

مقاله پژوهشی

اندازه‌گیری و شبیه‌سازی حرکت آب و جذب ریشه در مدیریت آبیاری هوشمند

احد باحجج خوشنودی^۱، سینا بشارت^{۲*}، کامران زینال‌زاده^۲

تاریخ دریافت: ۹۸/۱۰/۱۷

تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۱/۱۳

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: s.besharat@urmia.ac.ir

چکیده

پژوهش جاری با هدف بکارگیری روابط حاکم مربوط به هیدرولیک جریان در محدوده ریشه گیاه و استفاده از فن‌آوری نوین روز در خصوص ابزارهای میدانی اندازه‌گیری رطوبت و مکش رطوبتی خاک محدوده ریشه گیاه جهت پایش پیوسته عوامل مربوطه و مدیریت هوشمند سامانه آبیاری در راستای مصرف بهینه آب انجام یافته است. این تحقیق در باغ‌های سعیدآباد تبریز در دو سال متوالی ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ انجام گردید. با استفاده از دستگاه ثبت داده ۲۰ کاناله، محدوده ریشه از طریق حسگرهای رطوبتی ابزار بندی گردیده و داده‌های لحظه‌ای رطوبت خاک محدوده ریشه از طریق اینترنت به سرور انتقال و با این روش امکان مشاهده آنلاین داده‌ها تحت وب و ذخیره اطلاعات را مهیا نمود. در این پژوهش با تجهیز تیمار تحت مطالعه به سامانه آبیاری قطره‌ای تحقیقاتی با امکان تغییر عوامل هیدرولیکی شامل کنترل دبی تیمارهای مختلف اجرا و با برداشت مستمر داده‌ها، شکل و الگوی خیس شدگی واقعی خاک در زمانهای مختلف حاصل و درجه صحت تئوریها و روابط تجربی موجود صحت سنجی گردید. میزان جذب حداکثر در عمق ۲۰ سانتیمتر بود که مصرف روزانه معادل ۳۰-۵۰ لیتر محاسبه شد. در این تحقیق از نرم افزار HYDRUS-2D جهت شبیه سازی سناریوی های مختلف استفاده شد. مهمترین مسئله در این نرم افزار واسنجی ضرایب معادلات حاکم می‌باشد. در این تحقیق مدل‌های مربوط به پارامترهای حرکت و جذب ریشه بر اساس اندازه‌گیری‌های میدانی دقیق واسنجی و تایید شد ($RE=2.87$ و $NRMSE=2.14\%$). بر اساس نتایج، حرکت آب و مصرف گیاه محاسبه و ارائه گردید. بر این اساس نتایج تطابق الگوی خیس شدگی با محدوده ریشه گیاه در جهت مدیریت سامانه استفاده و نهایتاً صرفه جویی در مصرف آب مشخص گردید. بیشترین مقدار جذب آب در عمق ۴۰ سانتیمتر انجام شده است که این مقدار ۷۴ درصد کل جذب می باشد با کنترل این پروفیل از خاک می‌توان سامانه آبیاری هوشمند را مدیریت نمود.

واژه‌های کلیدی: الگوی خیس شدگی، رطوبت خاک، مدل‌های جذب ریشه، مدیریت آبیاری.

Measurement and Simulation of water flow and root uptake in Smart Irrigation Management

A Bahojb Khoshnoudi¹, S Besharat^{2*}, K Zeinalzadeh²

Received: January 07, 2020 Accepted: February 02, 2020

¹ Ph.D. student of Department of Water Engineering, Urmia University, Iran

² Associate professor, Department of Water Engineering, Urmia University, Iran

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

Abstract

Current research with the purpose of applying the governing equations related to hydraulics of flow in plant root zone and use of modern technology in field measurements for measuring soil water content and soil suction of the plant root zone for continuous monitoring of relevant factors and smart management of irrigation system in order to optimized use of water consumption has been done. This research was carried out in Saeed Abad Gardens in Tabriz in two consecutive years, 1977 and 1998. Using a 20-channel data logger, the root zone was instrumented with soil moisture sensors and the soil moisture instantaneous data were transmitted to the server via the Internet, allowing online data viewing and data storage provided. In this study, by equipping the treatment under study to research drip irrigation system with ability of changing hydraulic parameters including controlling the discharge rate of different treatments and by continuously data logging, the actual soil wetting pattern and shape at different times obtained and the accuracy of the theories and experimental relationships were validated. Maximum absorption was at 20 cm depth and daily intake was calculated to be 30-50 liters. In this study, HYDRUS-2D software was used to simulate different scenarios. The most important issue in this software is to calibrate the governing equations coefficients. In this study, models related to root motion and absorption parameters were calibrated and validated based on accurate field measurements (RE = 2.87 and NRMSE = 2.14 %). Based on the results, water movement and plant consumption were calculated and presented. Accordingly, the results of matching the wetting pattern with the root zone of the plant were used to manage the system and ultimately save water consumption. The highest amount of water uptake was at 40 cm depth, which is 74% of the total water uptake. By controlling this soil profile, an intelligent irrigation system can be managed.

Keywords: Irrigation management, Root water uptake, Water content, Wetting Pattern.

مقدمه

کشاورزی هستند که برای کاهش تأثیرات زیست‌محیطی و افزایش بازده مصرف آب آبیاری با مشکل مواجه می‌باشند (استر، ۲۰۰۳، فونه، ۱۹۹۵). فوس (۱۹۷۸) و ون‌گنوختن (۱۹۸۷) روابطی را برای تابع کاهش جذب با مکش خاک به دست آوردند که هر کدام دارای نقاط قوت و ضعف هستند (همایی، ۱۹۹۹). دانشمندان بسیاری الگوی پخش آب در خاک را به صورت عددی در آبیاری زیرسطحی و سطحی شبیه‌سازی نموده‌اند (لازارویچ و همکاران، ۲۰۰۷). یکی از مدل‌های ارائه شده در رابطه با حرکت آب و جذب ریشه، مدل *HYDRUS* می‌باشد. در مطالعه‌ای که سیال و اسکگز (۲۰۰۹) برای شبیه‌سازی تغییرات رطوبت خاک در آبیاری سطحی با استفاده از

سامانه‌های آبیاری قطره‌ای در مقایسه با سایر سامانه‌های آبیاری به شکل مؤثرتری می‌توانند آب و مواد شیمیایی را به ریشه گیاهان منتقل کنند (تروبورن و همکاران، ۲۰۱۵). طی طراحی سامانه‌ها، این اصل به ندرت مورد توجه قرار می‌گیرد که احتمالاً به این دلیل است که بیشتر کارورزان در بین خاک‌های مختلف متوجه تغییر الگوهای خیس‌شدگی نیستند. بافت خاک، پیش‌بینی‌کننده قابل‌اطمینانی برای خیس‌شدگی نیست (تروبورن و همکاران، ۲۰۱۵). آبیاری قطره‌ای وسیله‌ای است که هم باعث افزایش بازده مصرف آب آبیاری گردیده و هم شسته شدن مواد شیمیایی از منطقه ریشه را کاهش می‌دهد. این موارد اهداف مهمی برای آبیاری در

