

اندازه‌گیری و شبیه‌سازی جریان آب و جذب ریشه در خاک تحت سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی درخت سیب

احسان نظری^۱، سینا بشارت^{۲*}، کامران زینالزاده^۳، عادل محمدی^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۴/۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۵/۷

چکیده

این تحقیق با هدف اندازه‌گیری جریان آب در خاک و جذب آب ریشه در یک پلات 2×2 متر در یک باغ سیب ۱۵ ساله تحت سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در شهرستان میاندوآب انجام و با سناریوهای مختلف در نرم‌افزار HYDRUS-2D شبیه‌سازی شد. قطره‌چکان‌ها در عمق ۳۰ سانتی‌متری و به فاصله ۱ متر از تنه درخت نصب گردیدند. رطوبت حجمی خاک با استفاده از دستگاه TDR به صورت روزانه به مدت ۴ ماه اندازه‌گیری شد. به منظور واسنجی معادلات روابط جذب آب ریشه، نمونه‌هایی از ریشه به همراه خاک از نقاط مختلف در محدوده توسعه برداشت شد. نتایج نشان داد بیشترین و کمترین مقدار جذب آب ریشه به ترتیب به میزان 0.129 و 0.24 سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب در مختصات (عمقی، شعاعی) $(50, 60)$ سانتی‌متر و $(75, 150)$ سانتی‌متر از تنه درخت اتفاق افتاد. همچنین، حدود ۸۱ درصد جذب آب ریشه از عمق $50-0$ سانتی‌متری صورت گرفت. مقادیر RMSE $(0.193 - 0.141)$ نشان داد نرم‌افزار HYDRUS-2D تخمین مناسبی از رطوبت حجمی خاک را در سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی داشت. مقایسه سناریوهای مختلف شبیه‌سازی شده در HYDRUS-2D با نتایج اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای نشان داد با کاهش دبی قطره‌چکان به میزان ۲ لیتر بر ثانیه و افزایش مدت زمان آبیاری (با حجم آب کاربردی یکسان) جذب آب ریشه به میزان $5/08$ درصد افزایش و نفوذ عمقی به میزان $2/18$ درصد کاهش یافت.

واژه‌های کلیدی: قطره‌چکان، آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، جذب ریشه، نرم‌افزار HYDRUS-2D

مقدمه

آبیاری زیرسطحی یکی از روش‌های آبیاری است که عمدتاً به دلیل کم بودن هزینه اجرا و راندمان کاربرد بالا در مناطق خشک استفاده می‌شود (Bainbridge, 2001). در آبیاری زیرسطحی برای توزیع آب عمدتاً از گلدان‌های متخلخل، کوزه‌ها و لوله‌ها استفاده می‌شود (Stein, 1997; Abu-Zreig and Atoum, 2004; Siyal et al., 2013). آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (SDI) در مقایسه با دیگر سیستم‌های آبیاری، آب و مواد مغذی را به طور مستقیم در منطقه توسعه ریشه گیاه افزایش می‌دهد (Mohammad et al., 2014). این

امر می‌تواند علاوه بر صرفه‌جویی در مصرف آب آبیاری، میزان تولید محصول را نیز در سطح رضایت بخشی ارتقاء دهد (Costa et al., 2007; Al-Omran et al., 2010, 2012). طراحی بهینه سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی مستلزم آگاهی از الگوی توزیع آب در اطراف قطره‌چکان، نحوه توزیع ریشه گیاه، به حداقل رساندن خیس شدگی سطح خاک و نفوذ عمقی می‌باشد (Cote et al., 2003; Kandelous et al., 2011; Subbaiah, 2013). آزمایش‌های مزرعه‌ای برای مدیریت بهینه آبیاری مفید است، اما به دلیل صعوبت، هزینه بالا و زمان بر بودن این آزمایشات، بهتر است از مدل‌های شبیه‌ساز برای مطالعه جریان آب در خاک استفاده نمود (Honari et al., 2017). به منظور طراحی و مدیریت مناسب سیستم‌های آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (SDI)، مدل‌های مختلفی برای توصیف جریان آب از یک منبع نقطه‌ای یا خطی در خاک توسعه داده شده‌اند (Khalifa et al., 2004; Singh et al., 2006). یکی از مناسبترین مدل‌های شبیه‌ساز، بسته نرم‌افزاری HYDRUS است (Simunek et al., 2008). این مدل اگر با داده‌های اندازه‌گیری شده به خوبی کالیبره شود، می‌تواند به خوبی رطوبت حجمی و جذب آب ریشه را در زیر خاک شبیه‌سازی کند (Skaggs et al., 2004; Lazarovitch et al., 2004).

- ۱- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه
 - ۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، پژوهشکده مطالعات دریاچه ارومیه، دانشگاه ارومیه
 - ۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، پژوهشکده مطالعات دریاچه ارومیه، دانشگاه ارومیه
 - ۴- دانش‌آموخته دکتری آبیاری و زهکشی دانشگاه ارومیه، سازمان جهاد کشاورزی استان اردبیل
- (*) نویسنده مسئول: (Email: s.besharat@urmia.ac.ir)

برای تجزیه و تحلیل حرکت آب در اطراف قطره‌چکان حلقوی بکار رفته در آبیاری زیرسطحی بود. بررسی مطالعات مختلف نشان می‌دهد که بیشتر آزمایشات مزرعه‌ای و شبیه‌سازی‌های انجام‌یافته توسط محققین در سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی بوده و مطالعات کمتری در زمینه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی صورت گرفته است. همچنین اصلاح ضریب و کالیبراسیون معادلات جذب ریشه در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی مورد بررسی قرار نگرفته است. هدف اصلی این مطالعه، اندازه‌گیری جریان آب و جذب آب ریشه در زیر خاک و مقایسه مقادیر جذب در نقاط مختلف منطقه توسعه ریشه گیاه، کالیبراسیون ضرایب معادلات جذب آب ریشه در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی که اهمیت ویژه‌ای در دقت تخمین نرم‌افزار HYDRUS-2D دارد و همچنین شبیه‌سازی با سناریوهای مختلف تغییر دبی و مدت زمان آبیاری در نرم‌افزار HYDRUS-2D و نهایتاً مقایسه سناریوها و انتخاب گزینه برتر از نظر افزایش میزان جذب آب ریشه و کاهش تلفات عمقی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی درخت سیب بود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در باغی به مساحت ۲/۱۶ هکتار در دشت میاندوآب واقع در شمال غرب ایران با مختصات جغرافیایی ۳۷°۰۱' ۴۲/۱" شرقی و ۳۰°۳۱' ۴۶/۰" شمالی با آبیاری قطره‌ای زیرسطحی برای درخت سیب در سال ۱۳۹۷ انجام شد. منطقه مورد مطالعه با ارتفاع ۱۳۱۴ متر بالاتر از سطح دریا از نظر اقلیمی جرم مناطق گرم و نیمه‌مرطوب می‌باشد که تابستان‌های نسبتاً گرم و زمستان‌های مختصر سردی دارد. بر اساس آمار ۴۱ ساله، متوسط بارش سالانه آن ۲۷۰/۱ میلی متر، حداکثر دمای ثبت شده در مردادماه ۴۱/۵ درجه سانتی‌گراد و حداقل آن ۲۳/۵- در دی ماه می‌باشد. میانگین تبخیر سالانه منطقه مورد مطالعه ۱۲۰۵ میلی‌متر و رطوبت نسبی حدود ۶۰ درصد است. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک باغ مورد مطالعه شامل بافت، چگالی ظاهری، pH، EC، θ_{FC} ، θ_{PWP} و θ_s با روش‌های استاندارد تعیین شد. جدول ۱ خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد.

