

تغییرات پروفیل رطوبتی خاک در شرایط کاربرد بیوچار و آب دارای آلودگی میکروبی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی

فروغ عباسی تشنیزی^{۱*}، مهدی قبادی‌نیا^۲، فریبرز عباسی^۳ و عبدالرحمن معتمدی^۴

چکیده

بررسی چگونگی حرکت و توزیع آب و همچنین استفاده از ابزارها و روش‌های کارآمد برای حفظ آب در خاک یک ضرورت در شرایط کمبود آب در جامعه است. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر مدیریت آبیاری در شرایط کاربرد دبی‌های متفاوت و افزودن بیوچار به خاک در آبیاری قطره‌ای زیر سطحی بر توزیع رطوبت در خاک هنگام استفاده از آب‌های دارای آلودگی باکتریایی انجام شد. این پژوهش در قالب ۱۸ تیمار، شامل دو دبی قطره‌چکان (۲ و ۴ لیتر بر ساعت)، ۳ سطح ضربت تخلیه مجاز رطوبتی (۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد) و ۳ سطح بیوچار (صفر، ۰/۵ و یک درصد) در لایسی‌مترهایی به ابعاد ۱۷×۶۰×۷۰ سانتی‌متر و در شرایط استفاده از آبیاری قطره‌ای زیرسطحی اجرا شد. سه آبیاری با استفاده از آب حاوی باکتری فکال کلیفرم روی هر تیمار برحسب ضربت تخلیه مجاز تعریف شده انجام و در فواصل زمانی معین رطوبت خاک با استفاده از دستگاه رطوبت‌سنج قرائت شد. همچنین مدل HYDRUS-2D/3D برای شبیه‌سازی توزیع رطوبت به کار برده شد. نتایج نشان داد که استفاده از بیوچار سبب تغییر منحنی مشخصه رطوبتی در نقاط بین رطوبت اشباع و ظرفیت زراعی خاک لوم رسی شد؛ اما افزودن هیچ‌یک از دو سطح نیم و یک درصد بیوچار تغییری در نقطه پژمردگی دائم خاک ایجاد نکرد. افزودن یک و ۰/۵ درصد بیوچار به خاک به ترتیب منجر به افزایش ۴ و ۱۱ درصدی نگهداشت آب در خاک نسبت به تیمار بدون بیوچار شد. همچنین کاربرد بیوچار سبب کاهش ابعاد افقی جبهه پیشروی آب در هر دو دبی شد. افزودن بیوچار دور آبیاری را در مقایسه با تیمارهای بدون بیوچار افزایش داد. اگرچه در شرایط استفاده از بیوچار، مقدار رطوبت سطح خاک و گستردگی آن روی سطح خاک کمتر از تیمارهای کنترل بود، اما این اختلاف معنی‌دار نبود. بررسی اثر ضربت تخلیه مجاز رطوبتی نیز نشان داد که مقدار ۳۰ درصد این ضربت، یا کوتاه کردن دور آبیاری، از نوسانات رطوبتی در لایه بالای قطره‌چکان نسبت به تیمار با ضربت تخلیه مجاز رطوبتی حدود ۱۰ درصد کاسته و حرکت آب در راستای عمودی را نیز به دلیل تأثیر بیشتر نیروی ثقل، افزایش داد. مدل HYDRUS-2D/3D توانایی بالایی در شبیه‌سازی رطوبت در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی داشت. استفاده از بیوچار در نواحی خشک و گرفتار کمبود آب، می‌تواند ضمن کاهش آلودگی سطح به واسطه نگهداشت بیشتر رطوبت و کاهش میزان تبخیر کمک شایانی به کشاورزی کند. قطره‌چکان‌هایی با دبی زیاد، به دلیل گسترش ناحیه اشباع اطراف قطره‌چکان، می‌توانند برای گیاهان با ریشه کوتاه استفاده شوند. مدل HYDRUS-2D/3D به دلیل دقت آن در شبیه‌سازی رطوبت در شرایط مختلف، می‌تواند به عنوان یک ابزار برای تعیین مناسب‌ترین برنامه آبیاری به کار برده شود.

واژه‌های کلیدی: توزیع رطوبت، جبهه پیشروی، دبی، ماده اصلاح‌کننده.

ارجاع: عباسی تشنیزی ف.، قبادی‌نیا م.، عباسی ف. و معتمدی ع. ۱۴۰۱. تغییرات پروفیل رطوبتی خاک در شرایط کاربرد بیوچار و آب دارای آلودگی میکروبی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی. مجله پژوهش آب ایران. ۴۴: ۱۱۳-۱۲۷. DOI: <https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2022.10156.2373>

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۳- استاد، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی کرج.

۴- استادیار بازنشسته، گروه گیاهپزشکی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

* نویسنده مسئول: f.abbasi@stu.sku.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۰۹

مقدمه

پساب یک منبع آبی مهم و دائمی برای کشاورزی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود (ژانگ و شن، ۲۰۱۷). باکتری‌های موجود در پساب مانند ایشریشیاکولی، سالمونلا، شیگلا، کمپیلوباکتری‌ها و لیستریا می‌توانند در خاک یا سطح محصولات کشاورزی باقی بمانند و از طریق انتقال به انسان، باعث شیوع بیماری شوند. اهمیت این مسئله در سال ۲۰۰۶ در ایالات متحده آمریکا و به‌دنبال مصرف اسفناج آلوده به باکتری ایشریشیاکولی که منجر به بیماری ۲۰۵ نفر و مرگ ۳ نفر در ۲۶ ایالت این کشور شد، مشخص شد (لی و ون، ۲۰۱۶). استفاده از پساب برای آبیاری، در صورتی که به شیوه صحیح انجام نشود، می‌تواند موجب گسترش آلودگی در سطح خاک شود (نشریه ۵۳۵، ۱۳۸۹).

برای کاهش آلودگی سطح خاک روش‌های مدیریتی مختلفی مانند آبیاری قطره‌ای زیرسطحی مورد استفاده قرار گرفته‌است. ارون و همکاران (۱۹۹۲) با به‌کاربردن پساب در مزارع آزمایشی واقع در فلسطین اشغالی به این نتیجه رسیدند که آلودگی سطوح خاک و گیاه، هنگام استفاده از سیستم‌های آبیاری قطره‌ای و بارانی به‌ترتیب حداقل و حداکثر خواهد بود. سیستم آبیاری قطره‌ای به‌دلیل عدم‌پخش پاتوژن‌ها در هوا، نبود رواناب و امکان کنترل نفوذ عمقی مناسب‌ترین و مطمئن‌ترین سیستم برای کاربرد پساب است (عابدی کوپایی و بختیاری‌فر، ۲۰۰۴؛ کاپرا و سیکالون، ۲۰۰۴). حشمتی و همکاران (۱۳۹۶) از صفحات ژئوکمپوزیت به‌عنوان جایگزین قطره‌چکان در سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی استفاده و بیان کردند صفحات آبدۀ ژئوکمپوزیت باعث کاهش سطح خیس‌شده زمین و افزایش حداکثر سطح خیس‌شده پروفیل خاک شده‌است. کمپ (۱۹۹۸) عمق‌های ۲۰، ۲۵ و ۳۰ سانتی‌متر را از معمول‌ترین عمق‌های نصب قطره‌چکان در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی برای گیاهان مختلف زراعی، چمن و درختان گزارش کرد. سانتوس و همکاران (۲۰۱۶) نیز در پژوهش خود عمق ۲۰ سانتی‌متر را بهترین عمق نصب قطره‌چکان در خاک لومی هنگام کاربرد پساب به لحاظ مسائل محیط‌زیستی عنوان کردند.

استفاده از موادی که سبب بهبود ظرفیت نگهداشت آب خاک شوند نیز می‌تواند سطح خیس‌شده خاک را کاهش دهد. بیوچار یک ماده کربنی ناهمگن، بسیار متخلخل،

دارای سطح ویژه بالا و جرم مخصوص ظاهری پایین است که از تجزیه ترموشیمیایی زیست‌توده‌های آلی مانند ضایعات گیاهی، خرده‌های چوب، فاضلاب شهری یا کود در یک محیط فاقد اکسیژن یا دارای اکسیژن کم به‌دست می‌آید (لمن و همکاران، ۲۰۱۱). کیفیت بیوچار و کاربرد آن برای کشاورزی با دمای تولید و نوع مواد آلی یا همان زیست توده در ارتباط است (طارق و همکاران، ۲۰۱۹). بیوچار می‌تواند روی نگهداشت آب خاک به‌وسیله کاهش وزن مخصوص ظاهری، تغییر اندازه منافذ و تغییر سطح ویژه خاک اثر بگذارد (وانگ و همکاران، ۲۰۱۹). آبل و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کردند که افزودن بیوچار سبب بهبود منافذ خاک در دامنه ۰/۲ تا ۱۰ میکرومتر (منافذ متوسط و درشت) و گاهی تا ۵۰ میکرومتر می‌شود. ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۸) با بررسی کاربرد شلتوک برنج (صفر، ۱ و ۲ درصد) بر الگوی خیس‌شدگی خاک رس سیلتی در آبیاری قطره‌ای گزارش کردند که این امر سبب کاهش پیشروی افقی و افزایش پیشروی عمودی و افزایش رطوبت خاک در دامنه ظرفیت زراعی تا نقطه پژمردگی شد.

