

شبیه‌سازی توزیع رطوبت اطراف ریشه گیاه ذرت در خاکی با بافت سنگین تحت آبیاری
قطره‌ای نواری با استفاده از مدل HYDRUSSimulation of soil moisture distribution around of corn plant root in heavy soil
texture under drip-tape-irrigation system using HYDRUS-2D modelپرنیان مجیدی چهارمحالی^۱، حیدرعلی کشکولی^۲، داود خدادادی دهکردی^{۳*}، علی مختاران^۴، اصلا
اگر نژاد^۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۵/۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۵/۲۵

چکیده

آبیاری قطره‌ای یکی از بهترین روش‌های آبیاری است که از کم‌ترین مقدار آب در هر واحد محصول استفاده می‌کند و تلفات آب را از طریق تبخیر و نفوذ عمقی حذف می‌کند. با توجه به افزایش تمایل کشاورزان به استفاده از سیستم‌های آبیاری قطره‌ای به دلیل داشتن راندمان بالاتر، لزوم شناخت عوامل و پارامترهای تأثیرگذار بر این سیستم‌ها به منظور بالابردن راندمان آن‌ها اهمیت می‌یابد. یکی از این عوامل، الگوی مرطوب شدن قطره چکان‌هاست که نشان می‌دهد چگونه آب توزیع می‌شود و آیا برای ریشه‌ها کافی است یا خیر. مدل هایدروس توزیع رطوبتی خاک را با توجه به شرایط طراحی آن (بافت خاک و ویژگی‌های هیدرولیکی، تخلیه قطره‌چکان‌ها، مکان و فاصله) شبیه‌سازی می‌کند. تحقیق حاضر برای بررسی کارایی مدل HYDRUS در شبیه‌سازی حرکت آب در خاک و توزیع مجدد رطوبت اطراف ریشه گیاه ذرت در خاک‌های همگن و سنگین انجام گرفت. این تحقیق در مرکز تحقیقات کشاورزی استان خوزستان تحت آبیاری قطره‌ای نواری تیپ با سه رژیم آبیاری ۲، ۳ و ۴ روزه با سه تکرار در طی دو سال زراعی اعمال شد. به منظور پایش رطوبت اطراف ریشه، نیم‌رخ خاک تا عمق ۷۵ سانتی‌متری عمود بر نوار آبیاری قطره‌ای حفر شد. مقادیر رطوبت مشاهده‌ای و شبیه‌سازی، توسط آماره‌های R^2 ، EF ، ME و $RMSE$ مقایسه شدند. نتایج نشان داد میانگین توزیع رطوبت در رژیم آبیاری در محدوده ظرفیت زراعی است. مقادیر $RMSE$ برای رژیم‌های مختلف از ۲۹ تا ۴۰ درصد و مقادیر ME برای رژیم‌های مختلف از ۱ تا ۲ درصد متغیر بود. براساس مقادیر ME و $RMSE$ ، شبیه‌سازی رطوبت در رده عالی طبقه بندی شد. همچنین نتایج ضریب تبیین بین ۶۰ تا ۹۰ درصد و میزان کارایی مدل بین ۴۰ تا ۹۰ درصد میباشد بر اساس نتایج کمترین کارایی مدل در شبیه‌سازی ۲۴ ساعت بعد از آبیاری و بهترین شبیه‌سازی ۷۲ ساعت بعد از آبیاری بوده است. نتایج نشان‌دهنده توانمندی بالای مدل در شبیه‌سازی رطوبت حجمی خاک می‌باشد.

کلمات کلیدی: آبیاری قطره‌ای نواری، توزیع رطوبت، دور آبیاری، ذرت، مدل هایدروس.

- ۱- گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.
- ۲- گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.
- ۳- گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.
- ۴- استادیار پژوهشی بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خوزستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران.
- ۵- گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

*مسئول مکاتبه: Email: davood_kh70@yahoo.com

مقدمه

جنوب استان خوزستان دارای اقلیمی گرم و خشک است که با مشکل بی آبی بخصوص در فصل تابستان دست و پنجه نرم می‌کند. استفاده از سامانه‌های نوین آبیاری مانند آبیاری قطره‌ای نواری برای کشت گیاهان پردرآمد تابستانه مانند برنج، علوفه و نخیلات بسیار حایز اهمیت است (ورجاوند و همکاران، ۱۳۹۸). اراضی کشاورزی جنوب استان خوزستان، زمین‌هایی با بافت سنگین، شور و سدیمی با عمق آب زیرزمینی شور و کم عمق می‌باشند. لذا استفاده از سامانه‌های آبیاری تحت فشار (بارانی و قطره‌ای) در اراضی مذکور با توجه به محدودیت منابع آب ملزم به انجام تحقیق است. ارزیابی این سامانه‌ها از جمله پایش گیاه و خاک در اراضی مذکور با توجه به خشکسالی‌های اخیر و نتایج آن، می‌تواند در اجرا یا عدم اجرای سامانه‌های آبیاری نوین در مناطق مرکزی و جنوبی استان خوزستان بسیار مفید و ارزشمند باشد. با این حال، هنگام استفاده از استراتژی‌های صرفه‌جویی در مصرف آب، بسیار مهم است که وضعیت خاک و آب زراعی رصد شود تا در زمان واقعی، سطح تنش آب زراعی شناسایی شده و از عواقب جبران ناپذیر بر محصول و یا از بین رفتن تولید آن جلوگیری شود (Martínez et al., 2018). به همین دلایل ابزارهایی با کاربرد آسان، مانند مدل‌های شبیه‌سازی که قابلیت شبیه‌سازی انتقال آب در محیط خاک و گیاه را دارند اغلب برای ارزیابی غیرمستقیم وضعیت خاک و آب زراعی و برای برآورد شاخص‌های مربوط به تنش استفاده می‌شوند

(Minacapilliet al., 2009; Cammalleriet al., 2013; Ralloet al., 2017). یکی از محبوب‌ترین بسته‌های نرم افزاری برای شبیه‌سازی آب و انتقال نمک در خاک‌های اشباع مدل هایدروس است (Šimůnek et al., 2016). یکی از مزیت‌های اصلی این مدل انعطاف‌پذیری در انواع بافت خاک (با محدودیت در خاک‌های سنگین) با هر ترکیبی از منابع آب (منبع نقطه‌ای، منبع خطی یا هر منبع سطحی) است. این انعطاف‌پذیری بسیاری از محققان را ترغیب به استفاده از آن برای شبیه‌سازی آبیاری قطره‌ای کرده است (Bufonet al., 2012; Elnesret al., 2014; Mguidicheet al., 2015). مدل هایدروس به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته و در شبیه‌سازی توزیع رطوبت خاک در سیستم‌های متفاوت آبیاری، خاک‌های متنوع و مدیریت‌های متفاوت موفق بوده است (Karadndishet al., 2016). این مدل جریان پیچیده‌ای را در دامنه‌های یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی با استفاده از یک رابطه گرافیکی و شرایط مرزی انعطاف پذیر امکان پذیر می‌کند. از این مدل برای شبیه‌سازی انواع آبیاری‌های مختلف استفاده شده است، مانند آبیاری مداوم سیل (Mo'allimet al., 2018)، آبیاری نواری (Ebrahimianet al., 2013; Bristow et al., 2020) آبیاری بارانی (Yang et al., 2019; Naghedifaret al., 2018)، آبیاری قطره‌ای سطحی (Phogatet al., 2018) و آبیاری قطره‌ای زیر سطحی (Reyes et al., 2019; Elasbaet al., 2019).

بلافاصله پس از انتهای آبیاری، افزایش ذخیره آب خاک در زیر کف شیار تا حدودی برابر این میزان در زیر حاشیه بالایی شیار می‌باشد. در صورتی که حرکت آب به سمت پایین به علت لایه‌های میانی در خاک محدود شده‌است. عبدالرشید و همکاران (Abdrashid et al., 2015) خصوصیات هیدرولیکی خاک را در خاک زیر درخت نخل با استفاده از روش معکوس در مدل هایدروس دو و سه بعدی، تخمین زدند. حل معکوس با استفاده از داده‌های نفوذسنج نشان داد که این روش، به عنوان روشی بسیار مفید برای گسسته سازی سریع خصوصیات هیدرولیکی خاک زیر درخت نخل است. چن و همکاران (Chen et al., 2014) تاثیر تغییرات زمانی شاخص سطح برگ را بر پیش بینی‌های رطوبت خاک با استفاده از داده‌های سنسج از دور پوشش گیاهی بررسی کردند. در این پژوهش پیش بینی‌ها با استفاده از دو مدل (IBIS) و هایدروس انجام شد. پوریزدان خواه و همکاران (۱۳۹۳) رطوبت خاک تحت یک منبع خطی در خاک سنگین را با استفاده از مدل هایدروس دو بعدی شبیه‌سازی کردند. این محققین بیان کردند که با وجود بافت سنگین و ناهمگن خاک در منطقه، مدل توانست مقادیر رطوبت را در الگوی خیس شده به خوبی شبیه‌سازی کند. کرمی و همکاران (۱۳۹۴)، شبیه‌سازی آبشویی خاک شور را با استفاده از مدل هایدروس دو بعدی انجام داد. نتایج حاصل از این تحقیق نشانگر آن است که این مدل به خوبی توزیع شوری در خاک را شبیه‌سازی کرده‌است. باتوجه به شور بودن خاک کشاورزی و کیفیت پایین آب‌های در دسترس، اگر مشکل تجمع نمک در مجاورت بذر در زمان جوانه زدن زیاد باشد، استقرار گیاه با مشکل مواجه می‌شود. شبیه‌سازی حرکت نمک و املاح در خاک آبیاری شده این امکان را فراهم می‌کند که

