

مدل دو بعدی حرکت آب در خاک همراه با جذب آب توسط ریشه بر اساس حل معادلات حاکم و مطالعات میدانی

سینا بشارت^{*۱} - امیر حسین ناظمی^۲ - علی اشرف صدرالدینی^۳ - صداقت شهمراد^۴

تاریخ دریافت: ۸۸/۷/۵

تاریخ پذیرش: ۸۹/۳/۳۰

چکیده

حرکت آب در خاک بر اساس جذب آب توسط ریشه کلید مراحل رشد گیاه و انتقال آب و املاح در سیستم خاک-گیاه می‌باشد. هدف از این تحقیق حل معادلات حاکم در انتقال آب در خاک و ارائه مدل جذب آب توسط ریشه بر اساس مطالعات صحرایی می‌باشد. برای این منظور درصد حجمی رطوبت خاک با استفاده از دستگاه TDR اطراف درخت سبب که به صورت سطحی آبیاری شده بود در ۱۲ نقطه تا عمق ۲ متری در طول ۲۰ روز بلافاصله بعد از آبیاری بدست آمد. مدل دو بعدی جذب آب توسط ریشه بر اساس تابع توزیع تراکم ریشه، تعرق پتانسیل و فاکتور تصحیح تنش آب برای شبیه سازی انتقال آب و تعیین تأثیر ریشه در حرکت آب بسط داده شد. مدل جذب ریشه حاصله با مدل انتقال آب در خاک مبتنی بر حل معادله ریچاردز تلفیق شد. بر اساس نتایج ۶۰ درصد جذب آب در عمق ۲۰ تا ۴۰ سانتیمتری عمق خاک اتفاق افتاده است و در جهت شعاعی نیز در فاصله ۳۰ تا ۶۰ سانتیمتری حداکثر جذب بدست آمد که حدوداً ۳۰ درصد از کل جذب را در بر می‌گیرد. نتایج درصد رطوبت خاک شبیه سازی شده با داده‌های اندازه‌گیری شده میدانی مقایسه گردید که همبستگی قابل قبولی بین داده‌های شبیه سازی شده و اندازه‌گیری شده مشاهده شد ($R^2 = 0.97$). مدل عددی انتقال و جذب آب می‌تواند وسیله‌ای مفید در شبیه سازی جریان آب همراه جذب آب توسط ریشه در محیط غیر اشباع باشد که در مهندسی آب از اهمیتی خاص برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: حرکت آب، حل عددی، جذب ریشه، معادله ریچاردز، محیط غیر اشباع

مقدمه

آب در خاک مفید باشد. چون اکثر مدل‌ها شامل پارامتر جذب ریشه به صورت مکانی و زمانی می‌باشند (۲۱ و ۲۴). مدل‌های گوناگونی برای جذب آب توسط ریشه توسط دانشمندان مختلف ارائه شده است (۱۲، ۱۳ و ۱۹). این مدل‌ها بیشتر بر اساس مطالعات مکانی، توزیع ریشه مؤثر و راندمان جذب آب وابسته به پتانسیل آب در خاک ارائه شده‌اند. این مدل‌ها همچنین به ضریب گیاهی (K_c) مناسب در مراحل مختلف رشد نیاز دارند. مدل‌های موجود بیشتر به صورت یک بعدی هستند (۲، ۱۰، ۱۶ و ۲۰) به جز مدل‌های کولهو و آر (۵) و ورات و همکاران (۲۹) و گانگ و همکاران (۱۳) که به صورت دو بعدی ارائه شده‌اند. اما مدل‌های یک بعدی نمی‌توانند توزیع ریشه را به صورت شعاعی و عمودی در محیط ریشه درختان میوه برآورد نمایند. در حقیقت، توزیع ریشه در باغ‌ها به علت لایه بندی خاک، توزیع مواد غذایی و آب و تراکم بعضی قسمتهای خاک در اثر رفت و آمد و آبیاری بسیار ناهمگن می‌باشد (۱۴، ۱۷ و ۳۲). پس خاک ناهمگن و توزیع ریشه ناهمگن نیاز به مدل دو بعدی و سه بعدی انعطاف پذیر جهت شبیه سازی حرکت و جذب آب را در عمل

بر اساس مطالعات هیدرولوژیکی، جذب آب توسط سیستم ریشه و توزیع مکانی آن می‌تواند دارای نقش اساسی در کنترل اصلی جریان آب به اتمسفر و آبهای زیر زمینی باشد (۳ و ۱۸). برای فهم مقدار این جریان‌ها، نیاز به تخمین مکانی و زمانی جذب آب توسط ریشه می‌باشد. مقدار جذب ریشه همچنین در مسائل جریان مواد شیمیایی در خاک و مسائل اکولوژیکی و هیدرولوژیکی دخالت دارد (۱۵ و ۲۵).

شناخت دقیق جذب آب توسط ریشه می‌تواند در مدیریت بهتر سیستم‌های آبیاری کمک شایانی نماید. تأثیر سیستم ریشه گیاهان در حرکت آب و املاح می‌تواند در استفاده بهتر از مدل‌های شبیه سازی

۱- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه
* - نویسنده مسئول: (Email: sina323@yahoo.com)
۲- دانشجویان گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز
۳- دانشیار گروه ریاضی، دانشکده ریاضی، دانشگاه تبریز

دارد.

مطالعات جذب آب توسط دو گروه طبقه بندی می‌شوند (۷ و ۳۱). گروه اول روش‌هایی را شامل می‌شوند که مطالعات مربوط به صورت جریان شعاعی آب به یک ریشه منفرد در نظر گرفته می‌شود (۸ و ۱۹). مطالعات در گروه دوم بر اساس جذب رطوبت توسط ریشه بدون در نظر گرفتن تأثیر تک تک ریشه می‌باشد (۹ و ۲۲). که روش اول به نام روش میکروسکوپی و روش دوم به نام روش ماکروسکوپی استفاده می‌گردد. در روش میکروسکوپی ریشه‌های منفرد به صورت سیلندرهایی با طول نامحدود در نظر گرفته می‌شوند. در روش ماکروسکوپی آب از هر حجم مشخصی از خاک منطقه ریشه با مقادیر مختلف جذب می‌گردد. که به صورت مقدار عامل تخلیه S در معادله ریچاردز در نظر گرفته می‌شود. S تابع مکان و زمان است و روش ماکروسکوپی برتری معنی داری نسبت به روش میکروسکوپی دارد (۴، ۵ و ۳۰). هدف از این تحقیق مطالعه حرکت آب در خاک همراه با ارائه مدل دو بعدی انعطاف پذیر جذب ریشه برای درخت سیب می‌باشد که بر اساس اندازه‌گیری‌های صحرائی مورد ارزیابی و تأیید قرار گرفت. در این مقاله مدل جدیدی برای توزیع ریشه درختان بدست آمد که تأثیر مشخصات خاک مانند بافت در آن لحاظ شده است.