شکل و ابعاد الگوی پیشروی آب اطراف قطره‌چکان در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی وابسته به دبی و ویژگی‌های هیدرولیکی خاک است، از همین‌رو برای شناخت دقیق‌تر حرکت آب و ابعاد جبهه رطوبتی و همزمان کاهش هزینه‌ها و زمان برای انجام چنین پژوهش‌هایی، چندین مدل عددی و تحلیلی توسعه داده شده‌است. HYDRUS-2D/3D برنامه‌ای است که در سال‌های اخیر به‌شدت مورد توجه قرار گرفته‌است. این مدل از سال‌های گذشته برای شبیه‌سازی انتقال آب و املاح در محیط متخلخل با درجه اشباع متغیر در هندسه‌های مختلفی از خاک و روش‌های متفاوت آبیاری استفاده می‌شود. HYDRUS می‌تواند جریان آب و املاح را در یک صفحه افقی و عمودی و به‌صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی کند (سیمونک و همکاران، ۲۰۱۴). شبیه‌سازی ابعاد جبهه رطوبتی و جریان آب در این مدل با استفاده از معادله ریچاردز انجام می‌شود. پژوهشگران زیادی به بررسی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و شبیه‌سازی آن با استفاده از HYDRUS دو‌بعدی پرداخته‌اند. پرووانزانو (۲۰۰۷) گزارش کرد که HYDRUS دو‌بعدی در تخمین جبهه رطوبتی با استفاده از قطره‌چکان نصب‌شده در عمق ۲۰ سانتی‌متری خاک لوم شنی فرایند

بیوچار بر توزیع رطوبت و حرکت آب در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی انجام شد. خاک استفاده‌شده در این آزمایش از مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی تهیه، هواخشک و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. ویژگی‌های خاک مانند بافت خاک به روش هیدرومتری (جی و بادر، ۱۹۸۶)، وزن مخصوص ظاهری به روش سیلندر با حجم مشخص (بلک، ۱۹۸۶)، اسیدیته و هدایت هیدرولیکی خاک در نسبت حجمی ۱:۵ (خاک به آب) (رودوس، ۱۹۹۶؛ سیمس، ۱۹۹۶) و به‌وسیله دستگاه pHسنج و ECمتر اندازه‌گیری شد. برخی از مشخصات خاک و آب مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۱ و ۲ نشان داده شده‌است.

بیوچار مورد استفاده در این پژوهش از چوب نرم (Soft Wood) آلو و انار و در دمای پیرولیز ۴۵۰-۵۰۰ درجه سانتی‌گراد (دمای متوسط) به‌صورت تجاری تهیه و برای استفاده در پژوهش از الک ۲ میلی‌متری عبور داده (وانگ و همکاران، ۲۰۱۹) و به نسبت صفر، ۰/۵ و ۱ درصد با خاک مخلوط شد (نمادهای B0، B0.5 و B1). برای آن‌که شرایط لایسی‌مترها مشابه خاک مزرعه باشد خاک به‌صورت لایه‌به‌لایه و مطابق با وزن مخصوص ظاهری خاک مزرعه درون لایسی‌مترها ریخته شد.

نفوذ و جبهه رطوبتی اطراف یک قطره‌چکان زیرسطحی را به‌خوبی شبیه‌سازی کرده‌است. گازوانی و همکاران (۲۰۱۹) با ارزیابی عملکرد HYDRUS دو بُعدی برای شبیه‌سازی اثر مدیریت‌های مختلف آبیاری روی گیاه سبب‌زمینی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، این مدل را ابزاری به نسبت دقیق برای برآورد رطوبت اطراف قطره‌چکان معرفی کردند. با توجه به اینکه میزان خیس‌شدگی سطح خاک و گستردگی پروفیل رطوبتی در شرایط استفاده از پساب، یکی از عوامل تأثیرگذار بر میزان آلودگی باکتریایی خاک است؛ بنابراین پژوهش حاضر به بررسی اثر سطوح مختلف بیوچار، دبی قطره‌چکان و مدیریت آبیاری بر شکل پروفیل رطوبتی و شبیه‌سازی آن می‌پردازد. ضمن اینکه تاکنون پژوهش زیادی در ارتباط با تأثیر بیوچار بر پروفیل رطوبتی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نیز انجام نشده‌است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در بهار و تابستان ۱۳۹۸ روی خاکی با بافت لوم رسی و در لایسی‌مترهایی به ابعاد ۱۷×۶۰×۷۰ سانتی‌متر در محوطه بیرونی آزمایشگاه آبیاری دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد و با هدف بررسی تأثیر دبی و

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده

عمق نمونه‌برداری (cm)	بافت خاک	شن (درصد)	سیلت (درصد)	رس (درصد)	EC (dS m ⁻¹)	pH	جرم مخصوص ظاهری (g cm ⁻³)
۰-۳۰	لوم رسی	۳۶/۵	۳۵/۶	۲۷/۹	۰/۱۱۲	۸/۰۷	۱/۳۱

جدول ۲- برخی ویژگی‌های آب مورد استفاده

EC (dS m ⁻¹)	pH	TSS (mg l ⁻¹)	TDS (mg l ⁻¹)	فکال کلیفرم (CFU ml ⁻¹)
۰/۳۲	۷/۶	۰	۴۵	۰

بازه‌های زمانی ۳۰ دقیقه‌ای و یک‌ساعته ثبت و اندازه‌گیری شد. منحنی مشخصه رطوبتی خاک با استفاده از نمونه‌های خاک اشباع‌شده و دستگاه صفحات فشاری تعیین شد.

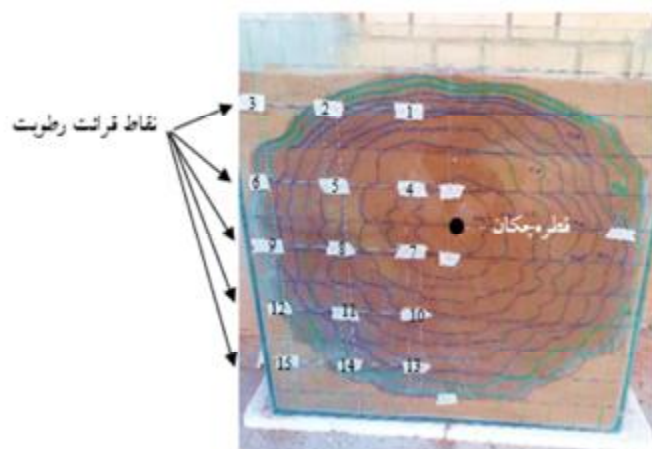
آب آبیاری

برای تهیه آب آبیاری حاوی باکتری، چند کلونی از باکتری فکال کلی‌فرم موجود در فاضلاب خام تصفیه‌خانه فاضلاب شهرکرد پس از کشت روی محیط کشت MacConkey آگار با استفاده از آنس استریل جداسازی، در محیط نوترینت برات ریخته و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۴۴ درجه سانتی‌گراد در انکوباتور رشد داده شد (گابر و همکاران،

لوله قطره‌چکان‌دار از نوع قطره‌چکان‌های درون خط و تنظیم‌کننده فشار با دو دبی ۲ و ۴ لیتر بر ساعت (Q2 و Q4)، در عمق ۲۰ سانتی‌متری (گازوانی و همکاران، ۲۰۱۹؛ سانتوس و همکاران، ۲۰۱۶؛ لی و ون، ۲۰۱۶) و در وسط لایسی‌متر قرار گرفت. برای حداقل کردن جریان ترجیحی، دیواره داخلی لایسی‌مترها با گریس پوشش داده شد. روی نیمه دیواره لایسی‌متر سوراخ‌هایی به‌صورت یک شبکه منظم به‌منظور اندازه‌گیری رطوبت خاک با استفاده از دستگاه رطوبت‌سنج SM300 تعبیه و میزان رطوبت در زمان‌های مختلف ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۲۴۰، ۳۰۰ دقیقه، ۲۴ و ۴۸ ساعت و همچنین قبل از شروع هر آبیاری قرائت شد (شکل ۱). ابعاد جبهه رطوبتی در نخستین آبیاری در

$CFU\ mL^{-1}$ به دست آمد (دالامه، ۲۰۱۶؛ سانگ و همکاران، ۲۰۰۶).

۲۰۰۶). پس از این مرحله برای هر آبیاری با توجه به حجم مورد نیاز آب آبیاری مقدار مشخصی از این محلول در آب آبیاری ریخته شد؛ به گونه‌ای که غلظت باکتری $\times 10^5$



شکل ۱- نمایی از لایسی متر مورد استفاده در پژوهش

تعریف شده برای هر تیمار، جریان آب ورودی به لایسی متر قطع شد.

شبیه‌سازی با مدل HYDRUS

HYDRUS مدلی است که با استفاده از روش عددی اجزای محدود، معادله ریچاردز را برای شبیه‌سازی جریان آب در شرایط مختلف محیط متخلخل به کار می‌برد. محدوده شبیه‌سازی برای این پژوهش مستطیلی به عرض ۳۵ و ژرفای ۵۵ سانتی‌متر، شامل ۱۳۵۱ گره لحاظ و خط لوله قطره‌چکان‌دار به عنوان یک نیم‌دایره با قطر ۲ سانتی‌متر در عمق ۲۰ سانتی‌متری در نظر گرفته شد. مقدار رطوبت اولیه (شرایط اولیه) خاک بر حسب شرایط رطوبتی لایسی مترها در ابتدای هر آزمایش به مدل معرفی و شرایط مرزی نیز به صورت شرایط اتمسفری در سطح خاک، دبی متغیر در محل قطره‌چکان و جریان صفر در مرزهای اطراف محدوده شبیه‌سازی شده تعریف شد. برای بررسی و مقایسه مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل HYDRUS از آماره‌های جذر میانگین مجموع مربعات خطا (RMSE)، ضریب تعیین (R^2) و ضریب جرم باقی‌مانده (CRM) استفاده شده است. مقادیر کمتر RMSE و مقادیر نزدیک‌تر به یک برای R^2 نشانه عملکرد خوب مدل در شبیه‌سازی است (کوئی و همکاران، ۲۰۱۷). برای محاسبه این آماره‌ها از معادلات زیر استفاده شد:

تعیین زمان آبیاری

ضریب تخلیه مجاز رطوبتی (MAD) در سه سطح ۵۰، ۳۰، و ۷۰ درصد (M30، M50 و M70) تعیین‌کننده زمان انجام آبیاری‌های دوم و سوم برای هر تیمار بود. θ_{MAD} و آب مورد نیاز آبیاری به ترتیب از معادلات (۱) و (۲) محاسبه شدند (مارتین و همکاران، ۱۹۹۰):

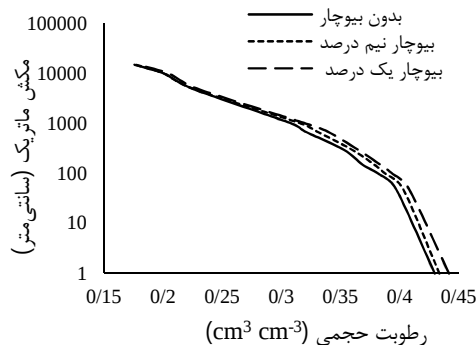
$$q_{MAD} = q_{fc} - (q_{fc} - q_{pwp}) \times MAD \quad (1)$$

$$d = (q_{fc} - q_{MAD}) \times D \quad (2)$$

در این معادلات θ_{fc} و θ_{pwp} به ترتیب رطوبت حجمی خاک در نقطه ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم ($cm^3\ cm^{-3}$)؛ MAD ضریب تخلیه مجاز رطوبتی؛ d، عمق آبیاری (میلی‌متر)؛ و D عمق خاک (میلی‌متر) است. در آبیاری اول همه نمونه‌ها تا حد ظرفیت زراعی آبیاری شدند و آبیاری‌های دوم و سوم بر حسب ضریب تخلیه مجاز رطوبتی مربوط به آن تیمار انجام شد.

