

## اندازه‌گیری و شبیه‌سازی دینامیکی حرکت آب در خاک با تأکید بر جذب ریشه

حبیب زارع<sup>1</sup>، سینا بشارت<sup>2\*</sup>

تاریخ دریافت: 1394/11/18 تاریخ پذیرش: 1395/3/5

### چکیده

سازوکار جذب آب توسط ریشه نقش مهمی را در مدیریت آب مورد نیاز کشاورزی ایفا می‌کند. هدف از انجام این مطالعه، بررسی توزیع رطوبت و جذب توسط ریشه در خاک پیرامون یک درخت سیب می‌باشد. جهت پایش رطوبت پیرامون درخت تحت آبیاری سطحی از جدیدترین دستگاه TDR از نوع Profile Probe استفاده شد. لذا در طرفین تنه درخت، 10 لوله ویژه به طول 1 متر و به فاصله 30 سانتی‌متر از هم در خاک نصب گردید و به منظور شبیه‌سازی رطوبت از مدل HYDRUS-2D استفاده شد. نتایج نشان داد بیش‌ترین تغییرات رطوبت در عمق صفر تا 40 سانتی‌متری اتفاق افتاده است و این تغییرات رطوبت در لایه‌های سطحی بیش‌تر از لایه‌های زیرین می‌باشد. مقدار جذب آب توسط ریشه نیز بیش‌تر در عمق 0-40 سانتی‌متری و در فاصله شعاعی 0-60 سانتی‌متری اتفاق افتاد. میزان جذب با افزایش فاصله شعاعی از درخت کاسته شده است. مدل HYDRUS نیز در تمام نقاط به خوبی توانسته است مقادیر رطوبت را شبیه‌سازی کند به جز در برخی از نقاط مربوط به عمق‌های 40 و 60 سانتی‌متری به دلیل تراکم زیاد خاک، برآورد مناسبی از رطوبت خاک نداشته است. با توجه به نتایج می‌توان نتیجه گرفت که با استفاده از مدل‌ها و اندازه‌گیری‌های دقیق می‌توان برنامه‌ریزی دقیق‌تری در رابطه با مدیریت آب آبیاری انجام داد.

واژه‌های کلیدی: رطوبت خاک، رطوبت سنج، مشخصه هیدرولیکی خاک، نرم‌افزار HYDRUS-2D

### مقدمه

روش حل عددی معادله ریچاردز که شامل پارامتر جذب آب است برآورد کرده‌اند. ترم جذب آب توسط ریشه،  $k_s$  به طور کلی تابعی از ارتفاع فشار آب خاک، ارتفاع فشار اسمزی، خصوصیات ریشه و شرایط آب و هوایی مانند نیاز تبخیری می‌باشد (Skaggs et al., 2006). مدل‌های جذب آب براساس چگونگی به کار بردن ترم جذب آب در معادله عمومی جریان به دو گروه اصلی تقسیم می‌شوند، که این طبقه‌بندی به صورت مدل‌های میکروسکوپی و مدل‌های ماکروسکوپی می‌باشند. در مدل‌های میکروسکوپی، جریان آب به طرف یک ریشه (تک ریشه) را مورد رسیدگی قرار می‌دهند و در مدل‌های ماکروسکوپی برداشت آب به وسیله کل ناحیه ریشه را بدون در نظر گرفتن تأثیر تک تک ریشه‌ها بررسی می‌کنند (Nimah 1973; Hanks and Green et al., 2006). مدل‌های میکروسکوپی عمدتاً براساس کارهای گاردنر (1960) هستند. که در آن، ریشه به عنوان یک استوانه متراکم با طول طولانی فرض شده است و توانایی جذب آب در سراسر ریشه به صورت یکنواخت صورت می‌گیرد. حرکت آب به سمت ریشه فقط به صورت شعاعی صورت می‌گیرد و درصد رطوبت اولیه خاک مقدار یکسانی دارد (پتانسیل ماتریک اولیه در حجم خاک یکسان است). مزیت راه حل گاردنر تحلیلی بودن آن است، اما تعیین پارامترهای آن بسیار دشوار است (Vrugt et al.,

جذب آب توسط ریشه یک فرآیند مهم در چرخه هیدرولوژیکی و جزئی اساسی در بیان آبی در مزرعه است (Gong et al., 2006). اهمیت این فرآیند در سیستم اکولوژیکی، تنها محدود به تأمین آب مورد نیاز گیاه نمی‌شود بلکه نقش آن در تغییرات بیولوژیکی و فیزیکی خاک به‌ویژه در منطقه ریشه (ریزوسفر) بسیار مهم است (Hinsinger 2005; et al., 2006: Gregory). جذب آب فرآیندی پیچیده است که توسط خصوصیات فیزیولوژیکی خاک و گیاه کنترل می‌شود (Qiao et al., 2010). همه این موارد سبب می‌گردد تا این پدیده به دقت مورد مطالعه قرار گیرد. به دلیل پیچیدگی‌های جذب ریشه، برای بررسی این فرآیند، به یک ابزار کمی نیاز است (Gong et al., 2006). کاردون و لیتی در تحقیقی پیشینه مدل‌های ریاضی شبیه‌سازی حرکت آب و نمک به همراه جذب ریشه را بررسی کردند (Cardon and Letey., 1992). تقریباً همه مدل‌ها، جریان آب را با

1- دانش آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

2- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

\* - نویسنده مسئول: (Email: sina323@yahoo.com)

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  $0/011$  تا  $0/045$  و  $0/57$  تا  $0/99$  به دست آمد (Kandelous and Simunek 2010). در نتیجه همبستگی خوبی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی مشاهده شد. آریت و همکاران 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 (Arbat et al., 2013). گونزالز و همکاران جهت شبیه‌سازی مقدار رطوبت خاک پیرامون ریشه گندم در دو سال زراعی تحت 4 تیمار آبیاری از نرم‌افزار HYDRUS-1D 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  $0/014$  -  $0/025$  و  $0/92$  -  $0/97$  بود که نشان از موفقیت مدل در برآورد رطوبت خاک داشت (González et al., 2015). بشارت و همکاران (1390) مدل جدید SWMRUM را جهت شبیه‌سازی حرکت آب در خاک و جذب ریشه ارائه کردند. مدل دو بعدی جذب آب توسط ریشه براساس تابع توزیع تراکم ریشه، تعلق پتانسیل و فاکتور تصحیح تنش آب بسط داده شد. در مدل بشارت و همکاران، تأثیر پارامترهای ریشه و تراکم خاک به طور مستقیم آورده شده است که در مدل وورات و همکاران (2001) و مدل‌های جذب ریشه محققین دیگر در نظر گرفته نشده است.

در برخی تحقیقات از مدل HYDRUS در شبیه‌سازی خیس-شدگی برای آبیاری قطره‌ای نیز استفاده شده است. در این تحقیقات از محاسبات مشخصات هیدرولیکی خاک جهت بالا بردن دقت مدل استفاده شده است. گیاه جز پارامترهای اصلی در مدل محققین بوده است (میرزایی و همکاران، 1384؛ Kandelous et al., 2011).

بر اساس مطالعات انجام شده تحقیقات محدودی در زمینه انتقال آب و جذب ریشه به صورت دو بعدی در مکان و زمان انجام گرفته است. هدف از این تحقیق، مطالعه توزیع رطوبت و جذب آب توسط ریشه در خاک پیرامون یک درخت سیب می‌باشد که بر اساس مطالعات میدانی و کالیبراسیون نرم‌افزار HYDRUS انجام گرفته است.