مواد و روش‌ها

محل آزمایش ها و مواد طرح: آزمایش‌های صحرائی در تابستان ۱۳۸۷ در باغ سیب مطالعاتی دانشکده کشاورزی ارومیه، طراحی و اجرا شد (E ۵۸° ۴۴' 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، بررسی‌های کامل و اندازه‌گیری‌ها بر روی یک چهارم این سطح انجام گرفت (شکل ۱). آزمایشات میدانی در ماه‌های مرداد و شهریور انجام شد. با استفاده از دستگاه رطوبت سنج *TDR (TRIME-FM)* در جهت شعاعی (R) و عمق (Z) درصد حجمی آب خاک اندازه‌گیری شد. بافت خاک لومی‌رسی با آب‌گذری پایین بود. مشخصات نگهداشت آب در خاک و پخشیدگی با استفاده از دستگاه صفحات فشار (*SEC-15Bar*) و هدایت هیدرولیکی اشباع و نفوذ از طریق دستگاه پرماتر گلف (*2800 KL Guelph permeameter*) محاسبه گردید.

درخت سیب در وسط باغ که به صورت ردیفهای شمالی- جنوبی کاشته شده‌اند انتخاب شد. فاصله داخل ردیفها ۳ متر و فاصله ردیفها از هم ۳/۲ متر بود. سن درخت ۶ سال با قطر تنه ۱۰ سانتیمتر، ارتفاع ۳/۰ متر و عرض تاج ۳/۰ متر بود. ریشه‌های زنده بیشتر در لایه ۱ متری خاک پراکنده بودند.

اندازه‌گیری‌های درصد آب در خاک: درصد حجمی آب در خاک

بلافاصله بعد از آبیاری سطحی در اطراف درخت هر ۲ ساعت اندازه‌گیری شد. در دوره زمانی ۲۹ تا ۳۱ مرداد اندازه‌گیری‌ها هر ۳ ساعت یادداشت گردید و در دوره زمانی ۱ تا ۱۳ شهریور اندازه‌گیری‌ها روزانه انجام می‌گرفت.

اندازه‌گیری‌های رطوبت در خاک با استفاده از دستگاه *TDR* انجام گرفت این دستگاه قابلیت اندازه‌گیری درصد حجمی رطوبت را در اعماق مختلف حداکثر تا عمق ۲ متر با دقت ± 0.1 درصد را دارد. به این صورت که لوله‌های پلاستیکی مخصوص دستگاه به قطر ۴/۵ سانتیمتر و توخالی به طول یک یا دو متر در خاک نصب می‌شود و سنسور اندازه‌گیری رطوبت (۲۰ سانتیمتر) وارد این لوله‌ها شده و می‌توان رطوبت خاک را در عمق مورد نظر و دلخواه قرائت کرد. ۱۲ لوله مخصوص دستگاه (۱ و ۲ متری) از شرکت سازنده دستگاه تهیه و در ۳ جهت در یک چهارم سطح مورد مطالعه درخت نصب گردید که در شکل ۱ محل و نقشه نصب لوله‌های دستگاه رطوبت سنج مشخص شده است. پروفیل درصد آب خاک در هر لوله در عمق خاک بر اساس اندازه‌گیری‌های درصد رطوبت خاک در فاصله‌های ۰/۲ متری بدست آمد (۰/۲-۰/۴، ۰/۴-۰/۶، ۰/۶-۰/۸، ۰/۸-۱/۰ و ۱/۰-۰/۸ متر و برای لوله ۲ متری تا عمق ۲ متر) و میانگین درصد رطوبت شعاعی برای هر ۵ لوله در هر جهت محاسبه شد (۰/۴۵-۰/۷۵، ۰/۷۵-۱/۰۵، ۱/۰۵-۱/۳۵، ۱/۳۵-۱/۶۵ و ۱/۶۵-۱/۳۵ متر). تغییرات دو بعدی پروفیل رطوبت خاک در عمق و شعاع در هر آزمایش ۸۵ اندازه‌گیری بود که در دوره آزمایش بیش از ۳۵۰۰ داده جمع‌آوری و ثبت گردید.

اندازه‌گیری تراکم طولی ریشه: تراکم ریشه یکی از مهمترین پارامترهای جذب ریشه در مدل حرکت و جذب آب در خاک به شمار می‌رود (۶). تراکم ریشه در جهت شعاعی و عمقی با فاصله از 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. ریشه‌های موجود در هر نمونه خاک جدا شده و اندازه‌گیری گردید و تراکم طولی ریشه (cm/cm^3) هر نمونه بر اساس طول ریشه به حجم نمونه بدست آمد.

مشخصات هیدرولیکی خاک: بافت خاک، چگالی ظاهری و حقیقی خاک در عمق‌های مختلف در آزمایشگاه بدست آمد. منحنی مشخصه خاک نیز با استفاده از دستگاه صفحات فشار بر اساس نمونه‌های دست‌نخورده خاک مشخص شد. هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با استفاده از دستگاه پرماترگلف در مزرعه اندازه‌گیری شد.

مدل حرکت آب در خاک: با در نظر گرفتن جریان آب به صورت دو بعدی در محیط متخلخل غیر اشباع و با فرض ناچیز بودن نقش فاز هوا در جریان مایع، معادله حاکم، معادله ریچاردز اصلاح شده می‌باشد. معادله ریچاردز در محیط متخلخل به صورت زیر نوشته می‌شود (۲۳).

$$\beta(z) = \left[1 - \frac{z}{z_m}\right] e^{-\frac{P_z}{z_m} |z^* - z|} \quad (5)$$

که در آن $\beta(z)$ توزیع مکانی ریشه در عمق $[-]$ ، z فاصله در عمق $[L]$ ، z_m حداکثر عمق ریشه دوانی $[L]$ و P_z و z^* پارامترهای تجربی می‌باشند $[L]$.

این پارامترها بر اساس مقدار حداکثر جذب آب که بین صفر تا z_m قرار دارند بدست می‌آیند ($0 \leq z_{max} \leq z_m$).

مدل ارائه شده در این تحقیق بر اساس داده‌های مشاهداتی و بهینه کردن پارامترها، به صورت زیر بدست آمد.

$$\beta(r, z, t) = C_{ir} \left(1 - \frac{r}{r_m(t)}\right) \left(1 - \frac{z}{z_m(t)}\right) \quad (6)$$

$$\times \beta_0 e^{(\rho(r/r_m(t)) + \tau(z/z_m(t)))}$$

که $\beta(r, z, t)$ تابع توزیع ریشه $[L^3 L^{-3}]$ ، C_{ir} ضریب قدرت رشد ریشه که با دستگاه پنترومتر (Rimik CP40II) ارزیابی شده است $[-]$ ، t زمان مشخص $[T]$ ، r فاصله در جهت شعاعی $[L]$ ، 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 با روش حداقل کردن خطای باقیمانده به ترتیب 0.05925 ، 0.3632 و 0.7519 - cm/cm^3 تخمین زده شده‌اند. ضریب C_{ir} با اندازه‌گیری‌های انجام شده در مزرعه با استفاده از دستگاه پنترومتر بر اساس مقدار سختی هر خاک به خاک شنی محاسبه شد. در طول آزمایش، رشد ریشه بسیار محدود بود. بنابراین در پایان آزمایشات تراکم ریشه اندازه‌گیری شد، حداکثر توسعه ریشه در جهت شعاعی و حداکثر توسعه ریشه در عمق به ترتیب 150 و 100 سانتیمتر بود. بنابراین بر اساس رابطه (۶) مدل ارائه شده شامل حداکثر ۶ پارامتر است.