فوقات و همکاران (Phogat et al., 2013) این مدل را در ارزیابی نوسانات روزانه آب برای آبیاری درختان بادام تحت مدیریت‌های متفاوت استفاده کردند. نتایج خوب اجرای این مدل برای توزیع مجدد زمانی و مکانی دینامیک آب در دامنه خاک، همچنین شبیه‌سازی روزانه جذب آب توسط ریشه را در پاسخ به نوسانات تبخیر و تعرق ارائه شده است. هر چند که با توجه به نتایج آنها، مدل میزان جذب آب توسط ریشه را از میزان اندازه‌گیری شده توسط سنسورها بیشتر شبیه‌سازی کرده‌است. عسکری و همکاران (Askari et al., 2014) اثرات سطح ایستابی بالا و شوری به کار رفته را در میزان آب مصرفی درخت نخل مورد بررسی قرار دادند که به این منظور از بسته نرم افزاری هایدروس یک بعدی به درستی تعرق درخت نخلی را که از آب زیرزمینی شور استفاده می‌کرد شبیه‌سازی نمود. لی و همکاران (Li et al., 2014) با به کارگیری مدل هایدروس یک بعدی حرکت آب را در یک مزرعه آزمایشی برنج ارزیابی کردند که در این پژوهش شبیه‌سازی حرکت آب با هایدروس به درستی انجام شده‌است. نگلیک و همکاران (Naglic et al., 2014) تاثیر بافت، میزان دبی قطره چکان و شرایط رطوبت اولیه خاک را بر اندازه الگوی خیس شدگی به صورت عددی بررسی کردند که به این منظور از مدل هایدروس دو و سه بعدی استفاده شد و نتایج حاکی از آن است که این مدل به خوبی ابعاد الگوی خیس شدگی را شبیه‌سازی کرده‌است. چن و همکاران (Chen et al., 2014) با استفاده از مدل هایدروس دو بعدی حرکت آب و نمک را در آبیاری شیار با آب شور شبیه‌سازی کردند. این محققین گزارش کردند که مدل به خوبی حرکت آب و املاح را در این شرایط شبیه‌سازی کرده است. هم چنین نتایج شبیه‌سازی بیانگر این می‌باشد که

شبیه‌سازی توزیع رطوبت اطراف ریشه گیاه ذرت در خاکی با بافت سنگین...

۷- درجه سانتی‌گراد گزارش شده‌است. آب مزارع مرکز با استفاده از یک کانال با پوشش سیمانی از ساحل راست رودخانه کارون بوسیله ایستگاه پمپاژ تامین می‌گردد. در این شرایط کیفیت آب آبیاری کاملاً وابسته به کیفیت آب رودخانه کارون است. قبل از کشت، به منظور یکسان نمودن شرایط خاک برای شروع به کار سامانه، عملیات آبخویی در مزرعه انجام شد. پس از نفوذ آب در زمین و خشک شدن نسبی خاک، از مزرعه نمونه خاک به صورت مرکب برداشته شد و برای تعیین وضعیت بافت خاک منطقه مورد مطالعه در اعماق مختلف و درصد رس، سیلت و شن و وزن مخصوص ظاهری به آزمایشگاه ارسال شد که نتایج آن در (جدول ۱) نمایش داده شده است. فاصله خطوط کشت ۷۵ سانتی‌متر و فاصله بوته‌ها بر روی هر خط ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد.

در سامانه آبیاری قطره‌ای نواری محاسبات مربوط به تعیین مقدار آب مورد نیاز در هر نوبت آبیاری و با توجه به رژیم‌های متفاوت آبیاری با دوره‌های ۲، ۳ و ۴ روزه، براساس نیاز آبی، به تفکیک دوره رشد گیاه تعیین و برای هر تیمار مشخص شده و طبق آن عمل شد. نیاز آبی گیاه ذرت به روش پنمن مانتیث-فانو براساس داده‌های آمار هواشناسی و کیفیت آب آبیاری برآورد و برنامه‌ریزی آبیاری در ماه-های مختلف رشد بر این اساس انجام شد. هر تیمار آبیاری شامل چهار نوار آبیاری (تیپ) به طول ۵۰ متر می‌باشد که تیمارهای مختلف با شیر فلکه‌های به قطر ۱/۲ اینچ که بر روی ورودی نوارهای آبیاری نصب هستند، جدا شده‌اند. با اینکار می‌توان تفاوت ساعات آبیاری در رژیم‌های مختلف را کنترل کرد. نوارهای آبیاری قطره‌ای نواری (تیپ) با فواصل ۷۵ سانتی‌متری از همدیگر در هر ردیف کاشت بذر پهن شدند. روزنه‌های خروجی آب بر روی هر نوار با فواصل ۲۰ سانتی‌متر از همدیگر می‌باشند و دبی هر روزنه

عمق بهینه برای کارگذاری قطره‌چکان را تعیین کرده و با تغییر میزان دبی قطره چکان و دور آبیاری، از کاهش محصول و افزایش شوری جلوگیری کرد. بنابراین، تحقیق حاضر با هدف بررسی نحوه‌ی توزیع رطوبت اطراف ریشه گیاه ذرت در یک خاک رسی تحت آبیاری قطره‌ای نواری و مقایسه نتایج با مدل هایدروس انجام پذیرفت.

مواد و روش‌ها

تحقیق حاضر در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خوزستان در تابستان سال ۱۳۹۷-۱۳۹۸ اجرا شد. مزرعه تحقیقاتی به دلیل داشتن بافت خاک رس و رسی سیلتی، آب شور زیرزمینی کم عمق (۱/۵ متری از سطح زمین) و شرایط آب و هوا، می‌تواند شاهدهی از مزارع کشاورزی مرکز و جنوب استان خوزستان باشد. این مزرعه مجهز به سامانه آبیاری تحت فشار بارانی و قطره‌ای است. تامین آب شبکه آبیاری تحت فشار، مشتمل بر یک استخر ذخیره آب به حجم ۲۴۲ مترمکعب، الکتروپمپ ۴/۵ کیلووات و خط لوله انتقال آب پلی‌اتیلن ۱۲۵ میلیمتر به طول ۲۵۰ متر می‌باشد. مزرعه آبیاری قطره‌ای نواری (تیپ) با سطحی حدود ۰/۵ هکتار با طول ۱۰۰ متر و عرض ۵۰ متر دارای سیستم فیلتراسیون و تعداد ۶۷ لوله پلی‌اتیلن سایز ۱۶ میلیمتر برای اتصال به نوار قطره‌ای (تیپ) می‌باشد. مزرعه مورد استفاده در مختصات $31^{\circ} 18' 19/4''$ عرض شمالی و $48^{\circ} 38' 10/7''$ طول شرقی در ارتفاع ۱۵ متر از سطح دریا واقع شده‌است. شهر اهواز مرکز استان خوزستان از نظر اقلیمی جزو مناطق نیمه‌خشک تا خشک کشور به شمار می‌آید. متوسط بارندگی در استان خوزستان طبق آمار بلند مدت ۲۵۵ میلی‌متر و متوسط تبخیر ۲۱۰۰ میلی‌متر در سال می‌باشد. متوسط درجه حرارت در دوره گرم ۳۱ درجه و حداکثر مطلق آن ۵۴ درجه سانتی‌گراد بوده‌است. متوسط درجه حرارت در دوره سرد ۱۵ درجه و حداقل مطلق آن

اشباع، n و α ضرایبی هستند مربوط به توابع هیدرولیکی خاک که مستقیماً شبکه عصبی تخمین زده می‌شوند، I نیز پارامتر تجربی مربوط به پیوستگی خلل و فرج خاک است که پارامترهای ورودی مدل HYDRUS هستند. مشخصات هیدرولیکی خاک با استفاده از مدل ون گنوختن - معلم (۱۹۸۰) تعریف شده است:

رابطه ۲:

$$\theta = \begin{cases} \theta(h) = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{(1 + |\alpha \cdot h|^n)^m} h < 0 \\ \theta_s h \geq 0 \end{cases}$$

رابطه ۳:

$$K(h) = K_s \frac{[(1 + |\alpha \cdot h|^n)^m - |\alpha \cdot h|^{n-1}]^2}{(1 + |\alpha \cdot h|^2)^{m(L+2)}}$$

رابطه ۴:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, m = 1 - \frac{1}{n}$$

که در آن S_e : اشباع نسبی، θ_s : رطوبت حجمی اشباع خاک، θ_r : رطوبت باقی مانده در پروفیل خاک، K_s : هدایت آبی اشباع و n و α پارامترهای تجربی می‌باشند. مدل HYDRUS به منظور حل عددی عناصر محدود، محیط شبیه‌سازی سه بعدی را با استفاده از مش گریدها به منشورهای چهار وجهی، شش وجهی و یا مثلثی تقسیم می‌نماید، در این تحقیق به دلیل استفاده از حالت دو بعدی از حالت مثلثی برای مش بندی استفاده شده است. هر چه گره‌ها به یکدیگر نزدیک‌تر باشند، نتایج دقیق‌تر ولی زمان محاسبات طولانی‌تر می‌گردد.