## مواد و روش‌ها

### اندازه‌گیری‌های میدانی

آزمایش‌های میدانی در باغ سیب دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه، در 54 روز و 6 دور آبیاری طراحی و اجرا گردید. ردیف‌های درختان به صورت شرقی - غربی بوده و محدوده طرح شامل قطعه

2001b). هم‌چنین به دلیل اینکه اندازه‌گیری پتانسیل آبی ریشه دشوار بوده و از یک ریشه به ریشه دیگر متفاوت می‌باشد. لذا در اکثر مدل‌ها به طور غیرمستقیم توسط مدل‌های تجربی بیان می‌شود (Wu et al., 1999; Vrugt et al., 2001a). لذا خروجی این مدل‌ها اکثراً به صورت نظری بوده و با شرایط عملی سازگاری ندارند. با این حال، این مدل‌ها به شکل قابل توجهی به درک فرآیند جذب آب توسط ریشه کمک کرده است. گروه دوم از مدل‌ها، مدل‌های ماکروسکوپی هستند که جذب آب توسط گیاه را بر مبنای پاسخ گیاه به پتانسیل توصیف می‌کنند (Cardon and Letey., 1992). در این مدل‌ها، مقدار جذب ریشه به صورت تابعی از مقدار آب جذب شده توسط تعداد ریشه‌های موجود در واحد حجم خاک بیان می‌شود (Feddes et al., 1974) و به جای مورفولوژی ریشه در واحد حجم، فرض بر این است که به طول ریشه بستگی دارد. مزیت مدل‌های ماکروسکوپی این است که بدون داشتن اطلاع از ساختار ریشه، می‌توان مقدار جذب را مستقیماً و به صورت مکانی و زمانی به دست آورد. نتایج مدل‌های ماکروسکوپی در شبیه‌سازی حرکت آب در خاک برای انواع گیاهان موفقیت‌آمیز بوده است (Biondini., 2001; Zuo et al., 2006). شکل عمومی این مدل‌ها به صورت زیر است (Feddes et al., 1978).

$$S = \alpha(h) \cdot S_{max} \alpha(h) \cdot \frac{I_p}{Z} \quad (1)$$

که در آن،  $\alpha(h)$  تابع بدون بعد عکس العمل تنش (تابع کاهش جذب) که برابر نسبت بین جذب واقعی (S) و حداکثر جذب ( $S_{max}$ ) می‌باشد.  $h[L]$  پتانسیل ماتریک،  $I_p$  تعلق بالقوه و  $Z$  عمق توسعه ریشه است. پارامتر  $\alpha$  در برخی مقالات، تابع کاهش جذب هم نامیده می‌شود (شهیدی، 1389). بدیهی است که مجموع S‌های مربوط به نواحی مختلف رشد ریشه برابر با تعلق واقعی است. فدس و همکاران (1978) و ون‌گنوختن (1987) روابطی را برای تابع کاهش جذب با مکش خاک به دست آوردند که هر کدام دارای نقاط قوت و ضعف هستند (Homaei., 1999). دانشمندان بسیاری الگوی پخش آب در خاک را به صورت عددی در آبیاری زیرسطحی و سطحی شبیه‌سازی نموده‌اند (Lazarovitch et al., 2007). یکی از مدل‌های ارائه شده در رابطه با حرکت آب و جذب ریشه، مدل HYDRUS می‌باشد. در مطالعه‌ای که سیال و اسکگز (2009) برای شبیه‌سازی تغییرات رطوبت خاک در آبیاری سطحی با استفاده از 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 (Siyal and Skaggs., 2009). کندلوس و سیمونک مدل HYDRUS-2D را برای ارزیابی توزیع رطوبت اطراف قطره‌چکان در یک آبیاری قطره‌ای زیر سطحی در یک خاک لوم

جهت تعیین نیاز آبی درخت سیب، و با در نظر گرفتن ضریب گیاهی مشخص منطقه، از داده‌های هواشناسی ایستگاه ارومیه استفاده گردید. این داده‌ها شامل تابش روزانه، دمای روزانه، رطوبت هوا، بارش و سرعت باد در ارتفاع 2 متری از سطح زمین بود. بافت خاک رسی بود که به روش هیدرومتری در آزمایشگاه به دست آمد. آبیاری درختان نیز به صورت غرقابی می‌باشد.

### مدل HYDRUS-2D

حرکت آب در خاک همراه با جذب ریشه براساس اطلاعات میدانی با استفاده از مدل HYDRUS دو بعدی (Simunek et al., 2006) شبیه‌سازی شد. معادله حاکم برای جریان آب در خاک معادله دو بعدی ریچاردز می‌باشد. مشخصات هیدرولیکی خاک با استفاده از رابطه ون گنوختن - معلم به دست آمد (Van Genuchten., 1980)

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |ah|)^m}, & h < 0 \\ \theta_s, & h \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$K(h) = K_s S_s^L [1 - (1 - S_s^{\frac{1}{m}})^m]^2 \quad (3)$$

$$S_s = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, \quad m = 1 - \frac{1}{n} \quad (4)$$

که در آن،  $\theta_s$  [-] درصد آب خاک اشباع،  $\theta_r$  [-] درصد آب خاک باقی‌مانده،  $K_s [LT^{-1}]$  هدایت هیدرولیکی اشباع،  $\alpha [L^{-1}]$  معکوس مقدار ورود هوا در حالت اشباع و  $n$ ،  $m$  و  $L$  پارامترهای وابسته به خاک و بی بعد هستند که با استفاده از برآزش بر معادله مورد نظر به دست می‌آیند. در نرم‌افزار HYDRUS دو بعدی از رابطه دو بعدی وورات و همکاران (2001) برای جذب آب توسط ریشه استفاده شده است (Vrugt et al., 2001a)

$$\beta(r, z) = a \cdot \exp[-b] \quad (5)$$

$$a = \left(1 - \frac{z}{z_m}\right) \left(1 - \frac{r}{r_m}\right) \quad (6)$$

$$b = \frac{p_z}{z_m} |z^* - z| + \frac{p_r}{r_m} |r^* - r| \quad (7)$$

که در آن،  $\beta(r, z)$  توزیع بدون بعد ریشه در دو جهت شعاع و عمق است،  $z_m [L]$  حداکثر عمق ریشه دوانی،  $r_m [L]$  حداکثر شعاع ریشه دوانی ریشه و  $p_r [-]$  و  $p_z [-]$  پارامترهای تجربی هستند. از آنجایی که مقدار پتانسیل جذب تجمعی باید با تعرق پتانسیل برابر باشد، توزیع جذب ریشه نرمالیزه شده،  $S_m [T-1]$  با عمق برابر است (Simunek et al., 2006)

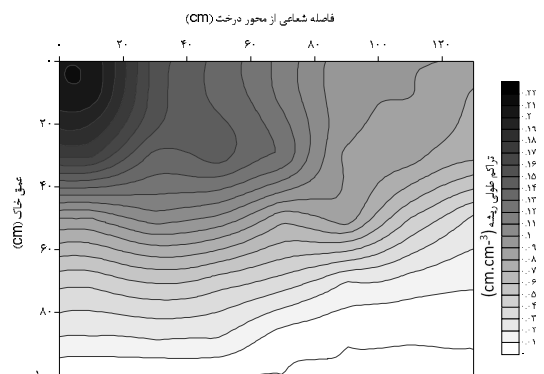
$$S_m(r, z) = \frac{\pi R^2 \beta(r, z, t) T_{pot}}{2\pi \int_0^{z_m} \int_0^{r_m} r \beta(r, z, t) dr dz} \quad (8)$$

که در آن،  $T_{pot} [LT^{-1}]$  مقدار تعرق پتانسیل و  $R$  اندازه دامنه

زمینی محصور شده به ابعاد  $3 \times 3$  متر در اطراف یک درخت سیب بود. به دلیل رسی بودن خاک اطراف درخت، ضریب آبیاری خاک کم برآورد شد. در نتیجه، از مقدار نفوذ عمقی صرف نظر شد. در این مطالعه، داده‌های دوره اول آبیاری به طول 9 روز مورد بررسی قرار گرفته است.

