

مقاله پژوهشی

بررسی تأثیر هندسه جریان ترجیحی بر توزیع رطوبت در پروفیل خاک در جریان دوبعدی تحت سطوح مختلف آبیاری

زینب احمدی مقدم^۱ و سید حسن طباطبایی^{۲*}

چکیده

در شرایط مزرعه، وجود درز و ترک‌ها سبب انتقال سریع‌تر آب و آلاینده‌ها می‌شود؛ بنابراین، باید آثار سطوح مختلف آبیاری (به‌علت کمبود منابع آب) و جریان ترجیحی هم‌زمان بر انتقال جریان آب بررسی شود. سطوح آبیاری در این پژوهش، ۱۲۰، ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد، انتخاب و جریان ترجیحی با ایجاد شکاف و پرکردن آن با شن ریزدانه بررسی شد. میزان ضرایب معادله ون-گنوختن خاک‌ها با استفاده از منحنی مشخص رطوبتی، محاسبه و کالیبره شد. شکل شکاف‌های تیغه‌ای با عرض‌های (B) ۱/۵، ۱، ۰/۵ و ۱/۵ سانتی‌متری و ارتفاع‌های (H) ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متری به نرم‌افزار Hydrus-2D معرفی و با حل مستقیم الگوی رطوبت خاک در تیمارها با سطوح آبیاری مختلف شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد وجود شکاف در سطوح آبیاری مختلف، از جمله کم‌آبیاری، سبب انتقال جریان آب به اعماق خاک می‌شود. اثر عمق شکاف نسبت به عرض شکاف در انتقال جریان، بیشتر است و در شکاف‌های با عمق ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر، میزان توزیع رطوبت در خاک، تفاوت بیشتری نسبت به عمق ۱۰ سانتی‌متر، به‌ویژه در سطوح آبیاری بیشتر نشان داد. وجود شکاف‌هایی با عمق ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر، سبب توزیع یکنواخت‌تر رطوبت در اطراف ناحیه جریان ترجیحی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: انتقال جریان، درز و ترک، کم‌آبیاری، عمق.

ارجاع: احمدی مقدم 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. ۴۱: ۱۵۳-۱۶۱.

1- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

2- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

* نویسنده مسئول: tabatabaei@sku.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۳۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۱۲

مقدمه

کمبود منابع آب سبب شده است برای کاهش مصرف آب، به‌ویژه در بخش کشاورزی از روش‌های کم‌آب‌اری استفاده شود؛ به‌عنوان مثال، در سال زراعی ۸۹-۹۰، کم‌آبی باعث کاهش ۳ میلیون هکتار سطح کاشت و ۵ میلیون تن تولید محصولات زراعی شد (آرمینیان و همکاران، ۲۰۱۱). کم‌آب‌اری، مصرف آب کمتر از نیاز آبی گیاه و شیوه‌ای برای افزایش کارایی مصرف آب است. زمان اعمال کم‌آب‌اری به نوع گیاه و مرحله رشد آن وابسته است. کم‌آب‌اری سبب افزایش کارایی میزان مصرف آب، کاهش میزان آفات و بیماری‌های گیاهی، کاهش شست‌وشوی ریزمغذی‌ها، افزایش کیفیت محصول، کاهش طول دوره کاشت و سازگاری گیاه می‌شود (لهمن و همکاران، ۲۰۱۱). از معایب روش‌های کم‌آب‌اری، به‌ویژه در سطوح کمتر آبیاری به کاهش میزان عملکرد محصول می‌توان اشاره کرد. در روش‌های کم‌آب‌اری، نوع روش اعمال کم‌آب‌اری باید به‌گونه‌ای باشد که میزان کاهش عملکرد محصول زیاد نباشد و از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه باشد. از شیوه‌های کم‌آب‌اری به آبیاری بخشی از ناحیه ریشه (به‌طور مثال یک در میان در آبیاری جویچه‌ای)، حجم آبیاری کمتر و افزایش فواصل آبیاری می‌توان اشاره کرد. جعفری و همکاران (۱۳۹۷) با بررسی انواع روش‌های مختلف کم‌آب‌اری بر عملکرد گونه‌ای از گندم دریافتند اعمال کم‌آب‌اری در سطح ۷۵ درصد و به‌صورت جویچه یک در میان، بهترین روش مدیریتی در شرایط محدودیت منابع آبی برای صرفه‌جویی در مصرف آب و افزایش بهره‌وری آب در کشت گندم در منطقه کرج است.

پیچیدگی ساختار خاک، بینش صریح فرایندهای موجود را منع می‌کند. برای درک بهتر فرایندهای جریان ترجیحی، سیستم‌های ساخته‌شده از خاک ماکروپور با هندسه ناشناخته مطالعه می‌شود. ماکسی‌میلیام و موهانتی (۲۰۰۵) با بررسی اثر جریان ترجیحی بر میزان نفوذ در منافذ ماکرو به عرض ۲/۴ سانتی‌متر و طول ۸۰ سانتی‌متر دریافتند در ابتدا، سرعت نفوذ در منافذ ماکرو سریع بود؛ اما به تدریج با گذشت زمان و اشباع شدن ماتریکس مجاور، میزان نفوذ در منافذ ماکرو کاهش یافت. منافذ درشت، سبب ایجاد جریان ترجیحی می‌شود و انتقال جریان در این خاک‌ها سریع‌تر است (ژئورینگ، ۱۹۹۹)؛ بنابراین، نقش جریان‌های ترجیحی، که در اثر عواملی همچون