محققین دیگر در نظر گرفته نشده است. طراحی بهینه آبیاری قطره‌ای مستلزم آگاهی از الگوی توزیع آب در اطراف قطره‌چکان، نحوه توزیع ریشه گیاه، به حداقل رساندن خیس شدگی سطح خاک و نفوذ عمقی می‌باشد. در این راستا محققین مختلف مانند کوته و همکاران (۲۰۰۳)، کاندلوس و همکاران (۲۰۱۱) و سوبایا (۲۰۱۳) آزمایش‌های مختلف میدانی طراحی و اجرا نمودند. آنها نتیجه گرفتند برای مدیریت بهینه سامانه‌های آبیاری به صورت هوشمند نیاز است که اندازه‌گیری‌های به هنگام با استفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیری دقیق انجام گیرد. آزمایش‌های مزرعه‌ای برای مدیریت بهینه آبیاری مفید است، اما به دلیل سختی و هزینه بر بودن این آزمایشها و زمان بر بودن آنها، بهتر است از مدل‌های شبیه‌ساز برای مطالعه جریان آب در خاک استفاده نمود (هوناری و همکاران، ۲۰۱۷). به منظور طراحی و مدیریت مناسب سامانه‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی، مدل‌های مختلفی برای توصیف جریان آب از یک منبع نقطه‌ای یا خطی در خاک توسعه داده شده‌اند (سینگ و همکاران، ۲۰۰۶). سائفادین و همکاران (۲۰۱۹) و فن و همکاران (۲۰۱۸) آزمایش‌های میدانی را با استفاده از یک لوله قطره‌چکان حلقه‌ای شکل تحت آبیاری قطره‌ای انجام دادند. نتایج شبیه‌سازی عددی با استفاده از *HYDRUS* نشان داد که این نرم‌افزار یک ابزار قدرتمند برای تجزیه و تحلیل حرکت آب در اطراف قطره‌چکان حلقوی بکار رفته در آبیاری زیرسطحی بود. بررسی مطالعات مختلف نشان می‌دهد که بیشتر آزمایش‌های مزرعه‌ای و شبیه‌سازی‌های انجام یافته توسط محققین در آبیاری قطره‌ای با استفاده از اندازه‌گیری‌های محدود رطوبت بوده و مطالعه‌ای که تمام اندازه‌گیری‌های تغییرات رطوبت و جذب را نشان دهد انجام نشده است. همچنین ضریب اصلاح و کالیبراسیون معادلات جذب ریشه در آبیاری قطره‌ای مورد بررسی قرار نگرفته است. هدف اصلی این مطالعه، اندازه‌گیری جریان آب و جذب آب ریشه با استفاده از دستگاه مدرن اندازه‌گیری و ثبت

نرم‌افزار *HYDRUS-2D/3D* انجام دادند به این نتیجه رسیدند که پیش‌بینی درصد رطوبت خاک با استفاده از مدل *HYDRUS* همبستگی خوبی با داده‌های مشاهداتی دارد ($R^2 = 0.98$). ساختمان خاک به علت ارتباط آن با هدایت هیدرولیکی و نگهداشت آب، بیشترین اثر را بر روی هندسه و الگوی رطوبتی خاک دارد (سیال و اسکگز، ۲۰۰۹). کاندلوس و سیمونک (۲۰۱۰) مدل *HYDRUS-2D* را برای ارزیابی توزیع رطوبت اطراف قطره‌چکان در یک آبیاری قطره‌ای زیر سطحی در یک خاک لوم رسی به کار بردند. نتایج شبیه‌سازی با دو سری از داده‌های آزمایشگاهی و میدانی مقایسه شد. مقدار $RMSE$ و R^2 به ترتیب برای رطوبت خاک در محدوده $(0.11 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3})$ تا 0.45 و 0.57 تا 0.99 به دست آمد (کاندلوس و سیمونک، ۲۰۱۰). آریات و همکاران (۲۰۱۳) مطالعه‌ای را در مورد توزیع آب و نیترات منطقه ریشه ذرت تحت آبیاری قطره‌ای انجام دادند. آنها دریافتند با $R^2 = 0.61$ و $RMSE = 0.040 \text{ (cm}^3 \text{ cm}^{-3})$ همبستگی خوبی بین رطوبت خاک اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی وجود دارد (آریات و همکاران، ۲۰۱۳). گونزالز و همکاران (۲۰۱۵) جهت شبیه‌سازی مقدار رطوبت خاک پیرامون ریشه گندم در دو سال زراعی تحت ۴ تیمار آبیاری از نرم‌افزار *HYDRUS-ID* استفاده نمودند. مدل به خوبی توانست تغییرات زمانی رطوبت خاک را در تیمارهای آبیاری شبیه‌سازی کند. در تیمارهای مورد مطالعه، محدوده تغییرات $RMSE$ و R^2 به ترتیب در بازه‌های $(0.25 - 0.14 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3})$ و $0.97 - 0.92$ بود که نشان از موفقیت مدل در برآورد رطوبت خاک داشت (گونزالز و همکاران، ۲۰۱۵). بشارت و همکاران (۲۰۱۰) مدل جدیدی را جهت شبیه‌سازی حرکت آب در خاک و جذب ریشه ارائه کردند. مدل دو بعدی جذب آب توسط ریشه براساس تابع توزیع تراکم ریشه، تعرق پتانسیل و فاکتور تصحیح تنش آب بسط داده شد. در مدل بشارت و همکاران (۲۰۱۰)، تاثیر پارامترهای ریشه و تراکم خاک به طور مستقیم آورده شده است که در مدل وورات و همکاران (۲۰۰۱) و مدل‌های جذب ریشه

مورد مطالعه شامل درخت سیب از نوع *Golden Delicious* با سن ۱۲ سال می‌باشد. باغ انتخابی مجهز به سامانه آبیاری قطره‌ای مدرن تحقیقاتی با امکان کنترل و اندازه‌گیری فشار و دبی بود. مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک در اعماق مختلف در جدول ۱ ارائه شده است. بر اساس نتایج خاک منطقه لومی می‌باشد و درصد رطوبت در ظرفیت زراعی حدود ۲۸ درصد حجمی محاسبه شد. مقادیر درصد رطوبت زراعی و پژمردگی دائم به وسیله دستگاه صفحات فشار اندازه‌گیری شد. بر اساس نتایج مشخصات خاک پارامترهای هیدرولیکی و ضرایب آن با استفاده از نرم افزار *Rosetta* محاسبه و در جدول ۲ ارائه شده است. در این مدل نیاز است که داده‌های مربوط به درصد شن، سیلت و رس، چگالی ظاهری، رطوبت در ظرفیت مزرعه و پژمردگی دائم وارد شود. پارامترهای هیدرولیکی و منحنی مشخصه خاک با استفاده از حل معکوس رابطه معلم (۱۹۷۶) در شبکه عصبی حاصل شده‌اند.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در منطقه مورد مطالعه و درصد حجمی نقاط رطوبتی مهم.

عمق (cm)	بافت (USDA)	رس	سیلت	شن	چگالی ظاهری (g/cm ³)	EC (dS/m)	pH	θ_{FC} (درصد)	θ_{PWP} (درصد)	θ_s (درصد)
۰-۳۰	لومی	۱۸	۳۲	۵۰	۱/۲۸	۷/۶۱	۷/۶۱	۲۸/۹	۱۲/۰	۳۸/۵
۳۰-۶۰	لومی	۱۶	۳۲	۵۲	۱/۲۶	۷/۷۲	۷/۷۲	۲۷/۴	۱۱/۲	۴۲/۲
۶۰-۹۰	سیلت لوم	۱۲	۱۶	۷۲	۱/۴۳	۹/۸	۸/۰۲	۲۷/۵	۱۲/۳	۳۹/۸

جدول ۲- خصوصیات هیدرولیکی خاک در لایه های مختلف.

عمق (cm)	θ_r (%)	θ_s (%)	N (-)	Ks (cm/day)	$\alpha(1/cm)$	I (-)
۰-۳۰	۶/۲	۳۸/۵	۱/۴۹	۳۵/۳۶	۰/۰۱۲۳	۰/۵
۳۰-۶۰	۵/۳	۴۲/۲	۱/۴۴	۴۵/۲۰	۰/۰۱۲۸	۰/۵
۶۰-۹۰	۴/۸	۳۹/۸	۱/۵۱	۶۷/۷۸	۰/۰۳۰۵	۰/۵

ریشه درخت سیب پروفیلی به عمق ۱۰۰ و عرض ۸۰ سانتیمتر حفر و سنسورهای رطوبتی به صورت شبکه ای که در شکل ۱ مشخص است با فواصل ۲۰ سانتیمتر از یکدیگر درون اعماق مختلف خاک نصب گردیدند (دقت سنسور $0.02 \text{ m}^3/\text{m}^3 \pm$ منظور ۲ درصد رطوبت حجمی).

