۹۹/۵ درصد، تفاوت معنی‌داری بین مقادیر برآوردی توسط مدل عددی HYDRUS-2D و مقادیر اندازه‌گیری‌شده ابعاد پیاز رطوبتی وجود ندارد و دقت مدل برای برآورد ابعاد پیاز رطوبتی رضایت‌بخش است. مقدار

طبق نتایج به‌دست‌آمده، مقدار آماره t محاسباتی برای هر دو پارامتر عمق و عرض خیس شدگی برآوردشده توسط مدل عددی کمتر از مقدار آماره t بحرانی است و همچنین مقدار P-value نیز بیشتر از ۰/۰۵ و بیان‌گر این است که

۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متری از سطح خاک برای تیمارهای مورد بررسی در شکل ۵ ارائه شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، یک ساعت پس از شروع آبیاری روند تغییرات رطوبت خاک برای همه تیمارهای آزمایشی تقریباً یکسان است. پس از گذشت سه ساعت از شروع آبیاری بیشترین مقدار رطوبت مربوط به تیمار مدیریت پیوسته (T1 P1) و کم‌ترین مقدار رطوبت مربوط به تیمار (T2 P4) است. در تیمار پیوسته رطوبت به عمق بیش از ۳۰ سانتی‌متری خاک رسیده، درحالی‌که در مدیریت‌های پالسی رطوبت حداکثر تا عمق ۳۰ سانتی‌متری خاک نفوذ کرده‌است. بررسی روند تغییرات رطوبت خاک شش ساعت پس از شروع آبیاری نشان می‌دهد که رطوبت در تیمارهای پیوسته و پالسی با زمان قطع جریان یک برابر (T1) به عمق بیش از ۳۰ سانتی‌متری خاک رسیده‌است؛ درحالی‌که در تیمارهای مدیریت پالسی با زمان قطع جریان سه برابر (T2) رطوبت هنوز به زیر عمق ۳۰ سانتی‌متری خاک نفوذ نکرده‌است. ۹ ساعت پس از شروع آبیاری در همه تیمارها رطوبت به زیر عمق ۳۰ سانتی‌متری خاک رسیده‌است، به جز تیمار (T2 P4) که هنوز رطوبت بالای عمق ۳۰ سانتی‌متری خاک است. ضمن اینکه در عمق ۲۰ سانتی‌متری خاک رطوبت تیمارهای مدیریت پالسی با زمان قطع جریان یک برابر (T1) بیشتر از بقیه تیمارها است و کم‌ترین مقدار رطوبت در عمق ۲۰ سانتی‌متری خاک مربوط به تیمار مدیریت آبیاری پیوسته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پس از گذشت ۱۲ ساعت از شروع آبیاری در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک رطوبت تیمارهای مدیریت پالسی با زمان قطع جریان سه برابر بیش از تیمارهای دیگر است و در همه تیمارها رطوبت به زیر عمق ۳۰ سانتی‌متری خاک رسیده‌است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در تیمارهای مدیریت پالسی رطوبت مدت زمان بیشتری در اعماق سطحی خاک حفظ می‌شود، درحالی‌که در تیمار مدیریت پیوسته با گذشت زمان رطوبت به اعماق پایین‌تر منتقل شده و می‌تواند از دسترس ریشه گیاه خارج شود. در نهایت ۲۴ ساعت پس از شروع آبیاری توزیع رطوبت در خاک برای همه تیمارهای مورد بررسی تقریباً مشابه است. تنها اختلاف جزئی در تیمارهای مدیریت پالسی با زمان قطع جریان سه برابر (T2) دیده می‌شود که در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری

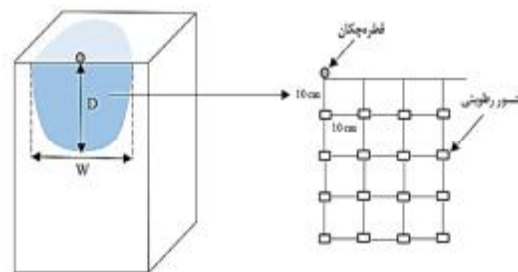
آماره RMSE شاخصی از عملکرد مدل است؛ اما میزان بیش‌برآورد یا کم‌برآورد مدل را مشخص نمی‌کند. برای کمی‌سازی دقت مقادیر برآوردی مدل در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری‌شده ابعاد پیاز رطوبتی از آماره میانگین خطای مطلق (MAE) استفاده شد. مقدار مثبت آماره MAE نشان‌دهنده بیش‌برآورد و مقدار منفی آن نشان‌دهنده کم‌برآورد مدل تجربی است.