جذب ریشه حداکثر به شدت تعرق پتانسیل (T_{pot}) بستگی دارد. توزیع مکانی و زمانی جذب ریشه حداکثر S_{max} از رابطه زیر محاسبه می‌گردد (۲۳).

$$S_{max}(r, z, t) = \frac{\pi R^2 \beta(r, z, t) T_{pot}}{2\pi \int_0^{z_m} \int_0^{r_m} r \beta(r, z, t) dr dz} \quad (7)$$

که در آن $S_{max}(r, z, t)$ بیانگر شدت جذب حداکثر $[L^3 L^{-3} T^{-1}]$ و R شعاع قسمت سایه انداز درخت $[L]$ می‌باشد.

بر اساس روش تخمین نیاز آبی گیاه *FAO*، تعرق واقعی بر اساس ضریب تعرق پتانسیل در فاکتور کاهش تعرق k_s بدست می‌آید (۱).

$$C \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rK(h) \frac{\partial h}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (K(h) \frac{\partial h}{\partial z}) - \frac{\partial K}{\partial z} - S(r, z, t, h) \quad (1)$$

که در این معادله C ظرفیت ویژه آب $[L^{-1}]$ ، h بار فشاری آب در خاک $[L]$ ، r جهت شعاعی و z جهت عمودی را نشان می‌دهد. همچنین t زمان $[T]$ و $S(r, z, t, h)$ نشان دهنده مقدار جذب آب توسط ریشه از خاک می‌باشد $[L^3 L^{-3} T^{-1}]$. منحنی مشخصه آب خاک استفاده شده در مدل توسط تابع توانی ون گنوختن (۲۶) تعریف گردید.

$$\theta = \theta_R + \frac{\theta_S - \theta_R}{(1 + (\alpha|h|)^n)^m} \quad m = 1 - \frac{1}{n} \quad (2)$$

که در آن θ_S درصد آب خاک اشباع $[L^3 L^{-3}]$ ، θ_R درصد آب خاک باقیمانده $[L^3 L^{-3}]$ ، α معکوس مقدار ورود هوا در حالت اشباع و n ، m پارامترهای وابسته به خاک که با استفاده از نرم افزار RETC بدست می‌آید، که مقادیر در جدول ۱ ارائه شده است. برای محاسبه هدایت هیدرولیکی غیر اشباع، از مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری شده (K_{fs}) توسط پرامتر گلف در مزرعه استفاده گردید. استفاده از هدایت هیدرولیکی اشباع مزرعه K_{fs} مناسب تر از هدایت هیدرولیکی مشخص خاک K_S است ($K_{fs} \leq K_S$). K_S عموماً بر اساس معادلات تجربی و K_{fs} به صورت طبیعی در صحرا با استفاده از دستگاه پرامترگلف و بر اساس مراحل نفوذ و با در نظر گرفتن هوای محبوس محاسبه می‌گردد. شرایط مزرعه نه تنها بر K_{fs} تأثیر می‌گذارد بلکه بر پارامترهای مؤثر بر هدایت هیدرولیکی غیر اشباع نیز مؤثر است. بنابراین برای محاسبه هدایت هیدرولیکی غیر اشباع خاک $K(h)$ از تابع گاردنر (۱۱) در این تحقیق استفاده شد.

$$K(h) = K_{fs} \exp[\phi(h - h_e)] \quad (3)$$

$$0 < \alpha < + \infty ; \quad h < h_e < 0$$

$$K(h) = K_{fs} ; \quad h \geq h_e \quad (4)$$

که ϕ پارامتر شیب که به ساختمان و بافت خاک وابسته است $[L^{-1}]$ ، h_e مکش آستانه ورود هوا به خاک $[L]$ می‌باشد. حوزه شبیه سازی جریان با طول $1/7$ و عمق 1 متر شبکه بندی شد که اندازه شبکه بندی 0.3 متر در جهت شعاعی و 0.2 متر در جهت عمق می‌باشد که بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده در مزرعه انتخاب گردید.

مدل دو بعدی جذب آب توسط ریشه درختان: مدل دو بعدی ارائه شده جذب آب توسط ریشه، بر اساس مدل ارائه شده توسط ورات (۲۹) بدست آمد. مدل ورات به صورت زیر می‌باشد.

معادلات می‌باشند، مشخص گردیدند (شکل ۲). معادله ۱ به صورت زیر گسسته و با استفاده از نرم افزار Matlab به صورت عددی حل شد.

$$C_{i,j}^n \frac{h_{i,j}^{n+1/2} - h_{i,j}^n}{\Delta t} = \frac{K_{i+1/2,j}^{n+1/2} (h_{i+1,j}^{n+1/2} - h_{i,j}^{n+1/2}) - K_{i-1/2,j}^{n+1/2} (h_{i,j}^{n+1/2} - h_{i-1,j}^{n+1/2})}{(\Delta r)^2} + \frac{K_{i,j}^{n+1/2} (h_{i+1,j}^{n+1/2} - h_{i-1,j}^{n+1/2})}{i\Delta r} + \frac{K_{i,j+1/2}^n (h_{i,j+1}^n - h_{i,j}^n) - K_{i,j-1/2}^n (h_{i,j}^n - h_{i,j-1}^n)}{(\Delta z)^2} - \frac{K_{i,j+1}^n - K_{i,j-1}^n}{2\Delta z} S_{i,j}^n \quad (۱۳)$$

شرایط اولیه و مرزی: برای شرایط مرزی سطح خاک، حل عددی نیاز به تخمین تعرق پتانسیل (T_{pot}) و تبخیر سطح خاک (E_s) دارد. داده‌های تبخیر و تعرق مرجع روزانه (ET_0) با استفاده از ایستگاه هواشناسی مجاور (در فاصله ۵۰۰ متری) بدست آمد. تبخیر و تعرق پتانسیل سیب با استفاده از ET_0 و ضریب گیاهی مشخص منطقه ($K_c=0.98$) مشخص گردید. تبخیر از سطح خاک با استفاده از اندازه‌گیری‌های متوالی رطوبت سنج (TDR) در ۲۰ سانتیمتر سطح خاک و خارج از محدوده ریشه ثبت شد. اندازه‌گیری‌های پروفیل دوبعدی رطوبت خاک بلافاصله بعد از آبیاری به عنوان شرایط اولیه برای شبیه سازی عددی وارد مدل گردید. در معادله ۱۴ شرایط اولیه و در معادلات ۱۵ الی ۱۷ شرایط مرزی منظور شده در حل معادلات ارائه گردیده‌اند. شبکه حل عددی معادلات حاکم در شکل ۲ نشان داده شده است.

