

اندازه گیری و مدل سازی جذب آب توسط ریشه در خاک

سینا بشارت^{۱*}، امیرحسین ناظمی^۲ و علی اشرف صدرالدینی^۲

تاریخ دریافت: ۸۷/۱۰/۲۹ تاریخ پذیرش: ۸۸/۲/۲۷

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

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

*مسئول مکاتبه E-mail: sina323@yahoo.com

چکیده

در سال‌های اخیر حرکت آب در محیط ریشه بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق الگوی مکانی و زمانی جذب آب توسط ریشه در خاک در محیط اطراف درخت سیب مورد مطالعه قرار گرفت. یکی از مهمترین بخش‌های مدل جذب آب توسط ریشه، تراکم طولی ریشه می‌باشد که با استفاده از نمونه برداری از خاک در یک چهارم محدوده توسعه ریشه اندازه‌گیری شد. مدل دوبعدی جذب آب توسط ریشه بر اساس تابع توزیع تراکم ریشه، تعرق پتانسیل و فاکتور تنش آب بسط داده شد. با استفاده از اندازه‌گیری‌های منظم توسط رطوبت‌سنج (TDR) میزان جذب آب توسط ریشه اندازه‌گیری و براساس حداقل‌سازی اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده پارامترهای مدل جذب آب ریشه بهینه گردید. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین جذب درخت سیب در عمق ۱۰ تا ۳۰ سانتیمتر اتفاق می‌افتد. نتایج همبستگی خوبی را بین داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی نشان داد و مشخص گردید که مدل حاصله کاربردی و انعطاف‌پذیر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، توزیع ریشه، جذب آب، حرکت آب، خاک غیراشباع

Measuring and Modeling Root Water Uptake in Soil

S Besharat^{1*}, AH Nazemi² and SAA Sadraddini²

¹Ph.D Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran

²Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran

*Corresponding author: E-mail: sina323@yahoo.com

Abstract

Water movement through the root zone has attracted an increasing interest during the last few decades. In this research, the spatial and temporal patterns of root water uptake were studied in the root zone of an apple tree. An important part of the root water uptake model is root length density which was measured by sampling soil cores in the one quarter of the root zone. A 2D model of root water uptake was established, which included root density distribution function, potential transpiration and soil water stress-modified factor. Root water uptake distribution was measured by an array of TDR probes and the model parameters were optimized, by minimizing the residuals between the measured and simulated data. Studies showed that the maximum root water uptake occurred at depth 10-30 cm. The results also showed an excellent agreement between the measured data and the simulated outputs, indicating that the developed root water uptake model was efficient and feasible.

Keywords: Optimization, Root water uptake, Root distribution, Unsaturated soil, Water flow

مقدمه

الگوی ریشه عموماً بر اساس میانگین چگالی وزنی ریشه یا بر اساس چگالی طولی ریشه تجزیه و تحلیل می‌شود. اغلب چگالی طولی ریشه جهت توصیف سیستم ریشه مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این وجود، اندازه‌گیری دقیق و بدست آوردن چگالی طولی ریشه در مزرعه مشکل و زمان‌بر است. چون توزیع ریشه بر اساس نوع خاک، نوع گیاه، فصل رشد و آب و هوای منطقه تغییر می‌کند.

بررسی‌های مختلفی بر اساس مرفولوژی ریشه درختان انجام گرفته است که شامل توزیع مکانی و زمانی ریشه تحت کاربرد آب به صورت موضعی می‌باشد (کجلگرین و همکاران ۱۹۸۵، مایروپک ۱۹۸۵، روس و گاردنر ۱۹۸۵). مدیریت آبیاری کاربردی در

مطالعه توزیع ریشه گیاهان و الگوی جذب آب توسط ریشه اهمیت بسیاری در توسعه سیستم‌های آبیاری مدرن و بهینه دارد (کلاسیر و گرین ۱۹۹۴). اطلاعات بافت و سیستم ریشه گیاهان جهت منطبق شدن طراحی و مدیریت سیستم آبیاری با نیاز گیاهی بسیار حائز اهمیت است. بعلاوه در برنامه زمان‌بندی آبیاری که بر کنترل وضعیت آب در خاک تکیه دارد، باید تاثیر الگوی جذب آب توسط ریشه را بر روی دینامیک آب مد نظر قرار داد. فاکتورهای گیاهی نه تنها بر روی خصوصیات مشخص آب در خاک بلکه بر روی تفسیر اطلاعات آب در خاک نیز تاثیر فراوان دارد (کلهو و آر ۱۹۹۶).

تخمین جذب آب توسط ریشه، و ارائه مدل دو بعدی توزیع مکانی تجربی برای ریشه درخت سیب می باشد.

مواد و روشها

محل آزمایش: آزمایش‌های صحرایی در

تابستان ۱۳۸۷ در باغ سیب مطالعاتی طراحی و اجرا شد (E ۵۸° ۵۴' , N ۳۹° ۳۷' و ارتفاع ۱۳۷۷ متر). محدوده طرح در باغ سیب، شامل زمین محصور شده اطراف درخت به اندازه ۲×۲ متر بود. با توجه به همگن و متقارن بودن محیط اطراف درخت، بررسی های کامل و اندازه گیری ها بر روی یک چهارم این سطح انجام گرفت. درخت سیب در وسط باغ که به صورت ردیفهای شمالی - جنوبی کاشته شده‌اند انتخاب شد. فاصله درختان داخل ردیف ۲ متر و فاصله ردیفها از هم ۲/۲ متر بود. سن درخت ۶ سال با قطر تنه ۱۰ سانتیمتر، ارتفاع ۳ متر و عرض تاج ۳ متر بود. ریشه های زنده بیشتر در لایه ۱ متری خاک پراکنده بودند (شکل ۱). آزمایشات میدانی در طول ۵ هفته از ۱۹ مرداد تا ۲۵ شهریور انجام شد. با استفاده از دستگاه رطوبت سنج TDR (TRIME-FM) و بهره گیری از لوله‌های مخصوص دستگاه درصد حجمی رطوبت در جهت‌های شعاعی (R) و عمق های (Z) مختلف خاک اندازه گیری شد.

دستگاه TDR قابلیت اندازه گیری درصد

حجمی رطوبت در اعماق مختلف حداکثر تا عمق ۳ متر با دقت ۰/۱ ± درصد را دارد. ۱۲ لوله مخصوص دستگاه (۱ و ۲ متری) تهیه و در ۳ جهت در یک چهارم سطح مورد مطالعه درخت نصب گردید. در شکل ۱ محل و نقشه نصب لوله های دستگاه رطوبت سنج مشخص شده است. بررسی تغییرات دو بعدی پروفیل رطوبت خاک در عمق و شعاع در هر آزمایش بر پایه اطلاعات حاصل از تعداد ۸۵ اندازه گیری بود و در کل، طی دوره آزمایش بیش از ۳۵۰۰ داده جمع آوری و ثبت گردید.

میکرو آبیاری بستگی به شناسایی توزیع مکانی و زمانی ریشه دارد. همچنین تخمین تغییرات آب در خاک در محیط ریشه بعد از آبیاری نیاز به شناخت توزیع و جذب آب توسط ریشه دارد (اسکوچ و پست ۱۹۸۶، کلاسنیتزر و هوپمن ۱۹۹۴). اطلاعات و تحقیقات در خصوص توزیع زمانی و مکانی جذب آب و املاح توسط ریشه، بخصوص در شرایط مختلف رطوبتی خاک بسیار محدود می باشد (کلاسیسیر ۱۹۸۹، کرامر و بویر ۱۹۹۵). مدل جذب آب توسط ریشه بر اساس الگوی مکانی و زمانی به خوبی قابل تشریح می باشد که توسط کلهو و اُر (۱۹۹۹) و ورات و همکاران (۲۰۰۱ a,b) توسعه یافته است.