مقدار مطلق این آماره نیز نشان‌دهنده عملکرد مدل است. نتایج نشان داد که مدل عددی HYDRUS-2D مقادیر ابعاد پیاز رطوبتی را بیش‌برآورد می‌کند. پارامتر کارایی مدل‌سازی نیز برای ارزیابی عملکرد مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد که باتوجه به نتایج به دست آمده در این پژوهش مدل عددی HYDRUS-2D دارای کارایی ۹۹ درصد است؛ بنابراین با توجه به نتایج به دست آمده، مدل عددی HYDRUS-2D در

برآورد عمق و عرض پیاز رطوبتی تحت سامانه آبیاری قطره‌ای با مدیریت پالسی در خاکی با بافت سنگین (رسی) دارای دقت قابل‌قبولی است.

توزیع رطوبت در خاک تحت مدیریت آبیاری قطره‌ای پالسی

مقدار رطوبت خاک در فواصل زمانی مشخص پس از شروع آبیاری برای تیمارهای مختلف توسط بلوک‌های گچی کار گذاشته شده در داخل جعبه خاک اندازه‌گیری شد. محل قرارگیری سنسورهای رطوبتی داخل خاک جعبه آزمایشگاهی در شکل ۴ ارائه شده‌است.



شکل ۴- شمایی از محل قرارگیری قطره‌چکان و سنسورهای رطوبتی داخل جعبه آزمایشگاهی

قرائت رطوبت در زمان‌های ۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۲۴ ساعت پس از شروع آبیاری انجام شد. روند تغییرات رطوبت اندازه‌گیری‌شده در محل قطره‌چکان و در عمق‌های ۱۰،

بیشترین رطوبت مربوط به تیمار مدیریت پیوسته (T1) است. (P1)

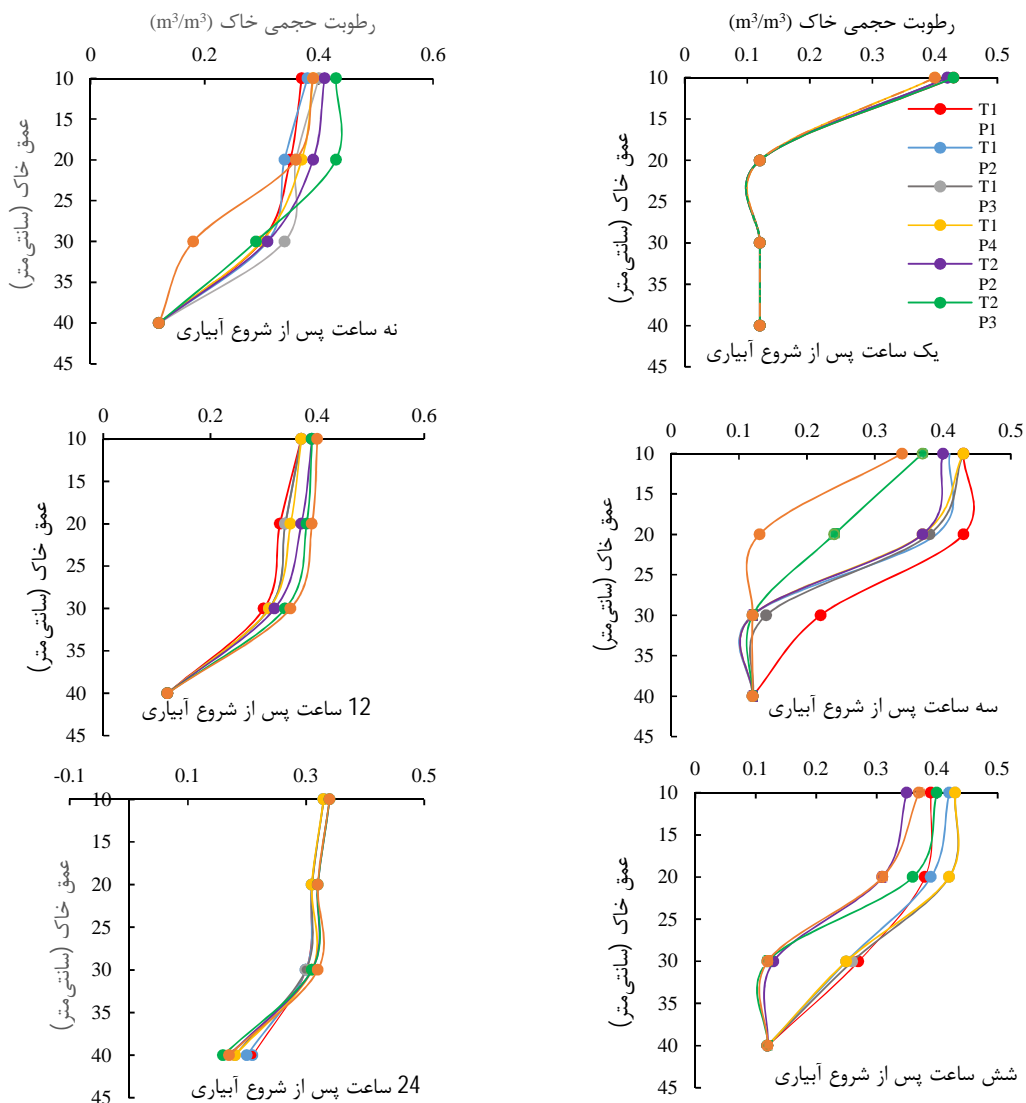
شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک تحت مدیریت آبیاری قطره‌ای پالسی توسط مدل عددی HYDRUS-2D و ارزیابی آماری مدل