مدل واقعی تعریف شده به HYDRUS

به دلیل تقارن زیاد نیمه راست و چپ پروفیل رطوبتی خاک در شرایط واقعی، شبیه‌سازی پروفیل رطوبتی با مدل

۲ لیتر بر ساعت است. در این طرح نمونه‌گیری از آب آبیاری جهت تحلیل کیفی آب در طی فصل رشد گیاه، نمونه‌برداری از خاک مزرعه به طور کلی در ۴ نوبت (قبل از کشت تا بعد از برداشت محصول) با هدف تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی جهت پایش املاح در ۳ عمق ۰-۲۵، ۲۵-۵۰ و ۵۰-۷۵ سانتی‌متری از سطح زمین انجام شد.

توصیف مدل عددی

این مدل شامل حل عددی معادله ریچاردز برای بررسی حرکت آب در خاک و معاملات مربوطه به روش عناصر محدود Galerkin حل گردیده‌اند (Simunek et al., 2006). در این مدل حرکت سه بعدی آب در خاک با استفاده از حل عددی معادله ریچاردز شبیه‌سازی شده است که با فرض خاک هم‌روند و یکنواخت از رابطه زیر محاسبه شد:

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

که در آن θ : رطوبت حجمی ($L^{-3}L^3$)، (h) : پتانسیل فشاری آب موجود در خاک (L)، t : زمان (T)، x : محور افقی (L)، z : مختصات عمودی (L) و k : هدایت آبی (LT^{-1}) می‌باشند.

پارامترهای هیدرولیکی خاک

قبل از اجرای مدل و شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک (در دو حالت افقی و عمودی) لازم بود که پارامترهای هیدرولیکی خاک تعیین شوند. برای تعیین پارامترهای هیدرولیکی از مدل ROSSETA استفاده شد که یک نسخه از آن به صورت لینک با مدل HYDRUS وجود دارد. مقادیر این پارامترها در (جدول ۲) ارائه شده است. در این جدول θ_r : رطوبت باقی مانده در خاک، θ_s : رطوبت اشباع خاک، K_s : ضریب نفوذپذیری خاک در حالت

شبیه‌سازی توزیع رطوبت اطراف ریشه گیاه ذرت در خاکی با بافت سنگین...

$$\text{رابطه ۶: } ME = \frac{1}{n} \sum P_i - O_i$$

$$\text{رابطه ۷: } R^2 = \frac{(\sum(P_i - P_0)(O_i - O_0))^2}{\sum(P_i - P_0)^2 \times \sum(O_i - O_0)^2}$$

$$\text{رابطه ۸: } EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_0)^2}$$

P_i : مقادیر برآورده شده، O_i : مقادیر مشاهده‌ای، O_0 :

میانگین مقادیر مشاهده‌ای و P_0 : میانگین مقادیر برآورد شده

واسنجی مدل HYDRUS

ابتدا مدل با استفاده از داده‌های به دست آمده از آزمایش دوم مورد واسنجی قرار گرفت. واسنجی مدل به این ترتیب بود که مدل برای زمان به نسبت طولانی اجرا شد و مشاهده گردید که مدل برآورد خوبی با نتایج مشاهده‌ای داشت.

نتایج و بحث

چگونگی حرکت آب و توزیع مجدد آن در خاک تحت آبیاری با یک منبع خطی توسط مدل HYDRUS شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که این مدل دارای توانایی بالایی در شبیه‌سازی میزان رطوبت خاک و توزیع مجدد آب در خاک دارد. برای صحت سنجی مدل HYDRUS از داده‌های به دست آمده در آزمایش سوم استفاده شد. یکی از اهداف این تحقیق بررسی توزیع رطوبت در زمان‌های بعد از آبیاری است. به منظور بررسی توانایی مدل عددی HYDRUS در تخمین میزان رطوبت در خاک در زمان بعد از آبیاری، مقایسه‌ای با داده‌های مشاهده‌ای در اعماق و مکان‌های مختلف خاک در هر سه رژیم آبیاری انجام گرفت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل نشان داد که مدل عددی HYDRUS برآورد خوبی از میزان رطوبت را در هر سه رژیم آبیاری، از خود نشان داد و ضریب تبیین حاصل از این برآورد ۰/۶۰ تا ۰/۹۲ بود. همان‌طوری که در شکل ۲ مشاهده می‌شود در رژیم آبیاری ۳ و ۴ روزه خط

تنها برای نیمه راست صورت گرفته و سپس با شرایط واقعی مقایسه شد. محیط شبیه‌سازی شده در مدل محدوده‌ای به عرض ۷۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر است که تغذیه توسط قطره چکان از بالای محدوده شبیه‌سازی شده انجام می‌پذیرد.

شرایط اولیه و شرایط مرزی تعریف شده برای

مدل

در شرایط اولیه تعریف شده به مدل، توزیع رطوبت به صورت خطی است. شرایط مرزی تعریف شده برای مدل به این صورت بود که در انتهایی محدوده شبیه‌سازی شده زهکشی آزاد، سطح خاک به عنوان مرز ورود آب و تماس با اتمسفر و طرف راست و چپ محیط مدل شده مرزها بدون جریان تعریف شده‌اند. یک نوع شرط مرزی زمانی متغیر جریان (Time variable boundary condition) واقع در سطح خاک تعریف شد که در طول زمان آبیاری با قطره چکان شدت جریان ورودی آب به خاک بر اساس دبی قطره چکان برای آن در نظر گرفته می‌شد و در زمان‌های غیر آبیاری مقدار دبی قطره‌چکان صفر در نظر گرفته می‌شد.

شاخص‌های ارزیابی مدل

در ارزیابی و مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت خاک، از شاخص‌های آماری ME ، EF و $RSME$ استفاده شد. مجدور میانگین مربعات خطا ($RMSE$)، میانگین انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده را از مقادیر اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. ME متوسط مطلق خطا بوده و می‌تواند بیش برآورد یا کم برآورد مدل را مشخص نماید. R^2 ضریب تبیین مدل و EF کارایی مدل است.

$$\text{رابطه ۵: } RSME = \left(\frac{\sum_{i=0}^{i=n} (P_i - O_i)^2}{n} \right)^{\frac{1}{2}}$$

آبیاری در اعماق مختلف خاک، بطور مستقل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند برآورد درصد رطوبت حجمی در زمان‌های ۱، ۲ و ۳ روز بعد از آبیاری در مکان‌های مختلف نمونه‌گیری در شکل ۳ ارائه شده است. بعد از آبیاری به دلیل توزیع مجدد رطوبت، تا زمانی که نقاط هم عمق به رطوبت یکسان دست یابند، تغییرات رطوبت ادامه دارد که این موضوع در نمودارها کاملاً مشهود است. این موضوع به دلیل یکنواخت بودن خاک مورد مطالعه و در نتیجه مشابه فرض نمودن الگوی توزیع رطوبتی قابل توجه است. می‌توان بیان نمود که مدل پیشروی جبهه رطوبتی را به دلیل همگن و ایزوتروپ فرض نمودن خاک، بسیار منظم پیش‌بینی می‌کند که این امر ممکن است با واقعیتی که در طبیعت (شرایط مزرعه‌ای) یا در شرایط آزمایشگاهی بنابر دلایلی مانند وجود سنگ‌ها، حفرات یا عدم تراکم یکنواخت در خاک اتفاق می‌افتد کمی اختلاف داشته باشد. این نتایج با تحقیق (خلیلی و همکاران، ۱۳۹۵) مطابقت دارد. نتایج شبیه‌سازی مدل نشان می‌دهد که بیشترین میزان رطوبت در هر شکل در محل قرارگیری قطره‌چکان‌ها است و شکل ۳ بیانگر این موضوع است در اکثر حالات تحت رژیم و عمق‌های مختلف مشاهده شد که مقادیر برآورد شده توسط مدل HYDRUS به مقادیر مشاهده‌ای نزدیک می‌باشد و در بعضی حالات نیز کم‌تر و یا بیشتر از مقادیر مشاهده‌ای می‌باشد. در تحلیل حرکت رطوبت در خاک از تاثیر وجود ریشه در پروفیل خاک نمی‌توان غافل بود. بلافاصله بعد از آبیاری رطوبت خاک در لایه ۰ تا ۲۵ سانتی متری به بالاترین مقدار خود رسیده است و سپس به دلیل جذب آب توسط ریشه و تبخیر تا آبیاری بعدی کاهش پیدا کرده است. می‌توان نتیجه گرفت که رطوبت بالا در این ناحیه به دلیل توسعه ریشه منجر به کاهش سریع رطوبت بعد از آبیاری