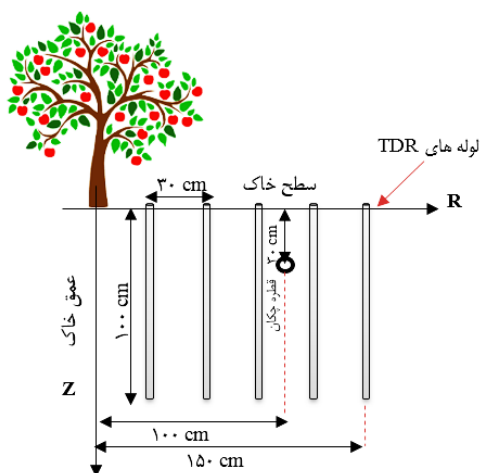
2005; Provenzano, 2007; Zhou et al., 2007; Kandelous and Simunek 2010a, b; Ramos et al., 2012; Azad et al., 2018). مطالعات زیادی در زمینه اندازه‌گیری و شبیه‌سازی رطوبت حجمی و جذب آب ریشه در آبیاری زیرسطحی وجود دارد. مطالعات تعدادی از محققین نشان داد با افزایش مدت زمان آبیاری، رطوبت حجمی و ابعاد الگوی خیس شده در خاک افزایش یافت (Besharat et al., 2016; Zhijuan et al., 2018). پروونزانو (۲۰۰۷) الگوی خیس شدگی در اطراف قطره‌چکان را در آبیاری قطره‌ای زیر سطحی با استفاده از مدل HYDRUS-2D ارزیابی کرد. این تحقیق در خاک لوم شنی انجام شد. نتایج نشان داد در طول آبیاری، این مدل به نحو مناسبی فرآیند نفوذپذیری را در اطراف قطره‌چکان شبیه‌سازی می‌کند. امانقلو و دیمان‌تولوس (۲۰۰۹) در تحقیقی در سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی دریافتند در یک زمان مساوی با کل زمان شبیه‌سازی، تغییر در شدت جریان تأثیری روی تبخیر و تعرق واقعی نداشت و تأثیر اندکی روی تلفات عمقی گذاشت. در تحقیق انجام‌یافته، نتایج عددی با HYDRUS نشان داد که وقتی از تبخیر از سطح خاک چشم‌پوشی می‌گردد، رطوبت حجمی خاک به راحتی توسط ریشه‌های گیاه استفاده می‌شود. کای و همکاران (۲۰۱۷) حرکت آب در خاک را در آبیاری زیرسطحی با قطره‌چکان سرامیکی متخلخل مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصله نشان داد HYDRUS-2D می‌تواند برای بررسی پارامترهای موثر در طراحی و مدیریت سامانه‌های آبیاری زیرسطحی و تعیین حالت مناسب جهت کارکرد بهینه قطره‌چکان سرامیکی مورد استفاده قرار گیرد. اتوینو و همکاران (۲۰۱۸)، الگوی خیس شدگی خاک را در آبیاری سطحی و قطره‌ای زیرسطحی در یک خاک لوم سیلتی مورد مطالعه قرار دادند. آنها حجم خیس شده را تابعی از زمان آبیاری، شرایط اولیه خاک و دبی قطره‌چکان بیان کردند. مقایسه پتانسیل اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده نشان داد که مدل HYDRUS می‌تواند به عنوان یک ابزار قدرتمند برای طراحی و مدیریت سامانه‌های آبیاری قطره‌ای زیرسطحی مورد استفاده قرار گیرد. سائفادین و همکاران (۲۰۱۹) آزمایشات میدانی را با استفاده از یک لوله قطره‌چکان حلقه‌ای شکل بر روی گوجه فرنگی و توت فرنگی تحت آبیاری زیرسطحی انجام دادند. نتایج شبیه‌سازی عددی با استفاده از HYDRUS نشان داد که این نرم‌افزار یک ابزار قدرتمند

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک را در منطقه مورد مطالعه

θ_s (%)	θ_{PWP} (%)	θ_{FC} (%)	EC (mmho/cm)	چگالی ظاهری (g/cm ³)	ذرات خاک (%)			بافت خاک (USDA)	عمق خاک (cm)
					pH	رس	سیلت		
۴۱/۲۳	۱۶/۰	۲۷/۹	۲۹۲۰	۱/۶۵	۳۲	۵۰	۱۸	لومی	۰-۳۰
۲۸/۹۳	۱۵/۲	۲۵/۴	۳۱۴۰	۱/۷۱	۵۴	۳۴	۱۲	شنی لومی	۳۰-۶۰
۲۸/۵۱	۱۴/۶	۲۱/۲	۱۸۸۰	۱/۷۵	۶۴	۱۸	۱۸	شنی لومی	۶۰-۹۰
۳۸/۴۲	۱۴/۸	۲۱/۵	۱۸۲۰	۱/۷۳	۶۰	۲۰	۲۰	شنی لومی	۱۲۰-۹۰

اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای

می‌گیرد. بنابراین، در برآورد جذب آب ریشه در لایه‌های مختلف خاک، از تاثیر آن در عمق‌های کمتر از ۲۵ سانتی متر چشم‌پوشی گردید. قرائت رطوبت حجمی خاک با TDR بلافاصله پس از اتمام آبیاری شروع و تا آبیاری بعدی ادامه یافت. هنگامی که در لایه‌های مختلف خاک، مقدار رطوبت حجمی خاک به رطوبت ظرفیت زراعی (زمانی که آب ثقیلی از خاک خارج شد) (جدول ۱) یا کمتر از آن رسید، به عنوان نقطه شروع جذب آب ریشه در نظر گرفته شد. پس از خروج آب ثقیلی، اختلاف بین رطوبت در هر روز و روزهای بعد از آن به عنوان جذب آب ریشه در آن دوره تعیین شد (Mohammadi et al., 2019).



شکل ۱- نمای شماتیک از موقعیت قطره‌چکان و لوله‌های دستگاه TDR

مدل HYDRUS-2D

در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، جریان آب از یک قطره‌چکان به داخل خاک را با استفاده از مدل HYDRUS-2D می‌توان شبیه‌سازی نمود (Simunek et al., 2006, 2016). در این مدل، منحنی مشخصه رطوبتی خاک، $\theta(h)$ ، از معادله ون گنوختن (۱۹۸۰) و $K(h)$ تابع هدایت هیدرولیکی غیراشباع از معادله معلم (۱۹۷۶) از روابط ۱ و ۲ به دست می‌آید:

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

$$K(h) = K_s S_e^l \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 ; m = 1 - \frac{1}{n} \quad , S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad , n > 1 \quad (2)$$

که در آن θ_r و θ_s مقدار رطوبت باقی‌مانده و اشباع در خاک $[L^3 L^{-3}]$ ؛ α مقدار معکوس ورود هوا به خاک $[L^{-1}]$ ؛ K_s هدایت

اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای در یک باغ، در اطراف یک درخت سیب ۱۵ ساله در یک قطعه 2×2 متر تحت سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با آرایش دو ردیفه خطی انجام شد. فاصله کاشت درخت‌ها 7×2 متر بود. قطره‌چکان‌ها در عمق ۳۰ سانتی‌متری و در فاصله شعاعی ۱ متر از مرکز درخت (شکل ۱) نصب شدند. تعداد قطره‌چکان‌ها برای هر درخت ۴ عدد، فاصله قطره‌چکان‌ها ۱ متر و دبی قطره‌چکان‌ها ۴ لیتر بر ثانیه بود. برنامه‌ریزی آبیاری با توجه به شرایط آب و هوایی منطقه مورد مطالعه و معیارهای استاندارد طراحی (شامل محاسبات تبخیر و تعرق به روش پنمن - ماتنیس، راندمان آبیاری، ضوابط هیدرولیکی لوله‌ها و ایستگاه پمپاژ، توپوگرافی منطقه مورد مطالعه، محاسبه نیاز آبی و ظرفیت شبکه و سایر ضوابط طراحی) انجام شد. فاصله آبیاری‌ها در ماه‌های تیر، مرداد، شهریور و مهر به ترتیب ۷، ۵، ۷ و ۱۰ روز و مدت زمان آبیاری ۷ تا ۱۲ ساعت بود. رطوبت حجمی خاک با استفاده از دستگاه TDR مدل (TRIME®) (PICO T3/IPH) اندازه‌گیری شد. لوله‌های TDR در ۵ نقطه در یک طرف درخت، در فواصل شعاعی ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ سانتی‌متر از مرکز درخت (شکل ۱) جایگذاری شدند. در هر فاصله، رطوبت حجمی خاک در عمق‌های ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ سانتی‌متر قرائت شد. رطوبت حجمی خاک به صورت روزانه تا ۴ ماه (تیر تا ۳۰ مهر) در طول فصل آبیاری اندازه‌گیری شد. در مجموع ۲۴۰۰ نقطه در مدت ۴ ماه اندازه‌گیری گردید. کالیبراسیون دستگاه TDR با مقایسه مقادیر قرائت شده رطوبت حجمی خاک با دستگاه TDR با مقادیر اندازه‌گیری شده (رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده پس از نمونه‌برداری و خشک کردن در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد از عمق‌های مختلف در زمان‌های مختلف به دست آمد) انجام شد. برای اندازه‌گیری تبخیر و تعرق، از داده‌های ایستگاه هواشناسی واقع در نزدیکی منطقه مورد مطالعه استفاده شد. رشد ریشه در جهت شعاعی و عمقی در ابتدا و پایان دوره ۴ ماهه با حفاری مستقیم اندازه‌گیری گردید. با توجه به تغییرات عمقی و شعاعی ریشه، نمونه‌های خاک به همراه ریشه از اطراف درخت برداشت و موقعیت هر نمونه شامل فاصله شعاعی و عمقی از تنه درخت در پایان آزمایشات ثبت شد. تراکم طولی ریشه $(cm.cm^{-3})$ در هر نمونه با تقسیم طول ریشه در هر نمونه به حجم نمونه برداشت شده به دست آمد. توزیع دو بعدی عمقی و شعاعی ریشه‌ها از طریق میانگین تراکم طولی ریشه در نمونه‌های برداشت شده در منطقه توزیع ریشه تعیین شد (Besharat et al., 2010). جذب آب ریشه از طریق اختلاف مقدار رطوبت حجمی خاک پس از آبیاری (پس از خروج آب ثقیلی از خاک) و مقدار رطوبت باقی‌مانده در خاک محاسبه گردید. اندازه‌گیری تبخیر نشان داد که در بین دو آبیاری، تبخیر بیشتر از لایه بالایی خاک صورت

داده‌های اندازه‌گیری شده و پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی خاک $(n, \alpha, \theta_s, \theta_r)$ به دست آمده با حل معکوس در شبکه عصبی ROSETTA محاسبه شدند. پارامترهای هیدرولیکی خاک در جدول ۲ نشان داده شده است.