جهت اندازه‌گیری درصد رطوبت حجمی خاک از دستگاه TDR نوع Profile Probe استفاده شد. در خصوص کالیبراسیون دستگاه می‌توان چنین بیان نمود که با دستگاه رطوبت سنج Profile Probe در این مزرعه کارهای مختلفی انجام شده است که قبلاً این دستگاه برای خاک مورد نظر کالیبره و تایید شده است. قبل از شروع آزمایشات نیز در نقاط مختلف خاک و رطوبت‌های مختلف نمونه‌های واقعی تهیه و دقت دستگاه تایید گردید. جهت استفاده از این دستگاه، 10 لوله مخصوص دستگاه به طول 1 متر در دو طرف شمالی و جنوبی تنه درخت و به فاصله 30 سانتی‌متر از هم نصب گردید. این دستگاه طوری طراحی شده است که رطوبت حجمی خاک را در فاصله شعاعی 15 سانتی‌متری محل نصب لوله و در عمق‌های 10، 20، 30، 40، 60 و 100 سانتی‌متری ثبت می‌کند. رطوبت خاک در دو روز ابتدایی، هر 2 ساعت یکبار ثبت می‌شد. در دو روز بعدی، هر 4 ساعت یکبار و در بقیه روزها به دلیل تغییرات کم رطوبت، روزانه ثبت می‌شد.

توزیع تراکم ریشه نسبت به عمق و فاصله شعاعی از تنه درخت متفاوت بوده و یکی از پارامترهای مهم در مدل‌های دینامیکی و هیدرولیکی خاک محسوب می‌شود که باید به دقت به دست آید. لذا پروفیلی به عمق 1 متر در کنار تنه درخت حفر و نمونه‌هایی از خاک برداشت شد. ریشه‌های هر نمونه با دقت شسته شده و تراکم طولی ریشه هر نمونه برحسب واحد طول ریشه در واحد حجم نمونه خاک ( $cm.cm^{-3}$ ) به دست آمد (شکل 1). شکل 1 نشان می‌دهد که توزیع ریشه با افزایش فاصله از درخت، کاهش می‌یابد. پس از فاصله 80 سانتی‌متر و عمق 60 سانتی‌متر، تراکم ریشه کاهش چشم‌گیری داشته است.



شکل 1- توزیع تراکم طولی ریشه حاصل از نمونه‌برداری از مزرعه

پروفیل رطوبت خاک بلافاصله بعد از آبیاری به عنوان شرایط اولیه در نظر گرفته شد. تبخیر تعرق مرجع ( $ET_0$ ) با استفاده از داده‌های هواشناسی به دست آمد. تبخیر تعرق پتانسیل سبب با استفاده از  $ET_0$  و ضریب گیاهی مشخص منطقه ( $K_c=0.98$ ) مشخص گردید (مرکز تحقیقات کشاورزی استان و بشارت و همکاران، 90). برای تعیین تبخیر از سطح خاک، لوله‌ای مجزا در نزدیکی درخت و در فاصله‌ای خارج از محدوده ریشه که جذب ریشه تأثیری بر آن نداشته باشد نصب گردید. تغییرات رطوبت در 20 سانتی‌متر سطح خاک به عنوان تبخیر از سطح خاک فرض شد. در شکل 2 نمودارهای تبخیر از سطح خاک ( $E_{soil}$ )، تعرق پتانسیل ( $T_{pot}$ ) و تبخیر تعرق مرجع ( $ET_0$ ) برای دوره 9 روزه رسم شده‌اند.

قبل از به‌کارگیری مدل جهت انجام عملیات شبیه‌سازی حرکت آب در منطقه ریشه، لازم بود که پارامترهای مدل براساس داده‌های خاک و گیاه مورد واسنجی قرار گیرد. جهت انجام این کار از کلیه پارامترهای اندازه‌گیری 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 30 درصد داده‌ها برای واسنجی و 70 درصد داده‌ها برای تأیید مدل استفاده شد. پس از مرحله واسنجی، نتایج مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده مورد بررسی قرار گرفت.

برای شرایط مرزی سطح خاک، حل عددی نیاز به تخمین تعرق پتانسیل ( $T_{pot}$ ) و تبخیر سطح خاک ( $E_{soil}$ ) دارد. داده‌های تبخیر و تعرق مرجع روزانه ( $ET_0$ ) با استفاده از ایستگاه هواشناسی مجاور (در فاصله 500 متری) به دست آمد. تبخیر و تعرق پتانسیل سبب با استفاده از  $ET_0$  و ضریب گیاهی مشخص منطقه ( $K_c=0.98$ ) مشخص گردید (شکل 2). تبخیر از سطح خاک با استفاده از اندازه‌گیری‌های متوالی رطوبت سنج (TDR) در 20 سانتی‌متر سطح خاک و خارج از محدوده ریشه ثبت شد. اندازه‌گیری‌های پروفیل دوبعدی رطوبت خاک بلافاصله بعد از آبیاری به عنوان شرایط اولیه برای شبیه‌سازی عددی وارد مدل گردید. محیط شبیه‌سازی بر اساس اطلاعات اندازه‌گیری شده 3 متر در 3 متر در عمق 1 متر در نظر گرفته شد.

جریان در فاصله شعاعی است که معمولاً برابر با  $r_m$  در نظر می‌گیرند. براساس روش تخمین نیاز آبی گیاه که توسط فائو ارائه شده است (Allen et al., 1998)، تعرق واقعی از رابطه 9 به دست می‌آید.

$$T_{act}(t) = k_s T_{pot}(t) \quad (9)$$

بنابراین

$$S_{act}(r, z, t) = \frac{\pi R^2 \beta(r, z, t) k_s T_{pot}(t)}{2\pi \int_0^{r_m} \int_0^{z_m} r \beta(r, z, t) dr dz} \quad (10)$$

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

$$k_s = \frac{TAW - D_r}{(1 - \phi) TAW} \quad (11)$$

$D_r [L]$  تخلیه آب منطقه ریشه،  $D_r [L^3 L^{-3}]$  مقدار آب در دسترس خاک در منطقه ریشه و  $\phi [-]$  کسری از آب قابل دسترس خاک می‌باشد که گیاه بدون تحمل تنش آبی، قادر به استخراج آب از منطقه ریشه است. برای درخت سیب، مقدار  $\phi$  برابر 0/5 می‌باشد (Allen et al., 1998). تعرق پتانسیل از رابطه 12 به دست می‌آید.

$$T_{pot} = K_c ET_0 - E_s \quad (12)$$

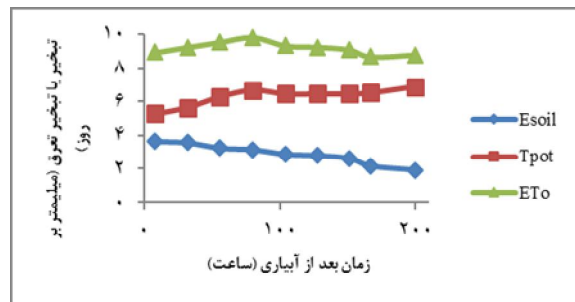
$K_c [-]$  ضریب گیاهی،  $ET_0 [LT^{-1}]$  تبخیر تعرق مرجع و  $E_s [LT^{-1}]$  تبخیر از سطح خاک می‌باشد. با در نظر گرفتن تنش آبی، می‌توان با استفاده از تابع تنش آب که توسط ون گنوختن (1987) ارائه شد، معادله 5 را تعدیل کرد (Van Genuchten., 1987):

$$\psi(r, z, h) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h}{h_{50}}\right)^p} \quad (13)$$