ترک‌ها ایجاد می‌شود، باید بر توزیع پروفیل رطوبت ارزیابی شود. عوامل مؤثر بر شکل‌گیری منافذ در خاک به دو دسته فیزیکی و زیستی تقسیم‌بندی می‌شود. از فرایندهای فیزیکی به سیکل‌های تورم و ایجاد ترک، انجماد و انبساط آب می‌توان اشاره کرد. از فرایندهای زیستی بر تشکیل منافذ در خاک از توسعه ریشه گیاهان در خاک و فعالیت‌های موجودات خاک‌زی، مانند کرم‌های خاکی و حشره‌ها می‌توان نام برد. گیاهان با ریشه قطورتر و عمیق‌تر، شرایط را برای حضور جریان افزایش می‌دهد. جریان‌های ترجیحی، حجم زیادی از آب را در ماتریکس خاک وارد می‌کند و به‌علت سرعت جریان بیشتر، سبب انتقال آب و آلاینده‌ها به اعماق خاک می‌شود؛ به همین علت، بررسی اثر جریان‌های ترجیحی در انتقال آلودگی، اهمیت ویژه‌ای دارد (ایلرز و گوس، ۲۰۰۳). استفاده از فاضلاب، سبب شورشدن خاک، تخریب خاک، کاهش میزان هدایت هیدرولیکی، آب‌گریزی خاک، کاهش عملکرد محصولات، آلودگی منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی و درنهایت، شیوع بیماری می‌شود و استانداردهای زیست‌محیطی را در استفاده از پساب باید رعایت کرد. حضور درز و ترک‌ها به‌صورت بالقوه، مشکلات استفاده از پساب را تشدید می‌کند (طباطبایی و همکاران، ۲۰۲۰). وانگ و همکاران (۲۰۱۳) و احمدی‌مقدم و همکاران (۱۳۹۹)، اثر جریان ترجیحی بر انتقال باکتری را در منافذ ماکرو به قطر ۱/۱۴ سانتی‌متر در ستون‌های خاک بررسی کردند. نتایج این پژوهش‌ها نشان داد میزان انتقال آلاینده در شرایط جریان ترجیحی، بیشتر است.

جعفری و همکاران (۱۳۸۶) با بررسی اثر عرض ترک‌های مختلف در شرایط آبیاری غرقابی متفاوت در شالیزارهای برنج دریافتند اثر پهنای ترک، ارتفاع آب آبیاری، اثر متقابل پهنای ترک و ارتفاع آب آبیاری بر حجم آب کاربردی و راندمان مصرف آب در سطح ۱ درصد، معنی‌دار بود و در تیمارهای دارای درز و ترک، کاهش ارتفاع غرقابی، سبب بهبود راندمان مصرف آب تا ۳۶/۵ درصد شد و تلفات آب آبیاری به‌ازای تیمارهای با عمق صفر (پربودن درز و ترک‌ها)، ۲/۵ و ۵ سانتی‌متر روی سطح خاک به ترتیب، ۵۶/۷، ۶۴/۵ و ۷۸/۲ درصد شد. برخی معتقدند با آبیاری‌های متعدد، درز و ترک‌ها در خاک بسته می‌شود و دیگر اثری بر انتقال ندارد؛ ولی برخی از پژوهشگران دریافتند ترک‌ها بعد از پرشدن بسته نمی‌شود و باعث

جریان‌های ترجیحی نیز به علل مختلف در سطح مزرعه ایجاد می‌شود و به‌علت نقش مهم جریان‌های ترجیحی باید رفتار این جریان‌ها، که در اثر ایجاد منافذ ماکرو در خاک شکل می‌گیرد، در شرایط کم‌آبایی بر جبهه رطوبتی ارزیابی شود؛ بنابراین، هدف این پژوهش، بررسی اثر هندسه منافذ (دارای عرض و عمق متفاوت) بر توزیع رطوبت در پروفیل خاک در سطوح مختلف آبیاری است.

مواد و روش‌ها

برای بررسی اثر جریان ترجیحی در پروفیل رطوبتی خاک از خاک با بافت لوم شنی استفاده شد که برخی از مشخصه‌های این خاک، مانند جرم مخصوص ظاهری خاک با روش سیلندر با حجم مشخص (بلک، ۱۹۸۶)، جرم مخصوص حقیقی خاک با روش پیکنومتر (بلک، ۱۹۸۶)، میزان کربن آلی با روش والکلی بلک (والکلی و بلک، ۱۹۸۳)، pH با دستگاه pHسنج و هدایت الکتریکی با سنسور شوری و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با روش بار ثابت (کلوت، ۱۹۸۶) اندازه‌گیری شد. برای تعیین میزان رطوبت در مکش‌های مختلف، دستگاه صفحات مکش به کار رفت و منحنی رطوبتی خاک با استفاده از این داده‌ها ترسیم شد. خلاصه متغیرهای فیزیکی خاک اندازه‌گیری شده در جدول ۱ ارائه شده است.

تراوش زیاد آب و ایجاد جریان‌های ترجیحی می‌شود (زهانگ و همکاران، ۲۰۱۴). به‌طور کلی، تعامل بین ناحیه مجاور خاک با ناحیه جریان ترجیحی، به بافت خاک، شرایط رطوبتی و میزان مواد آلی و پوشش گیاهی وابسته است (زهانگ و همکاران، ۲۰۱۷).

برای صرفه‌جویی در زمان و هزینه از مدل‌های تحلیلی، تجربی و عددی برای بررسی توزیع آب در خاک در شرایط مختلف محیطی و متغیرهای متنوع طراحی می‌توان استفاده کرد. مدل هایدروس دوبعدی، یکی از مدل‌های توانمند در شبیه‌سازی حرکت آب و املاح در خاک است که برپایه حل عددی معادله ریچاردز عمل می‌کند. این مدل را در سال ۱۹۹۹، سیمیونک و همکاران در آزمایشگاه شوری خاک آمریکا ارائه کردند. مدل‌های هایدروس دوبعدی و سه‌بعدی، برآورد دقیق‌تری در شبیه‌سازی رطوبت نسبت به مدل‌های تجربی و تحلیلی دارد (کندلوس و سیمونیک، ۲۰۱۰). اسکگز و همکاران (۲۰۰۴) برای مقایسه شبیه‌سازی هایدروس دوبعدی با مشاهدات تجربی در سیستم قطره‌ای، از هایدروس دوبعدی و حجم‌های متفاوت آب کاربردی استفاده کردند. نتایج نشان داد هایدروس دوبعدی، توانایی خوبی در شبیه‌سازی دارد و برای مدیریت و طراحی آبیاری قطره‌ای می‌توان از آن استفاده کرد. امروزه، با توجه به کمبود منابع آب، استفاده از روش‌های کم‌آبایی در حال توسعه است.