به علت سختی اندازه گیری مستقیم توزیع شدت جذب آب توسط ریشه در آزمایشگاه یا در مزرعه، در برخی از مطالعات شدت توزیع جذب آب توسط ریشه، بر اساس روش توازن آب در خاک تخمین زده شده است. در این روشها پارامترهای اصلی شامل تغییرات آب در خاک، آبیاری و اطلاعات هواشناسی می باشند (اسنگ و همکاران ۱۹۹۷ و ۱۹۹۸، زو و همکاران ۲۰۰۲).

دانشمندان دیگر بر روی روشهایی جهت بهینه کردن پارامترهای تعیین کننده و موثر مدلهای جذب آب توسط ریشه مطالعه نموده اند (کلهو و اُر ۱۹۹۶، هوپت و همکاران ۲۰۰۳، موسترز و بوتن ۱۹۹۹، ورات و همکاران ۲۰۰۱a). روش بسیار رایج برای جذب آب توسط ریشه در جریان غیر اشباع، بر اساس در نظر گرفتن جذب به صورت عامل تخلیه K در معادله ریچاردز می باشد (ویسلر و همکاران ۱۹۶۸، هوپت و همکاران ۲۰۰۳، گاردنر و همکاران ۲۰۰۵، سیمونک و همکاران ۲۰۰۶ و گانگ و همکاران ۲۰۰۶).

در اکثر تحقیقات مدلهای ارائه شده برای توزیع ریشه و جذب آب توسط ریشه به صورت یک بعدی و برای گیاهان یک ساله بسط داده شده است. هدف از این تحقیق مطالعه سودمندی مدلهای پارامتریک در بررسی و

بر اساس مدل مذکور توابع و مدل‌های متعددی برای شبیه‌سازی توزیع تراکم طولی ریشه مورد بررسی قرار گرفت. هدف بدست آوردن مدل دو بعدی با پارامترهای ساده و انعطاف پذیر در شرایط مختلف بود. مدل ارائه شده در این تحقیق بر اساس داده‌های مشاهداتی و بهینه کردن پارامترها، به صورت زیر بدست آمد و مورد استفاده قرار گرفت.

$$\beta(r, z, t) = C_{ir} \left(1 - \frac{r}{r_m(t)}\right) \times \left(1 - \frac{z}{z_m(t)}\right) \beta_0 e^{(\rho(r/r_m(t)) + \tau(z/z_m(t)))} \quad [2]$$

که $\beta(r, z, t)$ تابع توزیع ریشه $[L^3L^{-3}]$ ، t زمان $[T]$ ، r فاصله در جهت شعاعی از محور درخت $[L]$ ، z فاصله در عمق $[L]$ ، $r_m(t)$ شعاع حداکثر توسعه ریشه $[L]$ در جهت شعاعی در زمان t ، $z_m(t)$ عمق حداکثر توسعه ریشه $[L]$ در جهت عمودی در زمان t و τ ، ρ ، β_0 پارامترهای تجربی هستند که به ترتیب 0.2632 ، 0.5925 و -0.7519 cm/cm^3 تخمین زده شده‌اند. C_{ir} ضریب بدون بعد قدرت رشد ریشه که با دستگاه پنترومتر ارزیابی شده است. ضریب C_{ir} به بافت خاک و ساختمان خاک وابسته است و منعکس کننده نیروی لازم برای نفوذ ریشه در خاک بر اساس حداکثر و حداقل رشد طولی ریشه است. مقدار این ضریب با استفاده از دستگاه پنترومتر (Rimik CP20) بر حسب نیروی لازم جهت نفوذ ریشه در هر خاک به نیروی لازم جهت نفوذ در خاک شنی در یک رطوبت مشخص، محاسبه گردید. آزمایشات پنترومتر در آزمایشگاه و در مزرعه برای بافتهای مختلف انجام گرفت. مقادیر C_{ir} محاسبه شده در جدول ۱ ارائه شده است.

معادله ارائه شده برای چگالی ریشه (معادله ۲) دارای ۶ پارامتر می‌باشد که مقادیر آنها برای حل نهایی محاسبه شد. پارامترهای r_m و z_m به علت رشد محدود در طول دوره آزمایش به ترتیب ۱۵۰ و ۱۰۰ سانتیمتر و

بافت خاک لومی - رسی با آبگذری پایین بود. مشخصات نگهداشت آب در خاک با استفاده از دستگاه صفحات فشار^۱ و هدایت هیدرولیکی اشباع در مزرعه از طریق دستگاه پرماتر گلف^۲ محاسبه گردید. همچنین از تانسیموتر جهت اندازه گیری رطوبت ظرفیت مزرعه (یک سوم بار) استفاده شد.

اندازه گیری تراکم طولی ریشه: تراکم ریشه یکی از مهمترین پارامترهای جذب آب توسط ریشه در مدل حرکت و جذب آب در خاک به شمار می‌رود (کولهو و آر ۱۹۹۹). تراکم ریشه در جهت شعاعی و عمقی نسبت به تنه درخت متغیر است. پروفیلی با عمق ۱/۵ متر در کنار تنه درخت حفر و نمونه‌هایی از اطراف درخت در نقاط مختلف خاک برداشت شد. تراکم طولی ریشه هر نمونه بر اساس طول ریشه به حجم نمونه (cm/cm^3) بدست آمد.

توزیع دو بعدی ریشه در جهت شعاعی و عمقی و تراکم ریشه به صورت میانگین با استفاده از نمونه های بدست آمده محاسبه شد. نتایج به صورت نمودار گرافیکی در شکل ۲ آورده شده است. همچنان که در شکل مشخص است تراکم ریشه با افزایش فاصله از درخت و افزایش عمق کاهش می‌یابد.

مدل توزیع ریشه در خاک: مدل دو بعدی ارائه شده جذب آب توسط ریشه، بر اساس ساختار مدل ارائه شده توسط ورات (۲۰۰۱b) بسط داده شد. مدل یک بعدی ورات به صورت زیر می‌باشد.

$$\beta(z) = \left[1 - \frac{z}{z_m}\right] e^{-\frac{\rho z}{z_m} |z^* - z|} \quad [1]$$

که در آن $\beta(z)$ پارامتر بدون بعد توزیع مکانی ریشه در عمق است.

¹SEC-15Bar

²Guelph Permeameter 2800KL

$$S(r, z, t, h) = \gamma(r, z, h) S_{ac}(r, z, t) \quad [۴]$$

$S(r, z, t, h)$ نشان دهنده مقدار جذب ریشه $[L^3 L^{-3} T^{-1}]$ در مکان مشخص از خاک برای بار فشاری (h) در زمان t ، $S_{ac}(r, z, t)$ تعرق واقعی $[L^3 L^{-3} T^{-1}]$ و $\gamma(r, z, h)$ تابع بدون بعد تنش آب می باشد.