شکل ۶ توزیع رطوبت شبیه‌سازی شده توسط مدل عددی و مقادیر اندازه‌گیری شده داخل جعبه خاک را شش ساعت پس از شروع آبیاری برای تیمارهای مختلف پالسی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مطابقت خوبی بین مقادیر مشاهداتی (نقاط توپر) با مقادیر برآوردی مدل عددی (خطوط ممتد) وجود دارد و مدل عددی توانسته توزیع رطوبت در خاک را تحت مدیریت آبیاری قطره‌ای پالسی با دقت مناسبی برآورد کند. مقایسه آماری بین مقادیر رطوبت شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در مدت زمان‌های مختلف پس از شروع آبیاری با استفاده از پارامترهای جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE)، شاخص کارایی مدل (EF) در جدول ۳ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در ساعات اولیه آبیاری که رطوبت سطح خاک بالا است، مقدار آماره RMSE بیشتر از مقدار آن در ساعات پایانی اندازه‌گیری است که با توجه به توزیع رطوبت در خاک رطوبت در سطح خاک کاهش یافته است. همچنین مقدار آماره EF نیز در ساعات ابتدایی شروع آبیاری کمتر از ساعات پایانی اندازه‌گیری است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که دقت مدل عددی HYDRUS-2D در برآورد رطوبت با افزایش رطوبت کاهش می‌یابد و در مقادیر رطوبت‌های پایین‌تر دارای دقت بالاتری است.