لحظه ای رطوبت در خاک بود و بر این اساس شبیه‌سازی دقیقی از بیلان آب توسط *HYDRUS-2D* انجام گرفت که نتایج در مدیریت دقیق سامانه آبیاری استفاده شد.

مواد و روشها

محل آزمایش

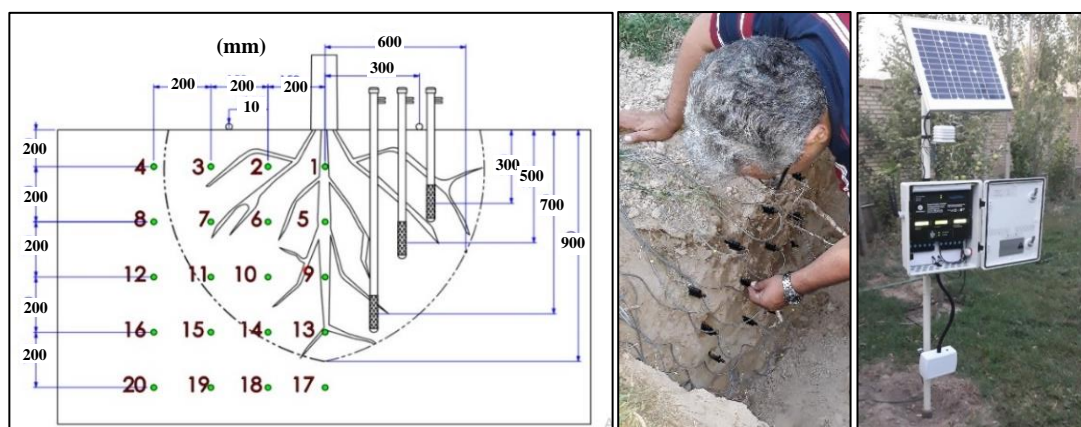
با توجه به بررسی های به عمل آمده از نظر وجود باغ میوه حفاظت شده با امکان اجرای سامانه آبیاری قطره‌ای از نظر احداث تجهیزات و ابزارهای اندازه گیری، باغ سیب واقع در اراضی سعیدآباد تبریز با مختصات $37^{\circ}58'39.2''N$ $46^{\circ}34'55.7''E$ جهت انجام پژوهش انتخاب گردید. از نظر تقسیم بندی اقلیمی، ناحیه مطالعاتی دارای اقلیم نیمه خشک و سرد بوده و ایستگاه اندازه گیری مربوطه در ارتفاع ۱۸۵۰ متری واقع شده و بارش متوسط سالانه ایستگاه باران سنجی ناحیه ۳۱۰ میلیمتر می‌باشد (ایستگاه سعید آباد). ضمناً متوسط تبخیر سالانه در این ایستگاه ۷۸۴ میلیمتر ثبت شده است. باغ

اندازه گیری های میدانی

یکی از مهمترین تفاوت‌های این تحقیق نسبت به سایر تحقیقات استفاده از دستگاه جدید اندازه‌گیری و ثبت رطوبت به صورت لحظه‌ای و آنلاین بود. در این تحقیق جهت اندازه‌گیری و تعیین الگوی رطوبتی خاک محدوده

طراحی شد. در این تحقیق از سه سنسور پتانسیل سنج در عمقهای ۳۰، ۵۰ و ۷۰ سانتیمتر نیز استفاده شد (شکل ۱).

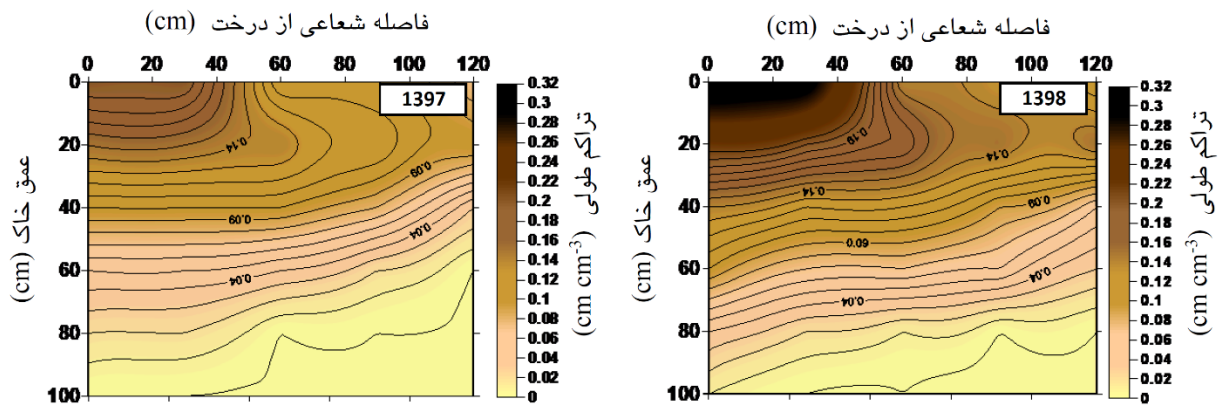
با در نظر گرفتن فاصله سنسورها به صورت ۲۰ سانتیمتر تعداد سنسور رطوبتی مورد نیاز ۲۰ عدد تعیین و دیتالاگر (*Data logger*) مربوطه نیز بر این اساس



شکل ۱- دستگاه ثبت و ارسال اطلاعات رطوبت، دما و پتانسیل خاک به صورت آنلاین با ۲۳ عدد سنسور نصب شده. زمان هر آبیاری بین ۸ تا ۱۲ ساعت انجام می‌گرفت. 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 دو سال با حفاری مستقیم اندازه‌گیری گردید (شکل ۲). 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 آزمایشهای 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 (بشارت و همکاران، ۲۰۱۰). برای محاسبه جذب آب ریشه از دو روش یکی از طریق اختلاف مقدار رطوبت حجمی خاک پس از آبیاری (پس از خروج آب ثقی از خاک) و مقدار رطوبت باقی‌مانده در خاک محاسبه شد و دیگری بر اساس نرم افزار *HYDRUS-2D* شبیه سازی گردید.

ثبت رطوبت و پتانسیل با استفاده از سنسورهای تایید شده شرکت سازنده انجام شده که از دقت بالایی ($\pm 0.02 \text{ m}^3/\text{m}^3$) در ثبت تغییرات رطوبت در خاک برخوردار هستند. این دستگاه قادر بود داده‌های دما و رطوبت را با فواصل زمانی مشخص (به صورت دلخواه) ثبت و ارسال نماید که در این تحقیق اطلاعات با فواصل ۳۰ دقیقه به صورت ۲۴ ساعته ارسال می‌شد. آزمایشها در دو سال ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ از اردیبهشت تا آبان ماه هر سال انجام گرفت. در طول آزمایشها بیش از ۱۲۰۰۰ داده رطوبت و پتانسیل ثبت و آنالیز گردید. یکی از امکانات دستگاه مورد نظر قطع و وصل سامانه آبیاری به صورت خودکار بر اساس اطلاعات رطوبتی و پتانسیلی خاک بود که در ادامه در خصوص نحوه کارکرد آن که یکی از اهداف تحقیق بود صحبت خواهد شد.