هیدرولیکی اشباع $[L T^{-1}]$; n شاخص توزیع اندازه خلل و فرج خاک $(-)$ ، S_e ضریب اشباع موثر $[L^3 L^{-3}]$ ؛ l پارامتر اتصال خلل و فرج $(-)$ ، که بر اساس نتایج به دست آمده در طیف وسیعی از خاک‌های مختلف مقدار آن برابر 0.5 در نظر گرفته می‌شود (Mualem, 1976)، می‌باشند. $\theta(h)$ و $K(h)$ در روابط (۲) و (۳) با استفاده از

جدول ۲- پارامترهای هیدرولیکی به دست آمده از مدل ROSETTA

عمق خاک (cm)	بافت خاک	θ_r ($cm^3 cm^{-3}$)	θ_s ($cm^3 cm^{-3}$)	α (cm^{-1})	n (-)	K_s ($cm \cdot day^{-1}$)	l (-)
۰-۳۰	لومی	۰/۰۶۱۵	۰/۴۱۲۳	۰/۰۰۵۹	۱/۵۹۷۴	۱۸/۱۴	۰/۵
۳۰-۶۰	شنی لومی	۰/۰۴۵۷	۰/۳۸۹۳	۰/۰۱۷۸	۱/۴۲۹۴	۲۵/۹۸	۰/۵
۶۰-۹۰	شنی لومی	۰/۰۴۰۵	۰/۳۸۵۱	۰/۰۳۸۴	۱/۴۸۸۴	۲۱/۱۴	۰/۵
۱۲۰-۹۰	شنی لومی	۰/۰۵۹۸	۰/۳۷۶۴	۰/۰۳۹۸	۱/۳۵۵۳	۲۱/۷۸	۰/۵

جذب آب ریشه

در HYDRUS، جذب آب ریشه به عنوان یک جزء تخلیه در معادله ریچاردز، با استفاده از تابع عکس‌العمل تنش که توسط فوس و همکاران (۱۹۷۸) ارائه گردیده، مدل‌سازی می‌شود.

$$S(h) = \alpha(h) b(x, z) St Tp \quad (3)$$

در معادله ۳، S میزان جذب آب ریشه $[T^{-1}]$ ، $\alpha(h)$ تابع عکس‌العمل تنش آب، $b(x, z)$ تابع توزیع تراکم ریشه $[L^{-2}]$ ، St عرض سطح خاک در فرایند انتقال ($St = 150 \text{ cm}$)، و Tp تفرق پتانسیل $[LT^{-1}]$ می‌باشد. در این تحقیق، پارامترهای تابع عکس‌العمل تنش برابر $h_1 = -10 \text{ cm}$ ، $h_2 = -25 \text{ cm}$ ، $h_3 = -200 \text{ cm}$ و $h_4 = -8000 \text{ cm}$ طبق تحقیقات فوس و همکاران (۱۹۷۸) در نظر گرفته شد. در HYDRUS از تابع دو بعدی $b(x, z)$ ، (ورات و همکاران، ۲۰۰۱، ۲۰۰۲) برای به دست آوردن تراکم توزیع ریشه استفاده می‌گردد:

$$b(x, z) = \left(1 - \frac{z}{Z_m} \left(1 - \frac{x}{X_m}\right)\right) e^{-\left(\frac{p_z}{Z_m} |z^* - z| + \frac{p_x}{X_m} |x^* - x|\right)} \quad (4)$$

در رابطه ۴، Z_m و X_m حداکثر طول ریشه در جهت‌های $[L]$ x و z از مبدأ گیاه و $[L]$ x^* و $[L]$ z^* پارامترهای تجربی هستند. برای به دست آوردن پارامترهای تجربی معادله ۵، نمونه‌های ریشه به همراه خاک از قسمت‌های مختلف برداشت گردید و پس از شستشوی دقیق ریشه‌ها و به دست آوردن تابع توزیع تراکم ریشه در قسمت‌های مختلف، معادلات مربوطه در نرم‌افزار Matlab وارد شد و ضرایب p_z ، p_x ، x^* و z^* بهینه‌سازی شدند. برای به دست حداکثر طول ریشه‌ها در جهات عمودی و افقی، حفاری مستقیم پروفیل خاک در دو جهت انجام شد و پارامترهای X_m و Z_m به ترتیب برابر ۱۵۰ و ۱۲۰ سانتی متر تعیین شد. برای به دست آوردن تابع توزیع تراکم ریشه در قسمت‌های مختلف شعاعی و عمقی ریشه از نرم‌افزارهای Smart Root و AutoCAD استفاده شد. نتایج مربوط به پارامترهای توزیع تراکم ریشه در معادله ۴ در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- پارامترهای تجربی تراکم توزیع ریشه در معادله ۵

X_m (cm)	Z_m (cm)	x^* (cm)	z^* (cm)	p_x (-)	p_z (-)
۱۵۰	۱۲۰	۱۰	۳۰	۱/۸	۱/۲

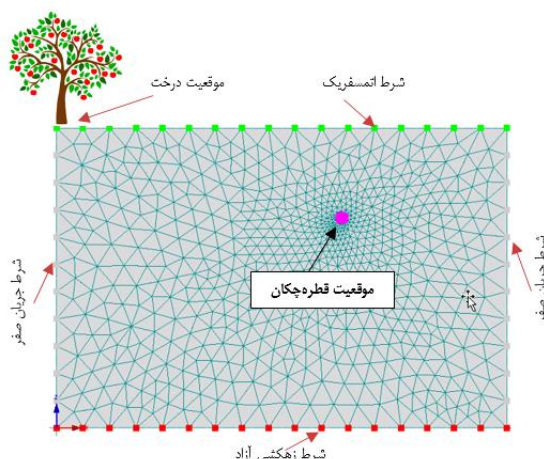
شرایط اولیه و مرزی

در این تحقیق، شبیه‌سازی در نرم‌افزار HYDRUS-2D در یک طرف درخت در پروفایلی از خاک به فاصله شعاعی و عمقی 150×150 سانتی متر از مرکز تنه درخت انجام شد. مقادیر رطوبت حجمی خاک در فواصل مختلف عمقی و شعاعی قبل از آبیاری اندازه‌گیری و به عنوان شرایط اولیه در نرم‌افزار HYDRUS-2D وارد شد. مرز چپ و راست به عنوان جریان صفر، مرز پایین به صورت شرط مرزی زهکشی آزاد و مرز بالا به عنوان شرط اتمسفریک تعیین و به عنوان شرایط مرزی در نرم‌افزار اعمال شد. تبخیر از سطح خاک به عنوان فلاکس مثبت و بارندگی و جریان وارد شده از قطره‌چکان به عنوان

فلاکس منفی در نرم‌افزار تعریف گردید. شرایط هندسی و مرزی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار HYDRUS-2D در شکل ۲ نشان داده شده است.

واسنجی و صحت‌سنجی مدل HYDRUS-2D

در این تحقیق، واسنجی مدل HYDRUS-2D در دو مرحله انجام شد. در ابتدا ۳۰ درصد از داده‌های اندازه‌گیری شده رطوبت حجمی جهت تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک با روش حل معکوس با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی اونبرگ - مارکوارت موجود در نرم‌افزار HYDRUS-2D، مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۲- شرایط هندسی و مرزی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار HYDRUS-2D

و شبیه‌سازی شده و MBE نشان‌دهنده بیش برآوردی یا کم برآوردی مدل می‌باشد. اگر مقادیر حاصل از RMSE و ME نزدیک به صفر باشد، نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل است. در این تحقیق، برای مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده از آزمون چند دامنه دانکن در نرم‌افزار SAS با ضریب اطمینان ۹۵ درصد استفاده و نتایج حاصله تجزیه و تحلیل شد.

توصیف سناریوهای تحقیق

مدیریت همزمان دبی و زمان آبیاری در کاهش میزان تلفات آب و افزایش میزان جذب در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است (Mohammadi et al., 2019). به دلیل زمان‌بر و پرهزینه بودن آزمایشات میدانی و اینکه نرم‌افزار HYDRUS یک ابزار قدرتمند برای شبیه‌سازی جریان آب و جذب آب ریشه در خاک می‌باشد که در صورت کالیبره کردن مناسب می‌توان از نتایج آن برای شبیه‌سازی در شرایط متفاوت از محدوده آزمایشات میدانی استفاده نمود (Honari et al., 2017). با توجه به نتایج مناسب ارزیابی مدل HYDRUS، در این تحقیق از سه سناریو به شرح ذیل استفاده گردید.

اندازه‌گیری و مقایسه داده در شرایط میدانی واقعی با دبی ۴ لیتر بر ثانیه و مدت زمان آبیاری طراحی شده.

شبیه‌سازی، با فرض کاهش دبی به نصف (۲ لیتر بر ثانیه) و افزایش مدت زمان آبیاری به دو برابر شرایط میدانی.

شبیه‌سازی، با فرض افزایش دبی به دو برابر (۸ لیتر بر ثانیه) و کاهش مدت زمان آبیاری به نصف شرایط میدانی.

توجه به این نکته ضروری است که در تمامی سناریوها میزان حجم آب کاربردی یکسان بود. پس از انجام آزمایشات و شبیه‌سازی انجام‌یافته در HYDRUS-2D، نتایج به دست آمده با یکدیگر مقایسه شدند.

