

## فاکتور جبران تنش رطوبتی توسط ریشه برای شرایط رطوبتی غیریکنواخت خاک

\* مهدی زاکری نیا<sup>۱</sup>، تیمور سهرابی<sup>۲</sup>، فریبرز عباسی<sup>۳</sup>، محمدرضا نیشابوری<sup>۴</sup> و مهدی شهابی فر<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup> استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، استاد گروه مهندسی آبیاری، دانشگاه تهران  
<sup>۲</sup> استادیار موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی کرج، <sup>۳</sup> استاد گروه خاکشناسی، دانشگاه تبریز، <sup>۴</sup> استادیار موسسه تحقیقات خاک و آب

تاریخ دریافت: ۸۷/۹/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۸۷/۲/۲۹

### چکیده

در این تحقیق به بررسی نقش بخش‌های مختلف ریشه در جبران تنش رطوبتی خاک از طریق افزایش جذب آب در بخش‌های مرطوب خاک پرداخته شده است. چهار لایسمتر از جنس PVC با قطر ۲۵ و ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر انتخاب گردید. لایسمترها با خاک لوم رسی که با لایه‌های شن و واکس به چهار لایه مجزا تقسیم شده بود، پر شد. آبیاری لایه‌های مورد نظر در لایسمترها به طریق زیرسطحی و تنش رطوبتی در لایسمترها با کاهش تعداد لایه‌های تحت آبیاری صورت پذیرفت. جلوگیری از تبادل رطوبت بین لایه‌های خاک در لایسمترها، امکان محاسبه جذب آب در هر لایه و نقش واقعی ریشه‌ها در لایه‌های تحتانی در جذب آب به هنگام وقوع تنش رطوبتی در لایه‌های فوقانی را به وجود آورد. رطوبت در لایه‌های مختلف لایسمترهای بالا به کمک دستگاه بازتاب‌سنجی زمانی (TDR)<sup>۱</sup>، اندازه‌گیری شد. تغییرات حجم آب مخازن متصل به لایه‌ها و نیز تغییرات رطوبت در هر لایه معادل آب مصرفی هر لایه بود. معادله جذب آب در شرایط تنش آبی، با توسعه یک فاکتور برای جبران تنش اصلاح شد. در این فاکتور ضربی به‌عنوان ضریب فعالیت گیاهی ریشه معرفی و به کمک معادله جبران تنش، مقدار این ضریب برای بخش‌های مختلف ریشه به هنگام وقوع تنش آبی در لایه‌های فوقانی ارزیابی شد. نتایج بیانگر آن بود که معادله جبران تنش ارائه شده در این تحقیق در بسیاری از حالات، مقادیر جذب را مناسب‌تر از معادله‌های موجود پیش‌بینی می‌نماید. مقدار فاکتور جبران تنش به ضریب فعالیت گیاهی جبران بستگی داشت که مقدار حداکثر این ضریب به روش معکوس از روی داده‌های جذب آب در لایسمترهای مختلف تعیین شد. نتایج بیانگر آن بود که با شدت یافتن تنش (افزایش تعداد لایه‌های تحت تنش آبی) مقدار ضریب فعالیت گیاهی افزایش یافت (به‌ترتیب ۱/۱، ۱/۸۷، ۲/۲۳ و ۲/۳۸ در لایسمترهای ۱ تا ۴). بنابراین با افزایش شدت تنش (افزایش تعداد لایه‌های تحت تنش) گیاه با افزایش ضریب فعالیت در ریشه‌های تحتانی، آب بیشتری را از آنجا جذب نمود.

واژه‌های کلیدی: آبیاری زیرسطحی، تنش آبی، جذب آب توسط ریشه، لایسمتر

## مقدمه

پدیده جذب آب توسط ریشه در مدل‌های هیدرولوژیک و اقلیمی از اهمیت زیادی برخوردار است (فدس و راتس، ۲۰۰۴؛ کلیدون و هیمن، ۱۹۹۸؛ زنگ و همکاران، ۱۹۹۸). جذب آب توسط ریشه، با روش‌های خرد<sup>۱</sup> و کلان<sup>۲</sup> کمی می‌گردد. به دلیل مشکل بودن اندازه‌گیری جزئیات هندسه سیستم ریشه و تغییرات زمانی آن، روش خرد با شرایط عملی سازگار نبوده و استقبال زیادی از آن نشده است. اما مدل‌های تجربی کلان که مقادیر آب جذب شده در منطقه ریشه را به‌طور کلی و بدون توجه به جزئیات جذب در هر ریشه، برآورد می‌نمایند، ساده‌تر بوده و برای کارهای عملی مناسب‌ترند. در مدل‌های کلان، تابع جذب آب توسط ریشه به‌صورت یک عبارت خروجی، و به فرم حجمی در معادله ریچاردز (۱۹۳۱) قرار می‌گیرد:

$$\frac{\partial \theta(z,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K(h) \cdot \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right) - S(z,t) \quad (1)$$

که  $\theta$  (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب) رطوبت در عمق  $Z$  (سانتی‌متر) برحسب سانتی‌متر مکعب آب در ۱ سانتی‌متر مکعب خاک،  $t$  زمان (روز)،  $h$  (سانتی‌متر) مکش ماتریک خاک،  $K$  (سانتی‌متر بر روز) هدایت هیدرولیکی خاک و  $S$  (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب در روز) معادل مقادیر آب جذب شده توسط ریشه بر حسب سانتی‌متر مکعب از ۱ سانتی‌متر مکعب خاک در هر روز می‌باشد.

معادله‌های فراوانی برای محاسبه جذب آب توسط ریشه در شرایط بهینه رطوبتی و نیز شرایط محدودیت آبی توسعه یافته‌اند (فدس و همکاران، ۱۹۷۸؛ پراساد، ۱۹۸۸؛ ون گنوختن، ۱۹۸۷؛ دیرکسن، ۱۹۸۵؛ همایی، ۱۹۹۹؛ لی و همکاران، ۲۰۰۱). هر کدام از این معادله‌ها با توجه به پارامترهای تعریف شده در آنها در شرایط خاص خود قابل استفاده می‌باشد. برخی از آنها نظیر معادله پراساد (۱۹۸۸) مخصوص شرایط بهینه رطوبتی بوده و در آن توجهی به تنش خشکی نشده است. در مواردی با در نظر