در این سامانه از دو قطره چکان ۴ لیتر بر ساعت استفاده شد. دور آبیاری بر اساس محاسبات انجام شده و تغییرات رطوبتی خاک بین ۴ تا ۸ روز متغیر بود و



شکل ۲- اندازه‌گیری تراکم طولی ریشه بر اساس نمونه برداری مستقیم از محدوده ریشه در دو سال (cm^3/cm^3).

$$\gamma(r, z, h) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h}{h_{50}}\right)^p} \quad [6]$$

که در آن، h_{50} مکشی از خاک است که در آن میزان جذب به ۵۰ درصد حداکثر جذب می‌رسد و معمولاً از طریق آزمون و خطا به دست می‌آید. p پارامتر تجربی است که در پژوهش‌های قبلی آنرا برابر با ۳ در نظر گرفته‌اند (ون گنوختن ۱۹۸۷). در نهایت، مقدار جذب ریشه از ترکیب دو معادله ۴ و ۶ حاصل می‌شود:

$$S(r, z, t, h) = \gamma(r, z, h) S_{ac}(r, z, t) \quad [7]$$

مدل *HYDRUS-2D* برای شرایط مرزی، نیاز به تخمین تعرق پتانسیل (T_{pot}) و تبخیر از سطح خاک (E_s) دارد. اندازه‌گیری‌های پروفیل رطوبت خاک بلافاصله بعد از آبیاری به عنوان شرایط اولیه در نظر گرفته شد. تبخیر تعرق مرجع (ET_o) با استفاده از داده‌های هواشناسی و با استفاده از معادلات تجربی (پنمن مانتیس) به دست آمد. تبخیر تعرق پتانسیل سبب با استفاده از ET_o و ضریب گیاهی مشخص منطقه در طول دوره رشد محاسبه گردید و اعداد بین ۰/۷۳ الی ۰/۹۸ متغییر بود. در بخش نتایج، مقادیر اندازه‌گیری و شبیه سازی شده برای بیشترین دوره مصرف گیاه ارائه شده است که ضریب گیاهی در این بازه ۰/۹۸ در نظر گرفته شد.

قبل از به‌کارگیری مدل جهت انجام عملیات شبیه‌سازی حرکت آب در منطقه ریشه، پارامترهای مدل

نرم افزار HYDRUS-2D

در نرم‌افزار *HYDRUS* دو بعدی از رابطه دو بعدی وورات و همکاران (۲۰۰۱) برای جذب آب توسط ریشه استفاده شده است (ورات و همکاران، ۲۰۰۱).

$$\beta(r, z) = a \cdot \exp[-b] \quad [1]$$

$$a = \left(1 - \frac{z}{z_m}\right) \left(1 - \frac{r}{r_m}\right) \quad [2]$$

$$b = \frac{pz}{z_m} |z^* - z| + \frac{pr}{r_m} |r^* - r| \quad [3]$$

که در آن، $\beta(r, z)$ توزیع بدون بعد ریشه در دو جهت شعاع و عمق است، z_m حداکثر عمق ریشه دوانی، r_m حداکثر شعاع ریشه دوانی ریشه و $p_z[-]$ و $p_r[-]$ و $z^*[L]$ و $r^*[L]$ پارامترهای تجربی هستند.

$$S_{ac}(r, z, t) = \frac{\pi R^2 \beta(r, z, t) k_s T_{pot}(t)}{2\pi \int_0^{z_m} \int_0^{r_m} r \beta(r, z, t) dr dz} \quad [4]$$

که در آن، $S_{ac}(r, z, t) [T^{-1}]$ جذب واقعی آب توسط ریشه بدون وجود تنش آبی و k_s ضریب بدون بعد کاهش تعرق که تابعی از آب قابل دسترس خاک می‌باشد.

$$T_{pot} = K_c ET_o - E_s \quad [5]$$

که در آن، $K_c[-]$ ضریب گیاهی، $ET_o [LT-1]$ تبخیر تعرق مرجع و $E_s [LT-1]$ تبخیر از سطح خاک می‌باشد. با در نظر گرفتن تنش آبی، می‌توان با استفاده از تابع تنش آب که توسط ون گنوختن (۱۹۸۷) ارائه شد، معادله ۴ را تعدیل کرد.

ساعتی رطوبت و هم از داده های دو سال رشد ریشه برای واسنجی پارامترهای مدل استفاده شد (جدول ۳ بر اساس معادله ۱) و بر این اساس نتایج شبیه سازی بهتر از تحقیقات قبل ارائه شده است. پس از مرحله واسنجی، نتایج مدل با مقادیر اندازه گیری شده مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۳- پارامترهای تجربی تراکم توزیع ریشه در معادلات ۵ و ۶.

سال	Xm (cm)	Zm (cm)	x* (cm)	z* (cm)	Px (-)	Pz (-)
۱۳۹۷	۷۰	۹۰	۱۲	۱۸	۱/۸	۱/۲
۱۳۹۸	۷۵	۱۰۰	۱۴	۲۱	۱/۳	۱/۴۲

دستگاه را در پروفیل خاک نشان می دهند. برای مقایسه بهتر مجموعه داده های رطوبت برای ۴ فاصله از تنه درخت (صفر، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ سانتیمتر) رسم شد. شکلها تغییرات رطوبت در اعماق مختلف (۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ سانتیمتر) برای ۷ دوره آبیاری را نشان می دهد. همانطوری که در شکلها مشاهده می گردد، بیشترین میزان نوسانات رطوبتی در فواصل ۲۰ و ۴۰ سانتی متر از مرکز تنه درخت اتفاق افتاد. این امر به دلیل واقع گردیدن قطره چکان در فاصله ۳۰ سانتی متری از تنه درخت و نزدیک بودن این نقاط به منبع تغذیه آب بود. بیشترین و کمترین میزان نوسانات رطوبتی به ترتیب در اعماق ۲۰ و ۱۰۰ سانتی متری مشاهده شد. در فواصل آبیاری، درصد رطوبت تا عمق ۴۰ سانتیمتری از خاک به طور متوسط از ۰/۳۲ به ۰/۱۸ (cm³ cm⁻³) رسید. این کاهش ۱۴ درصدی رطوبت بیانگر این مطلب است که حدود ۳۰۰-۴۰۰ لیتر آب از قسمت بالایی محیط ریشه برداشت شده است. بنابراین به طور متوسط میزان جذب آب توسط ریشه درخت سیب در عمق ۴۰-۰ سانتیمتر از محیط ریشه ۳۰-۵۰ لیتر در روز محاسبه شد. این نتایج با گزارشات ارائه شده برای درخت گلابی (کاسپاری و همکاران ۱۹۹۳) و درخت بالغ سیب (گرین و کلاسیس ۱۹۹۹) همخوانی دارد.

بر اساس داده های خاک و گیاه مورد واسنجی قرار گرفت. جهت انجام این کار از کلیه پارامترهای اندازه گیری شده در طول دوره آزمایش شامل بافت خاک، چگالی ظاهری و واقعی خاک، مقادیر آبیاری و رطوبت اولیه خاک استفاده شد. برای این منظور از ۷۰ درصد داده ها برای واسنجی و ۳۰ درصد داده ها برای تأیید مدل استفاده شد. در این تحقیق بر خلاف تحقیقات قبل، هم از داده های کامل