روش معکوس مبتنی بر حداقل سازی یک تابع هدف است که بیانگر اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار HYDRUS-2D می‌باشد. در این مرحله، با وارد کردن داده‌های اندازه‌گیری شده از جمله اجزای بافت خاک، چگالی ظاهری، رطوبت ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی در مدل ROSETTA موجود در HYDRUS، پارامترهای هیدرولیکی خاک شامل K_s ، θ_r ، θ_s و ضرایب α و n برآورد شدند. بر اساس تحقیقات روچا و همکاران (۲۰۰۶)، پارامترهای n و α به ترتیب دارای حساسیت بالا و پایین در معادله ونگنوختن (معادله ۱) هستند. بر این اساس در مرحله دوم، حل معکوس با تغییر دو پارامتر n و α به نحوی انجام شد که مقادیر تابع هدف در HYDRUS دارای کمترین خطا باشد. برای اعتبارسنجی HYDRUS-2D، از ۷۰ درصد مابقی داده‌های اندازه‌گیری شده استفاده شد. برای ارزیابی عملکرد مدل، از شاخص‌های آماری ضریب تعیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و خطای متوسط (MBE) استفاده شد. معادلات ریاضی این آماره به صورت زیر است:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^j (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^j (O_i - O_{ave})^2} \quad (5)$$

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

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

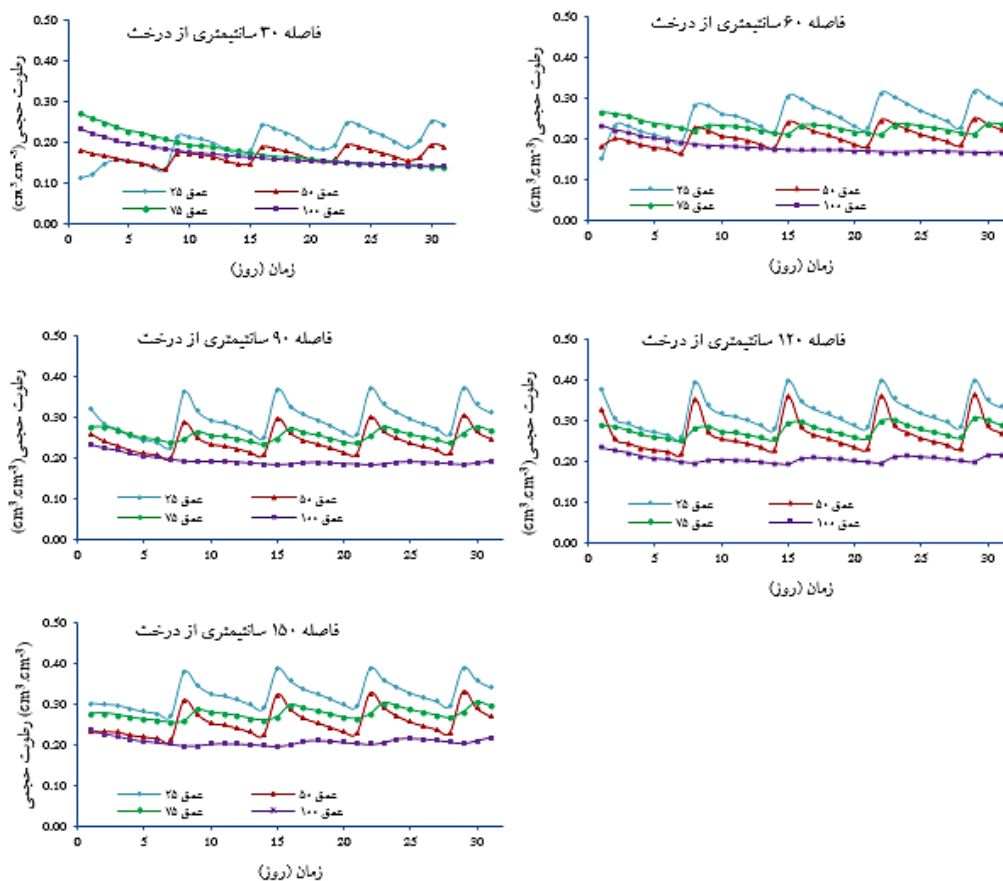
در این روابط O_i و P_i مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده، n تعداد اندازه‌گیری‌ها، O_{ave} متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده، R^2 نشان‌دهنده همبستگی بین داده‌ها (Khodaverdiloo et al., 2011). RMSE نشان‌دهنده خطای مطلق بین داده‌های اندازه‌گیری

نتایج و بحث

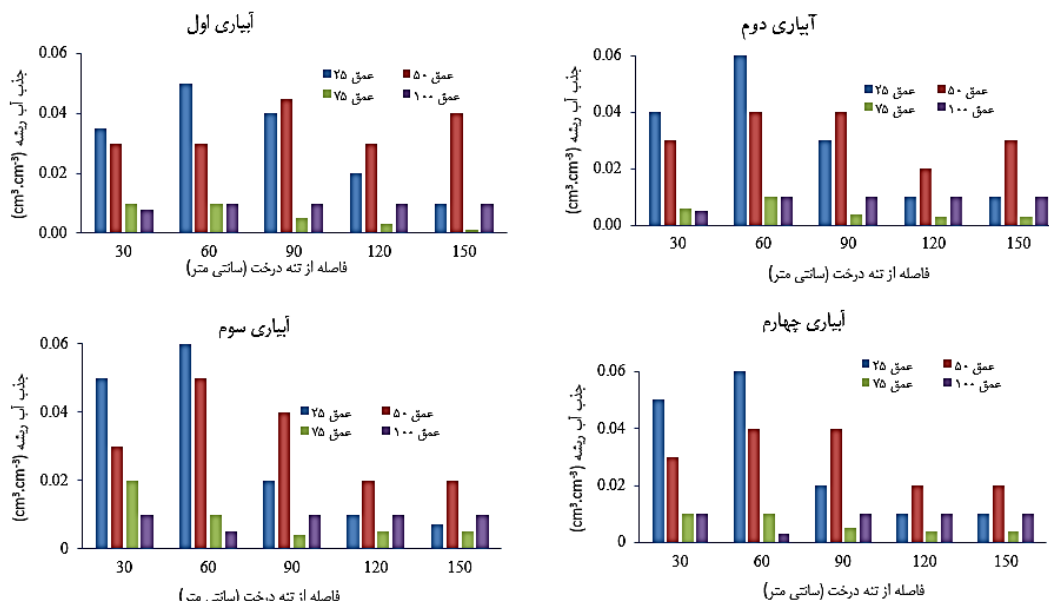
پروفیل رطوبتی و جذب آب ریشه

به منظور بررسی نحوه جریان آب در خاک و جذب آب ریشه، در این بخش از ۴ آبیاری اول در تیرماه برای انجام مقایسات استفاده و مقایسه نتایج کلی به همراه سایر سناریو ها در بخش ۳-۳ در جدول ۷ صورت گرفت. شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب رطوبتی حجمی اندازه‌گیری شده ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) توسط دستگاه TDR و جذب آب ریشه ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) را در پروفیل خاک به فاصله شعاعی ۱/۵ و عمقی ۱ متر در ۴ چرخه آبیاری در عمق‌های ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ سانتی متر در فواصل مختلف از تنه درخت نشان می‌دهند. همانطوری‌که در شکل ۳ مشاهده می‌گردد، بیش‌ترین میزان نوسانات رطوبتی در فواصل ۹۰ و ۱۲۰ سانتی متر از مرکز تنه درخت اتفاق افتاد. این امر به دلیل واقع شدن قطره‌چکان در فاصله ۱۰۰ سانتی‌متری از تنه درخت و نزدیک بودن این نقاط به منبع تغذیه آب بود. بیش‌ترین و کمترین میزان نوسانات رطوبتی به ترتیب در عمق‌های ۲۵ و ۱۰۰ سانتی‌متری

مشاهده شد. به دلیل خشک‌بودن منطقه توسعه ریشه در زمان آبیاری، رطوبت تنها در اطراف قطره‌چکان و در عمق ۲۵ سانتی‌متری به حد اشباع رسیده و پس از گذشت حدود ۲۴ ساعت و با رسیدن به حد ظرفیت زراعی به صورت تئوریک جذب ریشه شروع می‌گردد. جداول ۴ و ۵ به ترتیب مقایسه جذب آب ریشه را در اعماق و فواصل مختلف از درخت در ۴ آبیاری اول نشان می‌دهد. همانطوری‌که در شکل ۴ و جداول ۴ و ۵ مشاهده می‌گردد با وجود زیاد بودن نوسانات رطوبتی در فواصل شعاعی ۹۰ و ۱۲۰ سانتی‌متری، در تمامی ۴ آبیاری انجام‌شده بیش‌ترین میزان جذب آب ریشه در فاصله شعاعی ۶۰ سانتی‌متری و عمقی ۵۰ سانتی‌متری اتفاق افتاد. این امر به دلیل تراکم زیاد ریشه‌ها با نزدیک گردیدن به طرف تنه درخت بود که با وجود رطوبت زیاد در فواصل ۹۰ تا ۱۵۰ سانتی‌متری، به دلیل کم بودن تراکم ریشه نسبت به فاصله ۶۰ سانتی‌متری، جذب آب در حد فاصل ۹۰ تا ۱۵۰ سانتی‌متری کمتر از فاصله ۶۰ سانتی‌متری بود.