گرفتن کاهش جذب با کاهش رطوبت و یا افزایش مکش در خاک به این امر اشاره شده است که هنگام خشکی لایه‌های فوقانی، آب مورد نیاز تعرق گیاه از طریق جذب آب از لایه‌های تحتانی صورت می‌گیرد. بدون توجه به وجود یا نبود تنش رطوبتی در لایه‌های دیگر، مقدار حداکثر جذب در آن محاسبه می‌شود. این در حالی است که به نظر می‌رسد چگونگی رطوبت لایه‌های دیگر در مقدار جذب هر لایه تأثیر مستقیمی داشته و سهم جذب آب در هر لایه باید به‌نحوی مشخص گردد. به‌منظور اندازه‌گیری مقدار جذب آب از بخش‌های فوقانی تا تحتانی منطقه ریشه به هنگام شرایط مساعد رطوبتی و نیز به هنگام محدودیت آبی در بخش‌هایی از نیم‌رخ خاک، لازم است بخش‌های مختلف ریشه با به‌کارگیری یک روش مناسب به‌طوری از هم جداسازی شوند که اولاً باعث به‌هم خوردن شرایط طبیعی حاکم بر رشد ریشه نشود و ثانیاً بتوان مقدار آب جذب شده توسط هر بخش از ریشه را به آن بخش نسبت داد. روش جداسازی ریشه‌ها با لایه واکس توسط ویور و همکاران (۱۹۲۲) و هاتر و کلی (۱۹۴۶) ارایه شده است. تحقیقات دیگران نیز نشان داد که ریشه گیاه به راحتی از لایه‌های واکس متشکل از ترکیبات وازلین و پارافین عبور می‌کند، بدون آنکه مانعی در برابر توسعه آن ایجاد شود (هنریکسون و ومیر، ۱۹۳۱؛ هرکلراس و همکاران، ۱۹۷۷؛ آلبرت و همکاران، ۱۹۸۰؛ فیلیس و ریا، ۱۹۹۴).

**تئوری جبران تنش:** مدل‌های فعلی در شرایطی که نیم‌رخ رطوبتی خاک غیریکنواخت است جذب را در قسمت‌های مرطوب، معادل مقدار آن در زمان مرطوب بودن کل نیم‌رخ محاسبه می‌نمایند. اما مشاهدات بیانگر آن است که در این شرایط ریشه‌های موجود در بخش‌های مرطوب خاک، مقدار آب بیشتری جذب می‌نمایند (لی و همکاران، ۲۰۰۶؛ لای و کتول، ۲۰۰۰). بنابراین فاکتوری غیر از شرایط رطوبتی و تعداد ریشه موجود در هر لایه در پتانسیل جذب آب در هر لایه دخالت دارد. جارویس (۱۹۸۹) با برشمردن مشکلات شبیه‌سازی جذب آب توسط ریشه در شرایط تنش آبی به معرفی شاخص وزنی

که در آن،  $C_{f(i)}$  فاکتور جبران تنش در لایه  $i$  و  $\alpha$  تابع کاهش جذب معادله فلدس و همکاران (۱۹۷۸) می‌باشد. اگر رطوبت در کل نیم‌رخ در حد سهل‌الوصول باشد، مقدار  $C_{f(i)}$  برای همه لایه‌ها برابر واحد است. به این ترتیب مقدار جذب آب در لایه‌ها مطابق با معادلات قبل و براساس ضریب کاهش جذب و تراکم ریشه موجود در آن لایه محاسبه خواهد شد:

$$C_{f(i)} = 1 \quad \text{if} \quad \theta_k \Big|_{k=1}^n > \theta_c \quad (۴)$$

در این معادله  $\theta_c$  حد پایین رطوبت سهل‌الوصول،  $\theta_k$  رطوبت لایه‌های مختلف و  $n$  تعداد لایه‌ها می‌باشد. اما هنگامی که برخی لایه‌ها تحت تنش قرار گیرند، مقدار ضریب جبران تنش در لایه‌های مرطوب بزرگ‌تر از ۱ و مقادیر جذب نسبت به شرایطی که رطوبت کل نیم‌رخ بهینه باشد، بیشتر محاسبه می‌گردد ( $C_f > 1$ ). بنابراین با وقوع تنش در لایه‌های سطحی، در لایه‌های عمقی مرطوب با وجود تراکم کمتر ریشه، جذب نسبت به حالتی که کل نیم‌رخ رطوبت بهینه داشت، بیشتر محاسبه می‌گردد. در این تحقیق برای در نظر گرفتن توانایی گیاه در جبران تنش با افزایش جذب در لایه‌های مرطوب، معادله زیر برای ضریب جبران تنش ارائه شده است:

$$C_{f(i)} = 1 + \frac{\phi_i \cdot \theta_i}{\sum_{k=1}^n \theta_k} \quad (۵)$$

که در آن،  $\theta_i$  رطوبت لایه‌ای است که جذب در آن محاسبه می‌گردد و  $\phi_i$  ضریب جذب آب در آن لایه که به فیزیولوژی گیاه بستگی دارد (ضریب فعالیت گیاهی جبران تنش). با توجه به نوع گیاه مقدار  $\phi_i$  تغییر نموده و در دوره‌های مختلف رشد هر گیاه یک مقدار حداکثر برای این ضریب وجود خواهد داشت ( $\phi_{\max(i)}$ ). بنابراین ضریب جبران تنش نیز به دنبال آن دارای یک مقدار بیشینه خواهد بود که از معادله زیر محاسبه می‌گردد.

$$C_{f(\max i)} = 1 + \frac{\phi_{\max(i)} \theta_i}{\sum_{k=1}^n \theta_k} \quad (۶)$$

تنش برای کل نیم‌رخ خاک پرداخته و مقدار جذب در هر لایه را محاسبه نموده است. اما محدودیت استفاده از این شاخص وزنی تنش آن است که مقدار آستانه آن، اشاره‌ای به جزئیات حاکم بر رطوبت نیم‌رخ نداشته و فقط با تغییر شاخص، جبران تنش در نیم‌رخ را توجیه می‌نماید.

با توجه به محدودیت‌های توابع ارائه شده محققان یاد شده درباره برشمردن مقدار جذب آب در شرایط رطوبتی غیریکنواخت خاک، در این تحقیق سعی شده تا با ارائه یک معادله اصلاحی جدید توانایی جذب آب توسط ریشه گیاه در شرایط رطوبتی مختلف به صورت کمی مشخص گردد.