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک مورد مطالعه

بافت خاک	رطوبت زراعی	رطوبت در نقطه پژمردگی دائم	وزن مخصوص ظاهری	هدایت هیدرولیکی	مواد آلی	تخلخل
-	درصد حجمی	درصد حجمی	gr cm ⁻³	cm.min ⁻¹	%	درصد
لوم شنی	۲۷	۹	۱/۵	۰/۱۵	۲	۴۳/۲
شن	۲۰	۵	۱/۳	۳/۵	۰	۲۵

خاک فقط به اندازه ۵ سانتی‌متر از کف، بالا آمده باشد. در حین انجام عملیات آزمایشگاهی، ارتفاع خاک در ستون، به‌طور مداوم کنترل شد و برای جلوگیری از تشکیل لایه در خاک با میله‌ای روی سطح خاک هر لایه خراش داده می‌شد و همین روند برای پنج‌لایه به کار رفت. برای برقراری جریان ترجیحی، از روش وانگ و همکاران (۲۰۱۳) الگوبرداری شد. در این روش، ستون‌ها از کف در داخل ظرف آبی قرار گرفت و لوله‌ای به قطر ۱۶ میلی‌متر و ارتفاع حدود ۳۵۰ میلی‌متر در وسط ستون قرار داده شد. خاک به‌صورت لایه‌لایه، اطراف لوله ۱۶ میلی‌متری ریخته

در این پژوهش، ستون‌هایی با جنس پی‌وی‌سی با قطر ۱۶۰ و طول ۳۵۰ میلی‌متر (زند سلیمی، ۱۳۸۵) برای بررسی توزیع رطوبت به کار رفت. پرکردن ستون‌های خاک به‌صورت لایه‌لایه انجام و با در نظر گرفتن ارتفاع ۳۰ سانتی‌متری ستون‌ها، ارتفاع هر لایه، ۵ سانتی‌متر لحاظ شد. با توجه به میزان وزن مخصوص ظاهری، جرم خاک برای پرکردن پنج‌سانتی‌متری ستون، محاسبه و پس از تعیین جرم خاک مورد نیاز، همان مقدار خاک با ترازو، توزین و داخل استوانه ریخته شد. پس از پرکردن ستون با خاک، با کوبه به سطح خاک ضربه زده شد تا سطح

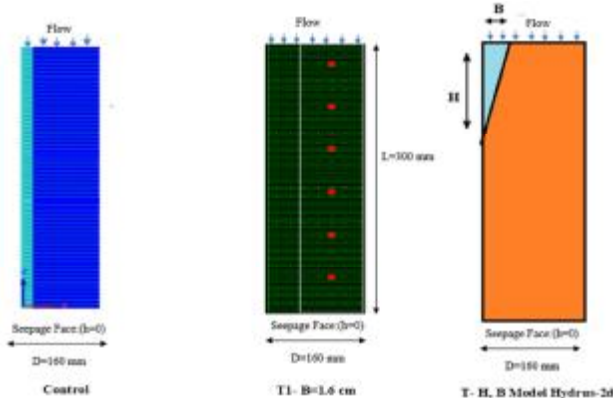
$$d_n = (\theta_{f,c} - \theta_{p,w,p})z_r \quad (۱)$$

$$\theta_m = \theta_{f,c} - MAD(\theta_{f,c} - \theta_{p,w,p}) \quad (۲)$$

در این معادله، d_n عمق خالص آبیاری (L)، $\theta_{f,c}$ رطوبت وزنی ظرفیت زراعی ($L^3 L^{-3}$)، z_r عمق ستون (L)، θ_m مرز پایین رطوبت سهل الوصول (الوصول $L^3 L^{-3}$) و $\theta_{p,w,p}$ رطوبت وزنی نقطه پژمردگی دائم ($L^3 L^{-3}$) است. MAD ضریب تخلیه مجاز رطوبتی است که در این پژوهش به طور متوسط، ۰/۵ در نظر گرفته شد. برای تخمین ضرایب مدل - ون گنوختن، نرم افزار RETC به کار رفت. داده‌های ورودی به نرم افزار، شامل منحنی مشخصه رطوبتی خاک، میزان هدایت هیدرولیکی اشباع و رطوبت اشباع بود و در خروجی نرم افزار، رطوبت باقی مانده و ضرایب تجربی معادله ون- گنوختن برآورد شد.

و بعد از هر لایه، کمی آب روی سطح خاک پاشیده شد. بعد از پرشدن ستون خاک، لوله ۱۶ میلی متری به آرامی، از داخل ستون بزرگ تر بیرون کشیده شد؛ به گونه ای که خاک اطراف، داخل سوراخ ریزش نکند؛ سپس در محل لوله ۱۶ میلی متری با کمک قیف، شن ریزدانه ریخته شد. این تیمار، T1 نام گذاری شد.