جریان آب در طول مدت آزمایش با استفاده از پمپ برقرار و برای تنظیم فشار قطره‌چکان از یک عدد فشارسنج که بعد از پمپ نصب شده بود، استفاده شد. از یک مخزن مدرج، به عنوان مخزن آب آبیاری استفاده و لوله ورودی پمپ در این مخزن قرار داده شد. به وسیله فشارسنج نصب‌شده در مسیر لوله خروجی پمپ، فشار جریان روی یک اتمسفر تنظیم و جریان اضافی آب آبیاری به مخزن برگردانده شد. پس از رسیدن سطح آب مخزن به میزان

خاک سبب افزایش رطوبت ظرفیت زراعی و در نتیجه آب قابل دسترس می‌شود.



شکل ۲- منحنی مشخصه رطوبتی خاک لوم رسی تحت تأثیر سه سطح بیوچار

تغییر نکردن رطوبت نقطه پژمردگی دائم در هیچ یک از تیمارهای مورد بررسی از دیگر نتایج این پژوهش بود. نسیمی و همکاران (۱۳۹۸) نیز در پژوهشی با کاربرد مقادیر ۰/۵، ۱ و ۲ درصد بیوچار برگ نخل در خاک لوم رسی شنی بیان کردند که بیوچار سبب افزایش رطوبت ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی دائم و در نتیجه آب قابل دسترس خاک شده است. آن‌ها علت این مسئله را به متخلخل شدن و افزایش منافذ خاک به دنبال کاربرد بیوچار نسبت دادند. بیوچار دارای بازه‌ای از منافذ ریز، متوسط و درشت است؛ به همین دلیل با افزایش منافذ درشت و متوسط خاک روی نقاط رطوبتی در مکش‌های کم (ظرفیت زراعی و رطوبت اشباع) اثر می‌گذارد و چنانچه سبب بهبود منافذ ریز خاک شود، میزان رطوبت نقطه پژمردگی دائم را تحت تأثیر قرار می‌دهد (چان و ژو، ۲۰۰۹). این نتایج نشان می‌دهد که افزودن بیوچار می‌تواند با تغییر منافذ و پارامترهای هیدرولیکی خاک، روی توزیع رطوبت، الگوی خیس‌شدگی و نگهداشت رطوبت در خاک اثر بگذارد.

توزیع رطوبت در خاک

جدول ۳، تجزیه واریانس اثر دبی، بیوچار، فاصله افقی (X) و عمق (Y) را بر توزیع رطوبت خاک نشان می‌دهد. مطابق با این جدول مشاهده می‌شود اثر همه تیمارها بر توزیع رطوبت خاک در سطح پنج درصد معنی‌دار است؛ اما اثر متقابل همه تیمارها معنی‌دار نبود.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad (4)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (5)$$

که در آن، O_i ، P_i و $\bar{O}$ به ترتیب مقادیر مشاهده، برآورد و متوسط مقادیر مشاهده شده در زمان t ام و n تعداد داده‌ها است. تحلیل‌های آماری این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار STATISTICA در قالب طرح فاکتوریل و مقایسه میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح معنی‌داری ۵ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

تأثیر بیوچار بر منحنی مشخصه رطوبتی خاک

شکل ۲، منحنی مشخصه رطوبتی برای خاک فاقد بیوچار، خاک مخلوط با ۰/۵ و یک درصد بیوچار را نشان می‌دهد. رطوبت ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم برای خاک فاقد بیوچار به ترتیب برابر با ۳۵/۳ و ۱۷/۷ درصد حجمی؛ برای تیمار ۰/۵ درصد بیوچار با ۲ درصد افزایش در رطوبت ظرفیت زراعی به ۳۶/۱ درصد رسید و برای رطوبت نقطه پژمردگی دائم تقریباً بدون تغییر باقی ماند. مقدار رطوبت ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم در تیمار یک درصد بیوچار نیز به ترتیب با افزایش ۶ و ۱/۱ درصدی به ۳۷/۴ و ۱۷/۹ درصد افزایش یافت.

افزودن یک و ۰/۵ درصد بیوچار به خاک مورد استفاده در این پژوهش به ترتیب منجر به افزایش ۴ و ۱۱ درصدی نگهداشت آب در خاک نسبت به تیمار بدون بیوچار شد. احمد و همکاران (۲۰۱۴) بیان کردند که افزودن بیوچار به خاک می‌تواند سبب افزایش نگهداشت رطوبت خاک تا ۱۸ درصد نیز شود. افزایش نگهداشت آب با بیوچار می‌تواند به دلیل آبریزی، سطح ویژه (احمد و همکاران، ۲۰۱۴) و تخلخل بالای ذرات بیوچار (وانگ و همکاران، ۲۰۱۹) باشد. پژوهشگرانی مانند آلتدورف و همکاران (۲۰۱۹)، ژو و همکاران (۲۰۱۷)، ما و همکاران (۲۰۱۶) و لو و همکاران (۲۰۱۴) با اشاره به توانایی ذرات بیوچار در جذب و نگهداشت آب، بیان کردند که افزودن بیوچار به

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر دبی، بیوچار، فاصله افقی و

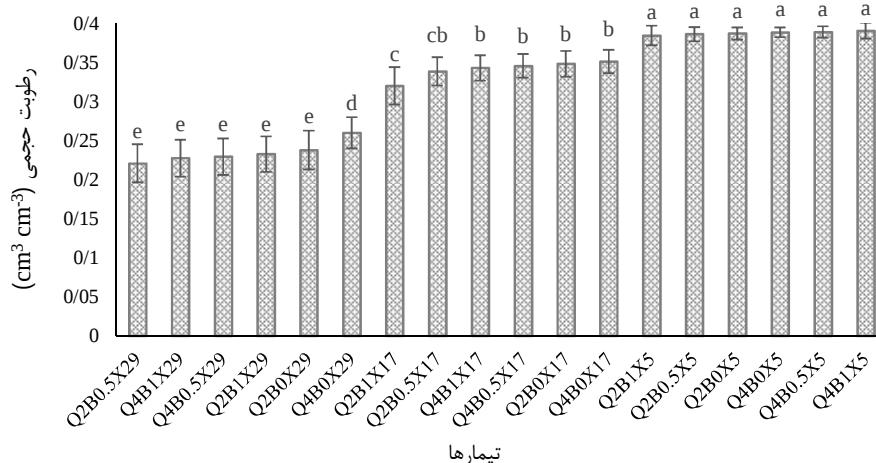
عمودی بر مقدار رطوبت خاک			
منبع تغییرات	میانگین مربعات	درجه آزادی	معنی داری
فاصله افقی (X)	۱/۱۰۸	۲	۰/۰۰۰*
بیوچار	۰/۰۰۸	۲	۰/۰۱۰*
دبی	۰/۰۰۴	۱	۰/۰۳۱*
عمق (Y)	۰/۸۲۹	۴	۰/۰۰۰*
بیوچار×دبی	۰/۱۰۴	۲	۰/۰۰۰*
X×Y	۰/۱۶۳	۸	۰/۰۰۰*

قطره چکان در راستای محور Y) بیشترین مقدار رطوبت و نقاط با فاصله افقی ۲۹ سانتی متر از قطره چکان کمترین مقدار رطوبت را داشتند. پس از قطع آبیاری، Q4 در مقایسه با Q2 در شرایط با و بدون بیوچار بیشترین میزان رطوبت را در همه فواصل افقی ایجاد کرد. علت را می توان به ایجاد ناحیه اشباع بزرگ تر در خاک و در نقاطی که رطوبت قرائت شده است، به دلیل مدت زمان کمتر توزیع آب در خاک در شرایط استفاده از دبی ۴ لیتر بر ساعت نسبت داد. از سوی دیگر بیوچار بیشترین میزان رطوبت را در فاصله افقی ۵ تا ۱۷ سانتی متری اطراف قطره چکان ایجاد کرد؛ به گونه ای که در این فاصله تیمارهای دارای بیوچار در مقایسه با تیمارهای بدون بیوچار رطوبت بیشتری داشتند. نگهداشت بیشتر رطوبت در خاک مخلوط با بیوچار را می توان دلیل بیشتر بودن رطوبت در نزدیکی قطره چکان در این تیمارها دانست. این تأثیر به گونه ای بود که گسترش جبهه رطوبتی پس از تزریق مقدار مشخص آب در تیمارهای مخلوط با بیوچار کمتر از تیمارهای کنترل بود.