## مواد و روش‌ها

اصلاح روابط جذب آب در شرایط تنش آبی: مقدار جذب در هر لایه از طریق معادله ۲ محاسبه می‌گردد:

$$S_i = \alpha_i \cdot \beta_i \cdot \frac{T_p}{\Delta Z_i} \quad (۲)$$

در این معادله،  $\beta_i$  کسر ریشه‌های موجود در هر لایه از کل ریشه‌های گیاه،  $T_p$  تعرق پتانسیل،  $\alpha_i$  تابع کاهش جذب آب در اثر مکش خاک و  $\Delta Z_i$  ضخامت لایه مورد نظر می‌باشد. اما با وقوع تنش آبی در لایه‌های سطحی، لایه‌های عمقی مرطوب با وجود تراکم کمتر، آب بیشتری جذب می‌نمایند (جبران تنش). بنابراین استفاده از معادله (۲)، به مقادیر جذب کمتر از واقعیت منجر شده و در نتیجه به تخمین بیشتر از حد رطوبت در لایه‌های تحتانی منجر می‌شود. در تحقیق‌های (لی و همکاران، ۱۹۹۹؛ لای و کتول، ۲۰۰۰؛ لی و همکاران، ۲۰۰۱؛ براد و همکاران، ۲۰۰۵) به این مهم اشاره شده است. بنابراین به کارگیری ضریب جبران تنش برای اصلاح معادلات موجود برای شبیه‌سازی بهتر رطوبت و جذب آب توسط گیاه، ضروری است. به این منظور معادله جذب آب در حضور تنش آبی در هر یک از لایه‌های خاک به صورت زیر اصلاح شده است:

$$S_i = \alpha_i \cdot \beta_i \cdot \frac{T_p}{\Delta Z_i} \cdot C_{f(i)} \quad (۳)$$

که در این رابطه  $\theta_i$  رطوبت در لایه مورد نظر،  $\theta_{pwp}$  رطوبت نقطه پژمردگی و  $\theta_s$  رطوبت اشباع خاک مورد نظر می‌باشد.

مقدار  $R_i$  نیز از معادله (۱۲) محاسبه می‌شود که توسط جرویتس و پیچ<sup>۲</sup> (۱۹۷۴) ارائه شده است.

$$R_i = f \left( \frac{\Delta z_i}{z_r} \right) e^{-f \left( \frac{z_i}{z_r} \right)} \quad (12)$$

در این رابطه  $f$  پارامتر تجربی توزیع ریشه،  $\Delta z_i$  ضخامت لایه مورد نظر،  $z_i$  عمق میانی لایه مورد نظر از سطح خاک و  $z_r$  عمق کلی ریشه برای گیاه مورد نظر است. در تحقیقات انجام شده مقدار  $f=3$  به آن معنی است که حدود ۵۳ درصد ریشه‌ها در ۲۵ درصد بالایی عمق ریشه قرار دارند. همچنین مقدار  $f$  با اندازه ۳/۶۷ و ۴/۵ نشانگر آن است که به ترتیب ۶۰ و ۶۸ درصد ریشه‌ها در ۲۵ درصد بالایی عمق ریشه‌ها قرار گرفته‌اند. با افزایش مقدار  $f$  سهم لایه‌های سطحی از ریشه‌ها بیشتر و به عبارت بهتر ریشه‌های بیشتری در لایه‌های سطحی در نظر گرفته می‌شود.

به منظور مقایسه داده‌های جذب آب شبیه‌سازی شده با سه معادله یاد شده و مقادیر اندازه‌گیری شده، درصد خطای نسبی<sup>۳</sup> ( $RE$ ) از معادله (۱۳) تعیین شد.

$$RE(\%) = \frac{100 \sum_{i=1}^n (S_i - M_i)}{n M_{mean}} \quad (13)$$

که در آن،  $S$  و  $M$  به ترتیب مقدار جذب شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده،  $n$  تعداد مشاهدات و  $M_{mean}$  میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد.

**برپایی آزمایش:** به منظور بررسی رفتار بخش‌های مختلف ریشه در جذب آب، چهار لایسمتر<sup>۴</sup> استوانه‌ای از جنس PVC با ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر و قطر خارجی ۲۵ سانتی‌متر تهیه شد. لایسمترها با خاک لومرسی<sup>۵</sup> و با جرم مخصوص ظاهری ۱/۳۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب پر

به منظور تخمین ضریب  $C_{f(i)}$  از روی داده‌های مشاهده‌ای جذب آب در هر لایه در شرایط وقوع تنش آبی در لایه‌های فوقانی، خطای موجود بین داده‌های اندازه‌گیری جذب آب در لایه‌های مختلف و نیز مقادیر جذب شبیه‌سازی شده با معادله اصلاحی ارائه شده در این تحقیق حداقل گردیده و از روش تخمین معکوس برای برآورد پارامتر  $\phi_i$  در هر لایه استفاده می‌شود. مقدار رطوبت سهل‌الوصول و رطوبت نقطه پژمردگی داریم نیز با روش معکوس تخمین زده شد. همچنین جذب آب برآورد شده با معادلات بدون جبران تنش (معادله ۳)، جبران تنش (معادله ۶) و جارویس (۱۹۸۹)، معادله (۷) با مقادیر جذب واقعی اندازه‌گیری شده از طریق معادله بیان آب، مقایسه و خطای موجود در معادله‌های مختلف استخراج شد. جارویس<sup>۱</sup> (۱۹۸۹) با برشمردن مشکلات شبیه‌سازی جذب آب توسط ریشه در شرایط تنش آبی، به معرفی شاخص تنش وزن داده شده برای کل پروفیل خاک پرداخت:

$$\bar{\alpha} = \sum_{i=1}^k R_i \alpha_i \quad (7)$$

در رابطه بالا  $\alpha_i$  ضریب کاهش جذب مبتنی بر رطوبت نرمال شده و  $R_i$  تابع ریشه یا کسر طول ریشه‌های موجود در هر لایه است. برای محاسبه  $\alpha_i$  از روابط ذیل استفاده می‌گردد.

$$\alpha_i = \frac{1 - \bar{\theta}_i}{1 - \bar{\theta}_{c2}} \quad \bar{\theta}_{c2} < \bar{\theta}_i \leq 1 \quad (8)$$

$$\alpha_i = 1 \quad \bar{\theta}_{c1} < \bar{\theta}_i \leq \bar{\theta}_{c2} \quad (9)$$

$$\alpha_i = \frac{\bar{\theta}_i}{\bar{\theta}_{c1}} \quad 0 < \bar{\theta}_i \leq \bar{\theta}_{c1} \quad (10)$$

برای محاسبه رطوبت نرمال شده از معادله (۱۱) استفاده شده است.

$$\bar{\theta} = \frac{\theta_i - \theta_{pwp}}{\theta_s - \theta_{pwp}} \quad (11)$$