$$h_{i,j}^0 = h_{0(i,j)} \quad (۱۴)$$

$$h_{2,j}^n - h_{1,j}^n = 0, \quad h_{i+1,j}^n - h_{i,j}^n = 0 \quad (۱۵)$$

$$h_{i,j+1}^n - h_{i,j}^n = \Delta z \quad (۱۶)$$

$$h_{i,2}^n - h_{i,1}^n = (1 + \frac{E_s}{K_{i+1/2}^n}) \Delta z \quad (۱۷)$$

با استفاده از روش تکرار، معادلات (۱۳) تا (۱۷) با برنامه نویسی عددی در نرم افزار Matlab نوشته و اجرا گردید.

نتایج

توزیع دو بعدی، در جهت شعاعی و عمقی تراکم ریشه به صورت میانگین با استفاده از نمونه‌های بدست آمده محاسبه شد. نتایج به صورت نمودار گرافیکی در شکل ۳ آورده شده است. همچنان که در شکل مشخص است تراکم ریشه با افزایش فاصله از درخت کاهش می‌یابد.

$$S_{ac}(r, z, t) = \frac{\pi R^2 \beta(r, z, t) k_s T_{pot}(t)}{2\pi \int_0^{z_m} \int_0^{r_m} r \beta(r, z, t) dr dz} \quad (۸)$$

که k_s فاکتور کاهش تعرق که به آب قابل دسترسی خاک بستگی دارد [-] به صورت زیر محاسبه می‌شود (۱).

$$k_s = \frac{TAW - D_r}{(1 - \Phi)TAW} \quad (۹)$$

که D_r عمق تخلیه آب در منطقه ریشه $[L]$ ، TAW آب قابل دسترسی خاک در منطقه ریشه $[L^3L^{-3}]$ ، Φ کسری از TAW که گیاه بدون تحمل تنش آب در خاک جذب می‌کند و بر اساس تحقیقات انجام شده قبلی برای درخت سیب ۰/۵ در نظر گرفته شده است (۱۳).

تعرق پتانسیل به صورت تعرق حداکثر در حالتی که گیاه در شرایط بدون تنش آب باشد تعریف می‌گردد.

$$T_{pot} = K_c ET_0 - E_s \quad (۱۰)$$

که K_c ضریب گیاهی [-]، ET_0 تبخیر و تعرق مرجع $[L^3T^{-1}]$ و E_s بیانگر تبخیر از سطح خاک می‌باشد $[L^3T^{-1}]$.

برای کاربرد $S(r, z, t)$ در معادله ریچاردز، ضریب اصلاحی بر اساس تابع تنش آب $\gamma(r, z, h)$ که به صورت زیر توسط ون‌گونختن (۲۷) ارائه گردید، در نظر گرفته می‌شود.

$$\gamma(r, z, h) = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{h}{h_{50}}\right)^p\right]} \quad (۱۱)$$

که h بار فشار آب در خاک در مکان مشخص از خاک (r, z) $[L]$ ، h_{50} بار فشار آب در خاک در حالتیکه جذب آب ریشه ۵۰ درصد کاهش یابد. $[L]$ ، P پارامتر برازش [-] که عموماً ۳ در نظر گرفته می‌شود (۲۷).

در نهایت جذب آب توسط ریشه در r و z مشخص را می‌توان بر اساس محاسبات معادلات (۶) تا (۱۲) بدست آورد.

$$S(r, z, t, h) = \gamma(r, z, h) S_{ac}(r, z, t) \quad (۱۲)$$

که در آن $S(r, z, t, h)$ نشان دهنده جذب ریشه در مکان مشخص از خاک برای بار فشاری (h) در زمان t می‌باشد. مقادیر حداکثر و حداقل پارامترهای جذب ریشه در جدول ۲ آورده شده است.

حل عددی دو بعدی معادلات حاکم حرکت آب

گسسته سازی معادلات: حل معادله در شبکه‌ای مستطیلی با گامهای مکانی $\Delta r \times \Delta z$ انجام گرفت. گره‌ها با استفاده از n, z, j ($j=1, 2, 3, \dots, J, J+1$) و ($i=1, 2, 3, \dots, I, I+1$) $n=1, 2, 3, \dots$ ($i=1, 2, 3, \dots, I, I+1$) که i و z دو بعد شبکه و n گام زمانی در حل عددی

بحث و نتیجه گیری

مدلهای یک بعدی ارائه شده توسط دانشمندان در شبیه سازی جذب و حرکت آب در خاک خصوصاً برای درختان از دقت کافی برخوردار نیستند (۱۰، ۱۶ و ۲۰). همچنین در بسیاری از تحقیقات انجام شده در انتقال آب و جذب ریشه، گیاهان یکساله مورد مطالعه قرار گرفته و تحقیقات بسیار محدودی در رابطه با درختان انجام گرفته است (۵، ۱۶، ۲۵ و ۳۲). در این تحقیق یک مدل جذب آب ریشه دو بعدی برای درخت سیب که دارای ساختاری متناسب با مدل یک بعدی ورات (۲۹) می باشد بسط داده شد. 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. در مدل‌های جدید جذب و تراکم ریشه مانند ورات (۲۸) و گانگ و همکاران (۱۳) تاثیر مشخصات خاک و ساختمان خاک وارد نشده است. که بر اساس تحقیقات انجام شده مشخصات خاک در نحوه توزیع و جذب آب توسط ریشه اثر بسیاری دارد. در مدل جذب آب ارائه شده بخصوص در مدل توزیع مکانی ریشه به مشخصات خاک توجه خاصی شد. در این مدل ساختمان خاک مستقیماً به صورت ضریب C_{ir} تاثیر داده شد (جدول ۲). این ضریب بر اساس داده‌های بدست آمده توسط پنترومتر در مزرعه کالبیره گردید. مدل برای حرکت آب و جذب توسط ریشه در خاک توسط اندازه‌گیری‌های صحرائی در باغ سیب تأیید شد. نتایج این تحقیق با نتایج بدست آمده از مدل گانگ و همکاران (۱۳) برای عمق جذب آب توسط ریشه بسیار متفاوت می باشد. به این صورت که میزان جذب حداکثر، در عمق صفر تا ۴۵ سانتیمتر بدست آمد که در تحقیق گانگ و همکاران (۱۳) حداکثر جذب در عمق ۴۰ تا ۱۰۰ سانتیمتر اتفاق می افتد. برای درخت سیب دستگاه رطوبت سنج TDR همراه با لوله‌های مخصوص در اعماق خاک برای اندازه‌گیری درصد رطوبت حجمی خاک استفاده گردید. منحنی مشخصه خاک بر اساس دستگاه صفحات فشار بدست آمد و اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در مزرعه با استفاده از دستگاه پرماتر گلف محاسبه شد و بر اساس نتایج رابطه هدایت هیدرولیکی غیر اشباع ارائه گردید. مدل ماکروسکوپیکی مناسبی برای تخمین تراکم ریشه در اطراف درخت سیب در مزرعه برای شبیه سازی حرکت و جذب آب در خاک پیشنهاد گردید. مقایسه داده‌های مشاهداتی با داده‌های خروجی حاصل از مدل تلفیقی که بر اساس کاربرد مدل ماکروسکوپیکی جذب آب توسط ریشه در مدل حل عددی معادلات حاکم بسط داده شد، همبستگی خوبی را نشان می دهد.