سطوح آبیاری ۱۲۰، ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد، انتخاب و به ترتیب، T120، T100، T80 و T60 نام گذاری شد. رطوبت اولیه تیمارها مرز پایین رطوبت سهل الوصول بود. تیمارهای T80 و T60 به ترتیب، حجم آبیاری به میزان ۲۰ و ۴۰ درصد، کمتر و تیمار T120 به میزان ۲۰ درصد، بیشتر از تیمار T100 بود. عمق خالص آبیاری با استفاده از معادله (۱) و میزان رطوبت در مرز پایین رطوبت سهل الوصول از معادله (۲) محاسبه شد.



شکل ۱- نمای هندسی از تیمارها و شرایط مرزی در نرم افزار Hydrus2D

$$r = \frac{N \sum_{i=1}^N O_i y_{pi} - \sum_{i=1}^N O_i \sum_{i=1}^N y_{pi}}{\sqrt{N \sum_{i=1}^N O_i^2 - \sum_{i=1}^N O_i^2 \times (N \sum_{i=1}^N y_{pi}^2 - (\sum_{i=1}^N y_{pi})^2)}} \quad (۴)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{D_{avg}} \times 100 \quad (۵)$$

که در این معادلات، y_p مقادیر محاسبه شده مدل، O_i مقادیر مشاهداتی مدل، D_{avg} میزان متوسط مقادیر مشاهداتی و N تعداد مشاهدات است.

برای بررسی شکل های هندسی متفاوت از درز و ترک بر تغییرات وضعیت توزیع پروفیل رطوبتی، نرم افزار Hydrus- به کار رفت و شکل های متفاوتی از شکاف به عرض و ارتفاع متفاوت به مدل معرفی شد که شامل ایجاد منفذهایی به صورت تیغه ای با قطرهای ۰/۵، ۱ و ۱/۵ سانتی متر در سطح خاک و به عمق های ۱۰، ۲۰ و

برای کالیبره کردن ضرایب معادله ون- گنوختن، از پروفیل رطوبتی در تیمارها با سطوح آبیاری مختلف در Hydrus استفاده شد. شرایط اولیه، شامل میزان رطوبت اولیه در عمق های مختلف خاک (شش عمق) بعد از هر آبیاری بوده است (حداقل و حداکثر زمان آبیاری تیمارها، ۱۰ تا ۲۰ دقیقه بود) و شرایط مرزی براساس شکل ۱ شامل برقراری جریان با هد ثابت و زهکشی آزاد در نظر گرفته شد.

برای مقایسه میزان مقادیر مشاهداتی و مشاهداتی، شاخص های مجذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، NRMSE و ضریب همبستگی r به کار رفت که مقادیر آنها از معادلات ذیل محاسبه شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_{pi} - O_i)^2}{N}} \quad (۳)$$

برای به دست آوردن ضرایب معادله ون - گنوختن با روش حل معکوس، منحنی مشخصه رطوبتی خاک به نرم افزار RETC معرفی شد و ضرایب معادله ون - گنوختن به دست آمد. متغیرهای هدایت هیدرولیکی و رطوبت اشباع خاک، اندازه گیری و در مدل RETC استفاده شد. در جدول ۲، مقادیر ضرایب معادله ون - گنوختن در خاک و شن آورده شده است.

جدول ۲- مقادیر متغیرهای هیدرولیکی برآوردشده با RETC

R	N	r_0	$\alpha(\text{cm}^{-1})$	خاک مورد مطالعه
۰/۹۵	۱/۹۹	۰/۰۸۷	۰/۰۱۶	خاک لوم شنی
۰/۹۴	۲/۴۶	۰/۰۵	۰/۰۰۷	شن

عمق جریان ترجیحی، میزان انتقال رطوبت افزایش یافت و توزیع رطوبت در پروفیل خاک، یکنواخت تر شد. به ازای موقعیت جریان ترجیحی (T1) به صورت استوانه‌ای شکل به قطر ۱۶ میلی‌متر، انتقال جریان از ناحیه جریان ترجیحی به عمق پروفیل خاک سریع‌تر بود. میزان رطوبت در پروفیل خاک در سطوح مختلف آبیاری در نزدیک ناحیه جریان ترجیحی با افزایش میزان عمق درز و ترک، اختلاف کمتری نسبت به شرایط بدون جریان ترجیحی نشان داد و این اختلاف براساس شکل‌ها در شرایط ترجیحی و در سطوح آبیاری بیشتر، اثر بیشتری بر میزان انتقال جریان نسبت به تیمارهای با سطح آبیاری کمتر گذاشت؛ بنابراین، میزان تلفات نفوذ عمقی با افزایش سطح آبیاری، بیشتر می‌شود.

اتصال خوب بین مسیرهای ترجیحی در محیط خاک، انتقال آب و املاح را به اعماق خاک افزایش می‌دهد (جرویس و همکاران، ۲۰۱۲) و براساس شکل‌ها، پروفیل رطوبتی خاک به ازای عمق جریان ترجیحی ۱۰ سانتی‌متر، به‌ویژه در تیمارهای کم‌آبیاری، اختلاف زیادی با شرایط بدون جریان ترجیحی نسبت به عمق جریان ترجیحی ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متری نداشت.

یکی از عواملی که سبب کاهش میزان راندمان آبیاری می‌شود، وجود درز و ترک در خاک است؛ زیرا درز و ترک در خاک، میزان نفوذ عمقی را افزایش می‌دهد و سبب کاهش راندمان آبیاری می‌شود و با خارج کردن آب از محیط توسعه ریشه، میزان رطوبت و ایجاد تنش را در گیاه افزایش می‌دهد.

۳۰ سانتی‌متر بود و اثر شکل این منحنی‌های تیغه‌ای در سطوح آبیاری مختلف بر انتقال جریان آب بررسی شد.

نتایج و بحث

ضرایب معادله ون - گنوختن

منحنی مشخصه رطوبتی خاک و شن در مکش‌های مختلف در شکل ۲ آورده شده است. میزان رطوبت ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم آن به ترتیب، ۲۷ و ۹ درصد شد.