که در آن،  $h_{50}$  مکشی از خاک است که در آن میزان جذب به 50 درصد حداکثر جذب می‌رسد و معمولاً از طریق آزمون و خطا به دست می‌آید.  $p$  پارامتر تجربی است که در پژوهش‌های قبلی برابر با 3 در نظر گرفته شده است (Van Genuchten., 1987). در نهایت، مقدار جذب ریشه از ترکیب دو معادله 10 و 13 حاصل می‌شود

$$S(r, z, t, h) = \psi(r, z, h) S_{act}(r, z, t) \quad (14)$$

مدل HYDRUS-2D برای شرایط مرزی، نیاز به تخمین تعرق پتانسیل ( $T_{pot}$ ) و تبخیر از سطح خاک ( $E_s$ ) دارد. اندازه‌گیری‌های



شکل 2- منحنی‌های تبخیر از سطح خاک، تعرق پتانسیل و تبخیر تعرق مرجع نسبت به زمان در طول دوره آزمایش

## نتایج و بحث

### جریان آب در خاک

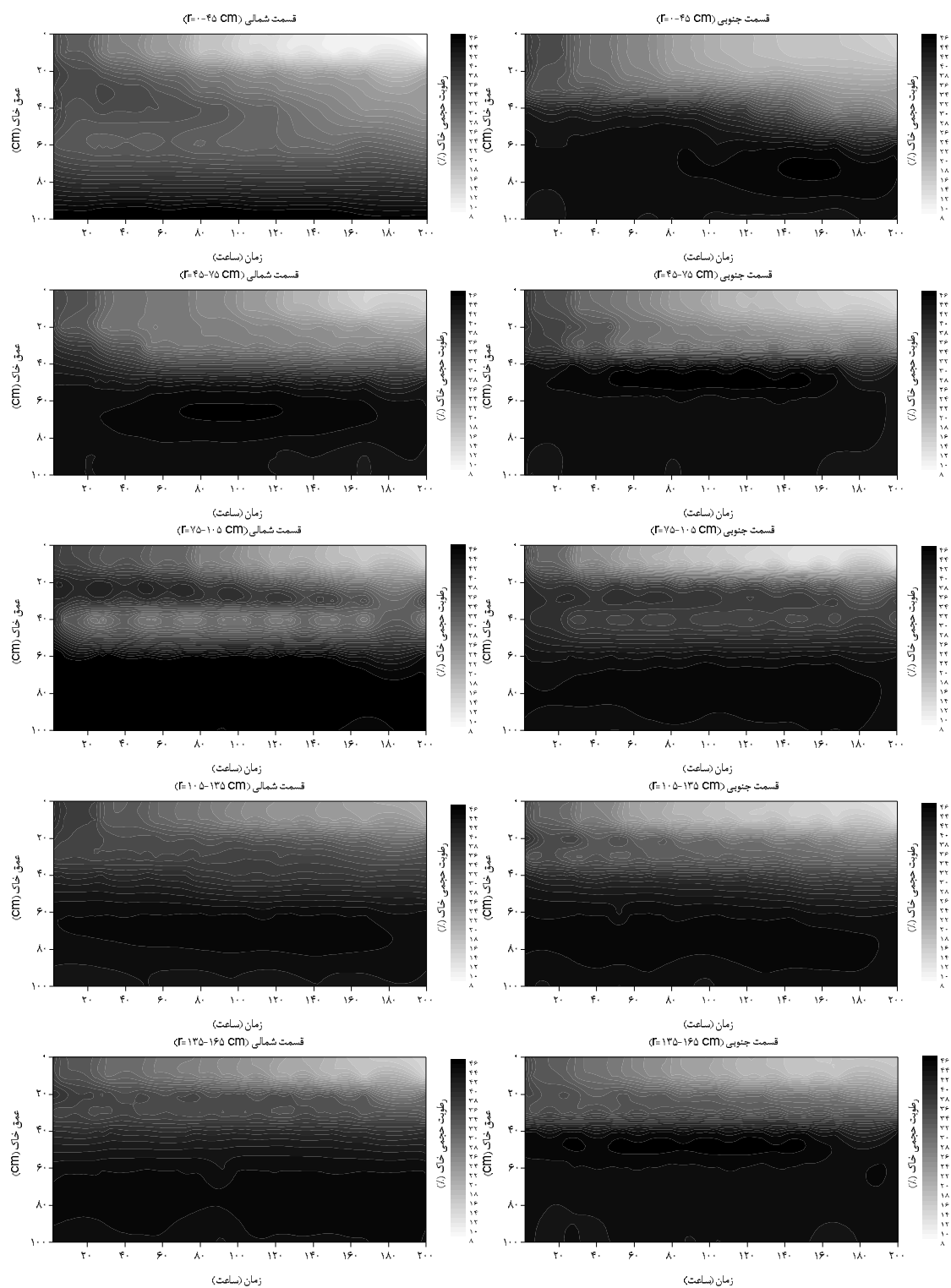
متر) دارای فشردگی و تراکم زیادی می‌باشد و با اینکه رطوبت این لایه در حد مناسبی جهت جذب آب توسط ریشه قرار داشت اما ریشه‌های درخت به دلیل عدم تهویه مناسب قادر به جذب آب از این منطقه نبودند. یکی از ایرادات مدل HYDRUS هم عدم تأثیرگذاری تراکم خاک در برآورد مشخصات هیدرولیکی خاک می‌باشد که بسیار بر روی محاسبات اثرگذار است. هم‌چنین هم‌بستگی خوبی بین همه داده‌ها با در نظر گرفتن داده‌های همه بلوک‌ها به دست آمد ( $R^2=0.90$  و  $RMSE=8.14\%$ ). وورات و همکاران با استفاده از مدل پیشنهادی خود که پایه و اساس برنامه HYDRUS می‌باشد رطوبت منطقه ریشه درخت بادام را در یک خاک لوم شنی با  $R^2=0.92$  مدل‌بندی کردند (Vrugt et al., 2001a).