مدل توسعه داده شده جذب ریشه بسیار انعطاف پذیر بوده و به صورت متغیر مکانی و زمانی جذب آب را شبیه سازی می نماید. با استفاده از پارامترهای بهینه شده معادلات جریان و جذب آب در خاک (جدول ۱ و ۲)، نتایج شبیه سازی بدست آمده در دوره آزمایش همبستگی خوبی با داده‌های اندازه‌گیری دارند. شبیه سازی درصد آب خاک حاصل از مدل دو بعدی و مقادیر اندازه‌گیری شده در مزرعه بصورت گرافیکی در شکل ۴ برای فواصل شعاعی انتخاب شده ارائه گردیده است. شکل ۴ همخوانی خوبی را بین نتایج مشاهداتی و شبیه سازی نشان می دهد. در این شکل‌ها مشخص شده است که بیشتر جذب و تغییرات رطوبت در خاک‌رخ تا عمق ۴۰ سانتیمتر انجام می پذیرد. که بیانگر جذب حداکثر در این منطقه است. بر اساس شکل ۴ می توان نتیجه گرفت که هر چه فاصله از تنه درخت در جهت شعاعی افزایش یابد مقدار تغییر رطوبت و جذب کاهش می یابد.

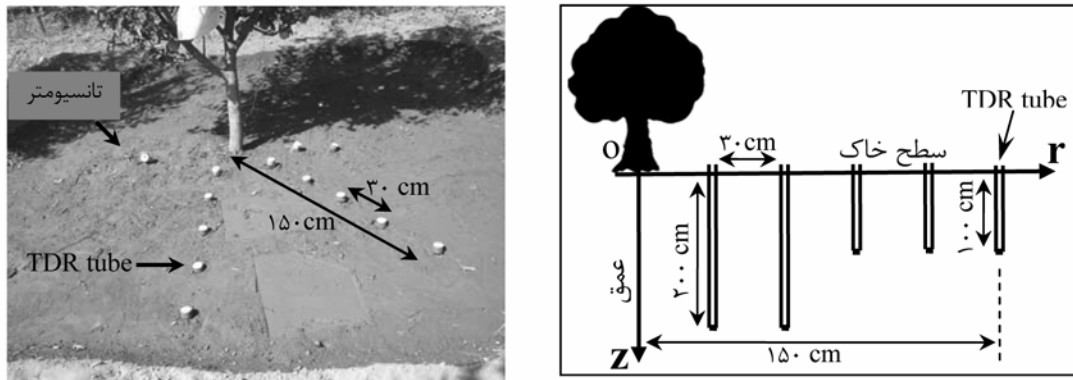
در شکل ۵ تغییرات مکانی رطوبت در خاک‌رخ بعد از آبیاری ارائه گردیده است. که در این شکل نتایج شبیه سازی و مشاهداتی در کنار هم ارائه شده است. نتایج مربوط به ابتدا و انتهای دوره آبیاری می باشد. نتایج همبستگی خوب بین مدل شبیه سازی با داده‌های اندازه‌گیری صحرائی را نشان می دهد. بر اساس شکل ۵ درصد رطوبت خاک در بیشتر نقاط خاک بیشتر از ۱۲ درصد حجمی می باشد. بر اساس تغییرات رطوبت در دو زمان مشخص ارائه شده، جذب ریشه بیشتر در شعاع صفر تا ۶۰ سانتیمتر اتفاق افتاده است. در نهایت نقشه دو بعدی جذب در بازه زمانی مشخص در شکل ۶ ارائه شده است. در شکل ۶ مقدار جذب شبیه سازی شده و محاسبه شده بر اساس تغییرات درصد رطوبت حجمی ارائه گردیده است. بر اساس این شکل مقدار جذب، بیشتر در عمق ۵ تا ۴۵ سانتیمتری و در فاصله شعاعی صفر تا ۶۰ سانتیمتری از درخت اتفاق افتاده است. که حداکثر میزان جذب $0.11 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ بدست آمد. در شکل‌های ارائه شده مشخص است که در مدل شبیه سازی دو بعدی مقدار جذب نسبت به اندازه‌گیری کمی بیشتر می باشد. شکل ۷ درصد جذب آب برای لایه‌های مختلف خاک و فاصله‌های مختلف از درخت را بین ۲۹ مرداد تا ۱۲ شهریور نشان می دهد. بر اساس این شکل ۶۰ درصد جذب آب در عمق ۲۰ تا ۴۰ سانتیمتری عمق خاک اتفاق افتاده است که بیشترین تراکم ریشه نیز در این بخش می باشد. در جهت شعاعی نیز درصد جذب بررسی گردید که در فاصله ۳۰ تا ۶۰ سانتیمتری حداکثر جذب بدست آمده است که حدوداً ۳۰ درصد از کل جذب را در بر می گیرد. در نهایت مقایسه نکوئی برازش بین داده‌های شبیه سازی و مشاهداتی برای فواصل مختلف از تنه درخت در شکل ۸ ارائه گردیده است ($R^2 = 0.97$).

جدول ۱- پارامترهای مشخصات هیدرولیکی خاک

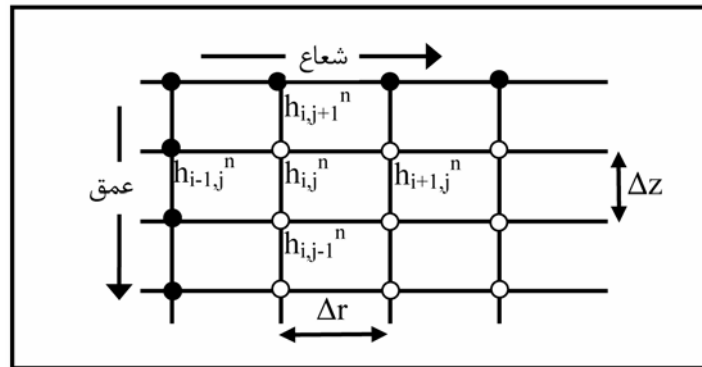
منحنی مشخصه خاک						عمق خاک (cm)
$K_s(\text{cm/day})$	$l(-)$	$n(-)$	$\alpha(1/\text{cm})$	$\theta_s(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	$\theta_R(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	
۱۰/۰۰	۰/۵۰	۱/۳۶	۰/۰۱	۰/۴۶	۰/۰۹	۰-۱۰۰
۱۲/۰۰	۰/۵۰	۱/۴۹	۰/۰۱	۰/۴۶	۰/۰۹	۵۰-۱۰۰