شکل ۳- رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) توسط دستگاه TDR در چهار دور آبیاری در عمق‌های ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ سانتی متر در فواصل مختلف از تنه درخت



شکل ۴- جذب آب ریشه اندازه گیری شده (cm³.cm⁻³) در چهار دور آبیاری ۷ روزه در عمق های ۲۵-۱۰۰ سانتی متر در فواصل شعاعی ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰ سانتی متری از تنه درخت

عامل مهم تأثیرگذار در جذب آب ریشه می باشد که تأثیر متقابل بر هم دارند. به عبارتی دیگر، در صورت وجود رطوبت یکسان در سراسر منطقه توزیع ریشه گیاه، نقاطی که دارای تراکم ریشه زیاد هستند جذب بیشتری خواهند داشت.

از طرفی، با وجود زیاد بودن تراکم ریشه در فاصله شعاعی ۳۰ سانتی متری، جذب آب ریشه کمتر از فاصله ۶۰ سانتی متری بود که این امر به دلیل دور بودن از محل قرار گرفتن قطره چکان و کمبود رطوبت در این نقطه بود. در واقع، تراکم ریشه و رطوبت خاک دو

جدول ۴- مقایسه میانگین جذب آب ریشه (cm³.cm⁻³) در عمق های ۲۵-۱۰۰ سانتی متر در آبیاری اول تا چهارم

شماره آبیاری	عمق (cm)			
	۱۰۰	۷۵	۵۰	۲۵
آبیاری اول	۰/۰۰۹۶ ^b	۰/۰۰۶۰ ^a	۰/۰۳۵ ^d	۰/۰۳۳ ^{c*}
آبیاری دوم	۰/۰۰۹۰ ^b	۰/۰۰۵۲ ^a	۰/۰۳۳ ^d	۰/۰۳۰ ^c
آبیاری سوم	۰/۰۰۹۰ ^a	۰/۰۰۹۸ ^b	۰/۰۳۳ ^d	۰/۰۳۰ ^c
آبیاری چهارم	۰/۰۰۸۶ ^b	۰/۰۰۳۳ ^a	۰/۰۳۰ ^c	۰/۰۳۰ ^c
مجموع آبیاری ها	۰/۰۲۶۰ ^b	۰/۰۲۴ ^a	۰/۱۲۹ ^d	۰/۱۲۲ ^c

*حروف مشابه در هر سطر نشان دهنده معنی دار نبودن اختلاف در سطح اطمینان ۵ درصد است.

جدول ۵- مقایسه میانگین جذب آب ریشه (cm³.cm⁻³) در فواصل مختلف از تنه درخت در آبیاری اول تا چهارم

شماره آبیاری	فاصله از درخت (cm)				
	۱۵۰	۱۲۰	۹۰	۶۰	۳۰
آبیاری اول	۰/۰۱۵ ^a	۰/۰۱۶ ^a	۰/۰۲۵ ^c	۰/۰۲۶ ^c	۰/۰۲۱ ^{b*}
آبیاری دوم	۰/۰۱۱ ^a	۰/۰۱۳ ^b	۰/۰۲۱ ^c	۰/۰۳۰ ^c	۰/۰۲۰ ^d
آبیاری سوم	۰/۰۱۱ ^a	۰/۰۱۱ ^a	۰/۰۱۹ ^b	۰/۰۳۱ ^d	۰/۰۲۸ ^c
آبیاری چهارم	۰/۰۱۱ ^a	۰/۰۱۱ ^a	۰/۰۱۹ ^b	۰/۰۲۸ ^d	۰/۰۲۵ ^c
مجموع آبیاری ها	۰/۰۴۸ ^a	۰/۰۵۱ ^b	۰/۰۸۳ ^c	۰/۱۱۵ ^e	۰/۰۹۴ ^d

*حروف مشابه در هر سطر نشان دهنده معنی دار نبودن اختلاف در سطح اطمینان ۵ درصد است

ارزیابی دقت مدل HYDRUS-2D در شبیه‌سازی رطوبت حجمی خاک

شکل ۵، مقادیر ضریب R^2 بین داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده رطوبت حجمی خاک را در فواصل ۱۵۰، ۱۲۰، ۹۰، ۶۰ سانتی متر از تنه درخت و جدول ۶ شاخص‌های آماری R^2 ، RMSE و ME را برای ارزیابی دقت HYDRUS-2D در تخمین رطوبت حجمی در فواصل مختلف از تنه درخت نشان می‌دهد. همانطوری که در شکل ۵ مشاهده می‌گردد ضریب بالای ۰/۸ به دست آمده برای R^2 نشان داد همبستگی مناسبی بین داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده رطوبت حجمی خاک وجود دارد. مقادیر RMSE به دست آمده، $0.193 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ - 0.141 نشان‌دهنده تخمین مناسب HYDRUS-2D از رطوبت حجمی در زیر خاک در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بود. در مطالعات مشابه انجام‌یافته یائو و همکاران (۲۰۱۱)، هنری و همکاران (۲۰۱۷) و سائفادین و همکاران (۲۰۱۹) جهت ارزیابی دقت مدل HYDRUS-2D در تخمین رطوبت حجمی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، مقادیر RMSE (به ترتیب) بین 0.24 - 0.11 ، 0.19 - 0.174 و 0.19 - 0.174 سانتی مترمکعب بر سانتی مترمکعب گزارش شده است که نشان‌دهنده کالیبراسیون مناسب و دقت بالای نرم‌افزار HYDRUS-2D در تخمین رطوبت حجمی خاک در این تحقیق است. مقادیر MBE به دست آمده در جدول ۶ نشان داد مدل تا فاصله شعاعی ۹۰ سانتی‌متری از تنه درخت، کم برآوردی و در فواصل ۱۲۰ و ۱۵۰ سانتی‌متری دارای اندکی بیش برآوردی بود.

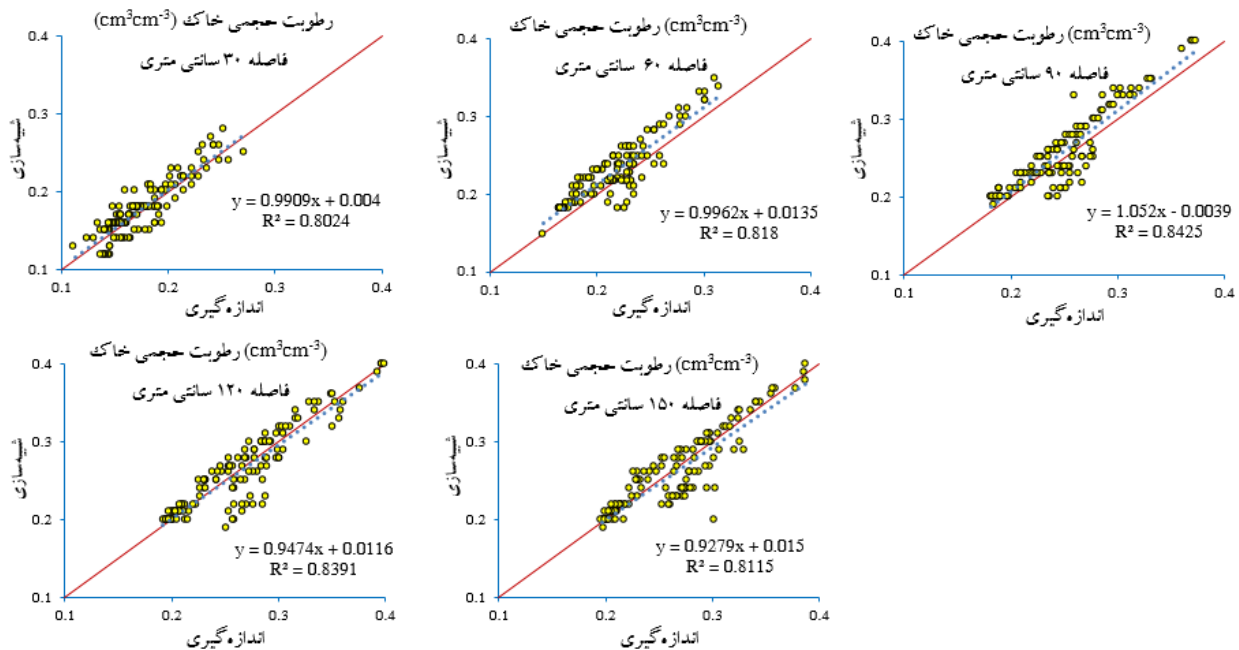
شبیه‌سازی سناریوهای مختلف در نرم‌افزار HYDRUS-2D

در این تحقیق، رفتار رطوبتی خاک در دو سناریو با دبی قطره‌چکان ۲ و ۸ لیتر بر ثانیه با میزان آب کاربردی یکسان در نرم‌افزار HYDRUS-2D شبیه‌سازی و نتایج به دست آمده با شرایط واقعی (دبی قطره‌چکان ۴ lit/h) مقایسه گردید. شکل ۶ رطوبت حجمی شبیه‌سازی شده پس از اتمام آبیاری اول را در دو سناریوی دبی ۸ لیتر بر ثانیه (Double) و دبی ۲ لیتر بر ثانیه (half) در پروفیل خاک به ابعاد $1 \text{ m} \times 1/5 \text{ m}$ با میزان آب کاربردی یکسان نشان می‌دهد.