### جذب ریشه

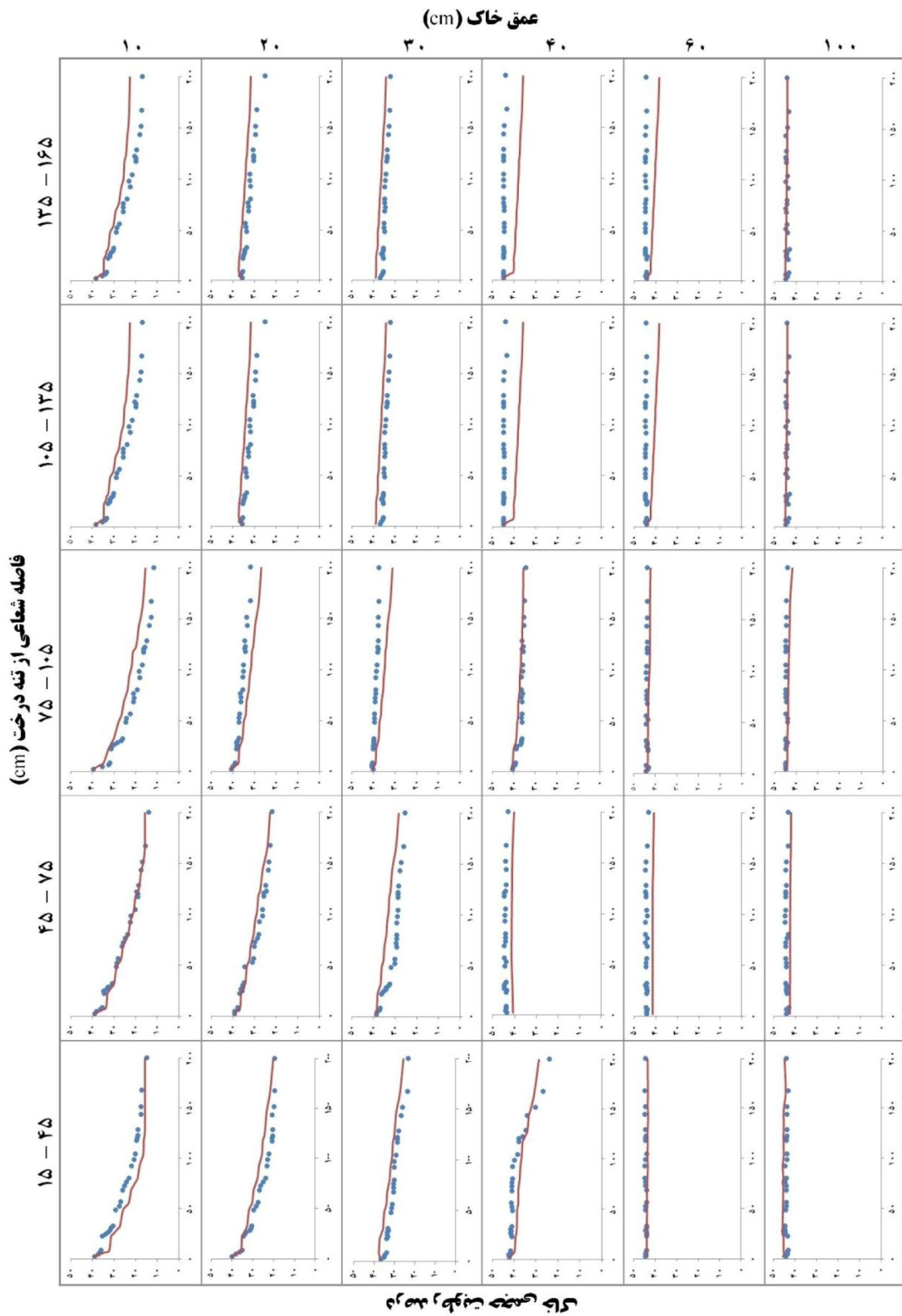
برای درک بهتر جذب و اینکه درخت در طول دوره با چه سرعتی فرآیند جذب آب را انجام می‌دهد، کل دوره را به سه بازه زمانی 3 روزه تقسیم‌بندی کرده و مقادیر جذب تجمعی در هر بازه رسم شد که در شکل 5 و 6 آورده شده است. میزان جذب ریشه حداکثر در هر دو سمت شمالی و جنوبی در حدود  $0/04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$  است. از کل جذبی که در سمت شمالی اتفاق افتاده است حدود 43 درصد در سه روز اول، 31 درصد در سه روز دوم و 26 درصد در سه روز انتهایی روی داده است. در سمت جنوبی هم 46 درصد جذب در سه روز اول، 28 درصد در سه روز دوم و 26 درصد در سه روز پایانی بوده است. البته درصد تغییرات رطوبت در عمق‌های مختلف متفاوت از هم می‌باشد. به عنوان مثال، در لایه‌های سطحی، درصد تغییرات مقدار آب خاک با گذشت زمان کاهش می‌یابد ولی در عمق‌های پایینی درصد تغییرات رطوبت به مرور زمان افزایش یافته است. در لایه 10 سانتی‌متری قسمت شمالی 51 درصد تغییرات جذب در سه روز اول، 37 درصد در سه روز دوم و تنها 12 درصد در سه روز انتهایی رخ داده بود. در لایه 10 سانتی‌متری قسمت جنوبی هم 60 درصد در بازه زمانی اول، 27 درصد در بازه زمانی دوم و 13 درصد در بازه زمانی سوم اتفاق افتاده است. در عمق 40-30 سانتی‌متری قسمت جنوبی 17 درصد در سه روز اول، 31 درصد در سه روز بعدی و 52 درصد در سه روز آخر جذب شده است. زی و همکاران (2013) در مطالعه‌ای که بر روی درخت صنوبر انجام دادند مشاهده کردند با کاهش مقدار رطوبت در پروفیل خاک، مقدار جذب درخت در لایه 40 سانتی‌متری بالایی از 98% به 61% تقلیل پیدا کرده است در حالی که مقدار جذب در لایه 90-40 سانتی‌متری از 2% به 39% رسیده است. هم‌چنین طی بررسی‌های آنان مشخص شد 58% تغییرات رطوبت در لایه 90-0 سانتی‌متری خاک، مربوط به لایه 20 سانتی‌متری سطحی خاک است که نشان از نقش مؤثر ریشه‌های سطحی در مقدار جذب رطوبت خاک دارد.

براساس داده‌های ثبت شده رطوبت، توزیع رطوبت در طرفین درخت و در فواصل شعاعی 0-45، 45-75، 75-105، 105-135، 135-165 سانتی‌متری رسم شد که در شکل 3 آورده شده است، با توجه به شکل 3 و در فاصله شعاعی 0-45 سانتی‌متری، مشخص می‌گردد که بیش‌ترین تغییرات رطوبت در عمق صفر تا 45 سانتی‌متری رخ داده است. این تغییرات براساس تبخیر از سطح خاک و جذب ریشه است. در این بازه شعاعی و تا حدود 140 ساعت بعد از آبیاری، تغییرات رطوبت فقط در لایه 40 سانتی‌متر بالایی اتفاق افتاده است. اما پس از گذشت این مدت، رطوبت لایه 60-40 سانتی‌متری هم شروع به کاهش کرده است که نشانگر شروع جذب (یا به عبارت بهتر، افزایش میزان جذب) از این قسمت می‌باشد. این تغییر رطوبت به دلیل کمبود رطوبت در لایه‌های بالایی و تمایل درخت به جذب آب از نقاط با رطوبت بالا و دوری جستن از تنش آبی است. با افزایش فاصله از تنه درخت و کاهش جذب ریشه (با توجه به کاهش تراکم ریشه)، تغییرات رطوبت کاهش می‌یابد. در فاصله 75-45 سانتی‌متری، تغییرات رطوبت تقریباً در لایه 40 سانتی‌متری بالایی خاک محدود شده است. در فاصله 135-75 سانتی‌متری تا حدود 180 ساعت پس از آبیاری، تغییرات رطوبت، بیش‌تر در عمق 20-0 سانتی‌متری اتفاق افتاده است. پس از این زمان، رطوبت لایه 30-20 سانتی‌متری هم دچار تغییر شده است. در فواصل 105-135 و 165-135 سانتی‌متری هم تغییرات رطوبت در لایه 20 سانتی‌متری رخ داده است. بیش‌تر این کاهش رطوبت هم به دلیل تبخیر از سطح می‌باشد. تغییرات بعد از عمق 20 سانتی‌متری اندک می‌باشد.