بر اساس روش تخمین نیاز آبی گیاه FAO، جذب واقعی $S_{ac}(r, z, t)$ بر اساس ضریب تعرق پتانسیل در فاکتور کاهش تعرق k_s بدست آمد (آلن و همکاران ۱۹۹۸).

$$S_{ac}(r, z, t) = \frac{\pi R^2 \beta(r, z, t) k_s T_{pot}(t)}{2\pi \int_0^{z_m} \int_0^{r_m} r \beta(r, z, t) dr dz} \quad [۵]$$

که T_{pot} تعرق پتانسیل $[L^3 T^{-1}]$ ، k_s فاکتور بدون بعد کاهش تعرق که به آب قابل دسترسی خاک بستگی دارد که به صورت زیر محاسبه می شود (آلن و همکاران ۱۹۹۸).

$$k_s = \frac{TAW - D_r}{(1 - \Phi) TAW} \quad [۶]$$

که D_r عمق آب تخلیه شده از منطقه ریشه $[L]$ ، TAW آب قابل دسترسی خاک در منطقه ریشه $[L]$ و Φ کسری از TAW که گیاه بدون تحمل تنش آب در خاک جذب می کند و برای درخت سیب ۰/۵ در نظر گرفته شده است (گانگ و همکاران ۲۰۰۶). تعرق پتانسیل T_{pot} به صورت تعرق حداکثر در حالتی که گیاه در شرایط بدون تنش آب باشد تعریف می گردد (ورات و همکاران ۲۰۰۱ a).

$$T_{pot} = K_c E T_0 - E_s \quad [۷]$$

که K_c ضریب گیاهی بدون بعد، $E T_0$ تبخیر و تعرق مرجع $[L^3 T^{-1}]$ و E_s بیانگر تبخیر از سطح خاک می باشد $[L^3 T^{-1}]$.

ثابت در نظر گرفته شد. در این قسمت برای C_{ir} های مختلف مقادیر τ_0 ، ρ_0 ، β_0 بر اساس داده های اندازه گیری شده در مزرعه بهینه شد. مقادیر بدست آمده در جدول ۲ ارائه گردیده است. از جدول مذکور می توان مقادیر ضرایب رابطه ۲ را در خاکهای مختلف مشخص نمود.

تحلیل خطای باقیمانده، اختلاف مقادیر اندازه گیری و شبیه سازی شده برای ارزیابی سطح کارایی مدل استفاده شد. در نهایت نتایج بر اساس ریشه مربعات میانگین خطا (RMSE) ارزیابی گردید که به صورت زیر بیان می شود.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\beta(m_i) - \beta(p_i)]^2}{n - m}} \quad [۳]$$

که در آن $\beta(m_i)$ و $\beta(p_i)$ به ترتیب مقادیر چگالی اندازه گیری شده و شبیه سازی شده برای ریشه، n تعداد اندازه گیری ها و m تعداد پارامترها را نشان می دهد.

خاک باغ مورد مطالعه لوم - رسی می باشد که در این خاک بر اساس جدول ۱، C_{ir} مقدار ۰/۶ بدست آمد. رابطه چگالی ریشه با استفاده از آنالیز حساسیت و شکل تغییرات تراکم ریشه بر اساس مقادیر مختلف ضرایب مورد بررسی دقیق قرار گرفت. بدین منظور برای C_{ir} ثابت (۰/۶) مقادیر مختلف ضرایب τ_0 ، ρ_0 ، β_0 در رابطه ۲ مورد ارزیابی قرار گرفت (جدول ۳). داده های محاسبه شده چگالی ریشه با استفاده از معادله با داده های اندازه گیری شده در مزرعه مقایسه گردید که خطای نسبی (Error) و RMSE در جدول ۳ ارائه شده است. حداکثر و حداقل پارامترهای معادله جذب ریشه در این جدول مشخص می باشند.

مدل جذب آب توسط ریشه: جذب آب توسط ریشه در r و z مشخص بر اساس رابطه فدیس و همکاران (۱۹۷۸) به صورت زیر بدست آمد .

حرکت آب در خاک: داده های بدست آمده به ۲۵ دسته تقسیم شد که از ۵ دسته آن برای واسنجی^۱ استفاده گردید. ارزیابی^۲ مدل دو بعدی ارائه شده برای جذب آب توسط ریشه با استفاده از داده های اندازه گیری شده درصد آب در خاک در دوره آبیاری در اطراف درخت سبب به انجام رسید. برای شبیه سازی تغییرات رطوبت در خاک مدل جذب ریشه در معادله ریچاردز وارد شد و به صورت عددی حل گردید.

ارزیابی مدل دو بعدی ارائه شده برای جذب آب توسط ریشه با استفاده از داده های اندازه گیری شده درصد آب در خاک در دوره آبیاری در اطراف درخت سبب به انجام رسید. برای شبیه سازی تغییرات رطوبت در خاک مدل جذب ریشه در معادله ریچاردز وارد شد و به صورت عددی حل گردید.

نتایج شبیه سازی شده و اندازه گیری شده رطوبت آب در خاک به صورت دو بعدی در شکل ۴ ارائه شده است. در این شکل برای سه زمان مشخص از دوره آبیاری نتایج به صورت گرافیکی رسم شده است.

بر اساس شکل ۴ کاهش رطوبت بین عمقهای ۵ تا ۴۵ سانتیمتر و در فاصله شعاعی ۰ تا ۶۰ سانتیمتر از درخت بیشترین مقدار را نشان می دهد که این تغییر بیانگر تبخیر از سطح خاک و جذب ریشه در نقاط مختلف خاک می باشد. با اندازه گیری مقدار تبخیر از سطح خاک مقدار جذب ریشه محاسبه گردید. با توجه به شکلهای ارائه شده، نتایج اندازه گیری شده و شبیه سازی شده همخوانی خوبی را نشان می دهند که می تواند تایید مدل ارائه شده باشد.

مقدار جذب آب: براساس مدل ارائه شده مقادیر جذب شبیه سازی شده در دوره ۷ روزه محاسبه گردید و با استفاده از داده های اندازه گیری شده در مزرعه مورد ارزیابی قرار گرفت. در شکل ۵ مقدار جذب شبیه سازی شده و اندازه گیری شده ارائه شده است که

تابع تنش آب $\gamma(r, z, h)$ به صورت زیر توسط ون گنوختن (۱۹۸۷) ارائه شده و وارد معادله ۴ گردید.

$$\gamma(r, z, h) = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{h}{h_{50}}\right)^p\right]} \quad [8]$$

که h بار فشار آب در خاک در مکان مشخص از خاک (r, z) ، h_{50} بار فشار آب در خاک که در آن جذب آب توسط ریشه ۵۰ درصد کاهش یابد $[L]$ ، p پارامتر برازش $[-]$ که عموماً ۳ در نظر گرفته می شود (ون گنوختن و گوپتا ۱۹۹۳). مقادیر حداکثر و حداقل پارامترهای جذب ریشه بر اساس آنالیز حساسیت و مقدار خطا مشخص و در جدول ۴ آورده شده است.

نتایج و بحث

بر اساس جدول ۲ شکل دو بعدی توزیع ریشه در عمق و شعاع رسم گردید که تاثیر تغییر مقدار ضرایب در این شکلها را می توان به سادگی مورد بررسی قرار داد (شکل ۳) بر اساس این جدول میزان حساسیت نتایج به ضرایب β_0 ، C_{ir} بیشتر بوده و تغییرات آنها باعث تغییرات زیاد تراکم ریشه و افزایش خطا می گردد. بر اساس شکل ۳ با افزایش مقدار ضریب p تراکم افقی ریشه افزایش می یابد (H1) و با افزایش مقدار ضریب τ تراکم ریشه در عمق خاک بیشتر می گردد (F3). با تغییر β_0 مقدار عددی تراکم ریشه مستقیماً افزایش یا کاهش می یابد (G4). شکل ۳ نشان می دهد که مدل دو بعدی ارائه شده از قابلیت فراوانی برخوردار است و توزیع تراکم ریشه را در شرایط مختلف می تواند شبیه سازی نماید. به عنوان مثال، قسمت D4 از شکل ۳ مدل خاصی از تراکم ریشه می باشد که می توان آنرا کاربردی از آبیاری زیر سطحی در نظر گرفت که تراکم ریشه در عمق خاک و در محل آبدهی لوله ها بیشتر از نقاط دیگر است.