2- Gerwitz and Page  
3-Relative Error  
4- Lysimeter  
5- Clay-Loam

شدند. خاک لایسیمترها با لایه‌های شن و واکس به ضخامت ۳/۵ سانتی‌متر (۰/۵ سانتی‌متر واکس و ۳ سانتی‌متر شن) در بین لایه‌های خاک زراعی به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر با چگالی ظاهری مشابه خاک مزرعه جداسازی شده بود. ترکیب واکس مرکب از ۷۰ درصد وازلین و ۳۰ درصد پارافین بود (آلبرت و همکاران، ۱۹۸۰؛ هرکلراس و همکاران، ۱۹۷۷). مقدار رطوبت در مکش ۳۳۰ سانتی‌متر برابر ۳۰/۵ درصد حجمی، رطوبت نقطه پژمردگی ۱۱ درصد حجمی و رطوبت نقطه اشباع برابر ۴۴ درصد حجمی اندازه‌گیری شد. برای جلوگیری از تبخیر، از لایه‌های شن در کف و بالای هر لایسیمتر استفاده شد. حدود ۹۰ درصد ذرات شن مورد استفاده در این تحقیق روی الک‌های شماره ۱۰ و ۸ (ذرات شن بین ۱/۳ تا ۲/۳ میلی‌متر) باقی می‌ماند. ۱۵ بذریونجه (واریته بمی) با سیستم ریشه‌های قوی و مصرف آب روزانه قابل اندازه‌گیری، در لایسیمترها کشت شد. لایسیمترها در گلخانه‌ای که دمای آن بین ۱۵ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی آن بین ۶۰ تا ۷۰ درصد در نوسان بود، نگهداری می‌شدند. با توجه به آن‌که واریته بمی از نوع چندساله است، بنابراین امکان استفاده از آن برای دوره طولانی جهت آزمایش جذب آب وجود داشت. تنش رطوبتی بعد از حدود ۵ ماه از کشت، در لایه‌های مورد نظر اعمال گردید. با نصب لوله‌های سفالی به طول ۲۰ و قطر ۱/۵ سانتی‌متر در لایه‌هایی از خاک لایسیمترها که در الگوی آبیاری قرار داشتند و اتصال آنها از طریق لوله‌های پلاستیکی شفاف و انعطاف‌پذیر به مخازن آب مدرج که روی قفسه‌هایی مستقر شده بود، آبیاری زیرسطحی در لایه‌های تحت آبیاری براساس نیاز رطوبتی لایه‌های مختلف خاک و به‌صورت غیراشباع بود. آب منتقل شده به هر لایه در همان لایه مصرف می‌شد، زیرا رطوبت همه لایه‌ها غیراشباع بوده و لایه‌های شن و واکس از تبادل احتمالی رطوبت بین لایه‌ها جلوگیری می‌کرد. رطوبت لایه‌ها در زمان‌های مختلف با دستگاه بازتاب‌سنجی

زمانی<sup>۱</sup> (*TDR*) مدل *TRASE* اندازه‌گیری شد. در هر لایسیمتر، چهار موج‌رسان سه شاخه‌ای قابل دفن در خاک با طول ۲۰ سانتی‌متر و طول کابل ۲ متر در چهار لایه به فواصل ۲۵ سانتی‌متر از یکدیگر استفاده گردید. دستگاه *TDR* موجود با اتصال به رابط<sup>۲</sup> داده رطوبت را هم‌زمان از ۱۶ موج‌رسان دریافت و ذخیره می‌کرد. با اندازه‌گیری مجموع آب مصرفی از مخازن متصل به هر لایه و تغییرات رطوبت لایه در گام‌های زمانی مختلف، جذب آب توسط ریشه‌های آن لایه محاسبه شد. هیچ‌گونه تنش رطوبتی تا توسعه مناسب ریشه‌ها در لایسیمترها اعمال نشد. برداشت بوته‌ها در زمانی که بیش از ۱۰ درصد آنها به گل می‌نشست، انجام گرفت. برداشت اول بعد از گل‌دهی نسبی یونجه (۷۷ روز بعد از کشت بذور) و برداشت‌های بعدی ۴۵ تا ۵۰ روز بعد از برداشت قبلی صورت گرفت (به‌منظور استقرار مناسب‌تر ریشه‌ها، در دور اول به زمان بیشتری برای گل‌دهی نیاز بود). از آنجا که اندازه‌گیری جذب آب از مقاطع مختلف ریشه مستلزم توزیع ریشه‌ها در کل نیم‌رخ خاک بود، بر این اساس اندازه‌گیری‌های جذب آب در لایسیمترها بعد از چین سوم که ریشه‌های گیاه یونجه در تمام لایسیمتر توسعه‌یافته بود، انجام شد. چگونگی لایه‌بندی خاک و اتصال لوله متخلخل در لایسیمترها در شکل‌های ۱ و ۲ نمایش داده شده است. آب در هر لوله متخلخل که ۴۰ سانتی‌متر بالاتر از سطح آب مخزن متناظر قرار داشت، تحت مکش نیروی ماتریک خاک بود. به‌طوری‌که به موازات جذب آب توسط ریشه، مکش رطوبت ایجاد شده در خاک سبب انتقال آب از مخزن آن می‌شد. لایسیمترها به‌ترتیب شامل لایسیمتر ۱ با آبیاری زیرسطحی در هر ۴ لایه  $a, b, c$  و  $d$ ، لایسیمتر ۲ با آبیاری زیرسطحی در ۳ لایه  $b, c$  و  $d$  با اعمال تنش آبی در لایه بالایی ( $a$ )، لایسیمتر ۳ با آبیاری زیرسطحی ۲ لایه  $c$  و  $d$  با اعمال تنش آبی در لایه‌های  $a$  و  $b$  و لایسیمتر ۴ با آبیاری زیرسطحی لایه  $d$  با اعمال تنش آبی

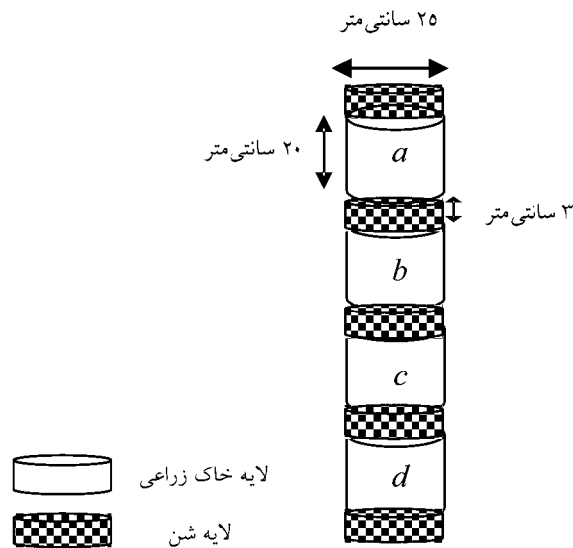
1- *TDR-TRASE-6050X- Soil Moisture California Crop*  
2- Multiplexer

در لایه‌های  $a$ ،  $b$  و  $c$  بودند. رطوبت اولیه لایه‌های تحت آبیاری قبل از شروع دوره اندازه‌گیری به اندازه ظرفیت زراعی بود. بنابراین با توجه به منحنی مشخصه رطوبتی خاک، مکش اولیه لایه‌های تحت آبیاری ۳۱۰ سانتی‌متر محاسبه شد. محاسبه‌های ارایه شده در این قسمت برای یک دوره ۱۰ روزه ارایه شده که ۲۰ روز بعد از توسعه نسبی بوته‌ها (بعد از برداشت سوم) آغاز شده است. تغییرات رطوبت در هر لایه به انضمام مقادیر ارتفاع آب کاهش یافته در مخازن متناظر با هر لایه تحت آبیاری به حجم آب تبدیل شده و به صورت حجم کل آب مصرفی