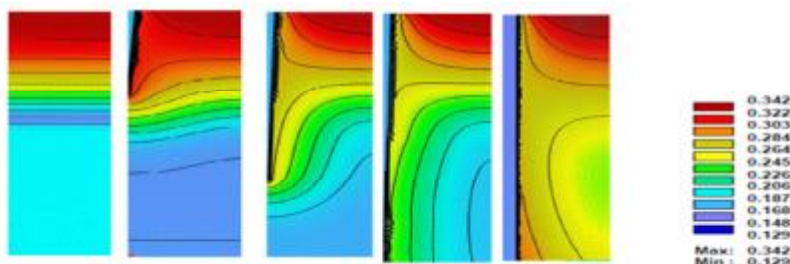
رطوبت در پروفیل خاک در شرایط بدون جریان ترجیحی

به‌ازای ضرایب معادله ون - گنوختن برآوردی، میزان رطوبت شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد میزان رطوبت به‌ازای ضرایب معادله ون - گنوختن با دقت خوب برآورد شد (کمترین و بیشترین میزان ضریب همبستگی، به ترتیب، ۰/۸۳ و ۰/۹۵ شد). در جدول ۳، میزان مجذور میانگین مربعات خطا برای مقادیر رطوبت در سطوح آبیاری مختلف برای ستون‌های بدون جریان ترجیحی در عمق‌های مختلف آورده شده است. براساس جدول ۳، میزان متوسط میزان درصد خطای رطوبت در عمق‌های ۰ و ۲۰ سانتی‌متری در دو تیمار با سطح آبیاری ۶۰ و ۱۲۰، حدود ۲ درصد بود و مقادیر رطوبت مدل نسبت به مقادیر مشاهداتی، اختلاف کمی داشت. جبهه رطوبتی سطوح مختلف آبیاری در شرایط جریان ترجیحی با حل مستقیم و در ستون‌های خاک بدون جریان ترجیحی با روش حل معکوس با HYDRUS-2D در شکل‌های ۲ و ۳ آورده شده است که براساس شکل، میزان رطوبت در تیمارهای با سطح آبیاری بیشتر در عمق‌های پایین، بیشتر است. نکته مهم در تصاویر انتقال جریان از ناحیه جریان ترجیحی به سمت ماتریکس خاک است که سبب افزایش میزان رطوبت در نزدیک جریان ترجیحی در اعماق مختلف خاک نسبت به ستون خاک بدون جریان ترجیحی شده است.

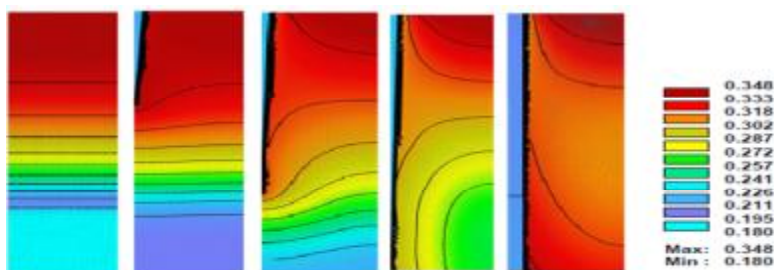
تغییرات رطوبتی در سطوح مختلف آبیاری به‌ازای عرض ۱/۵ سانتی‌متری و عمق‌های متفاوت جریان ترجیحی در شکل ۴ آورده شده است. براساس شکل، با افزایش میزان

جدول ۳- مقادیر خطا و ضریب همبستگی در شبیه‌سازی رطوبت در تیمارهای مختلف

تیمار	شرایط	تیمار	R	RMSE	NRMSE
T120	بدون منفذ ترجیحی	control	0/95	0/015	۵/۶۷
	قطر منفذ ۱۶ میلی‌متر	T1	۰/۹۶	۰/۰۰۸	۳/۵۲
T100	بدون منفذ ترجیحی	control	۰/۹۲	۰/۰۲	۵/۱۸
	قطر منفذ ۱۶ میلی‌متر	T1	۰/۹۶	۰/۰۲۳	۶/۰۳
T80	بدون منفذ ترجیحی	control	۰/۹۳	۰/۰۰۵	۵/۴۷
	قطر منفذ ۱۶ میلی‌متر	T1	۰/۹۵	۰/۰۱۹	۵/۶۹
T60	بدون منفذ ترجیحی	control	۰/۹۳	۰/۰۱۵	۶/۲۵
	قطر منفذ ۱۶ میلی‌متر	T1	۰/۹۰	۰/۰۱۲	۴/۷۵

T60: Control- B:0 H₁₀- B:0.5 H₂₀- B:0.5 H₃₀-B:0.5 T1-B:1.6

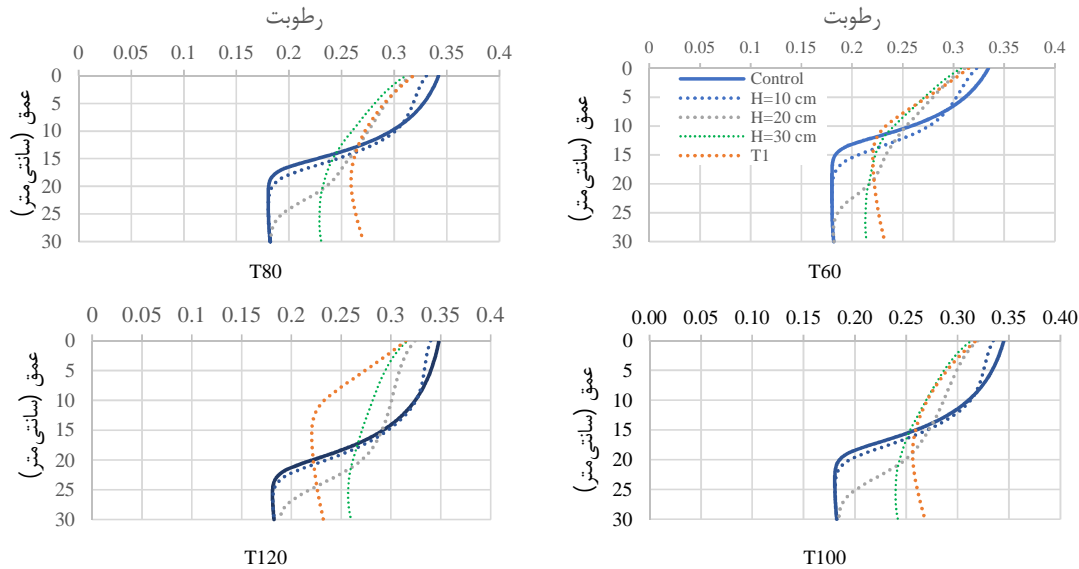
شکل ۲- جبهه رطوبتی در سطح آبیاری ۶۰ درصد ظرفیت زراعی در عمق‌های مختلف جریان ترجیحی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر و با عرض نیم‌سانتی‌متر با HYDRUS-2D