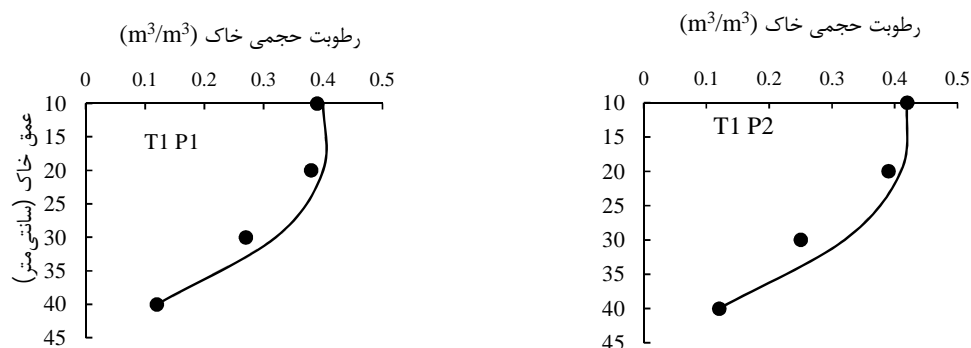
خاک رطوبت این تیمارها نسبتاً بیشتر بوده و در عمق زیر سی سانتی‌متری خاک رطوبت خاک در این تیمارها کم‌تر از بقیه است. به‌طور کلی بررسی نحوه تغییرات رطوبت خاک در زمان‌های مختلف پس از شروع آبیاری نشان می‌دهد که در ابتدای آبیاری، میزان رطوبت خاک در تیمار پیوسته بیش‌از سایر تیمارها بوده و تقریباً پس از گذشت ۶ ساعت از شروع آبیاری رطوبت خاک در این تیمار به اعماق پایین‌تر منتقل شد و رطوبت در سطح خاک کم‌تر از تیمارهای مدیریت پالسی شد. با توجه به بافت خاک مورد استفاده در این پژوهش که رسی بوده و دارای بافت سنگین است، بالابودن رطوبت خاک بیش‌از حد ظرفیت زراعی می‌تواند باعث ایجاد حالت ماندابی در سطح خاک شود که در صورت کاشت گیاه از لحاظ هوادهی ریشه و دسترسی به اکسیژن گیاه را دچار مشکل می‌سازد. درحالی‌که با اعمال مدیریت پالسی، روند تغییرات رطوبت خاک ملایم‌تر بوده و برخلاف تیمار مدیریت پیوسته که تمام حجم آب کاربردی یک‌باره وارد خاک می‌شود، تقسیم عمق آب آبیاری در بافت خاک سنگین باعث شده است فرصت کافی برای توزیع رطوبت در خاک فراهم شده و رطوبت بخش سطحی خاک به بیش از حد ظرفیت زراعی نرسد. در نتیجه استفاده از مدیریت پالسی با زمان قطع جریان بیشتر، شرایط مطلوب‌تری را از لحاظ رشد ریشه و هوادهی آن نسبت به مدیریت پیوسته برای گیاه فراهم می‌کند که با نتایج حاصل از پژوهش مدن و همکاران (۲۰۱۸) مطابقت دارد. همچنین بررسی تغییرات رطوبت در عمق ۴۰ سانتی‌متری خاک نیز نشان می‌دهد که افزایش تعداد پالس‌های آبیاری و افزایش زمان قطع جریان باعث کاهش حرکت عمودی آب در خاک شده است و در نتیجه کم‌ترین میزان رطوبت در عمق ۴۰ سانتی‌متری خاک مربوط به تیمار (T2 P4) و

جدول ۳- مقایسه آماری مقادیر رطوبت شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده تیمارهای مورد بررسی