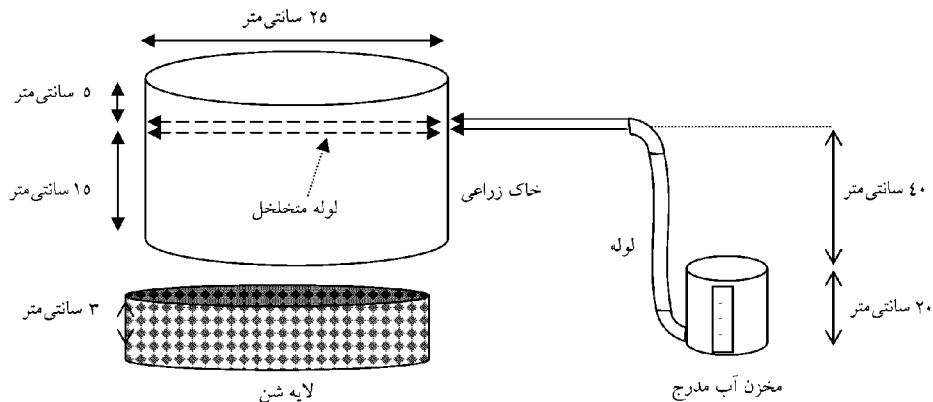
در هر لایه معرفی شد. حجم آب مصرف شده در لایه‌هایی که با مخازن آبیاری نمی‌شدند نیز از تغییرات رطوبت نسبت به ابتدای دوره، محاسبه شد. مقدار جذب آب در هر دوره زمانی از معادله زیر محاسبه گردید:

$$S_{(uptake)} = V_{(\Delta\theta)} + V_{(\Delta h)} \quad (14)$$

که در آن  $V_{(\Delta\theta)}$  تغییرات حجم آب موجود در هر لایه به خاطر کاهش رطوبت خاک برحسب لیتر،  $V_{(\Delta h)}$  حجم آب کاهش یافته از هر مخزن و  $S_{(uptake)}$  حجم آب مصرفی توسط ریشه گیاه در لایه مورد نظر بر حسب لیتر می‌باشد.



شکل ۱- لایه‌بندی خاک در لایسمترها.



شکل ۲- موقعیت لوله متخلخل در هر لایه تحت آبیاری زیرسطحی لایسمترها.

## نتایج و بحث

مقادیر رطوبت نیم‌رخ خاک لایسیمتر شماره ۱ در تاریخ‌های ۱۸، ۲۲ و ۲۷ فروردین ماه سال ۱۳۸۶ در شکل ۳ نمایش داده شده و مقادیر جذب ناشی از کاهش رطوبت و مصرف آب از مخازن متصل به لوله متخلخل در لایه‌های تحت آبیاری در تاریخ‌های بالا محاسبه و در شکل ۴ ارائه شده است. در ادامه مقادیر جذب آب محاسبه شده در لایه‌های مختلف با معادله بدون جبران تنش (معادله ۲)، معادله اصلاحی این تحقیق (روش جبران تنش معادله ۳) و معادله جارویس (۱۹۸۹) (معادله ۷) و مقادیر اندازه‌گیری شده، مقایسه شده است. خطای نسبی بین مقادیر شبیه‌سازی شده جذب آب، با روش‌های مختلف و مقادیر اندازه‌گیری شده در تاریخ‌های یاد شده در لایسیمترهای مختلف در جدول ۱ ارائه شده است. منفی بودن خطای نسبی به آن معنی است که در کل نیم‌رخ خاک، مقدار جذب شبیه‌سازی شده کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده است. به عبارت دیگر خطای نسبی برای قضاوت درباره چگونگی جزئیات جذب در هر لایه نبوده و به این منظور باید جذب آب در هر لایه را جداگانه براساس شرایط حاکم بر آن محاسبه و با روش‌های مختلف مقایسه نمود. لایسیمتر ۱ در تاریخ ۱۸ فروردین ماه سال ۱۳۸۶ به دلیل مناسب بودن رطوبت در نیم‌رخ، در هیچ‌کدام از لایه‌ها با تنش رطوبتی مواجه نشد (شکل ۳).

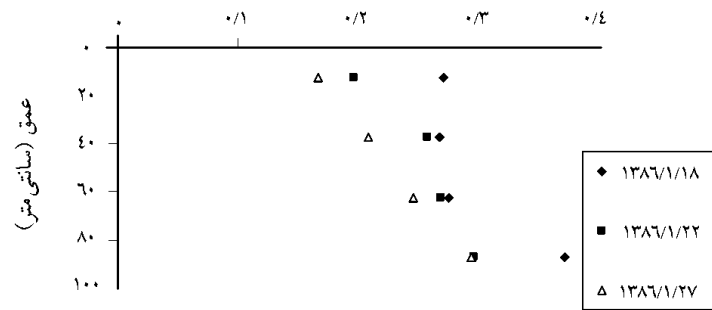
از این‌رو خطای نسبی به‌دست آمده بین مقادیر جذب آب تخمینی با روش جبران و بدون جبران تفاوتی با یکدیگر نداشت، اما مقدار خطای نسبی روش جارویس برای محاسبه جذب در کل نیم‌رخ نسبت به دو روش قبل کمتر بود. مقدار خطای نسبی در تاریخ ۲۲ فروردین ماه سال ۱۳۸۶ در هر سه روش منفی است، به عبارت دیگر به‌طور کلی در این لایسیمتر مقدار جذب توسط روش‌های سه‌گانه کمتر از حد اندازه‌گیری شده است. همچنین خطای نسبی روش جبران تنش نسبت به روش بدون جبران تنش و روش جارویس کمتر است.

در طول دوره رطوبت همه لایه‌ها به‌دلیل آبیاری زیرسطحی در حد سهل‌الوصول (بین ۰/۲ تا ۰/۳۵) قرار داشت (شکل ۳). البته در تاریخ ۲۷ فروردین ماه سال ۱۳۸۷ در لایه a مقدار رطوبت به کمتر از ۰/۲ تنزل یافته است. علت آن بود که در اواخر دوره با افزایش شدت جذب در این لایه به‌دلیل تراکم بیشتر ریشه‌ها در آن، سرعت جذب آب از سرعت دریافت رطوبت از لوله متخلخل بیشتر شده است. مقادیر جذب آب در عمق‌های مختلف با زمان در شکل ۴ نشان داده شده است. در تاریخ ۲۷ فروردین ماه سال ۱۳۸۶ مقدار خطای نسبی روش جبران تنش از روش جارویس کمتر است، بنابراین به‌طور کلی در این تاریخ مقدار جذب با روش جبران از روش جارویس و روش بدون جبران تنش مناسب‌تر پیش‌بینی شده است.