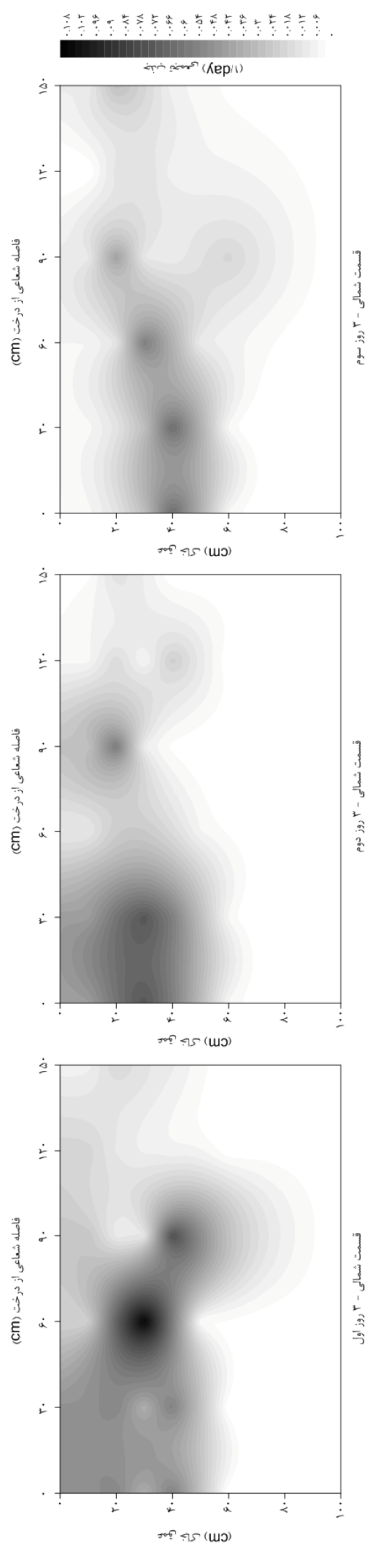
مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی رطوبت خاک در دو طرف تنه درخت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و مقادیر  $R^2$  و RMSE برای هر سمت، تحت 30 بخش جداگانه، به دست آمد. با توجه به نزدیک بودن مقادیر  $R^2$  و RMSE برای هر دو طرف، تنها مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی قسمت جنوبی نسبت به عمق و شعاع از درخت در شکل 4 آورده شده است. مقادیر  $R^2$  و RMSE مربوط به شکل 4 نیز در جدول 1 آورده شده است. با توجه به شکل 4، تا عمق 40 سانتی‌متری خاک که منطقه فعال ریشه در جذب آب مورد نیاز درخت می‌باشد در 11 بلوک از 15 بلوک موجود، مقادیر شبیه‌سازی بیش‌تر از مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد. از روی مقادیر موجود در جدول 1 مشخص است که مدل HYDRUS شبیه‌سازی بسیار خوبی در تمام لایه‌ها (به‌جز لایه 40 و 60 سانتی‌متری و فاصله شعاعی 105-135 و 165-135 سانتی‌متری) انجام داده است. به طوری که در مراحل مختلف آزمایش مشاهده شد خاک این لایه‌ها (عمق 40 و 60 سانتی-



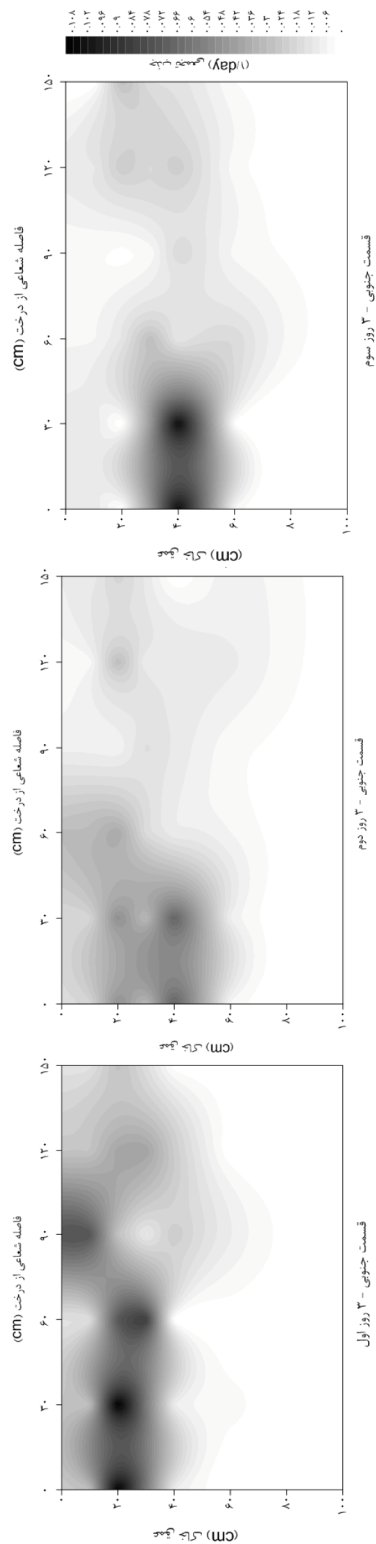
شکل 3- داده‌های اندازه‌گیری شده درصد رطوبت خاک برای فواصل مشخص در طول دوره آزمایش (200 ساعت)



شکل ۴- نمودارهای اندازه‌گیری (دایره‌های توبر) و شبیه‌سازی (خطوط ممند) رطوبت خاک در قسمت جنوبی تنه درخت زمان پس از آبیاری (ساعت)



شکل ۵ - جذب تجمعی قسمت شمالی درخت سیب در بازه‌های سه روزه



شکل ۶ - جذب تجمعی قسمت جنوبی درخت سیب در بازه‌های سه روزه

طرفین مقداری باهم متفاوت می‌باشد اما در مجموع نوعی یکنواختی در جذب مشاهده می‌شود. براساس محاسبات در منطقه حداکثر فعالیت ریشه در طول دوره، مقدار 450 لیتر آب توسط ریشه جذب