رگرسیون انطباق بهتری با خط نیمساز دارد و در رژیم آبیاری ۲ روزه تمامی داده‌ها بالاتر از خط نیمساز قرار گرفته‌اند که بیانگر این مطلب است که مدل هایدروس در تمامی نقاط مقدار بیش‌تری را برای رطوبت برآورد کرده است، با این حال ضریب زاویه خطررگرسیون در تمامی رژیم‌ها به عدد یک بسیار نزدیک بوده که نشان از شباهت زیاد بین داده‌های برآورد شده و مشاهده‌ای دارد. (Abouliat *et al.*, 2012), (Phogatet *al.*, 2012) و (Selimet *al.*, 2013) نیز دقت بالای HYDRUS در مدلسازی تغییرات رطوبت خاک بیان کرده‌اند. در تحقیق عطایی و همکاران (۱۳۹۷) ثابت شد که با کاربرد هایدروس برای شرایط واقعی باغ تحت مدیریت باغدار می‌تواند رطوبت خاک و جذب آب ریشه را با دقت و صحت بالایی برآورد نماید. زاویه خطررگرسیون در تمامی رژیم‌ها به عدد یک بسیار نزدیک بوده که نشان از شباهت زیاد بین داده‌های برآورد شده و مشاهده‌ای دارد. (Phogatet *al.*, 2012), (Abouliat *al.*, 2012) و (Selimet *al.*, 2013) نیز دقت بالای HYDRUS در مدلسازی تغییرات رطوبت خاک بیان کرده‌اند. در تحقیق عطایی و همکاران (۱۳۹۷) ثابت شد که با کاربرد هایدروس برای شرایط واقعی باغ تحت مدیریت باغدار می‌تواند رطوبت خاک و جذب آب ریشه را با دقت و صحت بالایی برآورد نماید. با توجه به رژیم‌های متفاوت ۲، ۳ و ۴ روزه و با هدف بررسی توزیع رطوبت بعد از هر آبیاری تا شروع آبیاری بعدی، نمونه برداری رطوبت خاک به ترتیب یک روز بعد از آبیاری در تمامی رژیم‌های آبیاری، دو روز بعد در رژیم آبیاری ۳ روزه و ۳ روز بعد در رژیم آبیاری ۴ روزه انجام گرفت. به منظور برآورد میزان رطوبت، داده‌های مورد بررسی در زمان‌های بعد از آبیاری تحت تیمارهای رژیم

شبیه‌سازی توزیع رطوبت اطراف ریشه گیاه ذرت در خاک با بافت سنگین...

ساعت تا عمق ۰-۴۵ سانتی متری بیش از حد ظرفیت مزرعه است و این نشان دهنده توزیع مناسب رطوبت از طریق قطره‌چکان می‌باشد. شکل ۵-ب نشان دهنده وضعیت توزیع رطوبت ۴۸ ساعت بعد از آبیاری می‌باشد. الگوی توزیع رطوبت در این زمان بیان کننده کاهش رطوبت در سطح خاک و افزایش تدریجی آن در لایه‌های پایین می‌باشد. شکل ۶-الف وب پروفیل رژیم آبیاری ۴ روزه افزایش رطوبت در لایه‌های سطحی تا بیش از ۴۰ درصد حجمی و تغییر جهت روند کاهش آن را در بر می‌دارد. و به تدریج لایه‌های پایین تر را تحت تاثیر قرار می‌دهد. شکل ۴-ج روند حرکت رطوبت پس از ۷۲ ساعت را نشان می‌دهد. تغییر جهت کاهش رطوبت در این شکل حاکی از پایین آمدن رطوبت در لایه‌های بالایی به میزان قابل توجه می‌باشد در نتیجه نیاز به آبیاری دیگری دارد.

نتایج ارزیابی مدل

با توجه به بررسی‌های آماری با در نظر گرفتن پارامتر آماری RMSE هر چه مقدار این پارامتر کم تر باشد مدل از کارایی بهتری برخوردار خواهد بود ولی با این پارامتر نمی‌توان مشخص نمود که مقادیر پیش بینی شده، بیش تر یا کم تر از مقادیر اندازه گیری شده هستند لذا از پارامتر میانگین خطا ME استفاده گردید، با این ترتیب که مقادیر مثبت آن نشان دهنده پیش بینی بیش تر (بیش برآورد) و مقادیر منفی آن نشان دهنده پیش بینی کم تر (کم برآورد) از مقادیر واقعی (مشاهده‌ای) می‌باشد. با توجه به جدول ۳، مقادیر بدست آمده تحت همه تیمارهای تحقیق مدل HYDRUS مقدار رطوبت را بیش تر از مقدار واقعی (مشاهده‌ای) برآورد کرده است. نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج حاصل از تحقیق افشار جهان‌شاهی و همکاران (۱۳۹۱) و دهقانی سانچ و همکاران (۱۳۹۸) مطابقت دارد. مقدار آماره EF نشان دهنده صحت برازش داده ها می‌باشد و از مقدار منفی بی

شده است. این نتایج با تحقیق Wenling et al. (2018) مطابقت دارد. عاملی که حرکت جانبی آب را نسبت به حرکت عمودی غالب ساخته است را می‌توان بالا بودن درصد رس خاک دانست علاوه بر آن می‌توان دریافت که بافت رسی خاک باعث توزیع و همپوشانی مناسب رطوبت در اطراف گیاه شده است. توزیع مکانی رطوبت خاک واکنش واضحی به شرایط آبیاری، جذب آب توسط ریشه گیاه در منطقه توسعه ریشه و تبخیر و تعرق از قسمت‌های خالی از کشت است (Li et al., 2015; Li et al., 2016). در لایه‌های بالایی خاک مقادیر بالاتر رطوبت خاک به فواصل آبیاری بستگی دارد و به مقدار زیادی تحت تاثیر تبخیر به دلیل وجود اثر متقابل بین خاک و هوا قرار می‌گیرد در حالی که مقدار رطوبت در لایه‌های عمیق تر به مقدار آب آبیاری بستگی دارد. آبیاری با دور کوتاه تر، مقدار آب بیشتری را در لایه بالای ننگه می‌دارد در حالیکه با دور بیشتر آبیاری، آب بیشتری می‌تواند به لایه‌های عمیق تر نفوذ کند (Li et al., 2013). شبیه‌سازی میزان رطوبت خاک در بازه‌های زمانی مختلف را توسط مدل برای قطره‌چکان دو لیتر بر ساعت در رژیم آبیاری ۲، ۳ و ۴ روزه در شکل ۴-۶ مشاهده می‌شود. رنگ‌های متفاوت نشان دهنده ی میزان رطوبت حجمی متفاوت در خاک است. شکل ۴-الف الگوی توزیع آب در خاک را ۲۴ ساعت بعد از اولین آبیاری در رژیم آبیاری نواری ۲ روزه نشان می‌دهد. حداکثر مقدار رطوبت در سطح خاک بوده و درصد رطوبت را به بیشتر از ۴۲ درصد حجمی رسانده است. این شکل نشان می‌دهد که اثر اولین آبیاری پس از ۲۴ ساعت هنوز بیشتر از ۲۵ سانتی متر عمق خاک را تحت تاثیر قرار نداده است. شکل ۵-الف در پروفیل رژیم آبیاری ۳ روزه روند افزایش رطوبت از سطح خاک به طرف پایین تدریجی است و مقدار آن به صورت جریان زیاد آب که منجر به زهکشی عمقی شود، نمی‌باشد. افزایش رطوبت بعد از ۲۴

آن بر توزیع رطوبت مشاهده می شود که مدل در ۲۴ ساعت اولیه بعد از آبیاری میزان رطوبت نسبت به مشاهده ای بیش بر آورد داشته و هر چه از زمان آبیاری بیشتر بگذرد میزان رطوبت شبیه سازی شده به مشاهده شده نزدیک تر می شود. بر اساس نتایج بدست آمده مشخص شد که مدل مذکور توانایی بالایی در شبیه سازی میزان رطوبت خاک داشته و قادر است شرایط رطوبتی خاک را در طول دوره ای آبیاری نیز با دقت بالایی تخمین بزند و گذشت زمان تاثیری بر دقت شبیه سازی مدل ندارد. همچنین توانایی مدل در شبیه سازی تحت رژیم های متفاوت نیز یکسان بود. توصیه می شود از این مدل برای شبیه سازی میزان رطوبت خاک و توزیع مجدد آب در خاکپیش از طراحی سیستم های آبیاری قطره- ای به منظور افزایش راندمان این سیستم ها استفاده گردد.