جدول ۲- پارامترهای مدل جذب آب توسط ریشه، استفاده شده در مدل عددی

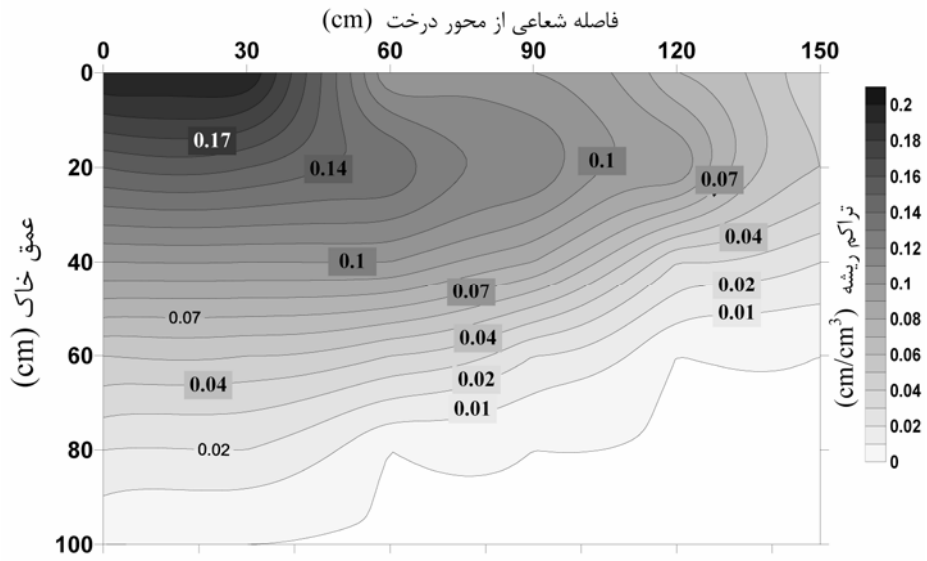
پارامترهای مدل جذب ریشه									
$h_{50}(\text{cm})$	$\Phi(-)$	$Dr(\text{cm})$	$z_m(\text{cm})$	$r_m(\text{cm})$	$\tau(\text{cm/cm}^3)$	$\rho(\text{cm/cm}^3)$	$C_{ir}(-)$	$\beta_0(\text{cm/cm}^3)$	
۱۰/۰۰	۲/۰۰	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۱۰	-۰/۲۰	۰/۲۰	۰/۰۲	۰/۱۸	حداقل
۵۰۰/۰۰	۳/۰۰	۲/۰۰	۱/۲۰	۲/۰۰	-۴/۰۰	۴/۰۰	۰/۸۰	۰/۸۸	حداکثر



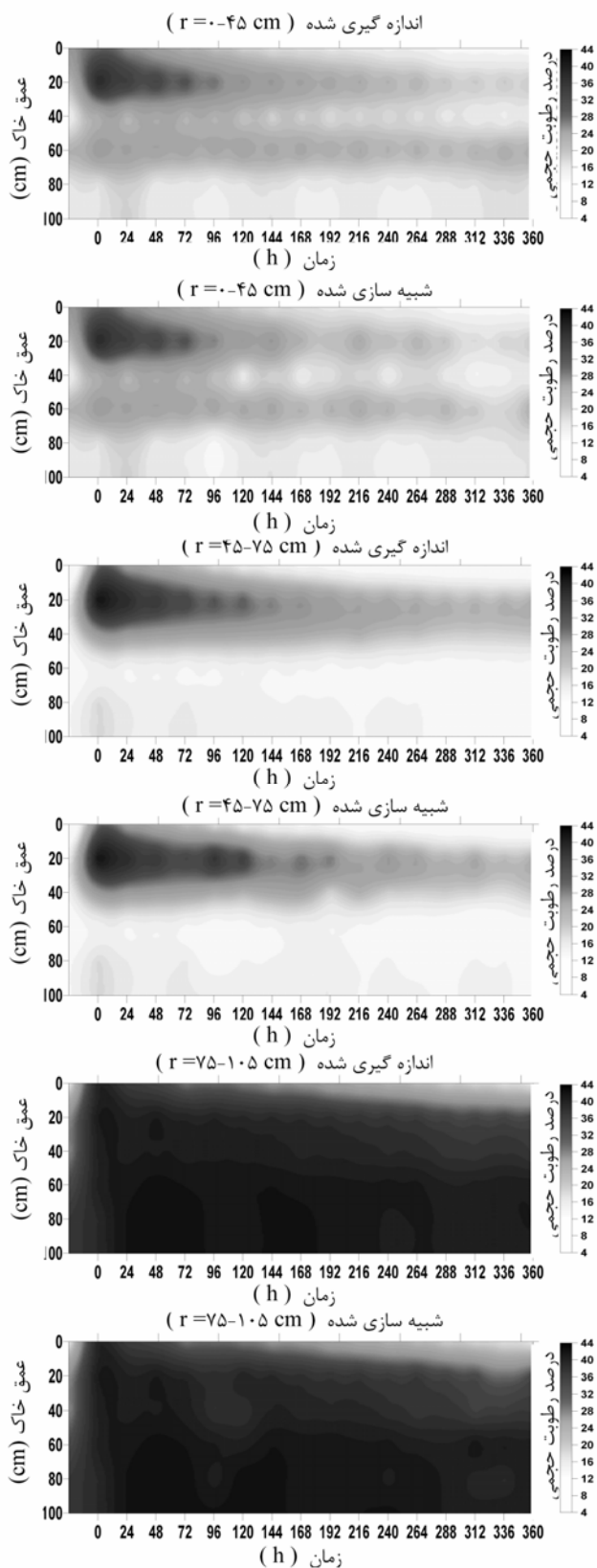
شکل ۱- نمایش محل انجام آزمایش ها و نقشه نصب لوله های رطوبت سنج