توزیع افقی رطوبت پس از قطع آبیاری

تحلیل آماری توزیع رطوبت خاک پس از قطع آبیاری نشان داد که میزان رطوبت در فواصل افقی مختلف از قطره چکان با یکدیگر در سطح ۵ درصد اختلاف معنی دار داشتند (شکل ۳).

مقدار رطوبت در فاصله افقی ۵ سانتی متری (میانگین رطوبت در نقاط ۱، ۴، ۷، ۱۰ و ۱۳) برای تیمار Q4B1 بیش از رطوبت دیگر تیمارها و برابر با $0.39 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ بود؛ با این حال اختلاف معنی داری بین رطوبت تیمارها در فاصله افقی ۵ سانتی متری وجود ندارد. نقاط واقع در فاصله ۵ سانتی متری از مبدأ (خط عمود بر محل



شکل ۳- میانگین رطوبت تیمارهای مورد بررسی آزمایش در فواصل افقی مختلف از مبدأ (X5= 5cm, X17= 17cm, X29= 29)

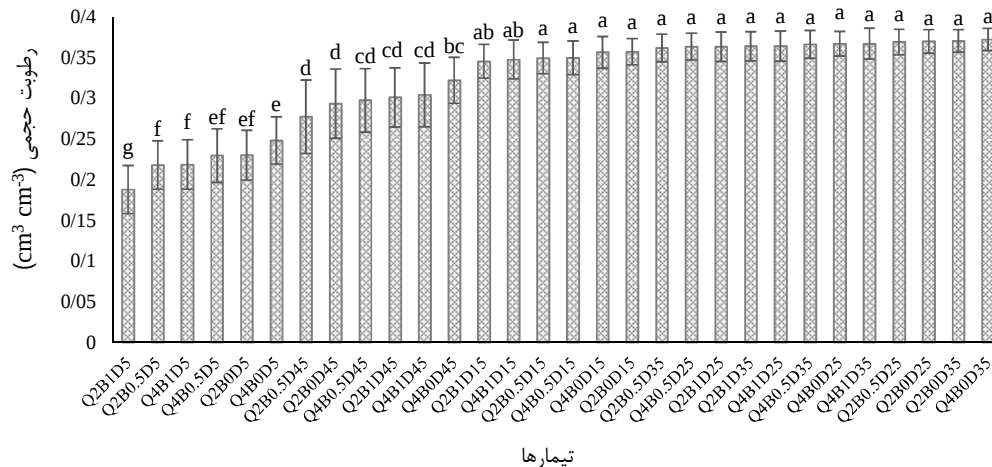
توزیع رطوبت در جهت ثقل بیشتر از توزیع در خلاف جهت ثقل است. ضمن اینکه سطح خاک کمترین میزان رطوبت را دارد. میانگین مقدار رطوبت در سه عمق ۱۵، ۲۵ و ۳۵ سانتی متر از ۰/۳۷۲ تا ۰/۳۴۵ متغیر است و اختلاف معنی داری بین آن ها وجود ندارد. اگرچه اثر عمق روی توزیع رطوبت معنی دار بود؛ اما اثر متقابل دبی، بیوچار و

توزیع عمودی رطوبت پس از قطع آبیاری

شکل ۴، توزیع رطوبت را پس از قطع نخستین آبیاری در عمق های مختلف تیمارهای مورد بررسی نشان می دهد. قابل مشاهده است که تا شعاع ۵ سانتی متری قطره چکان رطوبت تقریباً یکسان است و تفاوت معنی داری بین رطوبت ها وجود ندارد؛ اما با افزایش فاصله از قطره چکان

خاک در تیمار Q2B1 به میزان ۰/۱۸۸ و بیشترین مقدار آن به میزان ۰/۲۴۸ در تیمار Q4B0 مشاهده شد.

عمق معنی‌دار نبود. از شکل ۴، مشاهده می‌شود که اختلاف رطوبت بین سطح خاک و عمق‌های ۱۵، ۲۵ و ۳۵ سانتی‌متر معنی‌دار بوده‌است. کمترین مقدار رطوبت سطح



شکل ۴- میانگین توزیع رطوبت تیمارهای مورد بررسی در عمق‌های مختلف

آب است. علاوه‌براین قابل‌مشاهده است که دبی ۴ لیتر بر ساعت در مقایسه با دبی ۲ لیتر بر ساعت پیشروی کمتری داشته‌است. علت این مسئله همان‌گونه که ذکر شد، مدت زمان بیشتر توزیع آب در هنگام استفاده از دبی کمتر است. پو و همکاران (۲۰۱۹) نیز گزارش کردند که کاربرد ۱، ۲ و ۴ درصد بیوجار در خاک، سبب کاهش ابعاد پیشروی رطوبت شده‌است.

جدول ۴- ابعاد پیشروی جبهه رطوبتی در تیمارهای مختلف (سانتی‌متر)

تیمار	X_{left}	X_{right}	Y_{up}	Y_{down}
Q4B0	۱۷/۵	۱۶/۵	۱۰	۱۵
Q2B0	۱۸	۱۷	۹/۵	۱۵
Q4 B0.5	۱۴/۵	۱۵/۵	۹/۵	۱۴
Q2B0.5	۱۶	۱۶/۵	۱۰/۵	۱۳/۵
Q4B1	۱۵	۱۴/۳	۸/۸	۱۴
Q2B1	۱۴/۲	۱۴	۹	۱۳/۵

توزیع رطوبت با گذشت ۲۴ و ۴۸ ساعت از قطع آبیاری

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که زمان اثر معنی‌داری بر توزیع رطوبت داشته‌است. اگرچه اختلاف معنی‌داری بین رطوبت خاک پس از ۲۴ و ۴۸ ساعت وجود نداشت؛ اما رطوبت پس از قطع آبیاری اختلاف معنی‌داری با دو زمان

علت این مسئله را می‌توان به ترتیب به قابلیت نگهداشت بیشتر آب توسط بیوجار و سرعت بیشتر حرکت آب در شرایط استفاده از قطره‌چکان با دبی بیشتر نسبت داد. به‌صورت کلی می‌توان بیان کرد افزایش میزان بیوجار و کاهش دبی قطره‌چکان توانسته است سطح خیس‌شده و رطوبت کمتری در سطح خاک ایجاد کند. تبخیر از سطح خاک در ابتدا توسط انرژی موجود برای تبخیر (نور خورشید) و با کم‌شدن رطوبت بیشتر به ویژگی‌های هیدرولیکی خاک وابسته است؛ به عبارت دیگر با کم‌شدن رطوبت خاک مقدار تبخیر نیز کاهش می‌یابد (آن و همکاران، ۲۰۱۸). در شرایط استفاده از بیوجار در خاک به دلیل متخلخل‌بودن این ماده و توانایی آن در نگهداشت رطوبت علاوه بر کاهش هدررفت آب خاک به صورت تبخیر، انتقال آلودگی به سطح و لایه‌های بالایی خاک نیز کاهش می‌یابد. همچنین کاهش رطوبت سطحی میزان تبخیر از سطح خاک را نیز کاهش می‌دهد که این موضوع روی آب مصرفی در بلندمدت مؤثر خواهد بود. ابعاد جبهه پیشروی رطوبت در تیمارهای صفر، نیم و یک درصد بیوجار پس از کاربرد حجم مشخصی از آب در جدول ۴ نشان داده شده‌است. مطابق با این جدول، کاربرد بیوجار پیشروی رطوبت را در همه جهات کاهش داده‌است. این موضوع تأییدکننده توانایی بیوجار در حفظ و نگهداشت

سانتی‌متر به ترتیب برابر با ۰/۲۱۳، ۰/۳۰۱، ۰/۳۱۴، ۰/۳۲۳ ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) بود. رطوبت عمق ۴۵ سانتی‌متر به عنوان عمق انتهایی لایسی‌مترها، پس از گذشت این مدت افزایش و به ۰/۳۱۵ رسید. این مسئله نشان می‌دهد که با گذشت زمان از قطع آبیاری به دلیل کاهش اختلاف پتانسیل بین نقاط، نیروی ثقل اثر بیشتری در توزیع رطوبت داشته‌است. پاتل و راجپوت (۲۰۰۸) بیان کردند که به دلیل بیشتر بودن اثر نیروی ثقل، رطوبت در ناحیه زیر قطره‌چکان بیشتر از نواحی بالای آن است. همچنین در این مدت، میانگین رطوبت در فواصل افقی ۵، ۱۷ و ۲۹ سانتی‌متر به ترتیب برابر با ۰/۳۰۲، ۰/۲۹۸ و ۰/۲۸ (cm^3) بود که نشان می‌دهد کماکان در همه تیمارها، بیشترین مقدار رطوبت نزدیک به قطره‌چکان وجود دارد.