T120: Control- B:0 H₁₀- B:0.5 H₂₀- B:0.5 H₃₀-B:0.5 T1-B:1.6

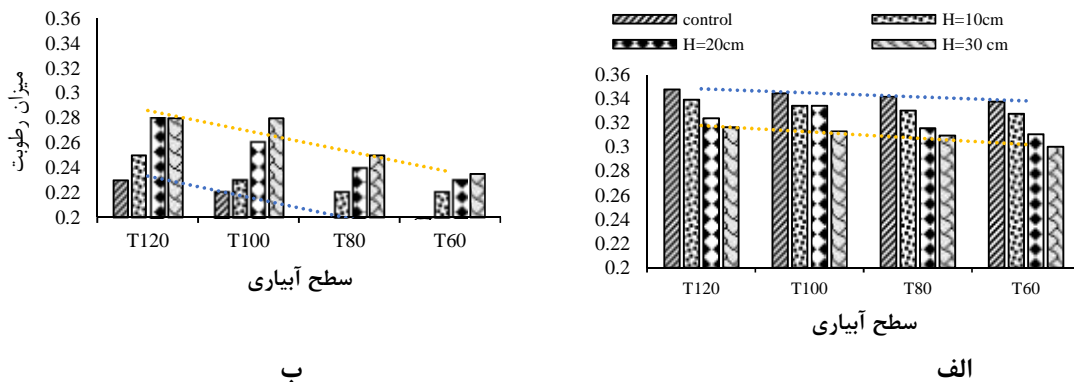
شکل ۳- جبهه رطوبتی در سطح آبیاری ۱۲۰ درصد ظرفیت زراعی در عمق‌های مختلف جریان ترجیحی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر و با عرض نیم‌سانتی‌متر (B=0.5) و جریان ترجیحی با عرض ۱/۶ و عمق ۳۰ سانتی‌متر با HYDRUS-2D

دهد (حمدی احمدآباد و همکاران، ۱۳۹۶). پلایان و متیوس (۲۰۰۴) با اعمال تغییر مدیریت آبیاری در منطقه باردناس اسپانیا، میزان بازده آبیاری را ارزیابی کردند. نتایج آنها نشان داد با کاهش زمان آبیاری، بازده کاربرد آب آبیاری از ۴۴ درصد به مقدار ۷۱ درصد افزایش یافت. میزان رطوبت در سطح خاک در تیمارهای T80، T60 و T100 در حالت وجود

بر اساس شکل ۵، با افزایش میزان عمق درز و ترک‌ها، میزان رطوبت از سطح خاک نسبت به خاک‌های بدون درز و ترک، کاسته و سبب انتقال رطوبت به اعماق پایین‌تر می‌شود. در شرایط کم‌آبیاری، حضور جریان‌های ترجیحی، سبب توزیع بهتر رطوبت در پروفیل خاک می‌شود؛ ولی با افزایش سطح آبیاری و زمان آبیاری، میزان تلفات نفوذ عمقی افزایش می‌یابد و راندمان آبیاری را کاهش می‌دهد. درز و ترک‌های موجود در بیشتر مزارع، سبب افزایش بیش از حد تلفات عمقی می‌شود؛ به‌گونه‌ای که ممکن است میزان تلفات عمقی را تا حدود ۷۱ درصد افزایش



شکل ۴- جبهه رطوبتی در سطوح مختلف آبیاری در تیمارهای ترجیحی با عرض ۱/۵ سانتی‌متر (B=1.5) HYDRUS-2D (در فاصله ۳/۵ سانتی‌متری از مرکز ستون)

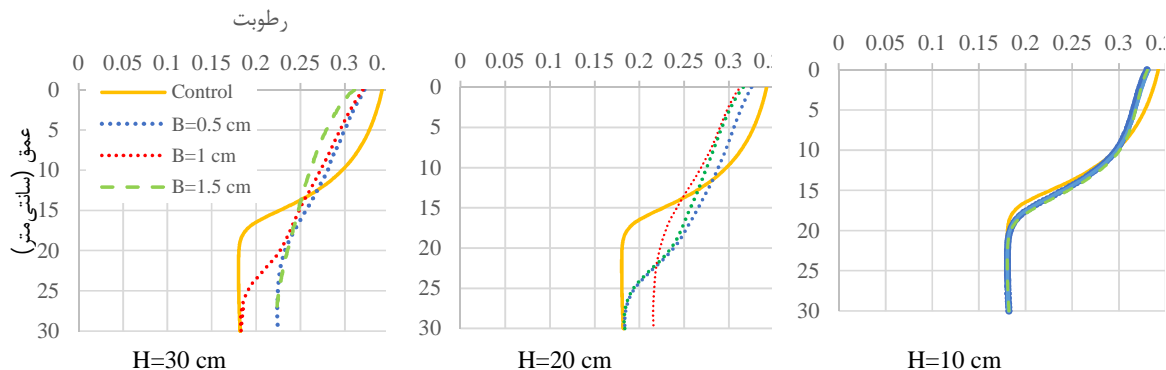


شکل ۵- میزان تغییرات رطوبت (الف) در سطح خاک (ب) در عمق ۲۰ سانتی‌متری به‌ازای عمق‌های مختلف جریان ترجیحی و با قطر شکاف ۱/۵ سانتی‌متری