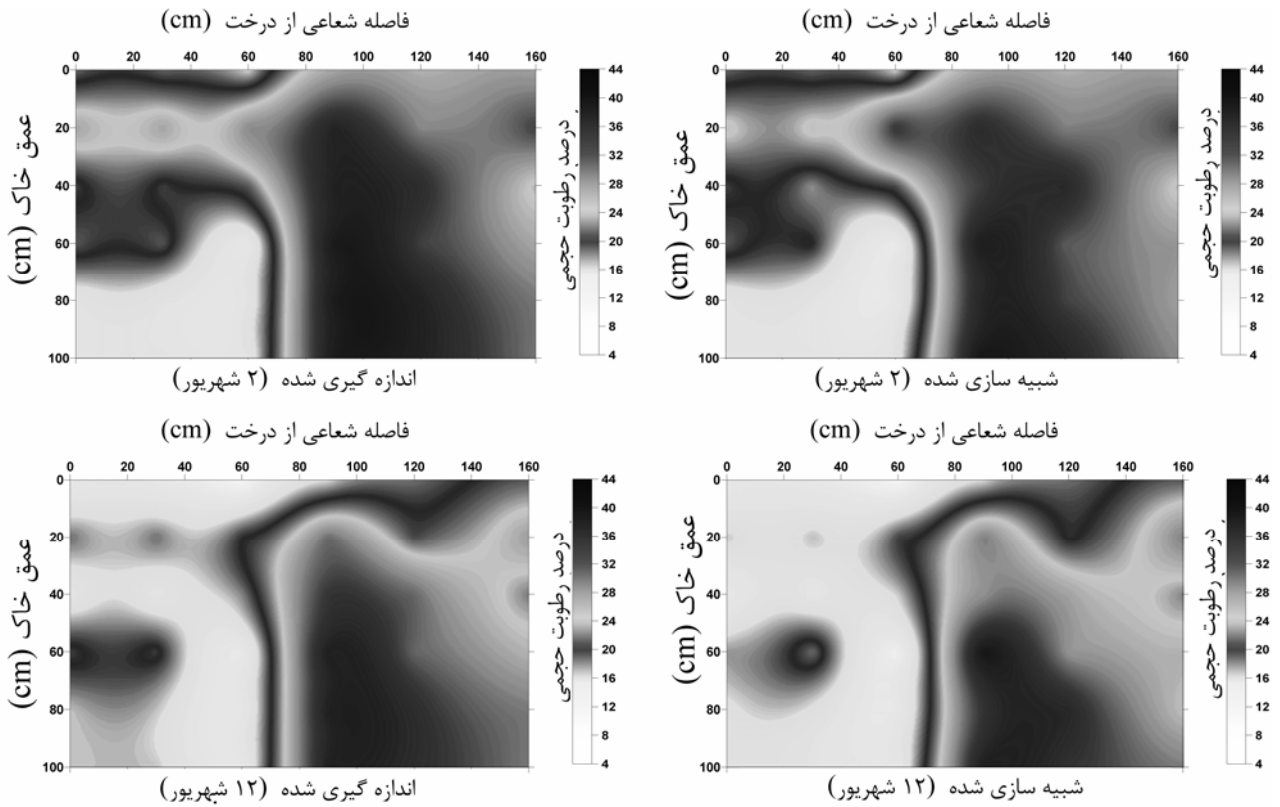
شکل ۲- شبکه بندی در حل عددی معادلات حاکم، گره های مشکی شرایط مرزی و گره های سفید نقاط مجهول



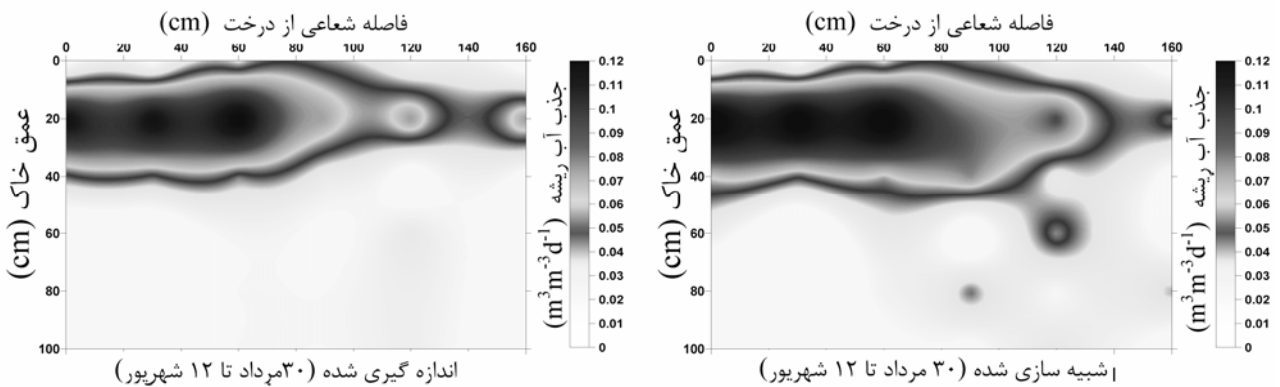
شکل ۳- توزیع تراکم ریشه اندازه‌گیری شده در جهت شعاعی از محور ریشه و عمق از سطح خاک



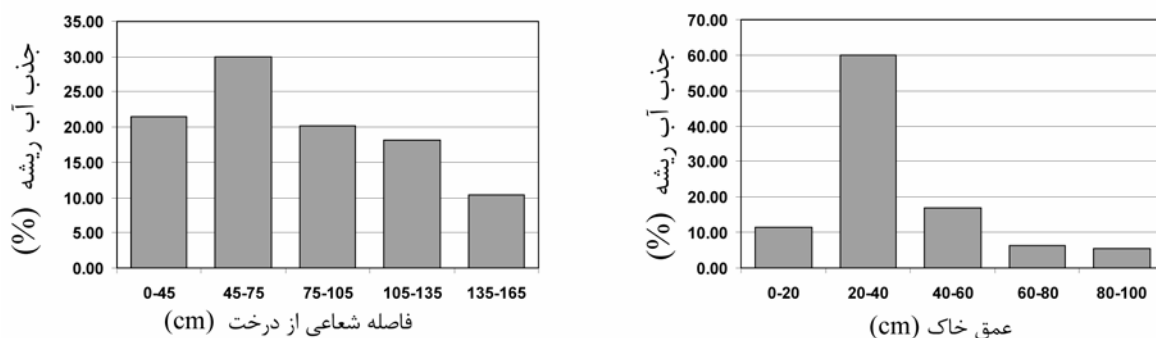
شکل ۴ - مقایسه بین داده های اندازه گیری شده و شبیه سازی شده درصد رطوبت خاک برای فواصل مشخص از درخت در طول ۳۶۰ ساعت پس از آبیاری



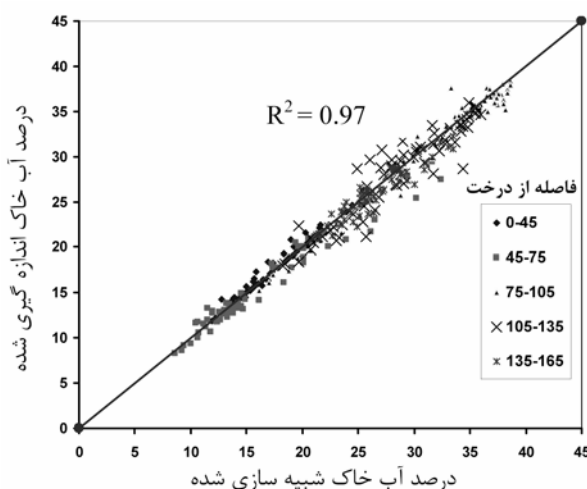
شکل ۵- طرح دو بعدی درصد رطوبت حجمی اندازه گیری شده و شبیه سازی شده در دو زمان