نهایت در بدترین حالت تا عدد ۱ در زمان برازش کامل داده ها متغیر است. مقدار R^2 از صفر تا یک تغییر می کند و هرچه این مقدار به یک نزدیک تر باشد، نشان دهنده برازش بهتر داده ها می باشد.

نتیجه گیری

نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که مدل HYDRUS قادر به شبیه سازی میزان رطوبت خاک در منطقه ریشه گیاه ذرت است و این توانایی را دارد که شرایط رطوبتی خاک را در طول دوره آبیاری و تحت شرایط رژیم های مختلف آبیاری و در اعماق مختلف خاک با دقت بالایی تخمین بزند. نتایج حاصل از شبیه سازی مدل HYDRUS نشان داد مدل بر آورد خوبی از میزان رطوبت را در هر سه رژیم آبیاری از خود نشان داد و ضریب R^2 بین ۰/۴۰ تا ۰/۹۰ بود. که کمترین بر آورد مربوط به آبیاری ۲ روزه و بیشترین بر آورد در آبیاری ۴ روزه بوده است و نشان می دهد کارایی مدل در رژیم آبیاری ۴ روزه بیشتر بوده است. و میزان ضریب R^2 بین ۶۰ تا ۹۰ درصد متغیر بود که نشان دهنده برازش خوب داده ها می باشد. نتایج ME مدل در تمامی رژیم ها میزان رطوبت را بیشتر از میزان واقعی آن در مزرعه شبیه سازی کرده است. با توجه به مقایسه رطوبت های اندازه گیری شده و شبیه سازی شده برای عمق های مختلف خاک در هر رژیم آبیاری مشاهده می شود که بهترین هم پوشانی در رژیم آبیاری ۴ روزه در عمق ۵۰ تا ۷۵ سانتی متری و در ۷۲ ساعت بعد از آبیاری است. روند بر آورد مدل در شبیه سازی توزیع عمودی میزان رطوبت نسبت به مقادیر مشاهده شده در عمق ۰ تا ۲۵ سانتی متری بیش بر آورد داشت و این اختلاف در رژیم آبیاری ۲ روزه نمایان تر است، اما به صورت کلی در تمامی رژیم ها در عمق های ۵۰-۷۵ بهترین شبیه سازی انجام شده است. با تحلیل مدل در شبیه سازی دور آبیاری و تاثیر

شبیه‌سازی توزیع رطوبت اطراف ریشه گیاه ذرت در خاکی با بافت سنگین...

جدول ۱- خصوصیات خاک مزرعه تحقیقاتی

Table 1- Soil specifications

چگالی ظاهری Apparent density (gr/cm ³)	درصد رطوبت نقطه بژمردگی Permanent Wilting Point (%)	درصد رطوبت ظرفیت زراعی Field Capacity (%)	بافت خاک Soil texture	شن (%) (%) Sand	سیلت (%) (%) Silt	رس (%) (%) Clay	عمق خاک Soil depth (cm)
1.35	11.8	24.5	Silty Clay	10	42	48	0-25
1.44	11.8	24.2	Clay	16	36.5	47.5	25-50
1.54	11.8	24.2	Clay	16	35	49	50-75

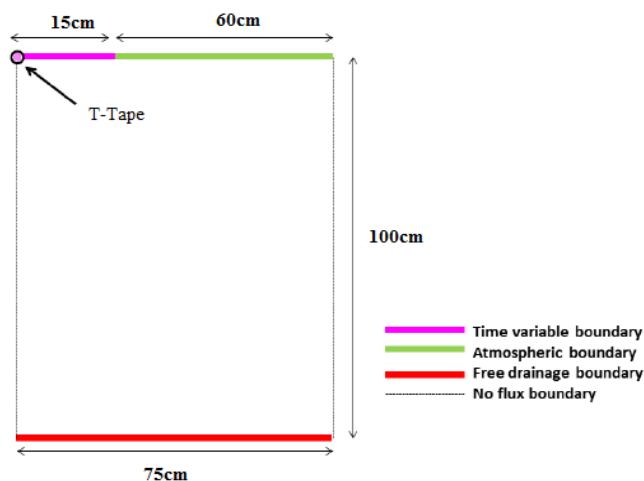
جدول ۲- پارامترهای هیدرولیکی مورد نیاز معادله ون گنوختن - معلم (وگنوختن، ۱۹۸۰)

Table 2. Hydraulic Parameters Required by Van Genuchten-Moalem equation (Van Genuchten, 1980)

هدایت Saturated hydraulic conductivity K_s (cmday ⁻¹)	رطوبت حجمی اشباع Saturated volumetric moisture θ_s (cm ³ cm ⁻³)	رطوبت باقی مانده در خاک Soil residual moisture θ_r (cm ³ cm ⁻³)	پارامتر تجربی Empirical parameter α (m ⁻¹)	پارامتر تجربی Empirical parameter n	پارامتر تجربی Empirical parameter l	مدل Model
5.12	0.4313	0.092	0.0158	1.2773	0.5	ROSSETA

جدول ۳- پارامترهای آماری محاسبه شده برای شبیه سازی رطوبت در خاک برای رژیم‌های متفاوت آبیاری

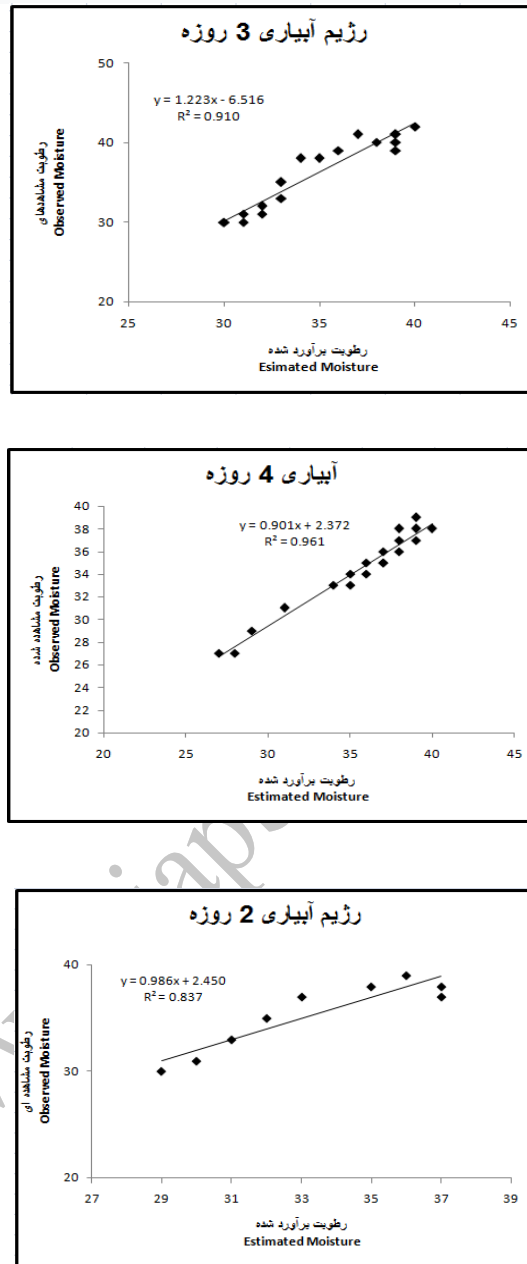
Table 3- Statistical parameters calculated to simulate soil moisture for different irrigation regimes				
EF	R ²	ME	RMSE	
0.40	0.60	2	2.35	۱روز بعد از آبیاری ۲ روزه 1 day after 2-day irrigation regime
0.80	0.68	1.85	2.08	۱روز بعد از آبیاری ۳ روزه 1 day after 3-day irrigation regime
0.75	0.65	1.45	1.94	۲روز بعد از آبیاری ۳ روزه 2 day after 3-day irrigation regime
0.75	0.55	1.55	2.40	۱روز بعد از آبیاری ۴ روزه 1 day after 4-day irrigation regime
0.67	0.64	0.88	2.26	۲روز بعد از آبیاری ۴ روزه 2 day after 4-day irrigation regime
0.90	0.90	0.87	2.28	۳روز بعد از آبیاری ۴ روزه 3 day after 4-day irrigation regime