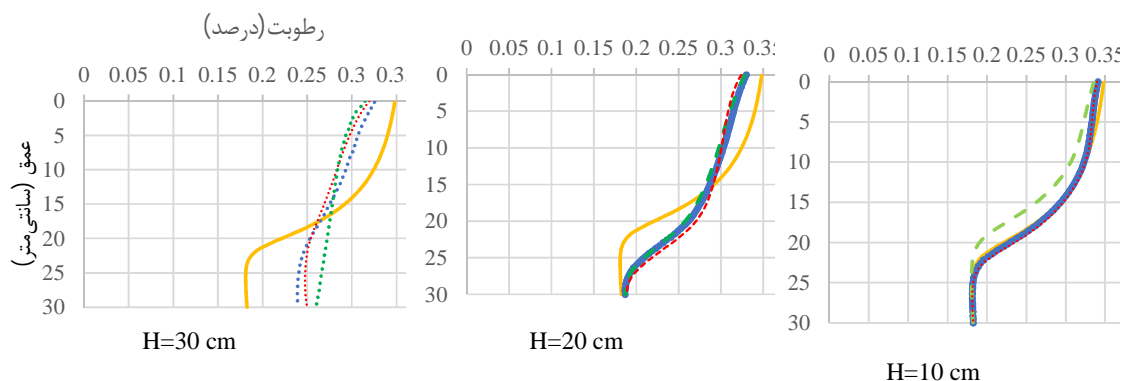
خاک در تیمار T80 نداشت؛ ولی در تیمار با سطح آبیاری T120 به‌ازای شکاف با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متری و قطر ۱/۵ سانتی‌متری، میزان رطوبت تا عمق بیست سانتی‌متری را کاهش داد. اثر قطر شکاف به‌ازای ارتفاع شکاف‌های ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متری، بر توزیع رطوبت در تیمار با سطح آبیاری T80 آشکارتر بود. میزان رطوبت در پروفیل خاک به‌ازای قطر شکاف‌های متفاوت در تیمار T120 اختلاف زیادی نداشت؛ ولی با افزایش ارتفاع شکاف، میزان توزیع رطوبت در عمق‌های مختلف، یکنواخت‌تر شد.

شکافی به عمق ۳۰ و عرض ۱/۵ سانتی‌متر، به‌ترتیب حدود ۱۱، ۹/۳، ۹/۲ و ۹/۱ درصد کاهش یافت و بر میزان رطوبت در عمق ۲۰ سانتی‌متری به‌ترتیب، ۲۴/۱، ۲۵، ۲۷ و ۲۱/۱ درصد افزوده شد.

شکل‌های شماره ۶ و ۷، توزیع پروفیل رطوبت را در اعماق مختلف خاک به‌ازای عرض‌های مختلف جریان ترجیحی در دو تیمار T80 و T120 نشان می‌دهد. براساس شکل، وجود شکافی با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر و قطرهای ۰/۵، ۱ و ۱/۵ سانتی‌متر، اثر معنی‌داری بر توزیع پروفیل رطوبت



شکل ۶- جبهه رطوبتی در سطح آبیاری ۸۰ درصد در تیمارهای ترجیحی با عرض‌های مختلف با HYDRUS-2D (در فاصله ۳/۵ سانتی‌متری از مرکز ستون خاک)



شکل ۷- جبهه رطوبتی در سطح آبیاری ۱۲۰ درصد در تیمارهای ترجیحی با عرض‌های مختلف با HYDRUS-2D (در فاصله ۳/۵ سانتی‌متری از مرکز ستون خاک)

سطح آبیاری، بیشتر باشد، یکنواختی توزیع، بیشتر است و با کاهش میزان رطوبت در سطح خاک و جریان آب به عمق‌های پایین‌تر، سبب توزیع بهتر رطوبت در عمق نسبت به شرایط بدون جریان ترجیحی می‌شود و بهتر است در شرایط با سطوح آبیاری پایین‌تر، منافذی در طول ستون خاک در اطراف عمق توسعه ریشه ایجاد و این منافذ با شن ریزدانه و دارای هدایت هیدرولیکی زیاد پر شود تا توزیع رطوبت در اطراف ناحیه ریشه یکنواخت‌تر شود؛ به‌طور مثال، در سطح خاک در تیمارهای با سطوح آبیاری ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ در حالت وجود جریان ترجیحی با عمق ۳۰ سانتی‌متر و عرض ۱/۵ سانتی‌متر، میزان رطوبت در عمق ۲۰ سانتی‌متری به ترتیب، ۲۴/۱، ۲۵، ۲۷ و ۲۱/۱ درصد افزایش یافت.