برای ارزیابی عملکرد مدل از شاخص های آماری خطای نسبی (RE) و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) استفاده شد. معادلات ریاضی این آماره به صورت زیر است:

$$RE = \sum_{i=1}^j \left(\frac{O_i - P_i}{O_i} \right) \times 100 \quad [8]$$

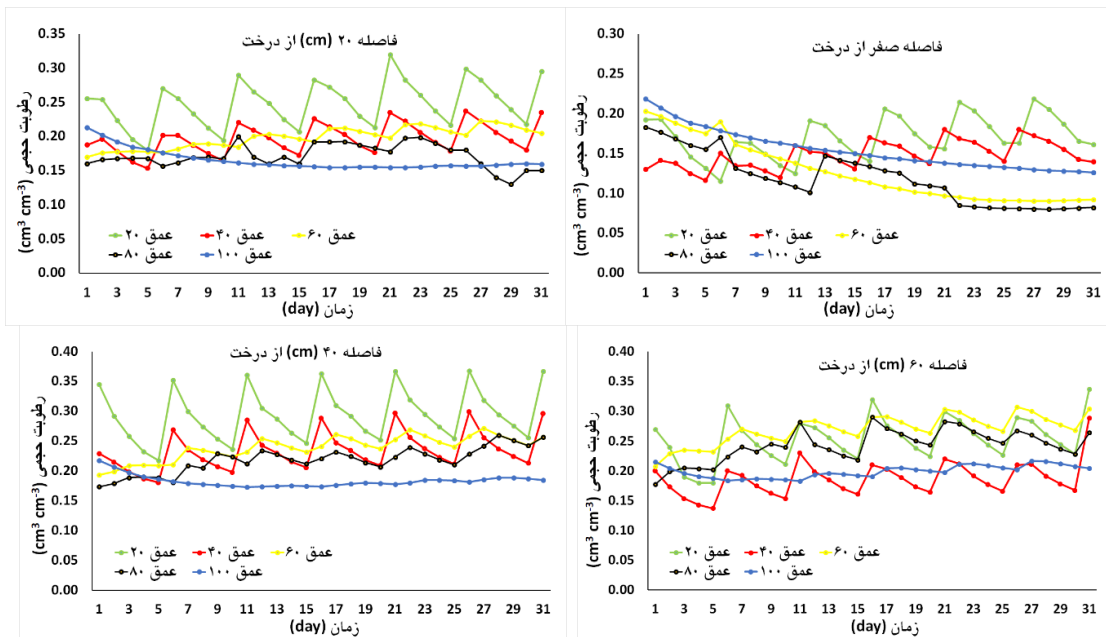
$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^j (O_i - P_i)^2}{n}} \times \frac{100}{O_{ave}} \quad [9]$$

در این روابط O_i و P_i مقادیر اندازه گیری و شبیه سازی شده، n تعداد اندازه گیری، O_{ave} متوسط مقادیر اندازه گیری شده، RE نشان دهنده خطای نسبی بین داده های اندازه گیری و شبیه سازی می باشد که بهتر است کمتر از ۵ درصد باشد و مقادیر $NRMSE$ اگر کمتر از ۱۰ درصد بدست آید نشان دهنده شبیه سازی ایده آل مدل است.

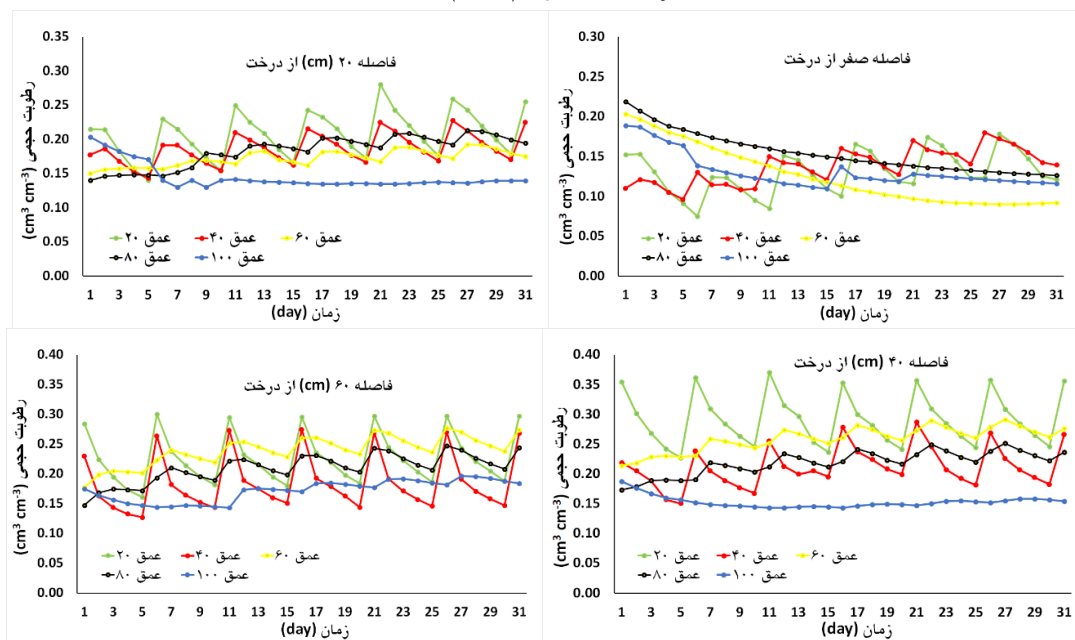
نتایج و بحث

پروفیل رطوبتی منطقه ریشه

تغییرات رطوبت خاک در دو سال متوالی در شکل های ۳ و ۴ ارائه شده است. در این شکلها تغییرات رطوبت مرداد ماه که بیشترین مصرف آب را دارا بود برای ۷ آبیاری با فواصل ۵ روز ارائه شد. شکل های ۳ و ۴ رطوبت حجمی اندازه گیری شده (cm³/cm³) توسط



شکل ۳- رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده در اعماق ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ سانتی متر در فواصل مختلف از تنه درخت سال اول (۱۳۹۷).



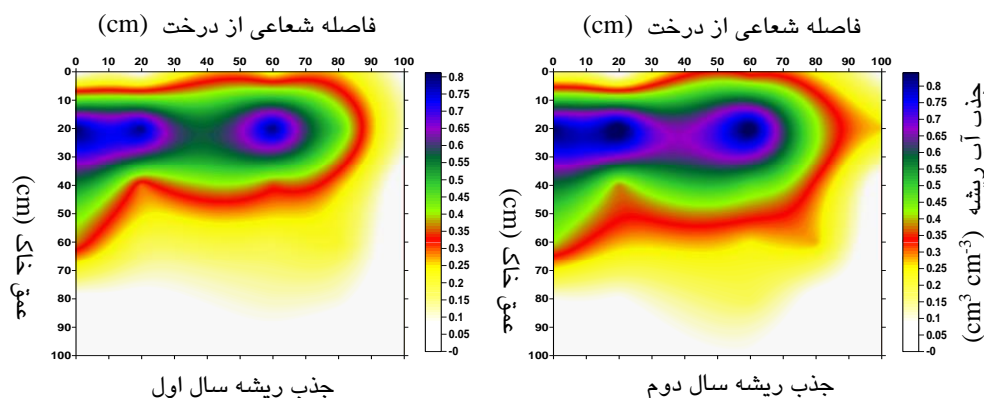
شکل ۴- رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده در اعماق ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ سانتی متر در فواصل مختلف از تنه درخت سال دوم (۱۳۹۸).

جذب آب توسط ریشه

براساس محاسبات ارائه شده و ثبت داده های رطوبت به صورت کامل و لحظه ای، مقادیر جذب در دو سال برای دوره ۴ ماه محاسبه گردید و به صورت شکل ۵ ارائه شد. (سیال و اسکگرز، ۲۰۰۹). با توجه به شکل ۵ می توان نتیجه گرفت که مقدار جذب ریشه محاسبه شده

در سال دوم بیشتر از مقدار سال اول است که می تواند به دو عامل اساسی برای این موضوع اشاره نمود. عامل اول تغییرات دمایی در سال دوم و عامل بعدی رشد گیاه و فعالیت ریشه می باشد. براساس این شکل ها بیشترین جذب آب در عمق ۱۰ تا ۴۰ سانتیمتر و در فاصله شعاعی ۰ تا ۷۰ سانتیمتر از درخت اتفاق افتاده است و حداکثر

نتیجه گیری موافق نتیجه گیری محققان زیادی از جمله کوستا و همکاران (۲۰۰۷) و تانگو همکاران (۲۰۰۵) می باشد که بیان کردند کمبود رطوبت (خشک ماندن) در قسمتی از ریشه گیاه موجب تولید اسید آبسزیک و کاهش هدایت روزنه ای در آن قسمت از ریشه شده و جذب آب ریشه کاهش می یابد.