شکل ۱- محدوده شبیه سازی شده برای مدل

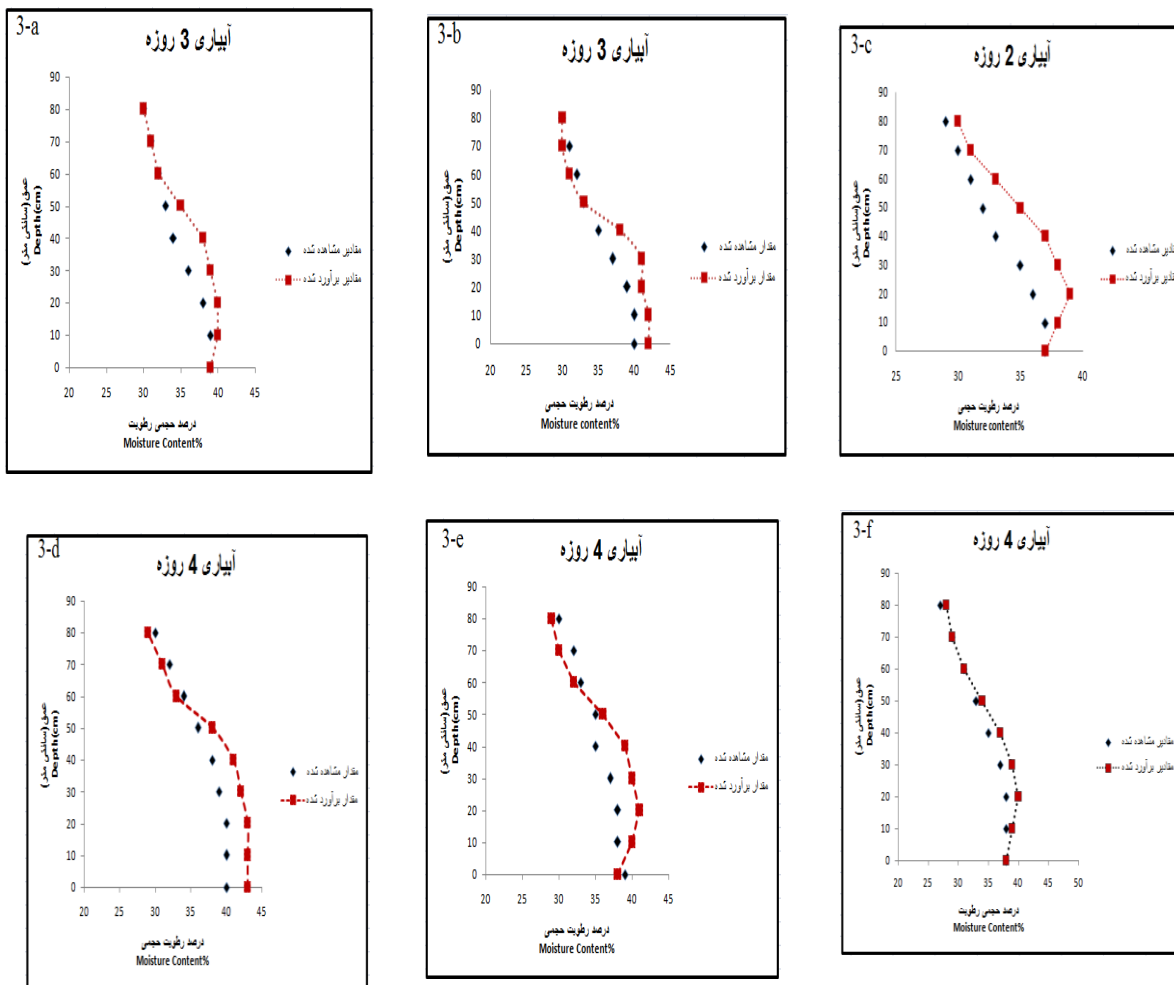
Figure 1- Simulated range for the model

شبیه‌سازی توزیع رطوبت اطراف ریشه گیاه ذرت در خاک با بافت سنگین...



شکل ۲- رابطه بین مقادیر رطوبت برآورد شده و مشاهده‌ای (درصد حجمی) در هر رژیم آبیاری

Figure 2 - Relationship between estimated and observed moisture values (percentage) in each irrigation regime



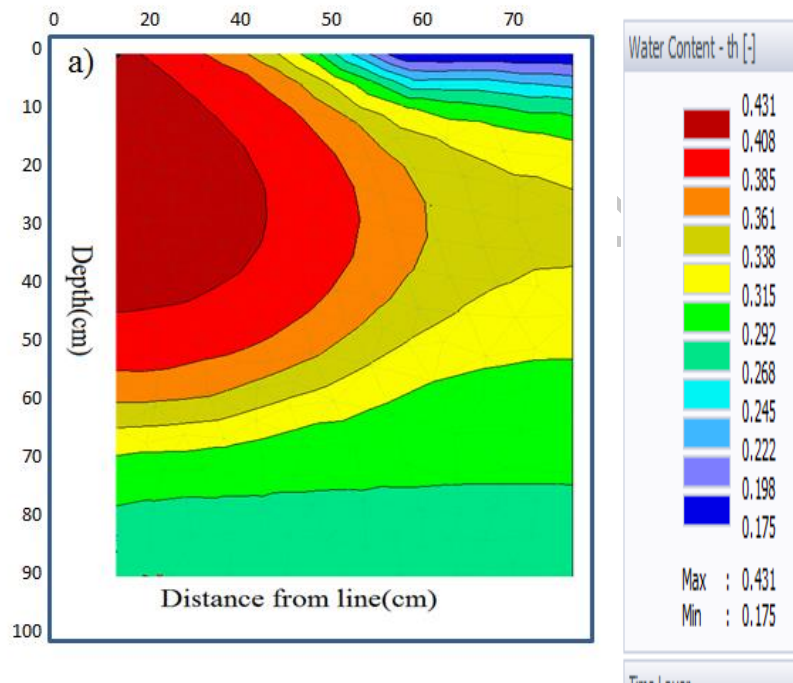
شکل ۳- مقایسه رطوبت های اندازه گیری شده و شبیه سازی شده

3-a) ۱ روز بعد از آبیاری ۳ روزه - 3-b) ۲ روز بعد از آبیاری ۳ روزه - 3-c) ۱ روز بعد از آبیاری ۲ روزه
 3-d) ۱ روز بعد از آبیاری ۴ روزه - 3-e) ۲ روز بعد از آبیاری ۴ روزه - 3-f) ۳ روز بعد از آبیاری ۴ روزه

Figure 3- Comparison of measured and simulated humidity

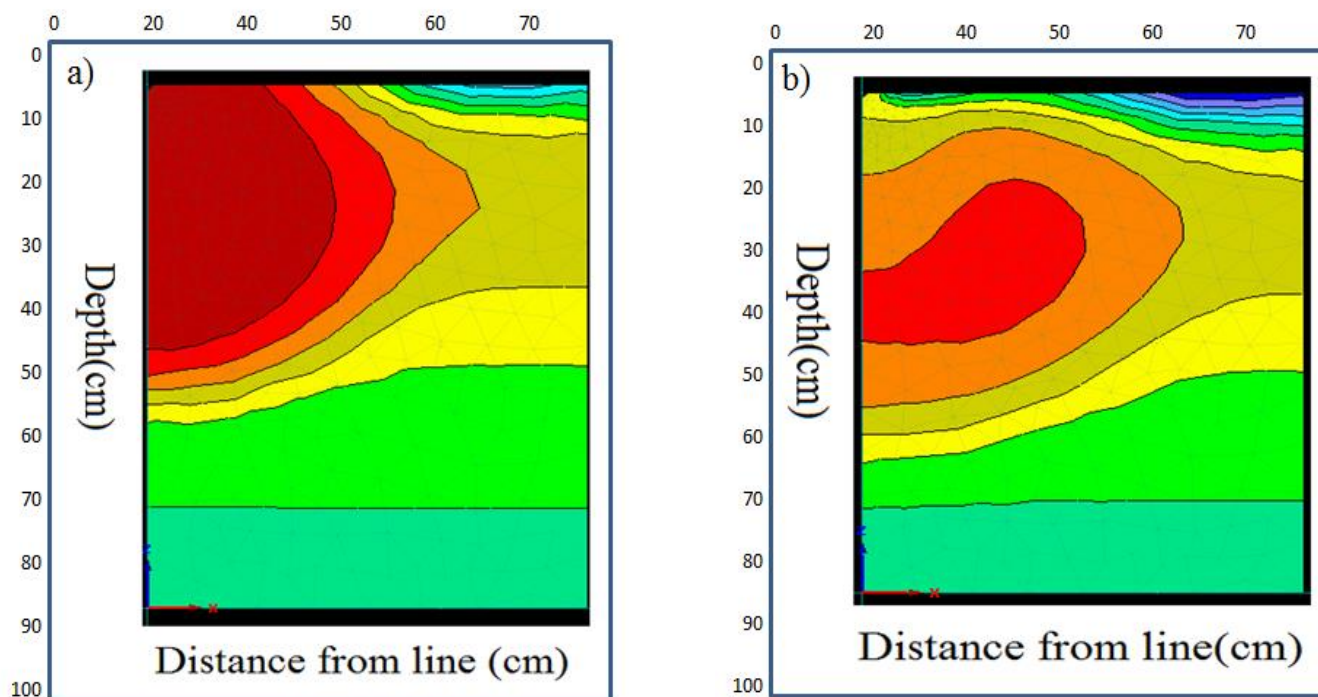
3-a) 1day after 3day irrigation regime , 3-b) 2day after3day irrigation regime , 3-d) 1day after 4-day irrigation regime
 3-c) 1day after 2-day irrigation regime, 3-e) 2day after 4-day irrigation regime 3-f) 3day after 4-day irrigation regime

شبیه‌سازی توزیع رطوبت اطراف ریشه گیاه ذرت در خاکی با بافت سنگین...