نتیجه‌گیری

به‌علت بالا بودن میزان هدایت هیدرولیکی در منافذ ماکرو، جریان‌های ترجیحی شکل می‌گیرد و سبب افزایش میزان نفوذ می‌شود. تعامل بین ماتریکس و ناحیه جریان ترجیحی به میزان رطوبت، بافت خاک و میزان مواد آلی، وابسته است. با افزایش سطح و میزان زمان آبیاری، میزان تلفات نفوذ عمقی افزایش می‌یابد و سبب کاهش راندمان آبیاری می‌شود. وجود جریان‌های ترجیحی در شرایط کم‌آبیاری سبب توزیع بهتر رطوبت در پروفیل خاک، به‌ویژه در ناحیه مجاور جریان‌های ترجیحی، به‌ازای سطوح آبیاری کمتر می‌شود؛ بنابراین، نقش این جریان‌ها در صورت مدیریت بهتر و با تنظیم فواصل آبیاری، سودمند و مفید است. نتایج این پژوهش نشان داد با افزایش میزان عمق و عرض جریان ترجیحی در نواحی اطراف جریان ترجیحی، توزیع رطوبت، یکنواخت‌تر است و هرچه میزان

- soil science and hydrology. Academic Press, Waltham, MA: USA.
11. Kandelous M. and Simunek J. 2010. Comparison of numerical, analytical, and empirical models to estimate wetting patterns for surface and subsurface drip irrigation. *Irrigation Science*. 28: 435-444.
 12. Klute A. 1986. Water retention: laboratory methods. In: Klute, A. (Ed.) *Method of Soil Analysis. Part 1: Physical and Mineralogical Methods*. 2nd ed., ASA/SSSA. Monograph. pp. 635-662.
 13. Lehmann J. Rillig M. C. Thies J. Masiello C. A. Hockaday W. C. and Crowley D. 2011. Biochareffects on soil biota a review. *Soil Biol*. 43: 1812-1836.
 14. Maximilian J. and Mohanty B. P. 2005. Water flow processes in a soil column with a cylindrical macropore: Experiment and hierarchical modeling. *Water Resources Research*. 41: 1-17.
 15. Playan E. and Mateos L. 2004. Modernization and optimization of irrigation systems to increase water productivity. *Agricultural water management*. 80(1): 100-116.
 16. Skaggs T. Trout T. Šimunek J. and Shouse P. 2004. Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 130: 304-310.
 17. Tabatabaei S. H. Nourmahnad N. Golestani Kermani S. Tabatabaei S. A. Heidarpour M. and Najafi P. 2020. Urban wastewater reuse in agriculture for irrigation in arid and semi-arid regions - A review. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*. 9: 193-220.
 18. Walkly A. and Black I. A. 1934. An examination of digestion method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration. *Soil Sci*. 37: 29-38.
 19. Wang Y. Scott A. and Simunek J. 2013. Transport and fate of microorganisms in soils with preferential flow under different solution chemistry conditions. *Journal Water resource research*. 49: 2424-2436.
 20. Zhang Y. Niu J. Zhang M. Xiao Z. and Zhu W. 2017. Interaction between plant roots and soil water flow in response to preferential flow paths in northern China. *Land Degrad. Dev*. 28: 648-663.
 21. Zhang Z. B. Zhou H. Zhao Q. G. Lin H. and Peng X. 2014. Characteristics of cracks in two paddy soils and their impacts on preferential flow. *Geoderma*. 228: 114-121.
- منابع**
۱. احمدی مقدم ز. طباطبایی س. ح. و ابراهیمی ع. ۱۳۹۹. اثر هم‌زمان کم‌آبیاری و جریان ترجیحی بر نگهداشت باکتری ایشریشیاکولی در خاک. نشریه آبیاری و زهکشی. ۶(۱۴): ۲۲۰۳-۲۲۱۶.
 ۲. جعفری ف. یزدانی ح. ر. و مصطفی‌زاده فرد ب. ۱۳۸۶. مدیریت آبیاری در خاک‌های ترک‌دار شالیزار. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه صنعتی اصفهان. دانشکده کشاورزی. ۱۵۵ص.
 ۳. جعفری ن. آقایی ف. و پاک‌نژاد ف. ۱۳۹۷. تأثیر روش‌های مختلف کم‌آبیاری بر عملکرد و کارایی مصرف آب گندم رقم پارسی. نشریه علمی پژوهشی اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی. ۱۲(۴): ۵۸۱-۵۹۸.
 ۴. حمدی احمدآبادی. لیاقت ع. سهرابی ت. رسول‌زاده ع. و نظری ب. ۱۳۹۶. بهبود عملکرد آبیاری سطحی با مدیریت زمان قطع جریان در مدل SIRMOD (مطالعه موردی: کشت و صنعت و دامپروری مغان). تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۸(۴): ۸۱۱-۸۲۲.
 ۵. زند سلیمی س. محبوبی ع. ا. صدقی م. رشیدیان م. و فیروزمنش م. ۱۳۸۵. بررسی اثر تیمارهای خاک بر منحنی رخنه باکتری ایشریشیاکولی آزادشده از کودهای آلی مختلف. نشریه آب و فاضلاب. ۷۴: ۵۹-۶۳.
 6. Arminian R. Mohammadi S. Houshmand S. and Khodombashi M. 2011. Chromosomal analysis of photosynthesis rate and stomatal conductance and their relationships with grain yield in wheat (*Triticum aestivum* L.) under water-stressed and well-watered conditions. *Acta Physiologiae Plantarum*. 33(3): 755-764.
 7. Black G. R. 1986. Bulk density. In: Klute, A. *Methods of soil analysis. Part I. Physical and mineralogical methods*. Soil Science Society of America. *Agronomy Monograph*. 9: 374-380.
 8. Ehlers W. and Goss M. 2003. *Water Dynamics in Plant Production*. CABI Publishing. 288 pp.
 9. Geohring L. D. Wright Wright P. E. Steenhuis T. S. and Walter M.F. 1999. Fecal Coliforms in Tile Drainage Effluent. ASAE Paper 99-2203. Amer. Soc. of Ag. Eng., St. Joseph, MI. 20 p.
 10. Jarvis N. J. Moeyes J. Koestel J. and Hollis J. M. 2012. Preferential flow in a pedological perspective. Pages 75-120 in H. Lin, ed. *Hydropedology: synergistic integration of*