¹Calibration

²Verification

۳۶۰ ساعت تا عمق ۱۰۰ سانتیمتری از سطح خاک برای فواصل ۰-۴۵، ۴۵-۷۵، ۷۵-۱۰۵، ۱۰۵-۱۳۵ و ۱۳۵-۱۶۵ سانتیمتر از درخت ارائه گردید. در این شکل، ۵ محدوده شعاعی از درخت در نظر گرفته شده و میانگین کل فواصل جهت مقایسه کلی رسم و مورد بررسی قرار گرفت. در این شکل به خوبی میزان تغییرات رطوبت نسبت به مکان و زمان قابل بررسی می‌باشد. با توجه به شکل ۶ مشخص می‌گردد که تغییرات رطوبت برای فواصل زمانی ابتدایی ارائه شده بیشتر از گامهای زمانی انتهایی می‌باشد. علت این امر رطوبت بالا در ابتدای آزمایش و ناچیز بودن فاکتور تنش آب در جذب آب توسط ریشه است که باعث گردیده در فواصل زمانی یکسان جذب در رطوبت بالا بیشتر گردد. همچنین تغییرات رطوبت در اعماق بیشتر از ۵۰ سانتیمتر مقدار کمی را نشان می‌دهد که به علت کاهش جذب در اعماق بیشتر از ۵۰ سانتیمتر می‌باشد. با افزایش فاصله شعاعی از درخت میزان تغییرات رطوبت و جذب نیز کاهش یافته است.

در نتیجه می‌توان بر اساس نتایج بیان نمود که مدل‌های توزیع ریشه در خاک در حل مسائل آب، خاک و گیاه یکی از مهمترین پارامترها به شمار می‌روند. بنابراین همیشه در مسائل آب، خاک و گیاه، یک مدل ریاضی کاربردی دقیق توزیع و جذب آب مورد نیاز می‌باشد. بسیاری از تحقیقات انجام شده در مورد حرکت و جذب آب در خاک بر اساس مدل‌های توزیع ریشه یک یک بعدی و گیاهان یک ساله انجام می‌گیرد (فدیس و همکاران ۱۹۷۶، مولز ۱۹۸۱، کولهو و آر ۱۹۹۶، سوما و همکاران ۱۹۹۸ و زوو و زانگ ۲۰۰۲). که این مدل‌ها در شبیه سازی توزیع ریشه درختان که وسیع تر و درصد رشد سالانه کمتر دارند، دقیق نخواهند بود. در این تحقیق مدل دو بعدی توزیع و جذب ریشه بر اساس اندازه گیریهای مزرعه بسط داده شد. مدل ارائه شده را می‌توان برای شرایط مختلف و درختان متفاوت در مدل‌های شبیه سازی با دقت بالا مورد استفاده قرار داد.

همبستگی قابل قبولی را نشان می‌دهد. البته مقدار برآورد شده جذب آب از طریق ریشه شبیه سازی کمی بیشتر از مقدار اندازه گیری حاصل شده است. براساس این شکلهای بیشترین جذب آب در عمق ۱۰ تا ۳۰ سانتیمتر و در فاصله شعاعی ۰ تا ۶۰ سانتیمتر از درخت اتفاق افتاده است و حداکثر جذب آب ۰/۱۱ متر مکعب بر متر مکعب در روز بوده که در عمق ۲۰ سانتیمتر از خاک بدست آمده است.

با مقایسه دوره ۷ روزه اول با دوره ۷ روزه دوم در شکل ۵ می‌توان نتیجه گرفت که به علت بالا بودن رطوبت در شروع آزمایش میزان جذب نیز مقدار بیشتری را نسبت به روزهای انتهایی دوره آبیاری نشان می‌دهد. میزان حداکثر جذب ریشه در ۷ روز ابتدایی ۰/۰۸ و در ۷ روز بعدی ۰/۰۴ متر مکعب آب در متر مکعب خاک در روز برآورد شده است.

در مدت دو هفته از آزمایش، درصد رطوبت خاک تا عمق ۴۰ سانتیمتری از خاک به طور متوسط از 0.35 به $0.16 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ رسید (شکل ۴). این کاهش ۱۹ درصدی رطوبت بیانگر این مطلب است که حدود ۶۰۰-۷۰۰ 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 ۴۰-۵۰ لیتر در روز محاسبه شد. این نتایج با گزارشات ارائه شده برای درخت گلابی (کاسپاری و همکاران ۱۹۹۳) و درخت بالغ سیب (گرین و کلاتسیر ۱۹۹۹) همخوانی دارد.

در نهایت نتایج تغییرات رطوبت اندازه گیری شده که همبستگی بالایی با نتایج شبیه سازی شده داشت ($R^2=0.97$) در شکل ۶ برای گامهای زمانی مختلف رسم گردید. در شکل ۶ تغییرات رطوبت خاک در عمق خاک و برای فواصل شعاعی مشخص از درخت در دوره زمانی ۳۶۰ ساعت بلافاصله پس از اتمام آبیاری ارائه گردید. به این صورت که درصد رطوبت اندازه گیری شده برای گامهای زمانی ۰، ۷۲، ۱۴۴، ۲۱۶، ۲۸۸ و

نتیجه گیری

در این تحقیق یک مدل توزیع ریشه دو بعدی برای درخت سیب که بسیار انعطاف پذیر و کاربردی بوده، ارائه گردید. مدل دوبعدی ارائه شده قابلیت محاسبه جذب آب توسط ریشه را به صورت زمانی و مکانی بر اساس الگوی پخش یکنواخت و غیر یکنواخت آب در خاک را دارد. مدل برای حرکت آب و جذب توسط ریشه در خاک توسط اندازه گیری های صحرائی در باغ سیب تأیید شد. دستگاه رطوبت سنج TDR همراه با

لوله های مخصوص در اعماق خاک برای اندازه گیری درصد رطوبت حجمی خاک استفاده گردید. نتایج بدست آمده با نتایج تحقیق ورات و همکاران (۲۰۰۱b) که بر روی درخت بادام انجام گرفته، همبستگی خوبی را نشان می دهد. بر اساس نتایج بیشترین جذب آب توسط ریشه درخت سیب در خاک لوم-رسی در عمق ۱۰ تا ۳۰ سانتیمتر اتفاق می افتاد که مقدار حداکثر جذب در دوره آزمایش به طور متوسط ۰/۰۱۱ ($m^3 m^{-3} d^{-1}$) بدست آمد.