جدول ۵- رطوبت خاک اطراف قطره‌چکان در تیمارهای با/بدون بیوچار (میانگین $\pm$ انحراف معیار)

تیمار	پس از قطع آبیاری	۲۴ ساعت پس از آبیاری
فاقد بیوچار	۰/۴۰۲ $\pm$ ۰/۰۳۹	۰/۳۴۷ $\pm$ ۰/۰۸۲
نیم درصد بیوچار	۰/۴۰۷ $\pm$ ۰/۰۲۸	۰/۳۴۳ $\pm$ ۰/۰۶۲
یک درصد بیوچار	۰/۴۱۱ $\pm$ ۰/۰۵۱	۰/۳۴۱ $\pm$ ۰/۰۵۸

تأثیر بیوچار بر توزیع رطوبت

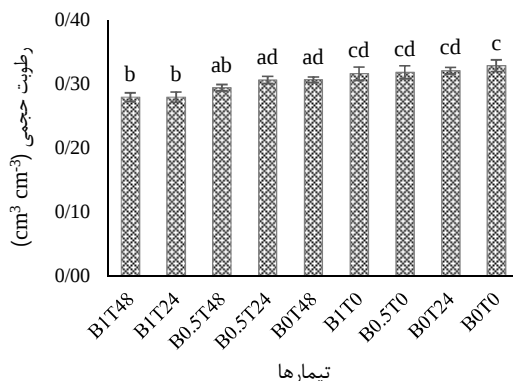
بررسی تأثیر بیوچار بر نحوه توزیع رطوبت نشان داد که افزودن این ماده به خاک اثر معنی‌داری بر توزیع رطوبت در خاک دارد. میانگین توزیع رطوبت بعد از قطع آبیاری - در همه نقاط نمونه‌برداری - در تیمارهای بدون بیوچار ۰/۳۲۸ و در تیمارهای دارای نیم و یک درصد بیوچار ۰/۳۱۸ و ۰/۳۱۶ ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) بود. این میزان با گذشت ۲۴ ساعت از قطع آبیاری به ترتیب به ۰/۳۱۲، ۰/۳ و ۰/۲۹۸ ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) رسید. علت کمتر بودن میانگین رطوبت در تیمارهای دارای بیوچار به نگهداشت بیشتر آب برمی‌گردد که این مسئله سبب توزیع و حرکت کمتر رطوبت به نقاط حاشیه‌ای و موقعیت‌های قرائت رطوبت شده‌است. البته پس از قطع آبیاری تیمارهای دارای بیوچار در فاصله افقی ۵ سانتی‌متر رطوبتی بیش از دیگر تیمارها داشتند (شکل ۳)؛ علت این مسئله بیشتر بودن رطوبت اشباع در خاک مخلوط با بیوچار است؛ به گونه‌ای که در مقایسه با خاک بدون بیوچار، رطوبت بیشتری در اطراف قطره‌چکان قرائت شد. آبل و همکاران (۲۰۱۳) و وانگ و همکاران (۲۰۱۹) حجم زیاد منافذ میکرو و ماکرو بیوچار را عامل افزایش

دیگر داشت. با گذشت زمان میزان آب خاک با فاصله افقی و عمقی از قطره‌چکان تغییر و نقاط واقع در بیشترین فاصله افقی در سطح و کف (نقاط ۳ و ۱۵)، کمترین میزان آب را دریافت کردند. پس از قطع آبیاری و آغاز فرایند توزیع مجدد رطوبت، میزان رطوبت در نواحی نزدیک قطره‌چکان روند کاهشی و در نقاط دورتر از آن روند افزایشی پیدا کرد؛ به گونه‌ای که میانگین رطوبت خاک در فواصل افقی ۵، ۱۷ و ۲۹ سانتی‌متر به ترتیب از ۰/۳۸۷، ۰/۳۴۱ و ۰/۲۳۴ بعد از قطع آبیاری به ۰/۳۱۵، ۰/۳۰۹ و ۰/۲۸۱ ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) پس از ۲۴ ساعت رسید. میانگین توزیع رطوبت در عمق نیز نشان داد که با قطع آبیاری رطوبت عمق ۴۵ سانتی‌متری از ۰/۲۹۹ به ۰/۳۱۴ (cm^3) افزایش یافت. رطوبت لایه سطحی خاک با اندکی تغییر از ۰/۲۲ به ۰/۲۱۸ ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) رسید؛ ضمن اینکه رطوبت در سایر عمق‌ها روند کاهشی داشت. بیشترین میزان کاهش رطوبت تا ۲۴ ساعت پس از آبیاری در اطراف قطره‌چکان بود و از سوی دیگر رطوبت نقاط حاشیه‌ای لایسی‌متر در این مدت سیر افزایشی داشت. رطوبت تیمارهای Q4 در مقایسه با تیمارهای Q2 در نقاط هم‌راستا با دیواره لایسی‌متر تفاوت قابل توجهی نداشتند.

میانگین رطوبت خاک پس از قطع آبیاری و ۲۴ ساعت پس از آن (برای سه آبیاری) در تیمارهای حاوی یک‌ونیم درصد بیوچار و فاقد بیوچار در جدول ۵، آورده شده‌است. مطابق با این جدول، ملاحظه می‌شود که میزان رطوبت خاک بلافاصله پس از آبیاری در نقاط ۴، ۷ و ۱۰ در تیمار یک درصد بیوچار بیش از دو تیمار دیگر است. نکته دیگر کمتر بودن رطوبت این نقاط ۲۴ ساعت پس از آبیاری در تیمارهای دارای بیوچار در مقایسه با تیمار بدون بیوچار است. این نتیجه مطابق با نتایج فیلیپس و همکاران (۲۰۲۰) است. این پژوهشگران بیان کردند که مخلوط کردن بیوچار در خاک لومی و لوم سیلتی سبب خروج سریع تر خاک از حالت اشباع می‌شود؛ درحالی‌که این مسئله در خاک شنی آرام‌تر انجام می‌شود. آن‌ها علت را به افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع به دلیل افزایش بیشتر حجم منافذ درشت و متوسط به دنبال افزودن بیوچار در خاک‌های لومی و لوم سیلتی نسبت دادند.

روند کاهشی مقدار رطوبت با گذشت ۴۸ ساعت از قطع آبیاری همچنان ادامه داشت؛ به گونه‌ای که پس از این مدت متوسط مقدار رطوبت عمق‌های ۵، ۱۵، ۲۵ و ۳۵

به گونه‌ای بود که کوتاه‌ترین دور آبیاری برای تیمارهای M30 و بیشترین دور آبیاری برای تیمارهای M70 مشاهده شد. دور آبیاری توزیع رطوبت در خاک را تغییر می‌دهد؛ یعنی وقتی دور آبیاری کاهش پیدا کند، رطوبت لایه بالایی خاک و مقدار آب آن افزایش می‌یابد. مخلوط کردن نیم و یک درصد بیوچار در خاک، سبب افزایش دور آبیاری در مقایسه با تیمارهای کنترل شد؛ به عنوان مثال دور آبیاری تیمار M70B1 با دو روز افزایش در مقایسه با تیمار M70B0 به ۱۲ روز افزایش یافت. نوسانات رطوبتی تیمارهای با و بدون بیوچار در شرایط انجام آبیاری پس از تخلیه ۳۰ درصد رطوبت قابل‌دسترس، کمتر از تیمارهای M50 و M70 بود. در این شرایط با توجه به کاهش گرادیان هیدرولیکی بین نقاط مختلف، سرعت حرکت آب در راستای افقی کندتر و در راستای عمودی بیشتر بود؛ اما در تیمارهای M70، چون پس از تخلیه ۷۰ درصد رطوبت قابل‌دسترس بالای قطره‌چکان آبیاری انجام می‌شد، آب سرعت بیشتری در راستای افقی داشت. همچنین تغییرات رطوبت سطح خاک در فواصل بین آبیاری‌ها (مقدار تبخیر از سطح خاک) در تیمارهای دارای بیوچار کمتر از تیمارهای کنترل بود. از آنجاکه در آبیاری زیرسطحی، سطح خاک از طریق نیروی موئینگی خیس می‌شود، استفاده از دور آبیاری کوتاه‌تر به دلیل حفظ بیشتر رطوبت، احتمالاً سبب انتقال و بقای بیشتر آلاینده‌ها در سطح خاک می‌شود؛ به عبارت دیگر هر اندازه خاک رطوبت کمتری از دست داده باشد، انتقال باکتری به سطح خاک راحت‌تر انجام می‌شود.



شکل ۵- توزیع رطوبت تیمارهای صفر، نیم و یک درصد بیوچار در سه زمان بلافاصله، ۲۴ و ۴۸ ساعت پس از آبیاری پس از نخستین آبیاری

نگهداشت آب دانستند و بیان کردند که تأثیر بیوچار بر نگهداشت آب با گذشت زمان به دلیل پرشدن منافذ آن با مواد آلی و معدنی خاک کاهش می‌یابد.

میانگین رطوبت پس از ۴۸ ساعت در تیمارهای مخلوط با یک، نیم و صفر درصد بیوچار به ترتیب ۰/۲۷۹، ۰/۲۹۴ و ۰/۳۰۶ (cm³ cm⁻³) بود. این مسئله به دلیل نگهداشت بیشتر و انتقال کمتر رطوبت در خاک‌های مخلوط با بیوچار است. بررسی مقدار رطوبت در سطح خاک بین تیمارهای با و بدون بیوچار نشان داد که بلافاصله پس از قطع آبیاری تیمارهای بدون بیوچار در نقطه شماره یک در مقایسه با تیمارهای دارای بیوچار رطوبت بیشتری داشته و در نقطه شماره ۳، تیمارهای دارای بیوچار کمترین مقدار رطوبت را داشته‌اند. با گذشت ۲۴ ساعت از قطع آبیاری رطوبت در نقاط ۲ و ۳ همه تیمارها افزایشی بود؛ اما پس از گذشت ۴۸ ساعت تنها رطوبت نقطه ۳ روند افزایشی داشت. مقدار رطوبت در نقطه ۳ برای تیمارهای بدون بیوچار پس از ۴۸ ساعت ۰/۱۷۶±۰/۰۱ و برای تیمارهای دارای نیم و یک درصد بیوچار به ترتیب برابر با ۰/۱۵۵±۰/۰۲۵ و ۰/۱۵۲±۰/۰۱۴ (cm³ cm⁻³) بود. این مسئله نشان‌دهنده سطح خیس‌شده بزرگتر در تیمارهای بدون بیوچار است.

شکل ۵، تغییرات رطوبت تیمارهای پژوهش را بر حسب میزان بیوچار نشان می‌دهد. قابل‌مشاهده است که میزان رطوبت تیمارهای کنترل در زمان‌های بلافاصله پس از آبیاری، ۲۴ و ۴۸ ساعت پس از قطع آن بیش از تیمارهای مخلوط با بیوچار در زمان‌های مشابه است. در زمان T0، اختلاف معنی‌داری بین رطوبت در تیمارهای مختلف وجود نداشته است و ۲۴ و ۴۸ ساعت پس از قطع آبیاری تیمار یک درصد بیوچار در مقایسه با دو تیمار دیگر به طور معنی‌داری رطوبت کمتری در خاک توزیع کرده است. این مسئله در زمینه پراکنش و انتقال مواد آلاینده داخل پساب در پروفیل خاک حائز اهمیت است؛ بدان معنا که کاربرد بیوچار می‌تواند توزیع آلاینده‌ها را به واسطه کم‌تر بودن توزیع رطوبت، محدودتر کند.