جدول ۱- مقادیر درصد خطای نسبی لایسیمترهای ۱ تا ۴.

لایسیمتر				روش شبیه‌سازی	تاریخ اندازه‌گیری
۴	۳	۲	۱		
۲/۸	۵/۲	۱۶/۷	۲۲/۸	جبران تنش	
۲/۸	۵/۲	۱۴/۶	۲۲/۸	بدون جبران تنش	۱۳۸۶/۱/۱۸
-۷/۷	-۲/۱	۱۵	۱۶/۴	روش جارویس	
۵/۵	-۳۰/۱	۸/۵	-۱۰/۶	جبران تنش	
-۲۳/۷	-۳۸/۱	۷	-۲۴/۱	بدون جبران تنش	۱۳۸۶/۱/۲۲
۴۸/۷	۱۵/۳	۹/۱	-۱۶/۶	جارویس	
۴/۱	-۳۱/۵	۷/۴	۹/۶	جبران تنش	
-۲۹/۹	-۴۱/۸	۱۰	-۸/۱۴	بدون جبران تنش	۱۳۸۶/۱/۲۷
۳/۷	۱/۴	۷	۱۳/۶	جارویس	

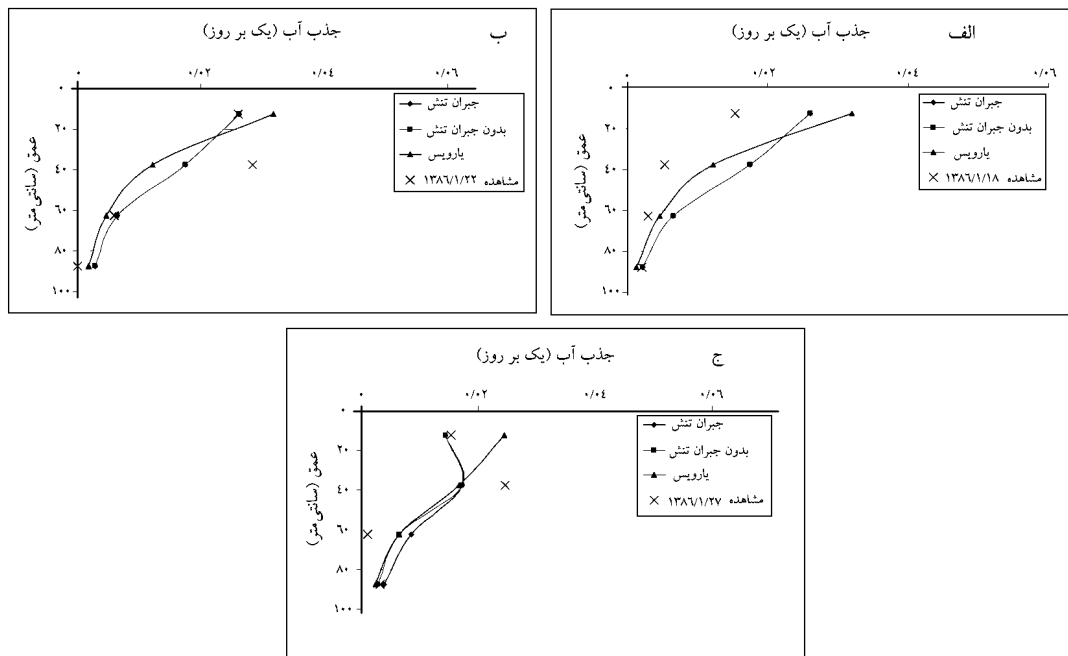
رطوبت (سانتی متر مکعب بر سانتی متر مکعب)



شکل ۳- نیمرخ رطوبت خاک در طول دوره برای لایسیمتر ۱.

لایه سطحی بیشتر از حد اندازه‌گیری شد. اما روش جبران مقدار جذب را در این لایه مناسب‌تر برآورد نمود. هر دو روش روند کاهش مقدار جذب با عمق را که به دلیل کاهش تراکم ریشه می‌باشد، به خوبی پیش‌بینی نمودند.

در تاریخ ۱۸ فروردین ماه سال ۱۳۸۶ به دلیل مناسب بودن شرایط رطوبتی، بین مقادیر جذب مشاهده‌ای با روش جبران و روش بدون جبران تنش اختلافی نبود. مقدار جذب در هر دو روش جبران و روش جارویس در

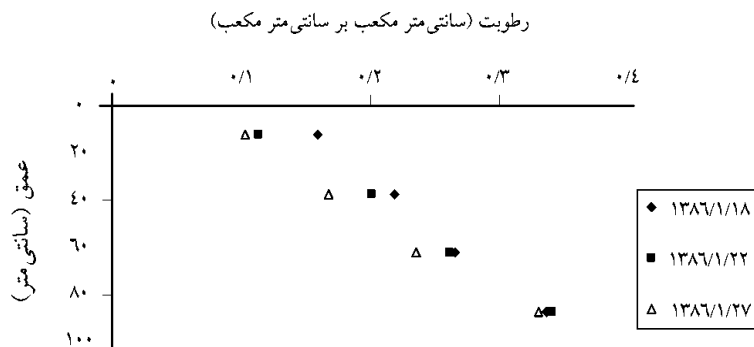


شکل ۴- مقایسه مقادیر جذب شبیه‌سازی شده با روش جبران تنش ارایه شده، روش جارویس با داده‌های جذب اندازه‌گیری شده به ترتیب در تاریخ‌های الف- ۱۸ فروردین ماه سال ۱۳۸۶، ب- ۲۲ فروردین ماه سال ۱۳۸۶، ج- ۲۷ فروردین ماه سال ۱۳۸۶ برای لایسیمتر ۱.



در تاریخ ۲۲ فروردین ماه سال ۱۳۸۶، پیش‌بینی روش جبران تنش در لایه سطحی مناسب‌تر از روش جارویس است. هر دو روش مقدار جذب در لایه دوم را کمتر از مقادیر اندازه‌گیری، پیش‌بینی نمودند. در لایه سوم و چهارم پیش‌بینی هر دو روش مناسب بود. در تاریخ ۲۷ فروردین ماه سال ۱۳۸۷ مقدار پیش‌بینی روش جبران در لایه سطحی تطابق زیادی با مقدار مشاهده‌ای نشان داد در حالی که روش جارویس مقدار جذب را در این لایه بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده نشان داده است. هر دو روش در لایه دوم مقدار جذب را کمتر از واقعیت پیش‌بینی نمودند. پیش‌بینی روش جبران تنش در لایه چهارم مناسب بود.