شکل ۶- جذب آب توسط ریشه، اندازه گیری شده و شبیه سازی شده در طول دوره آزمایش ($m^3 m^{-3} d^{-1}$)



شکل ۷- درصد جذب آب توسط ریشه در فاصله شعاعی از درخت و عمقهای مختلف خاک



شکل ۸- نکوئی برازش مقادیر اندازه گیری شده و شبیه سازی شده رطوبت خاک دو بعدی در اطراف درخت سیب

منابع

- Allen R., Pereira L.S., 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.
- Canadell J.R.B., Jackson J.R., Ehleringer H.A., Mooney O.E., and Schulze E.D. 1996. Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. Oecologia 108:583-595.
- Clausnitzer V., and Hopmans J.W. 1994. Simultaneous modeling of transient three-dimensional root growth and soil water flow. Plant Soil 164:299-314.
- Coelho F.E., and Or D. 1996. A parametric model for two dimensional water uptake intensity by corn roots under drip irrigation. Soil Sci. Soc. Am. J. 60: 1039-1049.
- Coelho E.F., and Or D. 1999. Root distribution and water uptake patterns of corn under surface and subsurface drip irrigation. Plant and Soil 206: 123-136.
- Corapcioglu M.Y. 1992. Modeling plant uptake and bioremediation of semi-volatile hydrocarbon compounds , Soil Sci. Soc. Am. J.,46: 704-709.
- Cushman H.J. 1982. Nutrient transport inside and outside the root rhizosphere: theory. Soil Sci. Soc. Am. J., 46: 704-709.
- Feddes R.A., and Rijtema P.E. 1972. Water withdrawal by plant roots. J. Hydro., Amstredam, The Netherland, 17: 33-59.
- Feddes R.A., 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.
- 11- Gardner W.R. 1964. Relation of root distribution to water uptake and availability. *Agron. J.* 56: 41–56.
 - 12- Gardner W.R. 1991. Modeling water uptake by roots. *Irrigation Sci.* 12: 109–114.
 - 13- Gong D., Kang Sh., Zhang Lu., 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.
 - 14- Green S.R., and Clothier B.E. 1998. The root zone dynamics of water uptake by a mature apple tree. *Plant Soil* 206 (1): 61–77.
 - 15- Hupet F., Lambot S., Feddes R.A., Van Dam J.C., and Vanclooster M. 2003. Estimation of root water uptake parameters by inverse modeling with soil water content data. *Water Resour. Res.* 39(11): 1312–1339.
 - 16- Jarvis N.J. 1989. A simple empirical model of root uptake. *J. Hydrol.* 107: 57–72.
 - 17- Jones H.G., and Tardieu F. 1998. Modelling water relations of horticultural crops: a review. *Sci. Hortic.* 74: 21–46.
 - 18- Kang S.Z., Liu X.M., and Xiong Y.Z. 1994. *Theory of Water Transport in the Soil-plant Atmosphere Continuum and its Application.* China Water Resources and Hydro-power Publication House, Beijing, pp. 147–149 (in Chinese).
 - 19- Molz F.J. 1976. Water transport in soil-root system: transient analysis. *Water Resour. Res.*, 12: 805-808.
 - 20- Molz F.J. 1981. Models of water transport in the soil-plant system: A review. *Water Resour. Res.* 17: 1245–1260.
 - 21- Musters P.A.D., and Bouten W. 1999. Assessing rooting depth of an Austrian Pine stand by inverse modeling soil water content maps. *Water Resour. Res.* 35:3041-3048.
 - 22- Raats P.A. 1976. Analytical solutions of simplified flow equation. *Tras. ASAE*, 19: 683-689.
 - 23- Simunek J., Sejna M., and Van Genuchten M.Th. 1999. The HYDRUS-2D software package for simulating two-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variable saturated media. Version 2.0, IGWMC-TPS-53, International GroundWater Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, CO.
 - 24- Simunek J., Sejna M., and Van Genuchten M.Th. 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.
 - 25- Somma F., Hopmans J.W., 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.
 - 26- Van Genuchten M.Th. 1980. A close-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892–898.
 - 27- Van Genuchten M.Th., and Gupta S.K. 1993. A reassessment of the crop tolerance response function. *Indian Soc. Soil Sci.* 4:730–737.
 - 28- Vrugt J.A., Van Wijk M.T., Hopmans J.W., and Simunek J. 2001a. One-, two-, and three-dimensional root water uptake functions for transient modeling. *Water Resour. Res.* 37: 2457–2470.
 - 29- Vrugt J.A., Hopmans J.W., and Simunek J. 2001b. Calibration of a two-dimensional root water uptake model. *Soil Sc. Soc. Am. J.* 65: 1027–1037.
 - 30- Whisler F.D. Klute A. and Millington R.J. 1968. Analysis of steady state evapotranspiration from a soil column. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 32:167–174.
 - 31- Xue Q., Zhu Z., Musick J.T., Stewart B.A., and Dusek D.A. 2003. Root growth and water uptake in winter wheat under deficit irrigation. *Plant and Soil* 257: 151–161.
 - 32- Zuo Q., and Zhang R. 2002. Estimating root-water-uptake using an inverse method. *Soil Sci.* 169(9): 561–571 .

Investigation of 2D Water Flow in Soil with Root Water Uptake Based on Solution of Governing Equation and Field Studies

S. Besharat^{1*} - A. H. Nazemi² - A. Ashraf Sadraddini³ - S. Shahmorad⁴

Abstract

Soil water movement with root water uptake is a key process transport of water and chemicals in the soil-plant system. In this study, two-dimensional root water uptake model was developed, which can be incorporated into numerical flow models. Root water uptake model includes root density distribution function, potential transpiration and soil water stress-modified factor. Root water uptake parameters were optimized, minimizing the residuals between simulated and measured water content data. Tube-time domain reflectometry (TDR) was used to measure soil volumetric water content around a surface-irrigated apple tree at 12 locations. The measured data are compared against the outputs from the numerical simulation of the soil water dynamics that uses Richards' equation. It shows that 30% of water was drawn from the radial distance of 30-60 cm and average water uptake from the soil layer of 20-40 cm accounts for 60% of the total water uptake. Simulated and measured water contents were in excellent agreement ($R^2=0.97$). Potentially the numerical model is a useful tool to various problems related to flow transport with plant water uptake in variably saturated soils.

Keywords: Numerical model, Richards' equation, Root water uptake, Unsaturated, Water flow

1- Assist. Prof., Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Urmia
(*-Corresponding Author Email:sina323@yahoo.com)

2,3- Assoc. Prof., Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

4- Assoc. Prof., Department of mathematics, Faculty of mathematics, University of Tabriz