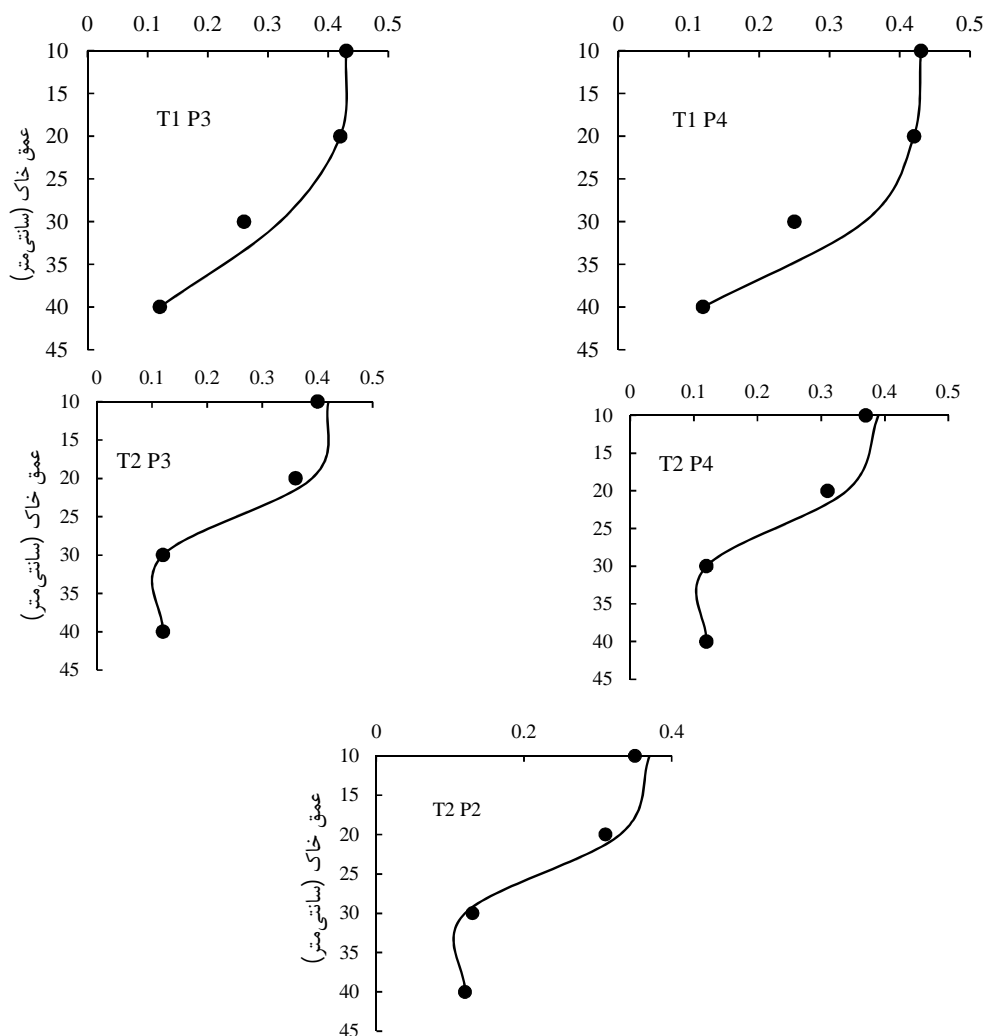
زمان از شروع آبیاری (ساعت)	یک	سه	شش	نه	۱۲	۲۴
RMSE	۰/۰۴۹	۰/۰۲۹	۰/۰۳۰	۰/۰۱۷	۰/۰۱۳	۰/۰۱۸
MAE	۰/۰۱۵	۰/۰۱۸	۰/۰۱۷	۰/۰۱۳	۰/۰۰۹	۰/۰۱۴
EF	۰/۸۶	۰/۹۴	۰/۹۴	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۱



شکل ۵- توزیع رطوبت خاک در محل قطره‌چکان در زمان‌های مختلف برای تیمارهای مورد بررسی



شکل ۶- مقایسه توزیع رطوبت خاک برآوردی (خط ممتد) توسط مدل عددی HYDRUS-2D و مشاهداتی (نقاط توپر) در تیمارهای مختلف شش ساعت پس از شروع آبیاری



ادامه شکل 6- مقایسه توزیع رطوبت خاک برآوردی (خط ممتد) توسط مدل عددی HYDRUS-2D و مشاهداتی (نقاط توپر) در تیمارهای مختلف شش ساعت پس از شروع آبیاری

نتیجه‌گیری

قطره‌چکان آبیاری و مقایسه آن با مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل عددی HYDRUS-2D حاکی از دقت قابل قبول مدل عددی بود؛ بنابراین می‌توان از مدل عددی HYDRUS-2D برای شبیه‌سازی جبهه رطوبتی حاصل از آبیاری قطره‌ای تحت مدیریت‌های مختلف پالسی برای طراحی، برنامه‌ریزی و مدیریت صحیح سیستم آبیاری قطره‌ای پالسی استفاده کرد. همچنین بررسی نتایج مربوط به نحوه توزیع رطوبت و ابعاد پیاز رطوبتی تشکیل شده در تیمارهای مختلف مورد آزمایش نشان داد که افزایش تعداد پالس‌های آبیاری و زمان قطع جریان باتوجه به بافت خاک مورد آزمایش (سنگین) باعث شد ضمن افزایش ابعاد پیاز رطوبتی که بیشتر در جهت افقی صورت گرفت، توزیع رطوبت در خاک نیز مناسب‌تر باشد و در ساعات اولیه