جدول ۱- مقادیر مختلف C_{ir} (معادله ۲) بدست آمده در خاکهای مختلف

خاک	شن	لوم-شنی	لوم	لوم-سیلتی	لوم-رسی	لوم-رسی-سیلتی	رس-شنی	رس
C_{ir}	۱	۰/۹۵	۰/۸۵	۰/۷۵	۰/۶	۰/۴۸	۰/۳۹	۰/۳

جدول ۲- مقادیر بهینه شده پارامترهای مدل توزیع ریشه (معادله ۲)

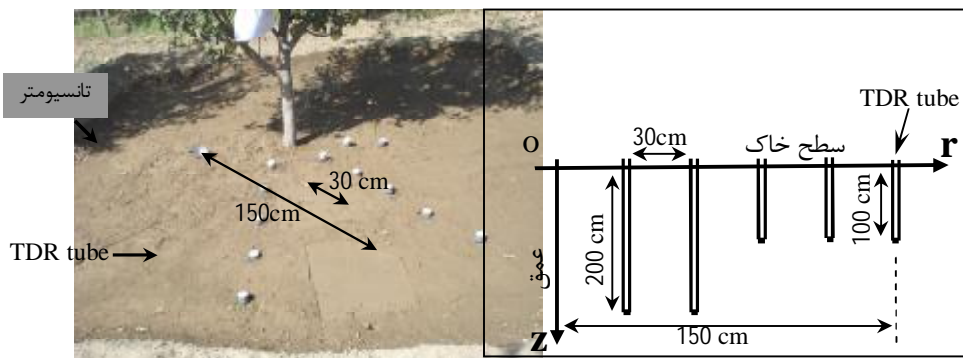
RMSE	Error	τ (cm/cm ³)	ρ (cm/cm ³)	β_o (cm/cm ³)	C_{ir}
۰/۰۲۸۵	۰/۹۷۴۱	-۰/۷۵۱۴	۰/۵۹۲۴	۰/۲۱۷۹	۱/۰۰
۰/۰۲۸۵	۰/۹۷۴۱	-۰/۷۵۲۰	۰/۵۹۲۱	۰/۲۲۹۴	۰/۹۵
۰/۰۲۸۵	۰/۹۷۴۱	-۰/۷۵۰۲	۰/۵۹۲۷	۰/۲۵۶۳	۰/۸۵
۰/۰۲۸۵	۰/۹۷۴۲	-۰/۷۴۵۳	۰/۵۹۳۳	۰/۲۹۰۲	۰/۷۵
۰/۰۲۸۵	۰/۹۷۴۲	-۰/۷۵۱۹	۰/۵۹۲۵	۰/۳۶۳۲	۰/۶۰
۰/۰۲۸۵	۰/۹۷۴۲	-۰/۷۵۲۳	۰/۵۹۲۷	۰/۴۵۴۱	۰/۴۸
۰/۰۲۸۴	۰/۹۷۴۲	-۰/۷۳۷۹	۰/۵۹۵۷	۰/۵۵۷۲	۰/۳۹
۰/۰۲۸۵	۰/۹۷۴۴	-۰/۷۱۸۷	۰/۶۰۰۵	۰/۷۲۱۶	۰/۳۰

جدول ۳- مقادیر مختلف پارامترهای مدل توزیع ریشه (معادله ۲) و خطای محاسبه شده نسبت به داده های مشاهداتی

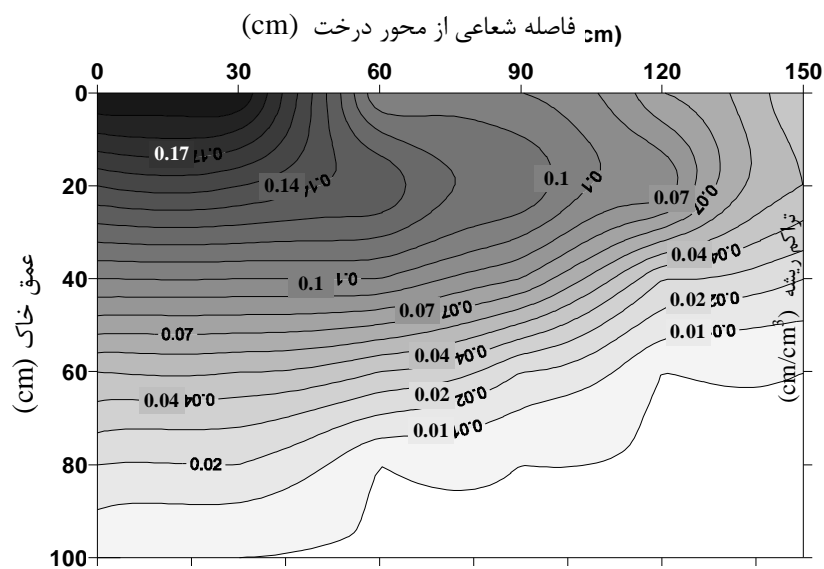
شکل	C_{ir}	β_o (cm/cm ³)	ρ (cm/cm ³)	τ (cm/cm ³)	Error	RMSE
A1	۰/۶۰	۰/۲۰	-۲/۰۰	-۲/۰۰	۳/۱۰۴۸	۰/۰۸۰۱
A2	۰/۶۰	۰/۲۰	-۲/۰۰	-۲/۰۰	۲/۹۳۲۵	۰/۰۷۶۷
A3	۰/۶۰	۰/۲۰	-۲/۰۰	۱/۰۰	۲/۵۷۹۵	۰/۰۶۹۵
A4	۰/۶۰	۰/۲۰	-۲/۰۰	۲/۰۰	۲/۹۰۰۴	۰/۰۷۵۰
B1	۰/۶۰	۰/۲۰	-۱/۰۰	-۲/۰۰	۲/۹۲۸۷	۰/۰۷۵۲
B2	۰/۶۰	۰/۲۰	-۱/۰۰	-۱/۰۰	۲/۷۲۷۸	۰/۰۷۰۸
B3	۰/۶۰	۰/۲۰	-۱/۰۰	۱/۰۰	۲/۳۲۹۳	۰/۰۶۱۹
B4	۰/۶۰	۰/۲۰	-۱/۰۰	۲/۰۰	۲/۸۰۳۴	۰/۰۶۹۷
C1	۰/۶۰	۰/۲۰	۱/۰۰	-۲/۰۰	۲/۲۲۹۹	۰/۰۵۸۶
C2	۰/۶۰	۰/۲۰	۱/۰۰	-۱/۰۰	۱/۹۱۹۷	۰/۰۵۰۹
C3	۰/۶۰	۰/۲۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۷۵۷۳	۰/۰۴۳۵
C4	۰/۶۰	۰/۲۰	۱/۰۰	۲/۰۰	۳/۰۳۲۱	۰/۰۷۵۷
D1	۰/۶۰	۰/۲۰	۲/۰۰	-۲/۰۰	۲/۰۹۷۷	۰/۰۵۲۷
D2	۰/۶۰	۰/۲۰	۲/۰۰	-۱/۰۰	۱/۸۰۰۹	۰/۰۴۵۱
D3	۰/۶۰	۰/۲۰	۲/۰۰	۱/۰۰	۲/۶۷۰۰	۰/۰۶۲۵
D4	۰/۶۰	۰/۲۰	۲/۰۰	۲/۰۰	۴/۹۹۵۶	۰/۱۲۰۴
E1	۰/۶۰	۰/۸۰	-۲/۰۰	-۲/۰۰	۲/۴۱۴۹	۰/۰۸۰۵
E2	۰/۶۰	۰/۸۰	-۲/۰۰	-۱/۰۰	۲/۵۹۶۳	۰/۰۸۵۹
E3	۰/۶۰	۰/۸۰	-۲/۰۰	۱/۰۰	۵/۰۲۱۰	۰/۱۵۴۹
E4	۰/۶۰	۰/۸۰	-۲/۰۰	۲/۰۰	۸/۰۸۸۲	۰/۲۵۷۸
F1	۰/۶۰	۰/۸۰	-۱/۰۰	-۱/۰۰	۲/۲۷۵۱	۰/۰۸۰۴
F2	۰/۶۰	۰/۸۰	-۱/۰۰	-۱/۰۰	۲/۵۹۴۸	۰/۰۸۷۱
F3	۰/۶۰	۰/۸۰	-۱/۰۰	۱/۰۰	۵/۷۹۴۷	۰/۱۶۶۷
F4	۰/۶۰	۰/۸۰	-۱/۰۰	۲/۰۰	۹/۶۸۴۲	۰/۲۸۰۸
G1	۰/۶۰	۰/۸۰	۱/۰۰	-۲/۰۰	۳/۸۸۸۸	۰/۱۳۵۷
G2	۰/۶۰	۰/۸۰	۱/۰۰	-۱/۰۰	۵/۳۹۷۶	۰/۱۵۱۰
G3	۰/۶۰	۰/۸۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱۱/۷۶۲۶	۰/۲۶۹۷
G4	۰/۶۰	۰/۸۰	۱/۰۰	۲/۰۰	۱۸/۵۸۸۶	۰/۴۳۳۱
H1	۰/۶۰	۰/۸۰	۲/۰۰	-۲/۰۰	۷/۲۰۲۶	۰/۲۳۴۶
H2	۰/۶۰	۰/۸۰	۲/۰۰	-۱/۰۰	۹/۳۹۰۱	۰/۲۵۹۹
H3	۰/۶۰	۰/۸۰	۲/۰۰	۱/۰۰	۱۸/۵۸۸۶	۰/۴۲۴۶
H4	۰/۶۰	۰/۸۰	۲/۰۰	۲/۰۰	۲۸/۴۵۳۵	۰/۶۴۸۸