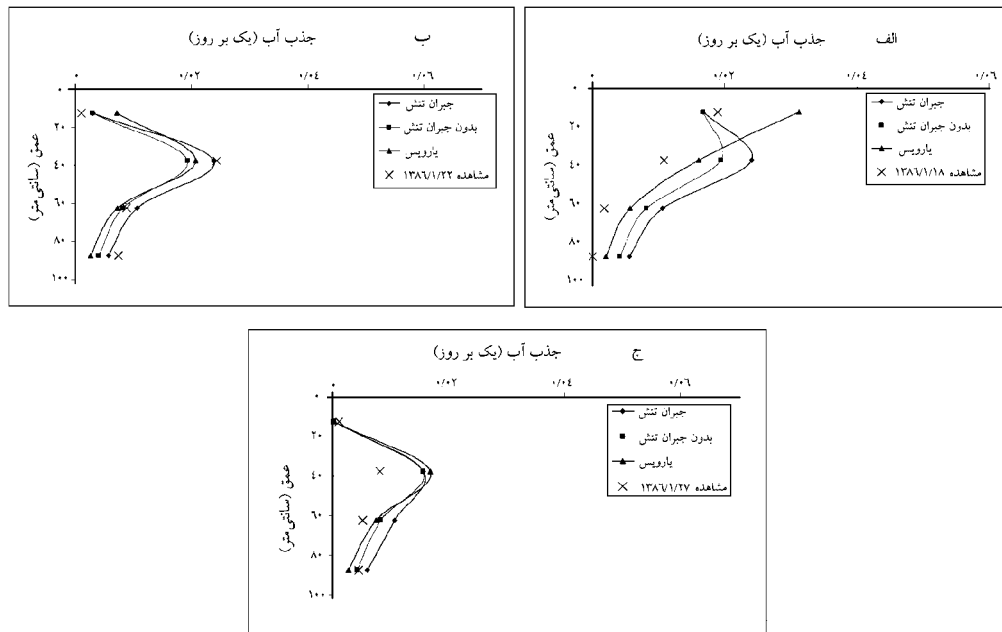
برای لایسیمتر ۲، خطای نسبی بین مقادیر جذب آب محاسبه شده با روش جبران تنش و روش‌های عدم جبران و جارویس در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده در تاریخ‌های ۱۸ فروردین ماه سال ۱۳۸۶ و ۲۲ فروردین ماه سال ۱۳۸۷ تفاوت زیادی نداشت (جدول ۱). با توجه به مثبت بودن خطای نسبی در آنها مشخص شد که هر سه روش مقادیر جذب را به‌طور کلی در نیم‌رخ بیشتر تخمین زده‌اند. در تاریخ ۲۷ فروردین ماه سال ۱۳۸۶/ رطوبت لایه *b* به‌دلیل جذب آب با سرعت بیشتر به کمتر از حد پایین سهل‌الوصول (۰/۲) تنزل یافته است.



شکل ۵- نیم‌رخ رطوبت در طول دوره برای لایسیمتر ۲.

نیم‌رخ جذب آب در لایسیمتر شماره ۲ در تاریخ‌های ذکر شده در شکل ۶ ارایه شده است. مقایسه جذب آب در زمان‌های مختلف نشان داد که در تاریخ ۱۸ فروردین ماه سال ۱۳۸۶ روش جبران تنش و روش بدون جبران مقدار جذب را در لایه سطحی مناسب پیش‌بینی نمودند و روش جارویس مقدار جذب را بیشتر از حد برآورد نموده است. در لایه‌های تحتانی پیش‌بینی روش جارویس به واقعیت نزدیک‌تر بود. در تاریخ ۲۲ فروردین ماه سال ۱۳۸۷ با کاهش بیشتر رطوبت لایه سطحی به نقطه پژمردگی دائمی مقدار جذب در لایه *b* افزایش یافته

است، این افزایش در روش جبران تنش به خوبی با مقدار اندازه‌گیری شده تطابق دارد (شکل ۵). مقدار جذب پیش‌بینی شده با روش جبران برای لایه‌های دیگر نیز در این تاریخ از روش بدون جبران و روش جارویس مناسب‌تر بود. روش جارویس در لایه دوم و چهارم مقدار جذب را کمتر و در لایه سوم مقدار جذب را مناسب پیش‌بینی نمود. در تاریخ ۲۷ فروردین ماه سال ۱۳۸۷ هر سه روش مقدار جذب را در لایه سطحی مناسب پیش‌بینی نمودند.

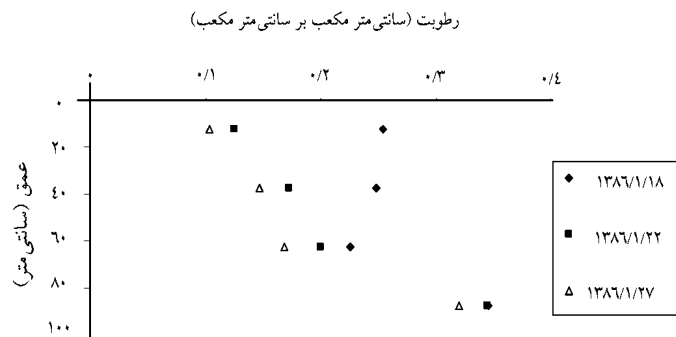


شکل ۶- مقایسه مقادیر جذب شبیه سازی شده با روش جبران تنش ارایه شده، روش جارویس با داده های جذب اندازه گیری شده به ترتیب در تاریخ های الف- ۱۸ فروردین ماه سال ۱۳۸۶، ب- ۲۲ فروردین ماه سال ۱۳۸۶، ج- ۲۷ فروردین ماه سال ۱۳۸۶ برای لایسمتر ۲.