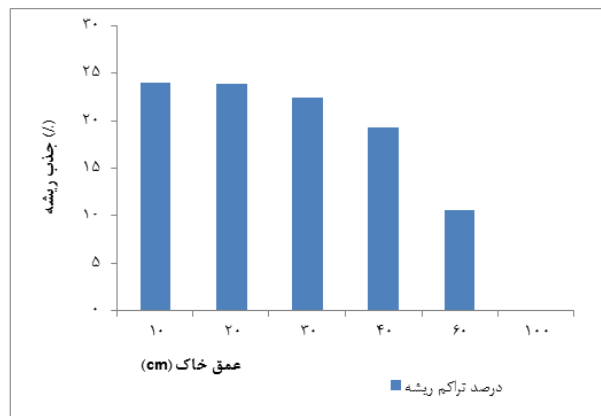
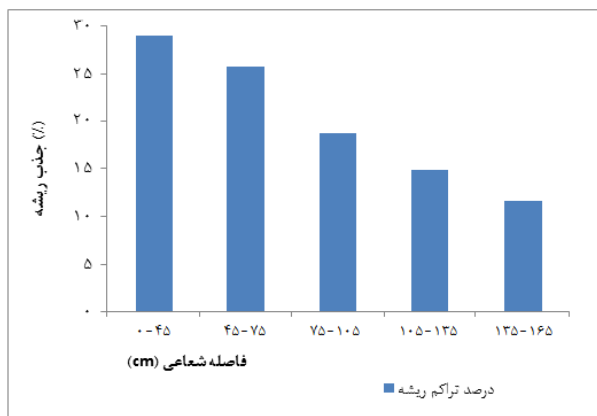
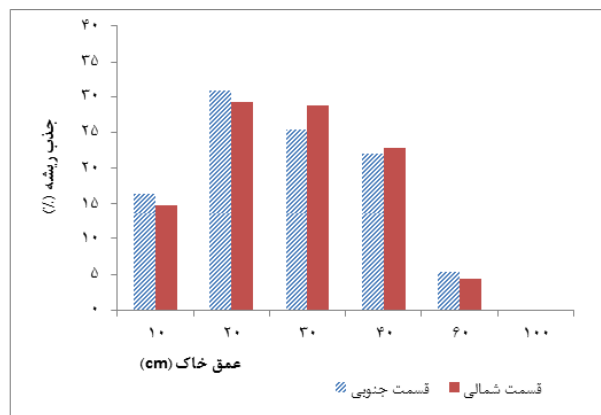
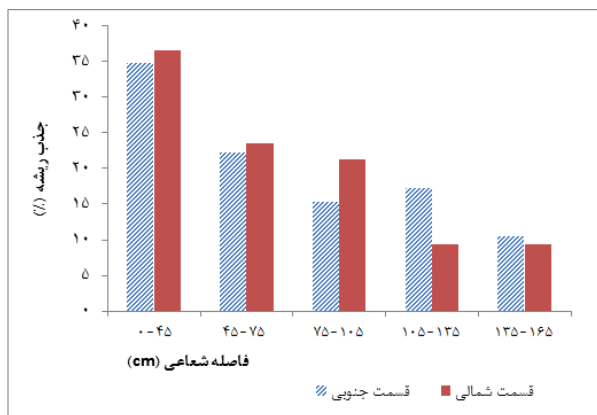
پس از محاسبه مقادیر تجمعی جذب ریشه در کل دوره، مشخص شده که 52 درصد جذب از قسمت جنوبی و 48 درصد جذب از قسمت شمالی رخ داده است. اگرچه در بعضی فواصل شعاعی، مقادیر جذب



فاصله 0-45 سانتی متری بوده است. مقدار جذب حداکثر در قسمت شمالی و جنوبی به ترتیب برابر 36/65 و 34/78 درصد بود. با مقایسه نمودارهای جذب ریشه و تراکم ریشه در جهت شعاعی، مشخص است که با افزایش فاصله شعاعی، هر دو نمودار حالت نزولی پیدا کرده‌اند. به عبارت دیگر، با کاهش تراکم ریشه در جهت شعاعی، مقدار جذب نیز کاهش یافته است. اما در جهت عمق، با اینکه تراکم ریشه در سه لایه 10، 20 و 30 سانتی متری تقریباً برابر است اما مقدار جذب در لایه 10 سانتی متر اول کم‌تر از دو لایه بعدی است. لایه سطحی خاک با هوا در ارتباط است لذا بیش‌تر تحت تأثیر تبخیر قرار دارد، از طرفی ریشه‌ها ممکن است حالت نسبتاً خشبی به خود گرفته، از قدرت جذب آن‌ها کاسته شود.

شده است. از این مقدار، 214 لیتر در قسمت شمالی (47 درصد) و 240 لیتر در قسمت جنوبی (53 درصد) جذب گیاه شده است. بنابراین با در نظر گرفتن دوره آبیاری 9 روزه، به طور متوسط میزان جذب آب توسط ریشه درخت سیب در عمق 0-40 سانتی متری از محیط ریشه تقریباً 50 لیتر در روز محاسبه شد.

شکل 7 درصد جذب آب برای لایه‌های مختلف و فاصله‌های مختلف از درخت را در دوره زمانی آبیاری برای طرفین درخت سیب براساس تراکم ریشه نشان می‌دهد. در قسمت شمالی، بیش از 29 درصد جذب در عمق 20-10 سانتی متری اتفاق افتاده است. در حالی که در قسمت جنوبی حدود 31 درصد جذب در این لایه روی داده است. در جهت شعاعی نیز بیش‌ترین جذب در هر دو سمت درخت در



شکل 4- مقادیر جذب ریشه براساس تراکم ریشه به صورت دو بعدی

اول هم به علت متفاوت بودن ساختمان خاک در باغ سیب می‌باشد. مقدار جذب آب توسط ریشه بیش‌تر در عمق 0-40 سانتی متری و در فاصله شعاعی 0-60 سانتی متری اتفاق افتاده است. این نتایج با نتایج گانگ و همکاران (2006) متفاوت بود. آن‌ها در مطالعه‌ای که بر روی درخت سیب و در یک خاک لومی انجام داده بودند بیش‌ترین تغییرات رطوبت را در عمق 40-100 سانتی متری مشاهده کرده بودند.

## نتیجه‌گیری

براساس نتایج، رطوبت خاک در ابتدای آزمایش، در هر دو سمت و در عمق 40 سانتی متری در حدود 39 درصد حجمی بود که نشان از همگن بودن خاک اطراف درخت دارد. رطوبت خاک در اکثر پروفیل خاک یکسان بوده و تغییرات رطوبت در طول دوره نشان دهنده تبخیر و جذب می‌باشد. اختلاف رطوبت در نقاط مختلف به ویژه در روزهای

جدول 1- مقادیر  $R^2$  و NRMSE رطوبت خاک قسمت جنوبی درخت تحت 30 بلوک جداگانه

135 - 165		105 - 135		75 - 105		45 - 75		15 - 45		شعاع عمق
RMSE (%)	$R^2$	RMSE (%)	$R^2$	RMSE (%)	$R^2$	RMSE (%)	$R^2$	RMSE (%)	$R^2$	
13/29	0/85	15/56	0/82	16/20	0/84	4/12	0/95	12/37	0/93	cm 10
7/84	0/90	7/70	0/85	8/36	0/88	5/47	0/97	9/58	0/98	cm 20
6/87	0/94	12/11	0/87	8/55	0/87	12/03	0/87	8/11	0/95	cm30
13/48	0/77	2/28	0/73	3/62	0/90	6/99	0/94	6/68	0/93	cm40
8/72	0/83	4/88	0/74	2/66	0/94	6/95	0/89	2/24	0/87	cm60
1/43	0/92	4/53	0/98	3/31	0/94	4/08	0/96	3/05	0/94	cm100

نواری. تحقیقات مهندسی کشاورزی. 6. 53-23:66.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper 56. U.N. Food and Agriculture Organization (FAO), Rome. 300pp.

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*. 120: 11-22.

Biondini, M. 2001. A three-dimensional spatial model for plant competition in an heterogeneous soil environment. *Ecological Modelling* 142 (3), 189-225.

Cardon, G.E., Letey, J. 1992. Plant water uptake terms evaluated for soil water and solute movement models. *Soil Science Society of America Journal*. J. 32, 1876-1880.

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. *Agricultural and Forest Meteorology*. 67: 13-27.

. 67: 13-27.

Feddes, R.A., Bresler, E., Neuman, S.P. 1974. Field test of a modified numerical model for water uptake by root systems. *Water Resources Research*. 10:1199-1206.

Feddes, R.A., Kowalik, P.J., Zaradny, H. 1978. Simulation of Field Water Use and Crop Yield. *Simulation Monographs*. Centre for Agricultural Publishing and Documentation. p. 189.

Gong, D.Z., Kang, S.Z., Zhang, L., Du, T.S., Yao, L.M. 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* 83.1-2:119-129.