این نتیجه‌گیری موافق نتیجه‌گیری محققان زیادی از جمله کوستا و همکاران (۲۰۰۷) و تانگو همکاران (۲۰۰۵) بود که بیان کردند کمبود رطوبت در قسمتی از ریشه گیاه موجب تولید اسید آبسزیک و کاهش هدایت روزه‌ای در آن قسمت از ریشه شده و جذب آب ریشه کاهش می‌یابد. همانطوری که در شکل ۴ مشاهده می‌گردد تا فاصله شعاعی ۶۰ سانتی‌متری از تنه درخت بیش‌ترین میزان جذب در عمق ۲۵ سانتی‌متری و در فاصله شعاعی ۹۰ تا ۱۵۰ سانتی‌متری رخ داد. داده‌های جدول ۴ نشان می‌دهد در مجموع ۴ آبیاری انجام‌شده بیش‌ترین میزان جذب آب ریشه در عمق ۵۰ سانتی‌متری و کمترین میزان آن در عمق‌های ۷۵ و ۱۰۰ سانتی‌متری (به دلیل کم بودن رطوبت خاک و تراکم ریشه) اتفاق افتاد. در مجموع ۴ آبیاری انجام‌شده (۲۸ روز) میزان جذب آب ریشه در عمق‌های ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ سانتی‌متر به ترتیب $39/2$ درصد (0.122)، $41/5$ درصد ($0.129 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)، $7/7$ درصد ($0.024 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)، $11/6$ درصد ($0.036 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) بود. اختلاف جذب آب ریشه در تمامی عمق با در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود. با توجه به نتایج به دست آمده، میزان جذب آب ریشه در مجموع چهار آبیاری از عمق ۵۰ سانتی‌متر به میزان ۴۱/۵ درصد و در واقع حدود ۸۱ درصد جذب آب ریشه از عمق ۰-۵۰ سانتی‌متر و تنها ۱۹ درصد در عمق زیر ۵۰ سانتی‌متر صورت گرفت. بشارت و همکاران (۲۰۱۰) در تحقیقی بر روی درخت سیب دریافتند بیش‌ترین میزان جذب آب ریشه در عمق ۱۰ تا ۳۰ سانتی‌متری اتفاق افتاد. همانطوری که در جدول ۵ مشاهده می‌گردد در مجموع ۴ آبیاری انجام‌شده (۲۸ روز) میزان جذب آب در فواصل 30 ، 60 ، 90 ، 120 ، 150 سانتی‌متر به ترتیب (۲۴ درصد) 0.30 ، 0.94 ، $29/3$ درصد ($0.115 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)، $21/4$ درصد ($0.084 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)، 13 درصد ($0.051 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)، $12/2$ درصد (0.048) بود که اختلاف جذب در تمامی فواصل در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود. با مشاهده جداول ۲ و ۳ می‌توان دریافت در مجموع ۴ آبیاری (۲۸ روز) بیش‌ترین و کمترین مقدار جذب آب ریشه به ترتیب در مختصات (عمقی، شعاعی) (۵۰، ۶۰) سانتی‌متر و (۷۵، ۱۵۰) سانتی‌متر از تنه درخت اتفاق افتاد.

جدول ۶- شاخص‌های آماری ارزیابی مدل HYDRUS در تخمین رطوبت حجمی خاک در فواصل مختلف از تنه درخت

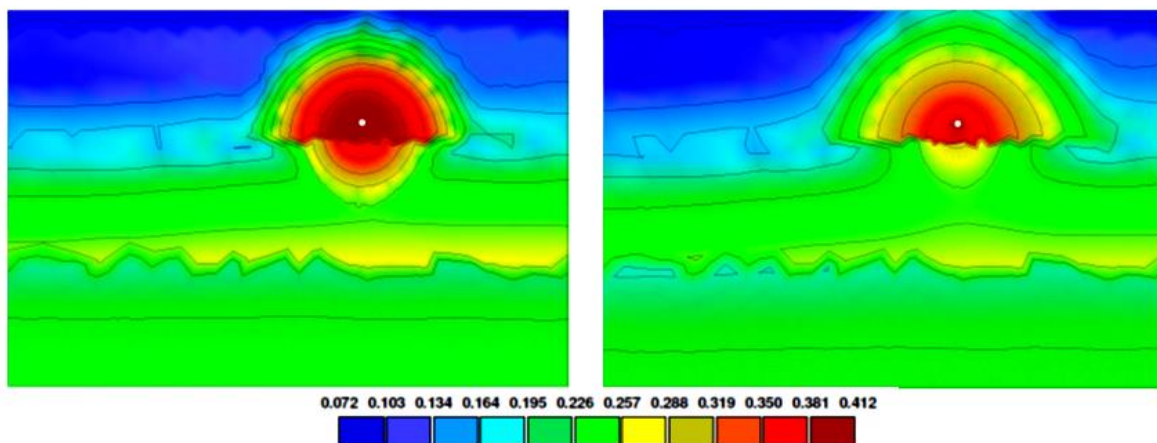
شاخص‌های آماری	فاصله از تنه درخت (سانتی‌متر)				
	۱۵۰	۱۲۰	۹۰	۶۰	۳۰
R^2	۰/۸۱۴۵	۰/۸۳۹۱	۰/۸۴۲۵	۰/۸۱۸۰	۰/۸۰۲۴
RMSE ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	۰/۰۱۷۲۷	۰/۰۱۶۴۲	۰/۰۱۴۰۹	۰/۰۱۸۵۳	۰/۰۱۹۳۴
MBE ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	۰/۰۱۵۴۴	۰/۰۰۹۱۲	-۰/۰۱۳۶۷	-۰/۰۵۸۹۴	-۰/۰۳۵۹۷



شکل ۵- ضریب تبیین (R^2) رطوبت حجمی خاک مابین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در فواصل شعاعی ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰ سانتی متری از تنه درخت

زیر قطره‌چکان) در این حالت بیشتر از شرایط با دبی ۲ لیتر بر ثانیه (سناریوی ۲) بود. حال آنکه، در دبی ۲ لیتر بر ثانیه به علت مدت زمان آبیاری زیاد، رطوبت به خوبی در تمامی جهات در اطراف قطره‌چکان توزیع گردید و الگوی خیس شدگی در این حالت بزرگ‌تر از دبی ۸ لیتر بر ثانیه بود. شکل ۷ جذب آب ریشه و میزان نفوذ عمقی آب را از پروفیل خاک در دو سناریوی ۲ و ۳ را نشان می‌دهد.

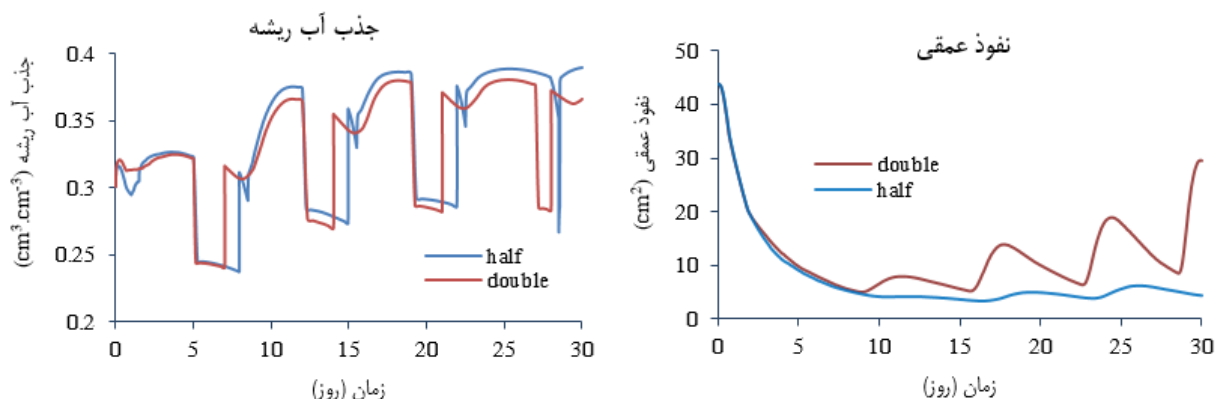
همانطوری که در شکل ۶ مشاهده می‌گردد پس از اتمام آبیاری در سناریو با دبی ۸ lit/h (سناریوی ۳) به علت مدت زمان آبیاری کمتر ($\frac{1}{8}$ برابر نسبت به سناریو با دبی ۲ لیتر بر ثانیه (سناریوی ۲)) توزیع آب در خاک به سرعت انجام گرفته و قطره‌چکان بیشتر اطراف خود را خیس می‌نماید. در ثانی به علت غلبه نفوذ عمقی به نفوذ جانبی در شدت جریان زیاد و مدت زمان آبیاری کم، نفوذ عمقی (خیس شدگی



شکل ۶- رطوبت حجمی شبیه‌سازی شده پس از آبیاری اول برای سناریوی شماره ۲ با دبی ۲ لیتر بر ثانیه (سمت راست) و سناریوی شماره ۳ با دبی ۸ لیتر بر ثانیه (سمت چپ) در میزان آب کاربردی یکسان

می‌توان به توزیع مناسب رطوبت در جهات جانبی و عمقی با کاهش دبی و افزایش مدت زمان آبیاری مرتبط دانست. در واقع به علت توزیع مناسب رطوبت در این سناریو، ریشه می‌تواند در تمامی نقاط به نحوه مطلوب از رطوبت توزیع گردیده در خاک استفاده نموده و در نتیجه آن جذب آب ریشه در این سناریو بیشتر از دیگر سناریوها باشد. حال آنکه، در سناریوی ۳ (دبی ۸ لیتر بر ثانیه) به علت توزیع رطوبت با دبی زیاد و مدت زمان آبیاری کم قسمت عمده رطوبت به علت غلبه نیروی ثقل در جهت عمقی حرکت نموده و به عمق‌های پایین تر که میزان تراکم ریشه و در نتیجه جذب ریشه در آن کمتر است انتقال می‌یابد. در ثانی، میزان تلفات عمقی نیز به علت غلبه نیروی ثقل در دبی ۸ لیتر بر ثانیه بیشتر از دبی‌های کمتر از آن بود. بررسی میزان تبخیر از سطح خاک در سه سناریوی مورد تحقیق نشان داد با تغییر دبی به میزان دو برابر و نصف تغییر چندانی در میزان تبخیر مشاهده نگردید (جدول ۷).