باتوجه به اهمیت مطابقت پیاز رطوبتی تشکیل شده اطراف قطره‌چکان آبیاری با الگوی رشد ریشه در خاک در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای، راهکارهای مختلفی از جمله استفاده از مدیریت پالسی برای ایجاد این مطابقت توسط پژوهشگران پیشنهاد شده‌است. در پژوهش حاضر اثر مدیریت‌های مختلف پالسی و زمان‌بندی قطع جریان بر توزیع رطوبت و ابعاد جبهه رطوبتی در یک خاک رسی تحت آبیاری قطره‌ای مورد بررسی قرار گرفت. عملکرد مدل عددی HYDRUS-2D نیز برای شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک رسی و ابعاد جبهه رطوبتی تحت آبیاری قطره‌ای با مدیریت پالسی ارزیابی شد. بررسی نحوه توزیع رطوبت در خاک و ابعاد جبهه رطوبتی تشکیل شده اطراف

عددی HYDRUS-2D. تحقیقات آب و خاک

ایران. ۵۲(۷): ۱۹۰۳-۱۹۱۳.

5. Assouline S. Möller M. Cohen S. Ben-Hur M. Grava A. Narkis K. and Silber, A. 2006. Soil-plant system response to pulsed drip irrigation and salinity: Bell pepper case study. *Soil Science Society of America Journal*. 70(5): 1556-1568.
6. Bakeer G. A. A. El-Ebabi F. G. El-Saidi M. T. and Abdelghany A. R. E. 2009. Effect of pulse drip irrigation on yield and water use efficiency of potato crop under organic agriculture in sandy soils. *Misr Journal of Agricultural Engineering*. 26(2): 736-765.
7. Batchelor C. Lovell C. and Murata M. 1996. Simple microirrigation techniques for improving irrigation efficiency on vegetable gardens. *Agricultural Water Management*. 32(1): 37-48.
8. Bordovsky J. P. and Porter D. 2003. Cotton response to pre-plant irrigation level and irrigation capacity using spray, LEPA, and subsurface drip irrigation. In 2003 ASAE Annual Meeting (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
9. Colaizzi P. D. Schneider A. D. Evett S. R. and Howell T.A. 2004. Comparison of SDI, LEPA, and spray irrigation performance for grain sorghum. *Transactions of the ASAE*. 47(5): 1477.
10. Cote C. M. Bristow K. L. Charlesworth P.B. Cook F.J. and Thorburn P.J. 2003. Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. *Irrigation Science* 22(3-4): 143-156.
11. Eid A. R. Bakry B. A. and Taha M. H. 2013. Effect of pulse drip irrigation and mulching systems on yield, quality traits and irrigation water use efficiency of soybean under sandy soil conditions.
12. Elmaloglou S. and Diamantopoulos E. 2008. The effect of intermittent water application by surface point sources on the soil moisture dynamics and on deep percolation under the root zone. *Computers and electronics in agriculture*. 62(2): 266-275.
13. Elnesr M. N. and Alazba A. A. 2015. The effects of three techniques that change the wetting patterns over subsurface drip-irrigated potatoes. *Spanish journal of agricultural research*. 13(3): 20.
14. Gärdenäs A. . Hopmans J. W. Hanson B. R. and Šimůnek J. 2005. Two-dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios under micro-irrigation. *Agricultural water management*. 74(3): 219-242.
15. Kandelous M. M. Šimůnek J. Van Genuchten M. T. and Malek K. 2011. Soil