جدول ۴- محدوده پارامترهای مدل جذب و توزیع ریشه آب توسط ریشه

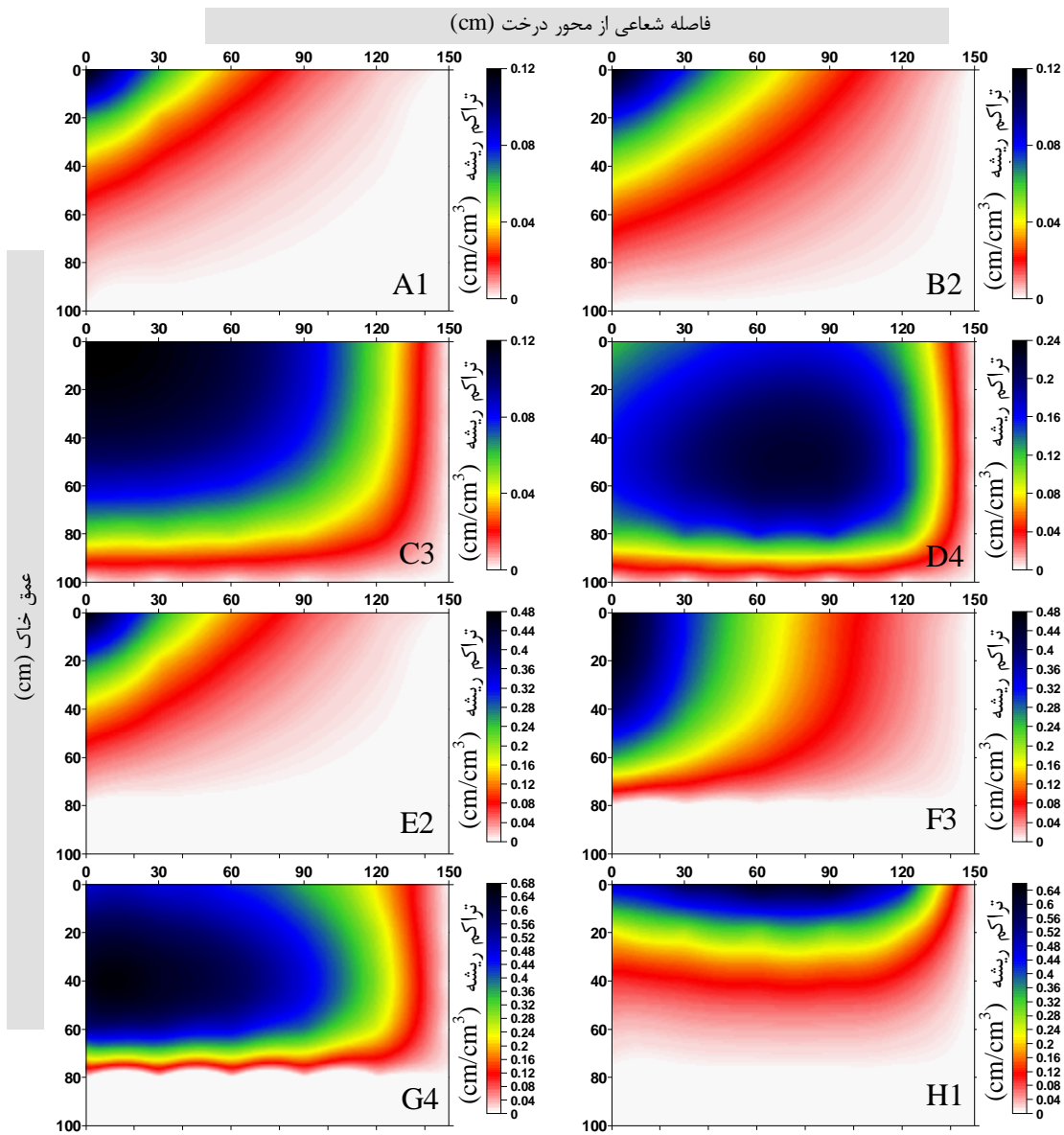
h_{50} (cm)	$\Phi(-)$	D_r (cm)	z_m (cm)	r_m (cm)	τ (cm/cm ³)	ρ (cm/cm ³)	C_{ir} (-)	β_o (cm/cm ³)	
۱۰/۰۰	۰/۵	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۱۰	-۰/۲۰	۰/۲۰	۰/۰۲	۰/۱۸	حداقل
۵۰۰۰/۰۰	۰/۵	۲/۰۰	۱/۲۰	۲/۰۰	-۴/۰۰	۴/۰۰	۰/۸۰	۰/۸۸	حداکثر