همانطوری که در شکل ۷ مشاهده می‌گردد جذب آب ریشه در تمامی آبیاری‌ها در دبی ۲ لیتر بر ثانیه اندکی بیشتر از دبی ۸ لیتر بر ثانیه و میزان نفوذ عمقی در دبی ۸ لیتر بر ثانیه بیشتر از دبی ۲ لیتر بر ثانیه بود. جدول ۷ تعادل جرمی رطوبت حجمی خاک شامل آبیاری، جذب آب ریشه، نفوذ عمقی، تبخیر و حجم آب ذخیره‌شده را در ۳ سناریوی ۱ (real)، ۲ (half) و ۳ (double) در ۴ ماه فصل آبیاری نشان می‌دهد. همانطوری که در جدول ۷ نیز مشاهده می‌گردد جذب آب ریشه در دبی‌های کاربردی (real) ۴، (half) ۲ و (double) ۸ لیتر بر ثانیه به ترتیب ۶۷/۷٪، ۶۵/۷۵٪، ۷۲/۷۸٪ و میزان نفوذ عمقی به ترتیب ۵/۶۳٪، ۷/۸۸٪، ۳/۴۵٪ بود. این نتایج نشان داد کاهش دبی به میزان ۲ lit/h و افزایش مدت زمان آبیاری، جذب آب ریشه را به میزان ۵/۰۸ درصد نسبت به شرایط واقعی و ۷/۰۳ درصد نسبت به دبی ۸ lit/h و افزایش و میزان نفوذ عمقی را به میزان ۲/۱۸ درصد نسبت به شرایط واقعی و ۴/۴۳ درصد نسبت به دبی ۸ لیتر بر ثانیه کاهش داد. علت افزایش جذب آب ریشه در سناریوی ۲ را



شکل ۷- جذب آب ریشه و نفوذ عمقی شبیه‌سازی شده در دو سناریوی ۲ (half) و ۳ (double) در میزان آب کاربردی یکسان در تیرماه

جدول ۷- مقایسه تعادل جرمی رطوبت حجمی خاک شامل آبیاری (%، جذب آب ریشه (%، نفوذ عمقی (%، تبخیر (% و میزان ذخیره در خاک (% در طول ۴ ماه برای سناریوهای ۱ (Real)، ۲ (half) و ۳ (Double)

ماه	آبیاری (%)			جذب آب ریشه (%)			نفوذ عمقی (%)			تبخیر (%)			میزان ذخیره (%)		
	Real	Double	half	Real	Double	half	Real	Double	half	Real	Double	half	Real	Double	half
تیر	۱۰۰	۶۷/۵	۶۶/۳	۷۱/۸	۶/۱	۸/۸	۲/۸	۱۵/۵	۱۵/۰	۱۵/۸	۱۰/۹	۱۰/۰	۹/۸	۱۰/۰	۹/۸
مرداد	۱۰۰	۶۸/۲	۶۵/۱	۷۲/۳	۳/۱	۵/۶	۲/۱	۱۷/۶	۱۶/۷	۱۷/۳	۱۱/۱	۱۲/۵	۸/۲	۱۲/۵	۸/۲
شهریور	۱۰۰	۶۷/۳	۶۶/۱	۷۲/۵	۷/۱	۸/۸	۳/۸	۱۴/۳	۱۳/۹	۱۴/۵	۱۱/۲	۱۱/۲	۹/۱	۱۱/۲	۹/۱
مهر	۱۰۰	۶۷/۸	۶۵/۵	۷۴/۵	۶/۲	۸/۳	۵/۱	۱۴/۱	۱۳/۷	۱۴/۱	۱۱/۹	۱۲/۵	۶/۳	۱۲/۵	۶/۳
میانگین	۱۰۰	۶۷/۷	۶۵/۷۵	۷۲/۷۸	۵/۶۳	۷/۸۸	۳/۴۵	۱۵/۲۸	۱۴/۸۳	۱۵/۴۳	۱۱/۲۸	۱۱/۵۵	۸/۳۵	۱۱/۵۵	۸/۳۵

نشان‌دهنده تأیید نتیجه‌گیری بالا در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی هم بود. همچنین کای و همکاران (۲۰۱۷) در تحقیقی دریافتند با کاهش مدت زمانی آبیاری می‌توان تلفات ناشی از نفوذ عمقی را در آبیاری

محمدی و همکاران (۲۰۱۹) نتیجه‌گیری کردند با کاهش دبی جریان و افزایش مدت زمان آبیاری در آبیاری سطحی جذب آب ریشه افزایش و میزان تلفات آب کاهش یافت. نتایج تحقیق حاضر

14(4): 939-950.

- Al-Omran, A. M., Al-Harbi, A. R., Wahb- Allah, M. A., Nadeem, M and Eleter, A. 2010. Impact of Irrigation water quality, Irrigation Systems, Irrigation Rates and Soil Amendments on Tomato Production in Sandy Calcareous Soil. *Turk. J. Agric. For.* 34: 59 – 73.
- Autovino, D., Rallo, G and Provenzano, G. 2018. Predicting soil and plant water status dynamic in olive orchards under different irrigation systems with Hydrus-2D: Model performance and scenario analysis. *Agric. Water Manag.* 203: 225-235.
- Azad, N., Behmanesh, J., Rezaverdinejad, V., Abbasi, F and Navabian, M. 2018. Developing an optimization model in drip fertigation management to consider environmental issues and supply plant requirements. *Agric. Water Manag.* 208: 344–356. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.06.030>.
- Bainbridge, D.A. 2001. Buried clay pot irrigation: a little known but very efficient traditional method of irrigation. *Agric. Water Manag.* 48, 79–88.
- Batchelor, C., Lovell, C., Murata, M. 1996. Simple microirrigation techniques for improving irrigation efficiency on vegetable gardens. *Agric. Water Manag.* 32: 37–48.
- Besharat, S., Nazemi, A.H and Sadraddini, A.A. 2010. Parametric modeling of root length density and root water uptake in unsaturated soil. *Turk. J. Agric. For.* 34: 439-449. doi:10.3906/tar-0905-39
- Cai, Y., Wu, P., Zhang, L., Zhu, D., Chen, J., Wu, S and Zhao, X. 2017. Simulation of soil water movement under subsurface irrigation with porous ceramic emitter. *Agric. Water Manag.* 192: 244–256.
- Costa, J.M., Ortuno, M.F and Chaves, M.M. 2007. Deficit irrigation as a strategy to save water: physiology and potential application to horticulture. *Journal of Integrative Plant Biology.* 49: 1421–1434.
- Cote, C.M., Birstow, K.L., Charlesworth, P.B., Cook, F.J and Thorburn, P.J. 2003. Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. *Irrig. Sci.* 22 (3–4): 143–156.
- Elmaloglou, S and Diamantopoulos, E. 2009. Simulation of soil water dynamics under subsurface drip irrigation from line sources. *Agric. Water Manag.* 96: 1587-1595.
- Feddes, A., Kowalik, P.J and Zaradny, H. 1978. Simulation of field water use and crop yield. Wiley, New York.
- 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. *J. Irrig. Drain.*
- زیرسطحی کاهش داد. نتایج این تحقیق نشان داد مدیریت همزمان دبی و مدت زمان آبیاری یک راهکار مناسب در کاهش میزان تلفات عمقی و توزیع مناسب رطوبت در منطقه توسعه ریشه گیاه در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بود.