آبیاری با توجه به تقسیم عمق آب آبیاری و سنگین‌بودن بافت خاک، رطوبت بخش سطحی خاک به بیش از حد ظرفیت زراعی نرسد و شرایط اشباع و ماندابی در سطح خاک ایجاد نشود؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در خاک‌هایی با بافت سنگین، با اعمال مدیریت پالسی و تقسیم عمق آب آبیاری برخلاف تیمار مدیریت پیوسته که حجم آب کاربردی به یکباره وارد خاک می‌شود، شرایط مطلوب‌تری از نظر توزیع رطوبت، هوادهی و اکسیژن برای رشد ریشه گیاه فراهم می‌شود. در راستای تحقیق انجام‌شده، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های بعدی علاوه بر بررسی توزیع رطوبت در بافت‌های خاک مختلف به بررسی نحوه توزیع شوری تحت تیمارهای مختلف آبیاری قطره‌ای پالسی و تأثیر آن بر رشد گیاه نیز پرداخته شود.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

منابع

۱. افراسیاب پ. دلبری م. و جعفری ح. ۱۳۹۵. بررسی اثرات مقادیر مختلف آبیاری، تراکم بوته و آرایش کاشت در روش آبیاری قطره‌ای-نواری بر عملکرد، اجزای عملکرد و کارایی مصرف آب ذرت دانه‌ای در اسلام‌آباد غرب. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*. ۴۷(۴): ۷۳۱-۷۴۱.
۲. کریمی ب. و کریمی ن. ۱۳۹۸. ارزیابی مساحت خیس‌شدگی پیاز رطوبتی در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی با جریان پیوسته و پالسی. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک (علوم کشاورزی و منابع طبیعی)*. ۲۶(۵): ۱-۱۹.
۳. محمدیگی آ. میرزایی ف. و 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.
۴. محمدی س. میرلطیفی س.م. دهقانی سانجیح. حاجی‌راد ا. و همایی م. ۱۴۰۰. مدل‌سازی ابعاد پیاز رطوبتی خاک تحت سامانه آبیاری قطره‌ای پالسی به روش آنالیز ابعادی و مقایسه با مدل

- antecedent water. *Soil Science Society of America Journal*. 74(6): 1886-1896.
27. Vyrilas P. and Sakellariou-Makrantonaki M. 2005. Intermittent water application through surface and subsurface drip irrigation. In 2005 ASAE Annual Meeting (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
 16. Karmeli D. and Peri G. 1974. Basic principles of pulse irrigation. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*. 100(3): 309-319.
 17. Li J. Zhang J. and Rao M. 2004. Wetting patterns and nitrogen distributions as affected by fertigation strategies from a surface point source. *Agricultural Water Management*. 67(2): 89-104.
 18. Liu X.F. Wan S.Q. Feng L. Jiang S.F. Kang Y.H. and Liu S.P. 2015. Response of potato yield and irrigation water use efficiency under subsurface drip irrigation at various lateral depths. *Journal of Irrigation and Drainage*. 34: 63-66.
 19. Madane D. A. Mane M. S. Kadam U. S. and Thokal R. T. 2018. Effect of pulse irrigation (drip) through different irrigation levels on moisture distribution pattern and yield of white onion (*Alium cepa L.*).
 20. Malek K. and Peters R. T. 2011. Wetting pattern models for drip irrigation: new empirical model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 137(8): 530-536.
 21. Pelletier G. and Tan C. S. 1993. Determining irrigation wetting patterns using time domain reflectometry. *HortScience*. 28(4): 338-339.
 22. Phene C. J. Davis K. R. Hutmacher R. B. and McCormick R. L. 1986, August. Advantages of subsurface irrigation for processing tomatoes. In II International Symposium on Processing Tomatoes, XXII IHC 200 (pp. 101-114).
 23. Phogat V. Mahadevan M. Skewes M. and Cox J. W. 2012. Modelling soil water and salt dynamics under pulsed and continuous surface drip irrigation of almond and implications of system design. *Irrigation science*. 30(4): 315-333.
 24. Šimůnek J. and De Vos J. A. 1999. Inverse optimization, calibration and validation of simulation models at the field scale. Modelling transport processes in soils at various scales in time and space. Wageningen Pers, Wageningen, the Netherlands. 431-445.
 25. Šimůnek J. and van Genuchten M. T. 2008. Modeling nonequilibrium flow and transport processes using HYDRUS. *Vadose Zone Journal*. 7(2): 782-797.
 26. Skaggs T. H. Trout T. J. and Rothfuss Y. 2010. Drip irrigation water distribution patterns: effects of emitter rate, pulsing, and