بررسی اثر MAD روی توزیع رطوبت در تیمارهای مختلف

آبیاری‌های دوم و سوم به لحاظ بررسی اثر MAD روی توزیع رطوبت در تیمارهای مختلف انجام شد. اثر MAD

شبیه‌سازی رطوبت

برای شبیه‌سازی پروفیل رطوبتی تیمارهای مختلف با استفاده از مدل HYDRUS از داده‌های رطوبت قرائت‌شده در زمان‌های مختلف پس از آبیاری اول و برای کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل نیز از رطوبت قرائت‌شده در آبیاری‌های دوم و سوم استفاده شد. مقایسه رطوبت اندازه‌گیری و شبیه‌سازی‌شده با پارامترهای آماری نشان از عملکرد خوب مدل داشت؛ به‌گونه‌ای که مقدار RMSE در

محدوده ۰/۰۳۷ تا ۰/۰۵۳ قرار گرفت (جدول ۶). احمدی‌مقدم و طباطبایی (۱۴۰۰) ضمن شبیه‌سازی توزیع رطوبت در پروفیل خاک لوم شنی با استفاده از HYDRUS-2D، مقادیر R^2 را بین ۰/۸۳ تا ۰/۹۵ و RMSE را حدود ۰/۰۲ عنوان و گزارش کردند که این مدل توانایی خوبی برای برآورد مقدار رطوبت در سطوح مختلف آبیاری (۱۲۰، ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد) دارد.

جدول ۶- مقدار پارامترهای آماری شبیه‌سازی رطوبت در تیمارهای مختلف پس از پایان آبیاری‌ها

پارامترهای آماری	Q2								
	B1			B0.5			B0		
	M70	M50	M30	M70	M50	M30	M70	M50	M30
R^2	۰/۷۱	۰/۷۴	۰/۷۲	۰/۷۱	۰/۷۲	۰/۶۳	۰/۷۵	۰/۷۴	۰/۶۳
RMSE	۰/۰۳۹	۰/۰۴	۰/۰۴۵	۰/۰۳۸	۰/۰۴	۰/۰۵۳	۰/۰۴۵	۰/۰۴	۰/۰۵
CRM	۰/۰۱	۰/۰۴۱	۰/۰۵۱	-۰/۰۰۰۷	۰/۰۵۷	۰/۰۱۱	۰/۰۶۷	-۰/۰۰۶۹	۰/۰۰۹۵
پارامترهای آماری	Q4								
	B1			B0.5			B0		
	M70	M50	M30	M70	M50	M30	M70	M50	M30
R^2	۰/۷۰	۰/۶۷	۰/۶۹	۰/۶۹	۰/۷۸	۰/۶۹	۰/۶۹	۰/۷	۰/۶۷
RMSE	۰/۰۳۹	۰/۰۳۸	۰/۰۴۴	۰/۰۴	۰/۰۳۷	۰/۰۵۲	۰/۰۴۴	۰/۰۴۳	۰/۰۵۳
CRM	۰/۰۰۰۹	۰/۰۴۲	۰/۰۴۸	۰/۰۳۲	۰/۰۳۱	۰/۰۱۱	۰/۰۶۵	۰/۰۶۴	۰/۱۲

مساحت خیس‌شده پس از اتمام آبیاری

مساحت خیس‌شده در فاز آبیاری برای دبی ۲ لیتر بر ساعت در همه تیمارها بیش از دبی ۴ لیتر بر ساعت بود (جدول ۷). علت این مسئله بیشتر بودن زمان آبیاری برای شدت جریان ۲ لیتر بر ساعت و بنابراین وجود فرصت کافی برای توزیع آب در خاک است (شی و همکاران، ۲۰۱۳؛ المالکلو و دیامنتوپلوس، ۲۰۰۹). منجزی و همکاران (۲۰۱۳) با بررسی توزیع رطوبت هنگام کاربرد دو دبی ۴ و ۶ لیتر بر ثانیه بیان کردند که هنگام کاربرد حجم یکسان آب، دبی کوچک‌تر در مقایسه با دبی بزرگ‌تر، بهتر در خاک توزیع می‌شود.

در این پژوهش سطح خیس‌شده خاک در هر دو دبی، برای خاک بدون بیوجار بیشتر و برای دو تیمار دیگر به تناسب میزان بیوجار، کمتر است. این مسئله تأثیر بیوجار بر ویژگی‌های هیدرولیکی و نگهداشت رطوبت در خاک را نشان می‌دهد.

مقدار R^2 نیز برای آبیاری اول و در نقاط مورد نظر نزدیک به ۸۰ درصد و بیشتر از مقدار نظیر آن در آبیاری دوم و سوم و هر سه آبیاری بود؛ اما با لحاظ کردن هر سه آبیاری این میزان، تا ۶۰ درصد نیز کاهش یافت. بوفون و همکاران (۲۰۱۲) مقدار R^2 را در پژوهش خود برای نخستین آبیاری حدود ۸۰ درصد و با رفتن به انتهای دوره آبیاری مقدار آن را ۷۰ درصد بیان و علت را تجمع خطاهای شبیه‌سازی با گذشت زمان عنوان کردند. شاخص CRM هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد، مناسب‌تر است. کمترین و بیشترین مقدار این پارامتر در پژوهش حاضر ۰/۰۰۶۹- و ۰/۱۲ است. قره‌شیخ بیات و همکاران (۱۳۹۴) در پژوهشی روی شبیه‌سازی رطوبت خاک رس سیلانی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با استفاده از HYDRUS-2D با اشاره به عملکرد عالی این مدل، بیشترین و کمترین مقادیر CRM را به ترتیب ۰/۱ و ۰/۰۶۵- و برای RMSE به ترتیب ۰/۰۱۳ و ۰/۰۴۵ بیان کردند.

جدول ۷- مساحت خیس شده در فاز آبیاری در تیمارهای مورد

بررسی			
دبی ($l\ hr^{-1}$)	بیوچار (%)	مساحت خیس شده (cm^2)	
		مشاهده‌ای	شبیه‌سازی شده
۲	۰	۱۵۲۱	۱۳۴۵
	۰/۵	۱۴۸۷	۱۳۲۸
	۱	۱۴۱۰	۱۳۰۰
۴	۰	۱۵۰۰	۱۲۹۰
	۰/۵	۱۴۷۱	۱۲۵۴
	۱	۱۳۹۱	۱۲۰۰

بررسی توزیع رطوبت در خاک

شکل ۶ (الف تا ج) تغییرات الگوی توزیع رطوبت آب خاک را در پنج زمان متفاوت (انتهای زمان آبیاری، ۲۴ ساعت، ۴۸ ساعت، پیش از شروع و پس از آبیاری دوم) برای ضریب تخلیه رطوبت ۷۰ درصد در تیمارهای مورد بررسی نشان می‌دهد. رنگ‌های متفاوت در این شکل‌ها نشان‌دهنده مقادیر مختلف رطوبت حجمی خاک است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ناحیه اشباع اطراف قطره‌چکان در همه تیمارها به دلیل بالابودن ظرفیت نگهداری رطوبت، قطر بزرگی دارد؛ اما در قطره‌چکان با دبی ۴ لیتر بر ساعت، به دلیل مدت زمان کوتاه‌تر ورود آب و فرصت کمتر توزیع آن، قطر این ناحیه بزرگ‌تر و سطح خیس شده کمتر است. یافته‌های المالگلو و دیامنتوپلوس (۲۰۰۹) و شی و همکاران (۲۰۱۳) و الترابیلی و همکاران (۲۰۱۹) نیز روند مشابهی از حجم خیس شده خاک در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با دبی‌های متفاوت نشان می‌دهد.