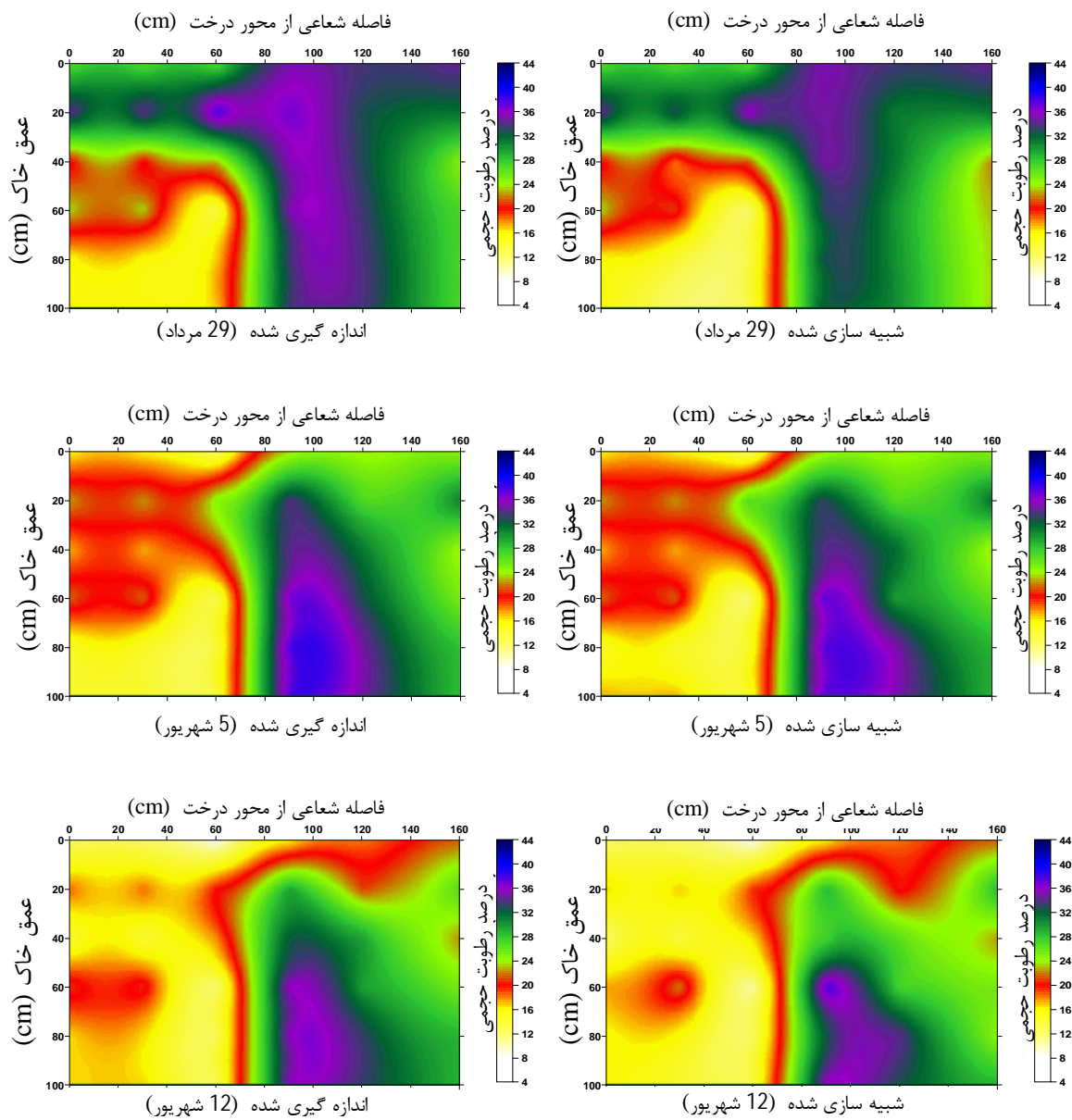
شکل ۱- نمایش محل انجام آزمایش‌ها و نقشه نصب لوله‌های رطوبت‌سنج



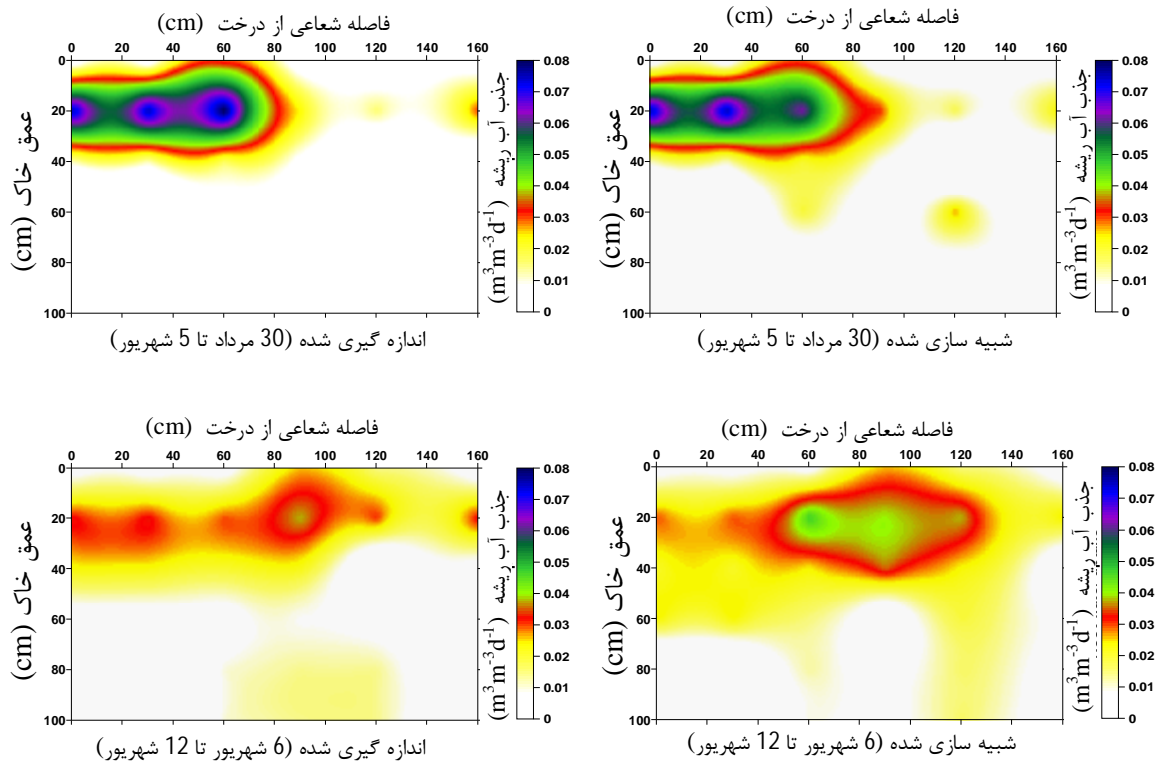
شکل ۲- توزیع تراکم ریشه اندازه‌گیری شده در جهت شعاعی از محور ریشه و عمق از سطح خاک



شکل ۳- وضعیت‌های مختلف مکانی دو بعدی ریشه بر اساس جدول ۳ نسبت به پارامترهای مدل (cm^3/cm^3)