شکل ۵- الگوی دو بعدی مقادیر اندازه گیری شده جذب آب توسط ریشه در دو سال برای دوره ۴ ماه ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

بلوکها به دست آمد ($RE = 2.87$ و $NRMSE = 2.14\%$). در شکل ۷ نیز داده های پراکنش بین رطوبت های اندازه گیری شده و شبیه سازی شده رسم شده است. این شکل به دو بخش تقسیم شد و رطوبت های فاصله صفر و ۲۰ سانتیمتر در یک شکل و فواصل ۴۰ و ۶۰ سانتیمتر هم در شکل دیگری رسم شد. نتایج نشانده همبستگی خوبی بین داده های مشاهداتی و شبیه سازی است.

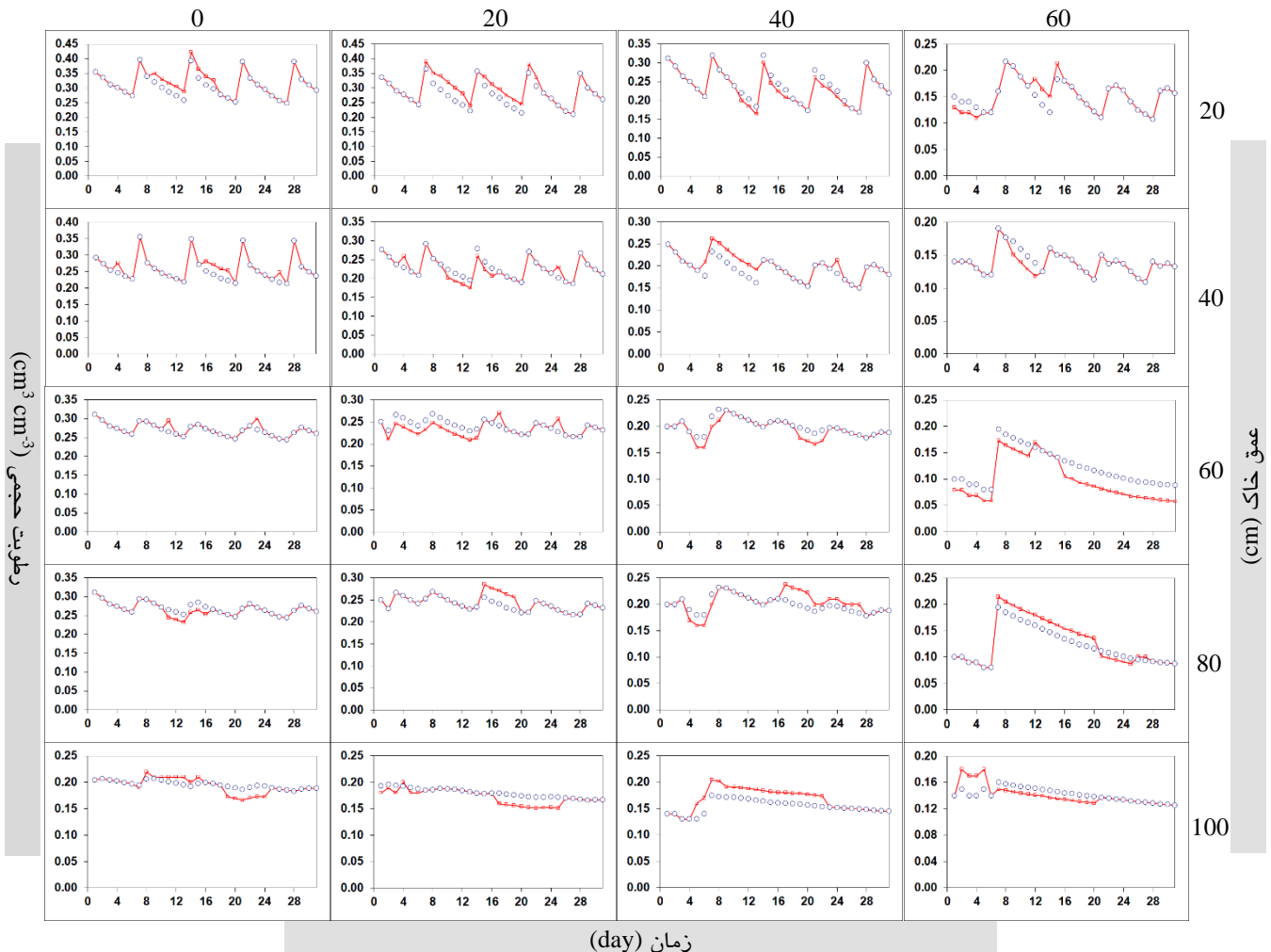
نتایج شبیه سازی با نرم افزار *HYDRUS-2D* نشان داد که این نرم افزار را می توان برای شرایط مختلف آبیاری مورد استفاده قرار داد تا در مدیریت آبیاری با استفاده از داده های واقعی و لحظه ای در چرخه مدیریت هوشمند سامانه های آبیاری وارد شود. بر این اساس نتایج کاربردی بدست آمده از نرم افزار در شکل ۸ ارائه شد. در این شکل نتایج تغییرات رطوبت، پتانسیل، جذب و نفوذ عمقی مشاهده می شود.

جذب آب ۰/۸۴ متر مکعب بر متر مکعب بوده که در عمق ۲۰ سانتیمتر از سطح خاک بدست آمده است. این نتایج با گزارش تحقیق کاندلوس و سیمونک (۲۰۱۰) همخوانی دارد. بر اساس شکل ۵ می توان مشاهده کرد که جذب در فاصله شعاعی ۶۰ سانتیمتر بیشتر از فاصله شعاعی ۴۰ سانتیمتر از تنه درخت بدست آمده است. این

شبیه سازی نرم افزار *HYDRUS-2D* مقادیر اندازه گیری و شبیه سازی شده رطوبت خاک در یک طرف تنه درخت برای شهریورماه از سال دوم مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و مقادیر دقت مدل بر اساس شاخص های RE و $NRMSE$ ، تحت ۲۰ بخش جداگانه، به دست آمد. مقادیر RE و $NRMSE$ مربوط به شکل ۶ نیز در جدول ۴ آورده شده است. برای مقایسه بهتر مقادیر جدول ۴ بر اساس میانگین تمام داده ها محاسبه شد که نتایج بهتری را ارائه نموده است. از روی مقادیر موجود در جدول ۴ مشخص است که مدل *HYDRUS-2D* شبیه سازی بسیار قوی در تمام لایه ها (به جز لایه های ۴۰ و ۶۰ سانتی

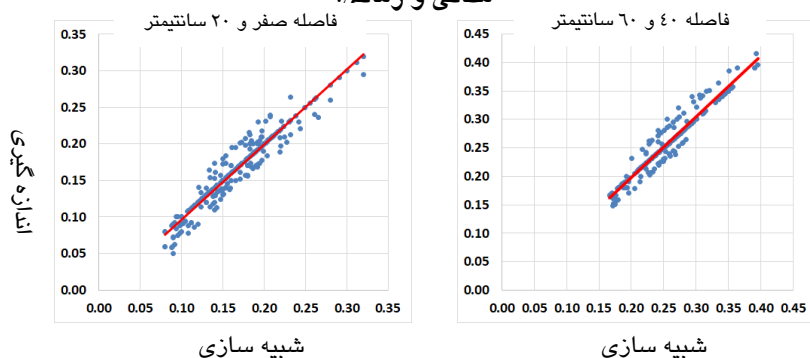
متری و فاصله شعاعی ۲۰ سانتیمتری) انجام داده است. یکی از ایرادات نرم افزار عدم تاثیرگذاری تراکم خاک در برآورد مشخصات هیدرولیکی خاک می باشد که بسیار بر محاسبات تاثیر می گذارد. همچنین همبستگی خوبی بین همه داده ها با در نظر گرفتن داده های همه