شکل ۴- شبیه سازی پروفیل رطوبتی خاک تحت رژیم آبیاری ۲ روزه با دبی ۲ لیتر بر ساعت. (a) ۲۴ ساعت بعد از آبیاری)

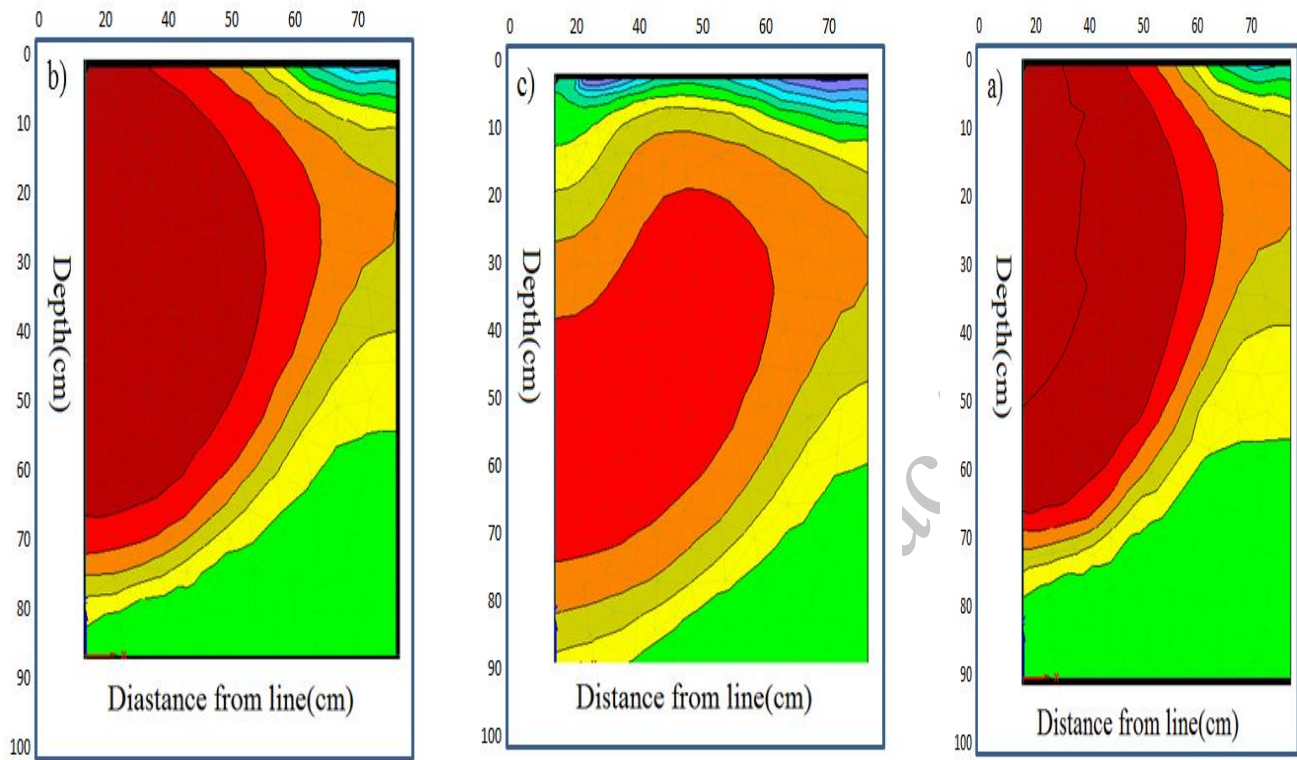
Figure 4 - Simulation of soil moisture profile under 2-day irrigation regime with a flow rate of 2 liters per hour. a) 24 hours after irrigation)



شکل ۵- شبیه سازی پروفیل رطوبتی خاک تحت رژیم آبیاری ۳ روزه با دبی ۲ لیتر بر ساعت. (a) ۲۴ ساعت بعد از آبیاری و (b) ۴۸ ساعت بعد از آبیاری)

Figure 5 - Simulation of soil moisture profile under 3-day irrigation regime with a flow rate of 2 liters per hour. a) 24 hours after irrigation and b) 48 hours after irrigation)

شبیه‌سازی توزیع رطوبت اطراف ریشه گیاه ذرت درخاکی با بافت سنگین...



شکل ۶- شبیه سازی پروفیل رطوبتی خاک تحت رژیم آبیاری ۴ روزه با دبی ۲ لیتر بر ساعت. (a) ۲۴ ساعت بعد از آبیاری، (b) ۴۸ ساعت بعد از آبیاری و (c) ۷۲ ساعت بعد از آبیاری)

Figure 6 - Simulation of soil moisture profile under 4-day irrigation regime with a flow rate of 2 liters per hour. a) 24 hours after irrigation and b) 48 hours after irrigation c) 72 hours after irrigation)

فهرست منابع

References

- افشار جهانشاهی، م.، ح. زارع ایبانه، ه. نقوی و ا. اسلامی. ۱۳۹۱. بررسی تاثیر دو عمق نصب قطره چکان با دبی های یکسان بر توزیع رطوبتی در سیستم آبیاری قطره‌ای زیر سطحی و شبیه‌سازی آن با مدل HYDRUS-2D. فصلنامه مهندسی آبیاری و آب، ۳(۱۰): ۱۱۳-۱۰۱
- پوریزدان خواه، ه.، م. ر. خالدیان، م. ح. بیگولی و پ. شاهین رخسار. ۱۳۹۳. شبیه سازی توزیع رطوبت تحت یک منبع خطی در خاک سنگین با استفاده از مدل هایدروس دو بعدی. نشریه پژوهش آب در کشاورزی، ۲۸(۳): ۵۹۹-۶۱۱.
- خلیلی، م.، م. اکبری، ا. هزارجریبی، م. ذاکری نیا، ف. عباسی و ع. کولائی‌ان. ۱۳۹۵. مدل کردن نیمرخ رطوبتی در آبیاری زیر سطحی با استفاده از HYDRUS-2D. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۲(۱۰): ۱۳۶-۱۴۴.
- دهقانی سانج، ح.، ح. حاجی آقا بزرگی و ا. کتغانی. ۱۳۹۸. کاربرد مدل HYDRUS-2D در بررسی تغییرات رطوبت خاک زیر درختان پسته با سیستم آبیاری زیر سطحی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۶(۱۳): ۱۵۳۸-۱۵۴۹.
- عطایی، ع.، م. نیشابوری، م. اکبری، د. زارع حقی و ا. عنابی میلانی. ۱۳۹۷. ارزیابی مدل هایدروس دو بعدی برای تعیین توزیع رطوبت خاک در آبیاری قطره ای سطحی و زیر سطحی درختان پسته. نشریه پژوهش آب در کشاورزی، ۴(۳۲): ۵۸۱-۵۹۵.
- کریمی، م.، م. فراستی و ر. ملکی. ۱۳۹۴. شبیه سازی آبتوی خاک شور با استفاده از نرم افزار هایدروس دو بعدی. نشریه پژوهش های خاک (علوم خاک و آب)، ۲۹(۱): ۴۹-۵۷.
- ورجواند، پ.، ع. مختاران و ش. آبسالان. ۱۳۹۸. بررسی تغییرات شوری خاک در کشت‌های ذرت و گندم تحت سامانه آبیاری قطره‌ای نواری در مناطق مرکزی خوزستان. اولین کنگره بین المللی و چهارمین کنگره ملی آبیاری و زهکشی ایران. آبان ماه ۹۸.
- AbrRashid, N.S., M. Askari, T. Tanaka, J. Simunk and M.Th. van Genuchten. 2015.** Inverse estimation of soil hydraulic properties under oil palm trees. *Geoderma*, 241-242:306-312.
- AbouLila, T.S., R. Berndtsson, M. Persson, M. Somaida, M. El-Kiki, Y. Hamed and A. Mirdan. 2012.** Numerical evaluation of subsurface trickle irrigation with brackish water. *Irrigation Science*, 31: 1125-1137.
- Askri, B., A.T. Ahmed, T. Abichaou and R. Bouhlila. 2014.** Effects of shallow water table, Salinity and frequency of irrigation water on the date palm water use. *Journal of Hydrology*, 513:81-90.
- Bristow, K.L., J. Šimunek, S.A. Helalia and A.A. Siyal. 2020.** Numerical simulations of the effects furrow surface conditions and fertilizer locations have on plant nitrogen and water use in furrow irrigated systems. *Agric. Water Manag.*, 232: 124.
- Bufon, V.B., R.J. Lascano, C. Bednarz, J.D. Booker and D.C. Gitz. 2012.** Soil water content on drip irrigated cotton: comparison of measured and simulated values obtained with the HYDRUS 2-D model. *Irrig. Sci.*, 30: 259-273.
- Cammalleri, C., G.Rallo, C. Agnese, G. Ciralo, M. Minacapilli and G. Provenzano. 2013.** Combined use of eddy covariance and sap flow techniques for partition of ET fluxes and water stress assessment in an irrigated olive orchard. *Agric. Water Manage.*, 120:89-97.
- Chen, M., G. R. Willgoose and P.M. Saco. 2014.** Spatial prediction of temporal soil moisture dynamics using hydrus-1D. *Hydrology Pricess*, 28:171-185.
- Chen, M., G. R. Willgoose and P.M. Saco. 2015.** Investigation the impact of leaf area temporal variability on soil moisture prediction using remote sensing vegetation data. *Journal of Hydrology*, 522:274-284.