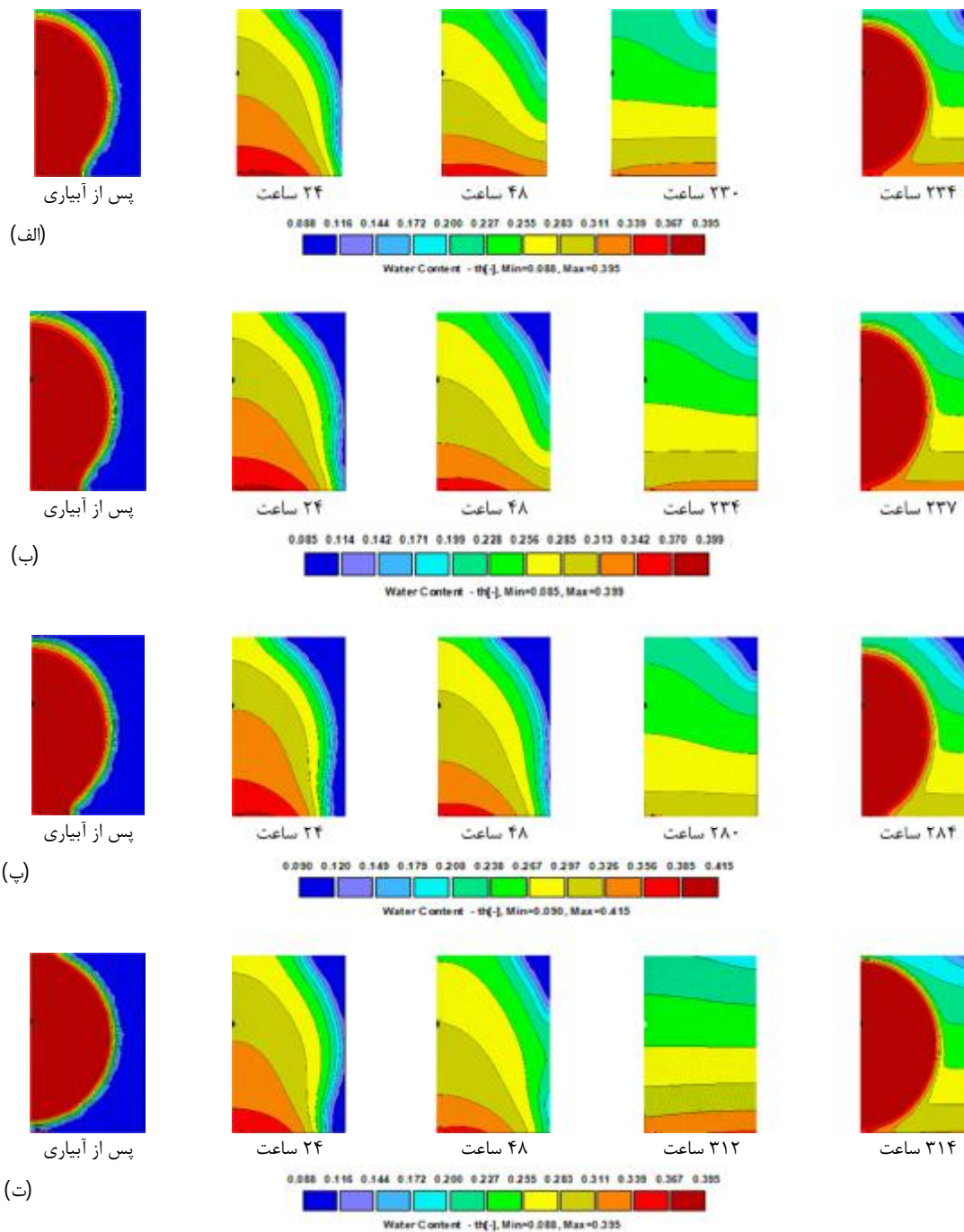
الگوی توزیع رطوبت شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده نشان داد که بیشترین رطوبت خاک در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بین اعماق ۱۵ تا ۵۵ سانتی‌متر و کمترین میزان آن در سطح وجود دارد (شی و همکاران، ۲۰۱۳). مشاهده شکل ۶ و همچنین بررسی نتایج مشاهداتی، نشان می‌دهد که حرکت افقی و عمودی جبهه پیشروی رطوبت در تیمارهای دارای بیوچار نسبت به تیمارهای بدون بیوچار به دلیل فضای متخلخل، توان نگهداری آب بین منافذ یا بین ذرات به دلیل نیروی کاپیلاری یا جذب آب روی سطح بیرونی بیوچار کمتر است. میزان رطوبت شبیه‌سازی شده سطح خاک در هنگام کاربرد دبی ۴ لیتر بر ساعت و در شرایط بدون بیوچار، تقریباً حالت اشباع را در سطح خاک

نشان می‌دهد؛ اما در عمل رطوبت این ناحیه در حد اشباع نبود. هنری و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهشی بیان کردند که HYDRUS مقدار رطوبت سطح خاک را در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (عمق نصب قطره‌چکان ۳۵ سانتی‌متر) بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده برآورد کرده‌است. نتایج پژوهش حاضر همانند پژوهش حیدری و همکاران (۱۳۹۷)، سیال و همکاران (۲۰۱۳) و قربانیان و همکاران (۱۳۹۳) نشان داد که این مدل قطر خیس شده را کمتر از مقدار واقعی برآورد کرده‌است. این پژوهشگران فرضیه‌های به کاررفته در معادله ریچاردز مبنی بر در نظر نگرفتن جریان در منافذ درشت را علت این مسئله دانستند.

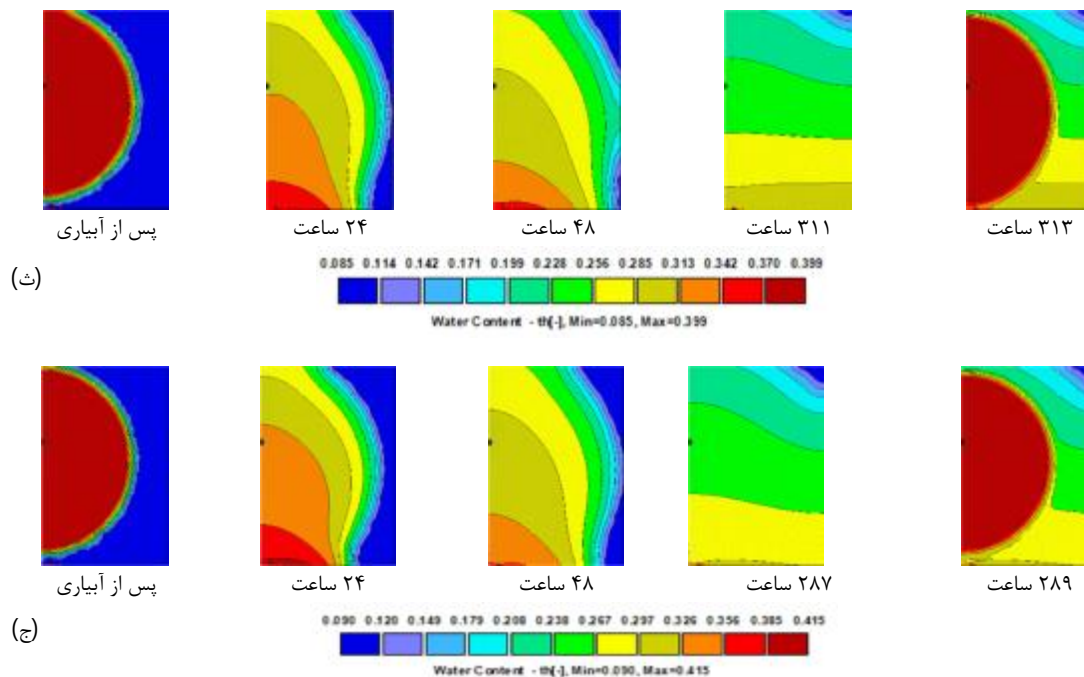
نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد بیوچار سبب نگهداشت بیشتر آب در خاک، کاهش ابعاد جبهه پیشروی، کاهش احتمال انتقال آلودگی به سطح و افزایش دور آبیاری می‌شود. کاربرد میزان بیوچار استفاده شده در این پژوهش، تأثیر معنی‌دار و قابل توجهی بر میزان رطوبت سطح خاک نداشت؛ اگرچه میزان تبخیر در شرایط استفاده از بیوچار کمتر از تیمارهای کنترل بود. کاربرد دبی بزرگ‌تر در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی منجر به گسترش عمودی آب در مقایسه با گسترش افقی شد؛ اما این میزان در مقایسه با دبی کوچک‌تر قابل توجه نبود. با توجه به نتایج به دست آمده از این پژوهش، توصیه می‌شود در شرایط کشت گیاهان ریشه کوتاه در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، انتخاب قطره‌چکان با دبی بزرگ‌تر به لحاظ ایجاد ناحیه اشباع بزرگ‌تر مورد توجه قرار گیرد. استفاده از بیوچار به دلیل تخلخل و توانایی آن در جذب و نگهداشت رطوبت می‌تواند به عنوان عاملی مطلوب در راستای حفظ و ذخیره آب در ناحیه ریشه گیاه لحاظ شود. لازم است در شرایط استفاده از دبی بزرگ‌تر هنگام کاربرد آب‌های نامتعارف، مانند پساب، برای کاهش انتقال آلودگی روی سطح خاک، مسائل مدیریتی از جنبه‌های مختلف (زمان و حجم مناسب آبیاری و همچنین استفاده از مواد جاذب) مورد توجه قرار گیرد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد HYDRUS در شرایط استفاده از دبی بزرگ‌تر، میزان رطوبت سطح خاک را بیش از میزان اندازه‌گیری شده و ابعاد افقی جبهه خیس‌شدگی را کمتر از مقدار مشاهداتی برآورد کرد. با این حال می‌توان بیان کرد که مدل

HYDRUS توانسته تغییرات زمانی و مکانی رطوبت را در شرایط متفاوت خاک از نظر پارامترهای هیدرولیکی به خوبی شبیه سازی کند.



شکل ۶- رطوبت شبیه سازی شده در تیمارهای الف: Q2M70B0، ب: Q2M70B0.5، پ: Q2M70B1، ت: Q4M70B0



ادامه شکل ۶- رطوبت شبیه‌سازی شده در تیمارهای ث: Q4M70B0.5 و ج: Q4M70B1

منابع

زیرسطحی، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع

کشاورزی)، ۲۸(۱): ۱۷۹-۱۸۹.

۶. قره‌شیخ بیات م، خالدیان م، ر، بیگلویی م، ح، و شاهین‌رخسار پ، ۱۳۹۴، شبیه‌سازی عددی رطوبت خاک در آبیاری قطره‌ای نواری زیرسطحی، ۹(۲): ۲۵۲-۲۶۱.

۷. نسیمی پ، کریمی ا، و متقیان ح، ر، ۱۳۹۸، آثار بیوجار برگ خرما بر هدایت هیدرولیکی اشباع و ضرایب رطوبتی خاک لوم رسی شنی، مجله پژوهش آب ایران، ۱۳(۳): ۱۶۱-۱۷۱.

۸. نشریه ۵۳۵، ۱۳۸۹، ضوابط زیست‌محیطی استفاده مجدد از آب‌های برگشتی و پساب‌ها، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست‌جمهوری، ۱۵۵ ص.

9. Abedi koupai J. and Bakhtiarifar A. 2004. Effect of treated wastewater on hydraulic characteristics of emitters in trickle irrigation systems. Journal of Agricultural and Natural Resource. 8: 33-43.
10. Abel S, Peters A, Trinks S, Schonsky H, Facklam M. and Wessolek G. 2013. Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. Geoderma. 202-203: 183-191.
11. Ahmad M, Upamali A, Eun J, Zhang M, Bolan N, Mohan D, Vithanage M. Soo S.