فاصله از درخت (cm)



شکل ۶- تغییرات رطوبت اندازه گیری شده (° ° °) و شبیه سازی شده (■ ■ ■) رطوبت حجمی ($cm^3 cm^{-3}$) به صورت

مکانی و زمانی



شکل ۷- نمودار پراکنش داده های رطوبت اندازه گیری شده و شبیه سازی شده

با دقت بالا زمان هر آبیاری را با در نظر گرفتن تغییرات لحظه ای رطوبت تعیین نمود و به صورت کاملاً هوشمند زمان قطع و وصل سامانه آبیاری را کنترل کرد. بر

با وجود داده های زیاد در نقاط مختلف فقط برای عمق ۴، ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ سانتیمتر که بیشترین فعالیت ریشه را دارا بود نتایج ارائه شد. بر اساس شکل می توان

نمودار رطوبتی اعماق مختلف و در صورت عدم وجود اطلاعات جذب ریشه، نمودارهای متوسط ارقام رطوبتی میتواند مورد استفاده قرار گیرد.

اساس نتایج رطوبت و پتانسیل دقیقاً می توان زمان رسیدن زمان تنش به ریشه را مشخص نمود. بدیهی است با معلوم بودن ناحیه فعال جذب ریشه (از نظر عمق)

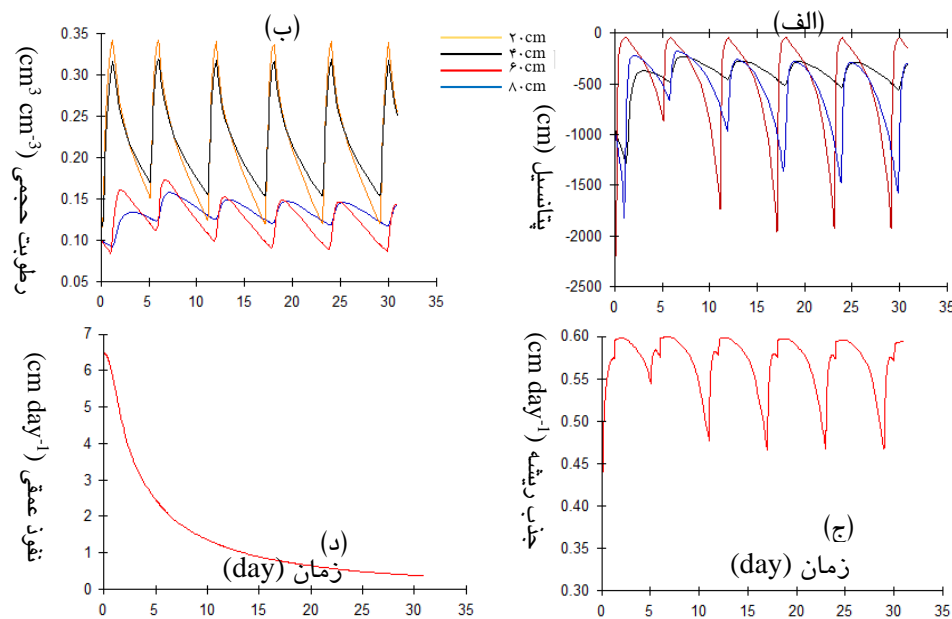
جدول ۴- مقادیر RE و $NRMSE$ بین رطوبت خاک شبیه سازی شده و اندازه گیری شده در ۲۰ بخش جداگانه قسمت بالا مربوط به میانگین داده ها و قسمت پایین مربوط به شکل ۷ (کاراندیش و سیمونک، ۲۰۱۶).

شعاع (cm) ←		۲۰		۴۰		۶۰		عمق (cm)
$NRMSE$ (%)	RE	$NRMSE$ (%)	RE	$NRMSE$ (%)	RE	$NRMSE$ (%)	RE	
۱/۲۴	۲/۱۸	۱/۲۵	۲/۱۲	۱/۲۶	۲/۱۱	۳/۲۳	۱/۱۱	۲۰
۲/۲۶	۳/۱۵	۳/۵۹	۳/۸۲	۳/۵۶	۳/۱۷	۲/۶۲	۳/۱۰	۴۰
۲/۷۷	۴/۱۲	۳/۱۱	۳/۶۲	۳/۹۵	۴/۶۵	۲/۲۵	۲/۱۰	۶۰
۱/۰۶	۳/۱۸	۲/۳۸	۱/۱۷	۱/۱۲	۲/۰۹	۱/۸۶	۲/۰۸	۸۰
۲/۴۹	۱/۰۸	۲/۱۷	۱/۷۶	۲/۴۴	۲/۸۷	۲/۸۷	۲/۷۲	۱۰۰

شعاع (cm) ←		۲۰		۴۰		۶۰		عمق (cm)
$NRMSE$ (%)	RE	$NRMSE$ (%)	RE	$NRMSE$ (%)	RE	$NRMSE$ (%)	RE	
۴/۷۶	۱۲/۱۸	۸/۳۵	۸/۵۲	۵/۲۷	۱۲/۱۱	۳/۴۱	۴/۴۸	۲۰
۴/۸۸	۸/۲۳	۵/۵۲	۱۴/۸۲	۸/۳۸	۸/۲۸	۴/۰۷	۱۲/۳۲	۴۰
۲/۸۲	۱۶/۲۳	۶/۹۵	۳/۹۶	۵/۴۷	۱۴/۲۵	۸/۳۰	۱۷/۲۵	۶۰
۳/۲۶	۱۸/۲۲	۴/۴۴	۶/۱۸	۶/۰۹	۶/۱۱	۱۲/۰۳	۱۱/۰۳	۸۰
۵/۸۱	۶/۱۹	۶/۰۵	۹/۴۸	۹/۲۳	۷/۸۷	۹/۵۷	۶/۲۷	۱۰۰

که همان بیشترین رطوبت ثبت شده در شکل است و کاهش رطوبت تا زمان رسیدن محیط خاک به نقطه بحرانی ادامه یافته است. بر این اساس می توان میزان جذب را به حداکثر و میزان نفوذ عمقی را کاهش داد (شکل ۸). محمدی و همکاران (۲۰۱۹) نتیجه گرفتند که با کاهش دبی جریان و افزایش مدت زمان آبیاری میزان جذب ریشه افزایش و تلفات نفوذ عمقی کاهش می یابد. نتایج تحقیق حاضر نشان دهنده تأیید نتیجه گیری بالا در آبیاری قطره ای هم بود. همچنین کای و همکاران (۲۰۱۷) در تحقیق دریافتند با کاهش مدت زمانی آبیاری می توان تلفات ناشی از نفوذ عمقی را در آبیاری 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 قطره ای بود.