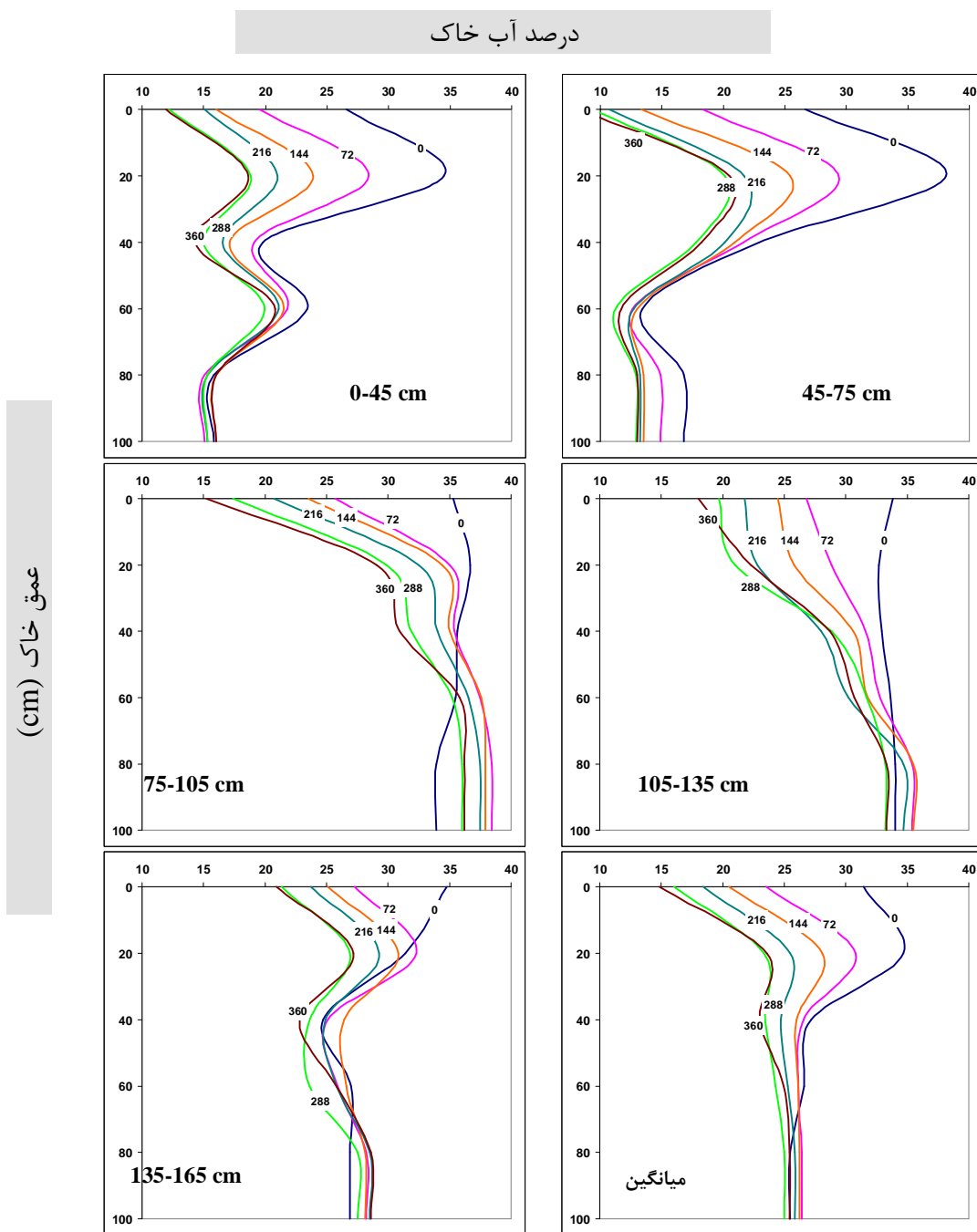


شکل ۴- مقایسه مقادیر درصد رطوبت اندازه گیری شده و شبیه سازی شده دو بعدی در سه زمان مشخص



شکل ۵- نمایش دو بعدی مقادیر اندازه گیری شده و شبیه سازی شده جذب آب توسط ریشه در دو دوره ۷ روزه از شروع

آبیاری ($\text{m}^3 \text{m}^{-3} \text{d}^{-1}$)



شکل ۶- تغییرات متوسط درصد رطوبت خاک در گام زمانی ۷۲ ساعت ($\Delta t=72$) بلافاصله پس از اتمام آبیاری و در فواصل مشخص از محور ریشه در عمق خاک

منابع مورد استفاده

- Allen R, Pereira LS, Raes D and Smith M, 1998, Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Requirements FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO, Rome, Italy.
- Asseng S, Richter C and Wessolek G, 1997. Modeling root growth of wheat as the linkage between crop and soil. *Plant and Soil* 190, 267–277.
- Asseng S, Ritchie JT, Smucker AJM and Robertson MJ, 1998. Root growth and water uptake during water deficit and recovering in wheat. *Plant and Soil* 201, 265–273.
- Caspari HW, Green SR and Edwards WRN, 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.
- Clausnitzer V, and Hopmans JW, 1994. Simultaneous modeling of transient three-dimensional root growth and soil water flow. *Plant Soil* 164:299–314
- Clothier BE and Green SR, 1994. Rootzone processes and the efficient use of irrigation water. *Agric Water Manag* 25:1–12.
- Clothier BE, 1989. Research imperatives for irrigation science *J Irrigation Drainage Eng* 115(3):421–448.
- Coelho EF and Or D, 1999. Root distribution and water uptake patterns of corn under surface and subsurface drip irrigation. *Plant Soil* 206:123–136.
- Coelho EF and Or D, 1996. A parametric model for two-dimensional water uptake by corn roots under drip irrigation. *Soil Soc Am J* 60, 1039–1049.
- Feddes RA, Kowalik P, Kolinska-Malinka K and Zaradny H, 1976. Simulation of field water uptake by plants using a soil water dependent root extraction function. *J Hydrol* 31,13–26.
- Gardenas AI, Hopmans JW, Hanson BR and Simunek J, 2005. Two-dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios under micro-irrigation. *Agric. Water Manage.* 74, 219–242.
- Gong D, Shaozhong Kang S, Zhang L, Du T and Yao L, 2006. A two-dimensional model of root water uptake for single apple trees and its verification with sap flow and soil water content measurements, *agricultural water management* (83)119 – 129.
- Green S and Clothier B, 1999. The root zone dynamics of water uptake by a mature apple tree. *Plant Soil* 206: 61–77.
- Hupet F, Lambot S, Feddes RA, van Dam JC and Vanclooster M, 2003. Estimation of root water uptake parameters by inverse modeling with soil water content data. *Water Resour Res* 39(11) 1312 doi: 10.1029/2003WR002046.
- Hupet F, Lambot S, Javaux M and Vanclooster M, 2002. On the identification of macroscopic root water uptake parameters from soil water content observations. *Water Resour Res* 38(12) 1300 doi: 10.1029/2002WR001556.

- Kjelgren R, Goldhamer DA, Uriu K and Weinbaum SA, 1985. Almond tree response to variable nitrogen fertilization rates through low volume sprinklers. In: Proceedings of the 3rd International drip/trickle irrigation congress, Fresno, 2.
- Kramer PJ and Boyer JS, 1995. Water relation of plants and soils, Academic press, San Diago, USA.
- Meyer JL and Peck D, 1985. Avocado root distribution with microsprinklers. In: Proceedings of the 3rd International drip/trickle irrigation congress, Fresno 2, pp 682–686
- Molz FJ, 1981. Models of water transport in the soil-plant system: A review. Water Resour Res 17, 1245–1260.
- Musters PAD and Bouten W, 1999. Assessing rooting depths of an Austrian Pine stand by inverse modeling soil water content maps. Water Resour Res 35, 3041–3048.
- Roth RL and Gardner BR, 1985. Root distribution of mature orange trees irrigated by pressurized systems. In: Proceedings of the 3rd International drip/trickle irrigation congress, Fresno, 2, pp 579–586.
- Sakovich NJ and Post SEC, 1986. Lemon root distribution in sprinkler, drip systems Citrograph 71(7):143–144.
- Simunek J, Sejna M and Van Genuchten MTh, 2006. The HYDRUS Software Package for Simulating the Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media, User Manual, Version 1.0, PC-Progress, Prague, Czech Republic.
- Somma F, Hopmans JW and Clausnitzer V, 1998. Transient three-dimensional modeling of soil water and solute transport with simultaneous root growth, root water and nutrient uptake. Plant Soil 202, 281–293.
- Van Genuchten MTh and Gupta SK, 1993. A reassessment of the crop tolerance response function. Indian Soc Soil Sci 4:730–737.
- Van Genuchten MTh, 1987. A numerical model for water and solute movement in and below the root zone. Res. Rep. 121. U.S. Salinity Lab, ARS USDA, Riverside, CA.
- Vrugt JA, Hopmans JW and Simunek J, 2001a. Calibration of a two-dimensional root water uptake model. Soil Sci Soc Am J 65, 1027–1037.
- Vrugt JA, van Wijk MT, Hopmans JW and Simunek J, 2001b. One-, two-, and three-dimensional root water uptake functions for transient modeling. Water Resour Res 37, 2457–2470.
- Whisler FD, Klute A and Millington RJ, 1968. Analysis of steady-state evapotranspiration from a soil column. Soil Sci Soc Am Proc 32, 167–174 .
- Xue Q, Zhu Z, Musick JT, Stewart BA and Dusek DA, 2003. Root growth and water uptake in winter wheat under deficit irrigation. Plant and Soil 257, 151–161.
- Zuo Q and Zhang R, 2002. Estimating root-water-uptake using an inverse method. Soil Sci 167, 561–571.