۱. ابراهیمی ا، شایان‌نژاد م، و مصدقی، م، ر، ۱۳۹۸، تأثیر کاربرد شلتوک برنج و بیوجار آن بر الگوی خیس‌شدگی یک خاک رس سیلتی تحت آبیاری قطره‌ای سطحی، نشریه علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، ۲۴(۴): ۱۲۹-۱۳۹.

۲. احمدی‌مقدم ز، و طباطبایی س، ح، ۱۴۰۰، بررسی تأثیر هندسه جریان ترجیحی بر توزیع رطوبت در پروفیل خاک در جریان دو‌بعدی تحت سطوح مختلف آبیاری، مجله پژوهش آب ایران، ۱۵(۲): ۱۵۳-۱۶۱.

۳. حشمتی ف، قبادی‌نیا م، نوری‌امامزاده‌ای م، طباطبایی س، ح، ۱۳۹۶، تأثیر کاربرد صفحات ژئوکمپوزیت بر پیاز رطوبتی در سیستم آبیاری زیرسطحی، نشریه حفاظت منابع آب و خاک، ۷(۲): ۴۱-۵۲.

۴. حیدری ز، فراستی م، و قبادیان ر، ۱۳۹۷، بررسی اثر دبی بر الگوی خیس‌شده تحت آبیاری قطره‌ای سطحی و شبیه‌سازی با مدل HYDRUS-2D، فصلنامه علمی-پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، ۸(۴): ۱۳۲-۱۴۴.

۵. قربانیان م، منجری م، ص، ابراهیمیان ح، و لیاقت ع، ۱۳۹۳، ارزیابی مدل‌های HYDRUS-2D و SEEP/W در برآورد پیاز رطوبتی آبیاری قطره‌ای ثقلی سطحی و

- and other manure constituents: Comparison and modeling. *Applied and Environmental Microbiology*. 72: 7531-7539.
25. Honari M. Ashrafzadeh A. Khaledian M. Vazifedoust M. and Mailhol J. C. 2017. Comparison of HYDRUS-3D soil moisture simulations of subsurface drip irrigation with experimental observations in the South of France. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, American Society of Civil Engineers. 143: 04017014.
 26. Lehmann J. Rillig M. C. Thies J. Masiello C. A. Hockaday W.C. and Crowley D. 2011. Biochar effects on soil biota - A review. *Soil Biology and Biochemistry*. 43: 1812-1836.
 27. Li J. and Wen J. 2016. Effects of water managements on transport of *E. coli* in soil-plant system for drip irrigation applying secondary sewage effluent. *Agricultural Water Management*. 178: 12-20.
 28. Lu S. G. Sun F. F. and Zong Y. T. 2014. Effect of rice husk biochar and coalfly ash on some physical properties of expansive clayey soil (*Vertisol*). *Catena*. 114: 37-44.
 29. Ma N. Zhang L. Zhang Y. Yang L. Yu C. Yin G. Doane T.A. Wu Z. Zhu P. and Ma X. 2016. Biochar improves soil aggregate stability and water availability in a mollisol after three years of field application. *PLoS ONE*. 11.
 30. Martin D. L. Stegman E. C. and Freres E. 1990. Irrigation scheduling principals. In: Hoffman, G.L. Howell, T.A. Solomon, K.H. (Eds), *Management of farm irrigation systems*. ASAE Monograph. 155-372.
 31. Monjezi M. S. Liaghat A. Ebrahimian H. and Moradi M.A. 2013. Soil-wetting front in surface and subsurface drip irrigation. *Water Management*. 166: 272-285.
 32. Oron G. Demalach y. Hoffman Z. and Manor Y. 1992. Effect of effluent quality and application method on agricultural Productivity and environmental control. *Water Science Technology* 26: 1593-1601.
 33. Patel N. and Rajput T. B. S. 2008. Dynamics and modeling of soil water under subsurface drip irrigated onion. *Agricultural Water Management*. 95: 1335-1349.
 34. Phillips C. L. Light S. E. Gollany H. T. Chiu S. Wanzek T. Meyer K. and Trippe K. M. 2020. Can biochar conserve water in Oregon agricultural soils? *Soil and Tillage Research*. 198: 104525.
 35. Provenzano G. 2007. Using HYDRUS-2D simulation model to evaluate wetted soil volume in subsurface drip irrigation systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 133: 342-349.
 36. Pu S. Li G. Tang G. Zhang Y. Xu W. Li P. Feng G. and Ding F. 2019. Effects of and Sik Y. 2014. Chemosphere Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere*. 99: 19-33.
 12. Altdorff D. Galagedara L. Abedin J. and Unc A. 2019. Effect of Biochar Application Rates on the Hydraulic Properties of an Agricultural-Use Boreal Podzol. *Soil Systems*. 3: 53.
 13. An N. Tang C. S. Xu S.K. Gong X. P. Shi B. and Inyang, H. I. 2018. Effects of soil characteristics on moisture evaporation. *Engineering geology*. 239: 126-135.
 14. Bufon V. B. Lascano R. J. Bednarz C. Booker J. D. and Gitz D. C. 2012. Soil water content on drip irrigated cotton: comparison of measured and simulated values obtained with the Hydrus 2-D model. *Irrigation Science*. 30: 259-273.
 15. Black G. R. 1986. Bulk density. In: Klute, A. *Methods of soil analysis. Part I. Physical and mineralogical methods*. Soil Science Society of America. Monograph. 9: In: *Agronomy*. 374-380.
 16. Camp C. R. 1998. Subsurface Drip Irrigation: A Review. *Transactions of the ASAE*. 41. 1353-1367.
 17. Capra A. and Scicolone B. 2004. Emitter and filter tests for wastewater reuse by drip. *Agricultural Water Management*. 68: 135-149.
 18. Chan K. Y. and Xu Z. 2009. Biochar: Nutrient Properties and Their Enhancement. *Biochar for Environmental Management. Science and Technology*: 67-84.
 19. Dalahmeh S. S. 2016. Capacity of biochar filters for wastewater treatment in onsite systems – Technical Report.
 20. Elmaloglou S. and Diamantopoulos E. 2009. Simulation of soil water dynamics under subsurface drip irrigation from line sources. *Agricultural Water Management*. 96: 1587-1595.
 21. Eltarabily M. Bali K.M. Negm A.M. and Yoshimura C. 2019. Evaluation of RootWater Uptake and Urea Fertigation Distribution under Subsurface Drip Irrigation. *Water*. 11: 1487.
 22. Gee G. W. and Bauder J.W. 1986. Particle size analysis. *Nature*. 159: 717-718.
 23. Ghazouani H. Rallo G. Mguidiche A. Latrech B. Douh B. Boujelben A. and Provenzano G. 2019. Assessing Hydrus-2D model to investigate the effects of different on-farm irrigation strategies on potato crop under subsurface drip irrigation. *Water*. 11: 540.
 24. Guber A. K. Shelton D. R. Pachepsky Y. A. Sadeghi A. M. and Sikora L. J. 2006. Rainfall-induced release of fecal coliforms

- irrigated triploid. *Life Science Journal*. 10: 3466-3477.
48. Zhu X. Chen B. Zhu L. and Xing B. 2017. Effects and mechanisms of biochar-microbe interactions in soil improvement and pollution remediation: A review. *Environmental Pollution*. 227: 98-115.
- biochar on water movement characteristics in sandy soil under drip irrigation. *Journal of Arid Land*. 11: 740-753.
37. Qiu Z. Li J. and Zhao W. 2017. Effects of lateral depth and irrigation level on nitrate and *Escherichia coli* leaching in the North China Plain for subsurface drip irrigation applying sewage effluent. *Irrigation Science*. 35: 469-482.
38. Zhang Y. and Shen Y. 2017. Wastewater irrigation: past, present, and future. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*. 6: e1234.
39. Tareq R. Akter N. and Azam M. S. 2019. Biochars and biochar composites: low-cost adsorbents for environmental remediation. *Biochar from biomass and waste*: 169-209.
40. Wang D. Li C. Parikh S. J. and Scow K.M. 2019. Impact of biochar on water retention of two agricultural soils – A multi-scale analysis. *Geoderma*. 340: 185-191.
41. Rhoades J. D. 1996. Salinity electrical conductivity and total dissolved solid. In: Page, A. L. Sommer, C. E. Nelson, P. W. (Eds.), *Methods of Soil Analysis. In Part 3. Chemical Methods*. ASA/SSSA Madison, Wisconsin, USA. pp. 417-436.
42. Santos L. N. Matsura E. E. Gonçalves I. Z. Barbosa E. A. Nazário A. A. Tuta N. F. Elaiuy M. C. Feitosa D. R. and Sousa de A. C. 2016. Water storage in the soil profile under subsurface drip irrigation: Evaluating two installation depths of emitters and two water qualities. *Agricultural Water Management*. 170: 91-98.
43. Sims J. T. 1996. Lime requirement. In: Page, A. L. Sommer, C. E. Nelson, P.W. (Eds.), *Methods of soil analysis. In Part 3. Chemical Methods*. ASA/SSSA. Madison, Wisconsin, USA. 491 p.
44. Šimůnek J. Šejna M. and Genuchten M. van 2014. Software Package for Simulating Two-and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media, User Manual, Version 1.0. 241p.
45. Siyal A. A. Genuchten M. T. Van and Skaggs T. H. 2013. Solute transport in a loamy soil under subsurface porous clay pipe irrigation. *Agricultural Water Management*. 121: 73-80 .
46. Song I. Stine S. W. Choi C. Y. and Gerba C. P. 2006. Comparison of crop contamination by microorganisms during subsurface drip and furrow irrigation. *Journal of Environmental Engineering*. 132: 1243-1248.
47. Xi B. Wang P. Fu T. Zhang W. Deng T. and Jia L. 2013. Optimal coupling combinations among discharge rate, lateral depth and irrigation frequency for subsurface drip-