این اختلاف شاید به دلیل اختلاف نوع بافت خاک دو منطقه

باشد. با در نظر گرفتن دوره آبیاری 9 روزه، به طور متوسط میزان جذب آب توسط ریشه درخت سیب در عمق 0-40 سانتی‌متری از محیط ریشه تقریباً 50 لیتر در روز محاسبه شد. این نتایج با گزارشات ارائه شده برای درخت گلابی (کاسپاری و همکاران، 1993) همخوانی دارد. همچنین در پژوهشی که گرین و همکاران (1999) بر روی درخت سیب انجام دادند بیان کردند که برای یک دوره 21 روزه، متوسط مقدار آب مصرفی درخت حدود 32 لیتر در روز می‌باشد. هم‌چنین بیش‌ترین مقدار مصرف آب را توسط درخت در حدود 50 لیتر بر روز در اواسط تابستان و کم‌ترین آن در حدود 20 لیتر بر روز در اواسط پاییز گزارش کردند. این کاهش ناشی از افزایش میزان بارندگی و کاهش میزان تبخیر و تعرق می‌باشد.

مدل HYDRUS با اینکه در شبیه‌سازی مقدار جذب ریشه از دقت بالایی برخوردار است اما در اواخر دوره آبیاری و با کاهش مقدار رطوبت خاک از میزان دقت مدل کاسته شده است. در اعماق 40 و 60 سانتی‌متری هم دقت مدل نسبت به اعماق دیگر کم‌تر بود زیرا در نرم افزار HYDRUS تأثیر تراکم خاک و مواد آلی در مزرعه در مشخصات خاک و نوع ساختمان خاک در نظر گرفته نشده است.

## منابع

بشارت، س.، ناظمی، ا.، صدرالدینی، ع.، شهرداد، ص. 1390. استفاده از نرم‌افزار HYDRUS در شبیه‌سازی حرکت و جذب آب در خاک و ارائه نرم‌افزار SWMRUM. *مجله دانش آب و خاک*. 4. 89-73:77

شهیدی، ع.، نحوی‌نیا، م.ج.، پارسی‌نژاد، م. 1389. ارزیابی توابع کاهش جذب آب در شرایط تنش همزمان شوری و خشکی توسط رقم روشن گندم. *مجله پژوهش آب ایران*، شماره 7. 47-45:32

میرزایی، ف.، لیاقت، ع.، سهرابی، ت. و امید، م.ج. 1384. نمون‌سازی جبهه رطوبتی خاک از منبع تغذیه خطی در آبیاری قطره‌ای -

- Simunek, J., Sejna, M., Van Genuchten, M.Th. 2006. The HYDRUS software package for simulating two-and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solute in variably-saturated media, Technical Manual. Version 1.11, PC progress prague, Czech Republic.
- Siyal, A.A., Skaggs, T.H. 2009. Measured and simulated soil wetting patterns under porous clay pipe sub-surface irrigation. *Journal of Agricultural Water Management*. 96: 893-904.
- Skaggs, T.H., Van Genuchten, M.T., Shouse, P.J., Poss, J.A. 2006. Macroscopic approaches to root water uptake as a function of water and salinity stress. *Agricultural Water Management*. 86.1-2: 140-149.
- Van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*. 44.5: 892-898.
- Van Genuchten, M.Th. 1987. A numerical model for water and solute movement in and below the root zone, Unpublished Research Report, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, CA.
- Vrugt, J.A., Hopmans, J.W., Simunek, J. 2001a. Calibration of a two-dimensional root water uptake model. *Soil Science Society of America Journal*. 65.4: 1027-1037.
- Vrugt, J.A., van Wijk, M.T., Hopmans, J.W., Simunek, J. 2001b. One, two and three-dimensional root water uptake functions for transient modeling. *Water Resources Research*. 37:2457-2470.
- Wu, J.Q., Zhang, R.D., Gui, S.X. 1999. Modelling soil water movement with water uptake by roots. *Plant and Soil* 215: 7-17.
- Xi, B., Wang, Y., Jia, L., Bloomberg, M., Li, G., Di, N. 2013. Characteristics of fine root system and water uptake in a triploid *Populus tomentosa* plantation in the North China Plain: Implications for irrigation water management. *Agricultural Water Management*. 117: 83-92.
- Zuo, Q., Shi, J.C., Li, Y.L., Zhang, R.D. 2006. Root length density and water uptake distributions of winter wheat under sub-irrigation. *Plant and Soil* 285.1-2: 45-55.
- González, M.G., Ramos, R.B., Carlesso, R., Paredes, P., Petry, M.T., Martins, J.D., Aires, N.p., Pereira, L.S. 2015. Modelling soil water dynamics of full and deficit drip irrigated maize cultivated under a rain shelter. *Biosystems Engineering*. 132: 1-18.
- Green, S., Clothier, B. 1999. The root zone dynamics of water uptake by a mature apple tree. *Plant Soil*. 206: 61-77.
- Green, S.R., Kirkham, M.B., Clothier, B.E. 2006. Root uptake and transpiration: from measurements and models to sustainable irrigation. *Agricultural Water Management*. 86.1-2: 165-176.
- Gregory, P.J. 2006. Roots, rhizosphere and soil: the route to a better understanding of soil science? *European Journal of Soil Science* 57.1: 2-12.
- Hinsinger, P., Gobran, G.R., Gregory, P.J., Wenzel, W.W. 2005. Rhizosphere geometry and heterogeneity arising from root-mediated physical and chemical processes. *New Phytologist*. 168.2: 293-303.
- Homaee, M. 1999. Root water uptake under non-uniform transient salinity and water stress. Ph.D. thesis. Agricultural University Wageningen, the Netherlands.
- Kandelous, M.M., 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, M.M., Simunek, J., van Genuchten and Malek, K. 2011. Soil water content distributions between two emitters of a subsurface drip irrigation system. *Soil Science Society of America Journal*. 75.2: 488-497.
- Lazarovitch, N., Warrick, A.W., Furman, A., Simunek, J. 2007. Subsurface water distributions from drip irrigation described by moment analysis. *Vadose Zone Journal*. 6: 116-123.
- Nimah, M.N., Hanks, R.J. 1973. Model for estimating soil water, plant, and atmospheric interrelations. I. Description and sensitivity. *Soil Science Society of America Journal*. 37: 522-527.
- Qiao, D.M., Shi, H.B., Pang, H.B., Qi, X.B., Plauborg, F. 2010. Estimating plant root water uptake using a neural network approach. *Agricultural Water Management*. 98: 251-260.

## Measurement and Dynamic Simulation of Soil Water Flow with Emphasis on Root Water Uptake

H. Zare<sup>1</sup>, S. Besharat<sup>2\*</sup>

Received: Feb.7, 2016

Accepted: May.25, 2016

### Abstract

Mechanisms of crop root water uptake play an important role in agricultural water management. The aim of this study was to investigate soil water dynamics and root water uptake for an apple tree. Surface irrigation was performed around of tree. Tube-time domain reflectometry (TDR) –Profile Probe type- was used to measure soil volumetric water content. Therefore Specific tubes of 1 meter length and distance of 30 cm from each other were installed in both side of tree trunk. Moisture simulations were carried out with HYDRUS-2D model. Results showed that most changes in soil water occurred until the depth of 40 cm. These changes in surface layers are greater than above layers. Also root water uptake mostly is limited in the depth of 0-40 cm and radial distance of 0-60 cm from tree trunk. Root water uptake rate was reduced with increasing distance from the tree. HYDRUS-2D model successfully simulated the variability of soil water dynamics in until depth of 40 cm, but predict of soil water dynamics from depth of 60 to 100 cm is not good. This Difference is due to soil of this layer is very compact. So with attention to these results, a more detailed schedule will be designed in relation to irrigation water management.

**Keyword:** Soil water, Root water uptake, Simulation, HYDRUS-2D software

---

1- MS.c Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University

2- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University

(\*- Corresponding Author Email:sina323@yahoo.com)