نتیجه گیری

در این تحقیق نحوه جریان آب در خاک و جذب آب ریشه در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی درخت سیب بررسی و با سناریوهای مختلف در نرم‌افزار HYDRUS-2D شبیه‌سازی شد. نتایج به دست آمده نشان داد بیشترین و کمترین میزان نوسانات رطوبتی به ترتیب در عمق‌های ۲۵ و ۱۰۰ سانتی‌متری اتفاق افتاد. حدود ۸۱ درصد جذب آب ریشه از عمق ۵۰-۰ سانتی متر و تنها ۱۹ درصد در عمق زیر ۵۰ سانتی متر صورت گرفت. بیشترین و کمترین میزان جذب آب ریشه به ترتیب در مختصات (عمقی، شعاعی) (۵۰، ۶۰) سانتی متر و (۷۵، ۱۵۰) سانتی متر از تنه درخت اتفاق افتاد. مقادیر R^2 و RMSE به دست آمده نشان داد نرم‌افزار HYDRUS-2D تخمین مناسب از رطوبت حجمی در زیر خاک در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی داشت. مقایسه نتایج به دست آمده از طریق شبیه‌سازی نرم‌افزار HYDRUS-2D با سناریوهای مختلف نشان داد با کاهش دبی به میزان ۲ لیتر بر ثانیه و افزایش مدت زمان آبیاری (در حجم آب کاربردی یکسان) جذب آب ریشه را به میزان ۵/۰۸ درصد نسبت به شرایط واقعی و ۷/۰۳ درصد نسبت به دبی ۸ لیتر بر ثانیه افزایش و میزان نفوذ عمقی را به میزان ۲/۱۸ درصد نسبت به شرایط واقعی و ۴/۴۳ درصد نسبت به دبی ۸ لیتر بر ثانیه کاهش یافت. با توجه به نتایج این تحقیق توصیه می‌گردد در طراحی سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی میزان آبدهی قطره‌چکان با در نظر گرفتن مدیریت مناسب دبی و مدت‌زمان آبیاری انتخاب و برنامه‌ریزی مناسب آبیاری لحاظ گردد. این امر می‌تواند صرفه جویی قابل ملاحظه در مصرف آب مخصوصاً در مناطقی که با کمبود آب مواجه هستند، برای کشاورزان داشته باشد. همچنین پیشنهاد می‌گردد در تحقیقات آتی سناریوهای شبیه‌سازی گردیده در این تحقیق در شرایط واقعی انجام و نتایج به دست آمده مقایسه گردند.

منابع

- Abu-Zreig, M and Atoum, M.F. 2004. Hydraulic characteristics of clay pitchers produced in Jordan. *Can. Biosyst. Eng.* 46: 15–20.
- Al-omran, A. M., Al-Harbi, M. A., Wahb-Allah, M. A., Alwabel, M., Nadeem, M and Al-Eter, A. 2012. Management of Irrigation Water Salinity in Greenhouse Tomato Production under Calcareous Sandy Soil and Drip Irrigation. *J. Agri. Sci. Tech.*

- Simunek, J., Sejna, M and van Genuchten, M.T. 2006. The HYDRUS software package for simulating two and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. In: Technical Manual, Version 1.0, PC Progress, and Prague, Czech Republic.
- Simunek, J., van Genuchten, M.T.h and Sejna, M. 2008. Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages, and related codes. *Vadose. Zone J.* 7(2): 587–600.
- Simunek, J., van Genuchten, M.T and Sejna, M. 2016. Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages. *Vadose. Zo. J.* 15: 1–25.
- Singh, D.K., Rajput, T.B.S., Singh, D.K., Sikarwar, H.S., Sahoo, R.N and Ahmad, T. 2006. Simulation of soil wetting pattern with subsurface drip irrigation from line source. *Agric. Water Manag.* 83(1–2): 130–134.
- Siyal, A.A., van Genuchten, M.T and Skaggs, T.H. 2013. Solute transport in a loamy soil under subsurface porous clay pipe irrigation. *Agric. Water Manag.* 121: 73–80.
- Skaggs, T.H., Trout, T.J., Simunek, J and Shouse, P.J. 2004. Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. *J. Irrig. Drain. Eng.* 130: 304–310.
- Stein, T.M. 1997. The influence of evaporation, hydraulic conductivity, wall-thickness, and surface area on the seepage rates of pitchers for pitcher irrigation. *J. Appl. Irrig. Sci.* 32: 65–83.
- Subbaiah, R. 2013. A review of models for predicting soil water dynamics during trickle irrigation. *Irrig. Sci.* 31(3): 225–258. doi:10.1007/s00271-011-0309-x.
- Tang, L.S., Li, Y and Zhang, J. 2005. Physiological and yield responses of cotton under partial rootzone irrigation. *Field Crops Research.* 94: 214–223.
- Van Genuchten, M.T. 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am.* 44: 892–898.
- Vrugt, J.A., Hopmans, J.W and Simunek, J. 2001. Calibration of a two-dimensional root water uptake model. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65(4): 1027–1037.
- Vrugt, J.A., Van Wijk, M.T., Hopmans, J.W and Simunek, J. 2002. One-, two-, and three-dimensional root water uptake functions for transient modeling. *Water Resour. Res.* 37(10): 2457–2470.
- Yao, W.W., Ma, X.Y., Li, J and Parkes, M. 2011. Simulation of point source wetting pattern of subsurface drip irrigation. *Irrig. Sci.* 29: 331–339.
- Zhijuan, Q., Hao, F., Ying, Z., Tibin, Z.h., Aizheng, Y Eng. 04017014: 1-7. doi: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001188.
- Khalifa, H.E., El-Gindy, A.M., Sharaf, G.A and Allam, K.h.A. 2004. Simulating water movement in sandy soil under surface point source emitter, I. model development. *Misr. J. Ag. Eng.* 21(2): 341–361.
- Kandelous, M.M., Simunek, J., van Genuchten, M.T.h and Malek, K. 2011. Soil water content distributions between two emitters of a subsurface drip irrigation system. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 75(2): 488–497.
- Kandelous, M.M and Simunek, J. 2010a. Comparison of numerical, analytical, and empirical models to estimate wetting patterns for surface and subsurface drip irrigation. *Irrig. Sci.* 28(5): 435–444
- Kandelous, M.M and Simunek, J. 2010b. Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D. *Agric. Water Manag.* 97: 1070–1076.
- Khodaverdilo, H., Homae, M., van Genuchten, M.T and Ghorbani Dashtaki, S. 2011. Deriving and validating pedotransfer functions for some calcareous soils. *J. Hydrol.* 399: 93–99.
- Lazarovitch, N., Simunek, J and Shani, U. 2005. System dependent boundary condition for water flow from subsurface source. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69(1): 46–50.
- Mohammad, N., El-Nesr, N.M., Alazba, A.A and Simunek, j. 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.
- Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 12(3): 513–522.
- Provenzano, G. 2007. Using HYDRUS-2D simulation model to evaluate wetted soil volume in subsurface drip irrigation systems. *J. Irrig. Drain. Eng.* 133: 342–349. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(342).
- Ramos, T.B., Simunek, J., Gonc alves, M.C., Martins, J.C., Prazeres, A and Pereira, L.S. 2012. Two-dimensional modeling of water and nitrogen fate from sweet sorghum irrigated with fresh and blended saline waters. *Agric. Water Manag.* 111: 87–104.
- Rocha, D., Abbasi, F and Feyen, J. 2006. Sensitivity analysis of soil hydraulic properties on subsurface water flow in furrows. *J. Irrig. Drain. Eng.* 132: 418–424.
- Saefuddin, R., Saito, H and Simunek, J. 2019. Experimental and numerical evaluation of a ring-shaped emitter for subsurface irrigation, *Agric. Water Manag.* 211: 111-122.

Zhou, Q., Kang, S., Zhang, L and Li, F. 2007. Comparison of APRI and HYDRUS-2D models to simulate soil water dynamics in a vineyard under alternate partial root zone drip irrigation. *Plant Soil*. 291(1): 211-223.

and Zhongxue, Z.h. 2018. Spatial distribution and simulation of soil moisture and salinity under mulched drip irrigation combined with tillage in an arid saline irrigation district, northwest China. *Agric. Water Manag.* 201: 219-231.

Measurement and Simulation of the Water flow and Root Uptake in Soil under Subsurface Drip Irrigation of Apple tree

E. Nazari¹, S. Besharat^{2*}, K. Zeinalzadeh³, A. Mohammadi⁴

Received: Jun.26, 2019

Accepted: Jul.29, 2019

Abstract

This study was conducted to measure water flow and root uptake under the soil in a 2 m × 2 m plot around an apple tree 15 years old under subsurface drip irrigation in Miandoab region and simulated by different scenarios in HYDRUS-2D software. The emitters were installed at a depth of 30 cm and a distance of 1 m from the trunk of tree. The soil water content was measured daily using a TDR device for 4 months. In order to calibrate of root water uptake equations, samples from root and soil were collected from different parts of root development zone. The results showed that the highest and lowest amount of root water uptake were 0.129 and 0.024 cm³.cm⁻³, respectively, that occurred in the coordinates (radial, deep), (60 cm, 50 cm) and (150 cm, 75 cm) from the tree trunk, respectively. Approximately 81% of root water uptake was at a depth of 0-50 cm. The amounts of RMSE (0.0141- 0.0193), showed that, the HYDRUS-2D software can make an appropriate estimate from soil water content in subsurface drip irrigation. Comparison of different scenarios simulated in HYDRUS-2D with the results of field measurements showed that by reducing the emitter discharge by 2 lit/h and increasing the irrigation duration (in the constant amount of water used), the root water uptake increased by 5.08% and deep penetration decreased by 2.18% compared to actual condition.

Keywords: Emitter; Subsurface drip irrigation; Root uptake; HYDRUS-2D software

1- Ph.D. Student of Department of Water Engineering, Urmia University

2- Associate Professor, Department of Water Engineering, Urmia Lake Research Institute, Urmia University

3- Associate Professor, Department of Water Engineering, Urmia Lake Research Institute, Urmia University

4 -Ph.D. in Irrigation and Drainage, Ardabil Agricultural Jihad Organization

(* - Corresponding Author Email: s.besharat@urmia.ac.ir)