با توجه به نمودارهای تغییرات رطوبت در نقاط مختلف محیط ریشه، متوسط تغییرات رطوبت در عمق ۷۰ سانتیمتر دارای نوسانات حداقل و بیشترین نوسانات به عمق ۲۵ سانتیمتر مربوط می باشد. ضمناً نمودارهای رطوبتی اعماق مختلف در فواصل شعاعی محدوده ریشه در انتخاب موقعیت مناسب نصب سنسورهای فرمان قطع و وصل سامانه آبیاری هوشمند مورد استفاده قرار گرفت. به عنوان مثال در سامانه هوشمند به این صورت تعریف گردید زمانی که رطوبت متوسط سه عمق به ۱۸ درصد و پتانسیل به منفی ۹۴۰ سانتیمتر رسید سامانه شروع به آبیاری نماید. این اعداد بر اساس آزمایش مشخصات خاک، منحنی مشخصه، ظرفیت زراعی و پژمردگی قابل محاسبه می باشد که با اعداد رفرنس های مختلف همخوانی دارد (سوربورن و همکاران، ۲۰۱۵). با توجه به شکل (۸-ب) زمان هر آبیاری را می توان دید



شکل ۸- تغییرات پتانسیل خاک در اعماق مختلف (الف)، شبیه سازی تغییرات رطوبت خاک در اعماق مختلف (ب)، میزان جذب ریشه (ج) و میزان نفوذ عمقی تجمعی (د) در بازه یک ماه برای آبیاری های مختلف.

نتیجه گیری کلی

نتایج به دست آمده نشان داد بیشترین و کمترین میزان نوسانات رطوبتی به ترتیب در اعماق ۲۰ و ۸۰ سانتی متری اتفاق افتاد. حدود ۷۴ درصد جذب آب ریشه از عمق ۴۰-۰ سانتی متر صورت گرفت. مقادیر RE و $NRMSE$ به دست آمده نشان داد نرم افزار $HYDRUS-2D$ تخمین مناسب از رطوبت حجمی در زیر خاک در آبیاری قطره ای داشت. نتایج مدل با نتایج محققین دیگر نیز مقایسه و مشخص شد که اعداد تحلیل آماری استفاده شده در این تحقیق بهتر بوده است (کاراندیش و سیمونک، ۲۰۱۶). مقایسه نتایج به دست آمده از طریق شبیه سازی نرم افزار $HYDRUS-2D$ نشان داد می توان برای مدیریت زمان قطع و وصل سامانه به صورت

خودکار و آنلاین اقدام نمود تا گیاه کمترین تنش را داشته باشد. با توجه به اینکه اساس مدیریت آبیاری هوشمند اعمال روش های مدیریتی جهت تامین کسری رطوبت خاک محدوده ریشه در حد فاصل مقادیر مرزی رطوبت ظرفیت زراعی (FC) و نقطه آبیاری مجدد (RP) میباشد با ترسیم خطوط یادشده در نمودار تغییرات رطوبت اعماق مختلف، امکان تحقق سامانه مدیریت آبیاری هوشمند محقق می گردد. نتیجه این پژوهش منجر به ساخت دستگاه مدیریت آبیاری هوشمند گردید که به سامانه کنترل پمپاژ، سنسورهای رطوبتی، مکش رطوبتی و نرم افزار کنترل مجهز بوده که می تواند برای پایش و کنترل هوشمند شبکه های مدرن آبیاری مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

- Arbat G, Roselló A, Domingo Olivé F, Puig-Bargués J, González Llinàs E, Duran-Ros M, Pujol J, Ramírez de Cartagena F, 2013. Soil water and nitrate distribution under drip irrigated corn receiving pig slurry. *Agricultural Water Management* Volume 120, 11-22.
- Besharat S, Nazemi AH, Sadreddini AA, 2010. Parametric modeling of root length density and root water uptake in unsaturated soil. *Turkish Journal Agriculture and Forestry* 34: 439-449. doi:10.3906/tar-0905-39

- Caspari, H.W., Green, S.R., and Edwards, W.R.N. 1993. Transpiration of well-watered and water stressed Asian pear trees as determined by lysimeter, heat pulse, and estimated by a Penman-Monteith model. *Agric. Forest Meteorol.* 67, 13-27.
- Cai Y, Wu P, Zhang L, Zhu D, Chen JWS and Zhao X, 2017. Simulation of soil water movement under subsurface irrigation with porous ceramic emitter. *Agricultural Water Management* 192: 244–256.
- Costa JM, Ortuno MF and Chaves MM, 2007. Deficit irrigation as a strategy to save water: physiology and potential application to horticulture. *Journal of Integrative Plant Biology* 49: 1421–1434.
- Cote CM, Birstow KL, Charlesworth PB, Cook FJ and Thorburn PJ, 2003. Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. *Irrig. Sci.* 22 (3–4): 143–156.
- Feddes A, Kowalik PJ and Zaradny H, 1978. *Simulation of field water use and crop yield*. Wiley, New York.
- González MG, Ramos RB, Carlesso R, Paredes P, Petry MT, Martins JD, Aires Np and Pereira LS, 2015. Modelling soil water dynamics of full and deficit drip irrigated maize cultivated under a rain shelter. *Biosystems Engineering Volume 132*, 1-18.
- Green S and Clothier B, 1999. The root zone dynamics of water uptake by a mature apple tree. *Plant and Soil* 206: 61–77.
- Homae M, 1999. Root water uptake under non-uniform transient salinity and water stress. Ph.D. thesis. Agricultural University Wageningen, the Netherlands.
- Honari M, Ashrafzadeh A, Khaledian M, Vazifedoust M and Mailhol JC, 2017. Comparison of HYDRUS-3D soil moisture simulations of subsurface drip irrigation with experimental observations in the south of France. *J. Irrig. Drain. Eng.* 04017014: 1-7.
- Kandelous M and Simunek J, 2010. Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D. *Agricultural Water Management* 97, 1070-1076.
- Kandelous MM, Simunek J, van Genuchten MTh 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.
- Karandish F, Simunek J, 2016. A comparison of numerical and machine-learning modeling of soil water content with limited input data. *Journal of Hydrology*, 543, 892–909.
- Lazarovitch N, Warrick AW, Furman A and Simunek J, 2007. Subsurface water distributions from drip irrigation described by moment analysis. *Vadose Zone J* 6: 116–123.
- Mohammadi A, Besharat S and Abbasi F, 2019. Effects of irrigation and fertilization management on reducing nitrogen losses and increasing corn yield under furrow irrigation, *Journal of Agricultural Water Management* 213, 1116-1129.
- Mualem Y, 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research* 12(3): 513–522.
- Oster JD and Wichelns D, 2003. Economic and agronomic strategies to achieve sustainable irrigation. *Irrigation Science* 22:107-120.
- Phene CJ, 1995. Research trends in microirrigation. *Proc. Fifth International Microirrigation Congress*. Orlando, Florida, USA 2-6, P 6-24.
- Saefuddin R, Saito H and Simunek J, 2019. Experimental and numerical evaluation of a ring-shaped emitter for subsurface irrigation, *Journal of Agricultural Water Management* 211: 111-122.
- Singh DK, Rajput TBS, Singh DK, Sikarwar HS, Sahoo RN and Ahmad T, 2006. Simulation of soil wetting pattern with subsurface drip irrigation from line source. *Agricultural Water Management*. 83(1–2): 130–134.
- Siyal AA and Skaggs TH, 2009. Measured and simulated soil wetting patterns under porous clay pipe subsurface irrigation. *Journal of Agricultural Water Management* 96: 893-904.
- Subbaiah R, 2013. A review of models for predicting soil water dynamics during trickle irrigation. *Irrigation Science*. 31(3): 225–258.
- Tang LS, Li Y and Zhang J, 2005. Physiological and yield responses of cotton under partial root zone irrigation. *Field Crops Research* 94: 214-223.
- Thorburn PJ, Bristow KL and Cook FJ, 2015. *Improving Trickle Irrigation: Better Matching Trickle Systems Design to Soils*. *Acta horticulture* 123:34-46.
- Van Genuchten MT, 1987. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of American* 44: 892–898.

- Vrugt JA, Hopmans JW and Simunek J, 2001. Calibration of a two-dimensional root water uptake model. *Soil Science Society of America* 65(4): 1027–1037.
- Fan YW, Huang N, Zhang J and Zhao T, 2018 Simulation of Soil Wetting Pattern of Vertical, *Water* 10, 601.