- Ebrahimian, H., A. Liaghat, M. Parsinejad, E. Playán, F. Abbasi and M. Navabian. 2013.** Simulation of 1D surface and 2D subsurface water flow and nitrate transport in alternate and conventional furrow fertigation. *Irrig. Sci.* 31: 301–316.
- Elasbah, R., T. Selim, A. Mirdan and R. Berndtsson. 2019.** Modeling of fertilizer transport for various fertigation scenarios under drip irrigation. *Water*, 11(893): 1-15.
- Elnesr, M.N., A.A. Alazba, and J. Šimunek. 2014.** HYDRUS simulations of the effects of dual-drip subsurface irrigation and a physical barrier on water movement and solute transport in soils. *Irrig. Sci.* 32: 111–125.
- Jin, X., M. Chen, Y. Fan, L. Yan, and F. Wang. 2018.** Effects of mulched drip irrigation on soil moisture and groundwater recharge in the Xiliao River Plain, China. *Water*, 10(1755): 1-18.
- Karandish, F and J. Šimunek. 2016.** A field-modeling study for assessing temporal variations of soil-water-crop interactions under water-saving irrigation strategies. *Agric. Water. Manag.* 178: 291–303.
- Li, Y., j. Simunk, L. Jing, Zh. Zhang and Ni.Lixiao. 2014.** Evaluation of water movement and water losses in a direct-seeded-rice field experiment using hydrus-1D. *Agriculture water management.* 142:38-46.
- Li, X.W., M.G. Jin, N.Q. Zhou, J.O. Huang, S.M. Jiang and H. Telesphore. 2016.** Evaluation of evapotranspiration and deep percolation under mulched drip irrigation in an oasis of Tarim basin, China. *Journal of hydrology*, 538: 677–688.
- Li, X.W., M.G. Jin, J.O. Huang and J.J. Yuan. 2015.** The soil-water flow system beneath a cotton field in arid north-west China, serviced by mulched drip irrigation using brackish water. *Hydrogeology Journal*, 23: 35–46.
- Liu, M.X., J.S. Yang, X.M. Li, G.M. Liu, M. Yu and J. Wang. 2013.** Distribution and dynamics of soil water and salt under different drip irrigation regimes in northwest China. *Irrigation Science*, 31: 675–688.
- Martínez-Gimeno, M.A. L. Bonet, G. Provenzano, E. Badal, D.S. Intrigliolo and C. Ballester. 2018.** Assessment of yield and water productivity of clementine trees under surface and subsurface drip irrigation. *Agric. Water. Manag.* 206: 209–216.
- Mguidiche, A., G. Provenzano, B. Douh, S. Khila, G. Rallo and A. boujelben. 2015.** Assessing HYDRUS-2D to simulate soil water content (SWC) and salt accumulation under an SDI system: application to a potato crop in a semi-arid area of central Tunisia. *Irrig. Drain*, 64: 263–274.
- Minacapilli, M., C. Agnese, F. Blanda, C. Cammalleri, G. Ciralo, G. D'Urso, M. Iovino, D. Pumo, G. Provenzano and G. Rallo. 2009.** Estimation of actual evapotranspiration of Mediterranean perennial crops by means of remote-sensing based surface energy balance models. *Hydrol. Earth Sci. Syst.* 13(7): 1061–1074.
- Mo'allim, A.A., M.R. Kamal, H.H. Muhammed, N.K.E. Yahaya, H.B. Man and A. Wayayok. 2018.** Assessment of the vertical movement of water in a flooded paddy rice field experiment using Hydrus-1D. *Water*, 10(783): 1-20.
- Naghdifar, S.M., A.N. Ziaei and H. Ansari. 2018.** Simulation of irrigation return flow from a Triticale farm under sprinkler and furrow irrigation systems using experimental data: A case study in arid region. *Agric. Water Manag.* 210: 185–197.
- Naglic, B., C. Kechavarzi, F. Coulon and M. Pinater. 2014.** Numerical investigation of the influenced of texture, surface drip emitter discharge rate and initial soil moisture condition on wetting pattern size. *Irrigation Science*, 32:421-436.
- Selim, T., R. Berndtsson and M. Persson. 2013.** Simulation of Soil Water and Salinity Distribution under Surface Drip Irrigation. *Irrigation and Drainage*, 62: 352-362.

- Simunek, J., M.Th. Van Genuchten and M. Sejna. 2006.** The Hydrus Software Package for Simulating the Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably – Saturated Media. Technical Manual.
- Šimunek, J., M.T. Van Genuchten, and M. Šejna. 2016.** The HYDRUS Software Package for Simulating Two-and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media (Technical Manual No. Version 2.0).PC Progress, Prague, Czech Republic.
- Phogat, V., T. Pitt, R.M. Stevens, J.W. Cox, J. Šimunek and P.R. Petrie. 2020.** Assessing the role of rainfall redirection techniques for arresting the land degradation under drip irrigated grapevines. *J. Hydrol.* 587: 1-12.
- Phogat, V., M.A. Skewes, M. Mahadevan and J.W. Cox. 2013.** Evaluation of soil plant system response to pulsed drip irrigation of an almond tree under sustained stress conditions. *Agric. Water Manage.* 118: 1–11.
- Phogat, V., M. Mahadevan, M. Skewes and J.W. Cox. 2012.** Modelling soil water and salt dynamics under pulsed and continuous surface drip irrigation of almond and implications of system design. *Irrigation Science*, 30: 315-333.
- Rallo, G., P. González-Altozano, J. Manzano-Juárez and G. Provenzano. 2017.** Using field measurements and FAO-56 model to assess the eco-physiological response of citrus orchards under regulated deficit irrigation. *Agric. Water Manage.* 180: 136–147.
- Reyes-Esteves, R.G. and D.C. Slack. 2019.** Modeling Approaches for Determining Appropriate Depth of Subsurface Drip Irrigation Tubing in Alfalfa. *J. Irrig. Drain. Eng.* 145(10): 1-7.

Simulation of soil moisture distribution around of corn plant root in heavy soil texture under drip-tape-irrigation system using HYDRUS-2D model

Parnian Majidi Chaharmahali¹, Heidar Ali Kashkuli², Davoud Khodadadi Dehkordi^{*3}, Ali Mokhtaran⁴, Aslan Egdernezhad⁵

Received date: 16 August 2020

Accepted date: 28 July 2020

Abstract

Drip irrigation is one of the best irrigation methods that uses the least amount of water per unit of crop and eliminates water losses through evaporation and deep infiltration. Due to the increasing tendency of farmers to use drip irrigation system due to its higher efficiency, it is necessary to know the factors and parameters affecting these systems in order to increase their efficiency. One of these factors is the dripping pattern of the drippers because it shows how water is distributed and whether it is sufficient for the roots. Hydrusmodel simulates soil moisture distribution according to their design conditions (soil texture and hydraulic properties, dropper discharge, location and distance). The present study was conducted to evaluate the efficiency of the HYDRUS model in simulating soil water movement and redistribution of moisture around the roots of maize in homogeneous and heavy soils. This study was carried out in the Agricultural Research Center of Khuzestan Province under drip strip irrigation with three irrigation regimes of 2, 3 and 4 days with three replications during two cropping years. In order to monitor the moisture around the roots, dig a soil profile to a depth of 75 cm perpendicular to the drip irrigation strip. Observed and simulated moisture values were compared by R^2 , EF, MAE and RMSE statistics. The results showed that the average moisture distribution in each irrigation regime is in the range of crop capacity. RMSE values for different diets ranged from 1.29 to 2.40% and MAE values for different diets ranged from 1 to 2%. Moisture simulations were classified as excellent based on MAE and RMSE values. Also, the results of the coefficient of explanation are between 60 to 90% and the efficiency of the model is between 40 to 90%. Based on the results, the lowest efficiency of the model was in the simulation 24 hours after irrigation and the best simulation was 72 hours after irrigation. The results show the high capability of the model in simulating soil volumetric moisture.

Keyword: Corn, Drip-tape-irrigation, HYDRUS model, Irrigation interval, Moisture distribution.

1 - Department of Water Engineering and Sciences, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

2- Department of Water Engineering and Sciences, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

3- Department of Water Engineering and Sciences, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

4- Research Assistant Professor, Agricultural Technical and Engineering Research Department, Center for Agriculture and Natural Resources Research and Training, Khuzestan Province, Agriculture Research, Training, and Promotion Organization, Ahvaz, Iran.

5- Department of Water Engineering and Sciences, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

* Corresponding author: Email: Davood_kh70@yahoo.com.