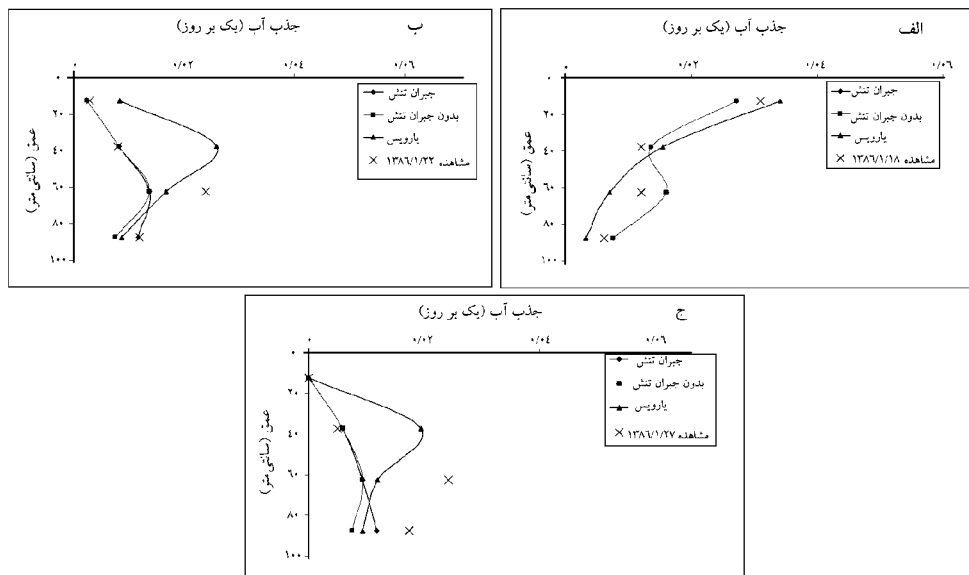
ماه سال ۱۳۸۶ و ۲۷ فروردین ماه سال ۱۳۸۶ کمتر از مقادیر واقعی بوده است (با توجه به منفی بودن مقدار خطای نسبی). در مجموع با توجه به جدول ۱ و شکل های ۸- ب و ۸- ج مقادیر پیش بینی روش جبران نسبت به روش عدم جبران بهتر بود. در لایسمتر ۳ دو لایه c و d با روش آبیاری زیرسطحی مرطوب می شد. رطوبت لایه c در تاریخ ۲۷ فروردین ماه سال ۱۳۸۶ به دلیل افزایش شدت تنش لایه های سطحی به کمتر از ۰/۲ کاهش یافت. شکل ۸ مقادیر جذب آب در لایسمتر ۳ را در تاریخ های مختلف نشان می دهد.

برای لایسمتر ۳ خطای نسبی روش جبران و روش عدم جبران در تاریخ ۱۸ فروردین ماه سال ۱۳۸۷ مشابه بود (جدول ۱). در این تاریخ با توجه به رطوبت مناسب نیم رخ (شکل ۷)، جبران تنش صورت پذیرفته است. این رو تفاوتی بین نمودارهای جذب در دو روش در شکل ۸- الف دیده نشد.

خطای نسبی مشابه ۵/۲ درصد برای روش های جبران تنش و روش بدون جبران (جدول ۱)، بیانگر آن است که برآورد جذب در تاریخ ۱۸ فروردین ماه سال ۱۳۸۶ با هر دو روش به نسبت مناسب و در تاریخ های ۲۲ فروردین



شکل ۷- نیم رخ رطوبت در طول دوره برای لایسمتر ۳.



شکل ۸- مقایسه مقادیر جذب شبیه سازی شده با روش جبران تنش ارایه شده، روش جارویس با داده های جذب اندازه گیری شده به ترتیب در تاریخ های الف- ۱۸ فروردین ماه سال ۱۳۸۶، ب- ۲۲ فروردین ماه سال ۱۳۸۶، ج- ۲۷ فروردین ماه سال ۱۳۸۶ برای لایسیمتر ۳.

و روش بدون جبران تفاوتی با یکدیگر نداشت (جدول ۱). زیرا به دلیل مناسب بودن رطوبت نیم رخ جبران تنش صورت نمی پذیرفت. اما در ادامه در تاریخ ۲۲ فروردین ماه سال ۱۳۸۶ با شدت یافتن تنش، خطای یاد شده در روش جبران تنش کمتر از روش بدون جبران و جارویس به دست آمد. بنابراین در این تاریخ مقادیر جذب محاسبه شده با روش جبران مناسب ترین روش بوده است. علت آن بود که گیاه توانسته تنش واقع شده در لایه های فوقانی را با جذب بیشتر آب از لایه تحتانی جبران نموده و این پدیده به خوبی در فرمول جذب با جبران در نظر گرفته شده است. روش جارویس در این تاریخ جذب آب را در مقایسه با دو روش دیگر با دقت کمتری برآورد نمود. در تاریخ ۲۷ فروردین ماه سال ۱۳۸۶ که تنش آبی در لایه های سطحی کاملاً گسترش یافته بود، مقادیر خطای روش جبران تنش نسبت به روش بدون جبران کمتر بود. شرایط اولیه نیم رخ رطوبتی خاک لایسیمتر ۴ در تاریخ های ۱۸، ۲۲ و ۲۷ فروردین ماه سال ۱۳۸۶ در شکل ۹ نشان داده شده است. رطوبت نیم رخ در ابتدای دوره در حد سهل الوصول (۰/۲ تا ۰/۳۵ حجمی) بوده و بر این اساس گیاه بدون محدودیت، آب را از همه نیم رخ جذب می نمود. به این دلیل احتیاجی به جبران تنش در هیچ کدام

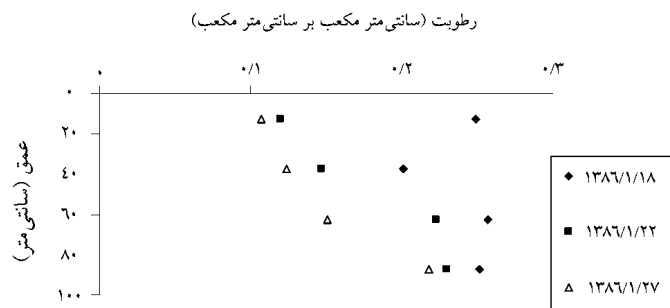
با توجه به شکل ۸- الف در تاریخ ۱۸ فروردین ماه سال ۱۳۸۶ روش جبران تنش و روش بدون جبران مقادیر جذب را در همه لایه ها مناسب پیش بینی نمودند. مقادیر جذب در این روش ها در سه لایه تحتانی از روش جارویس بهتر بود. روش جارویس در لایه سطحی مقدار جذب را مناسب و در بقیه لایه ها کمتر از حد برآورد نموده است. در تاریخ ۲۲ فروردین ماه سال ۱۳۸۶ (شکل ۸- ب) روش جبران تنش در لایه  $a$  و  $b$  مقدار جذب را مناسب تخمین زد، در لایه  $c$  مقدار جذب کمتر از مقادیر اندازه گیری شده بود. در حالی که روش جارویس در همه لایه ها به خصوص لایه  $b$  مقدار جذب را نامناسب برآورد نموده است. روش جبران تنش در لایه  $d$  بهترین تخمین را برآورد نمود. در تاریخ ۲۷ فروردین ماه سال ۱۳۸۷ در لایه  $a$  و  $b$  پیش بینی روش جبران تنش و روش بدون جبران مناسب بود. اما روش جارویس مقدار جذب را در لایه  $a$  مناسب ولی در لایه  $b$  نامناسب تخمین زد. به طور کلی در لایه های  $c$  و  $d$  هر سه روش مقدار جذب را کمتر از واقعیت تخمین زدند. اما پیش بینی روش جبران تنش در لایه  $d$  از بقیه بهتر بود.

در لایسیمتر ۴ در ابتدای دوره (۱۸ فروردین ماه سال ۱۳۸۶) درصد خطای نسبی محاسبه جذب با روش جبران

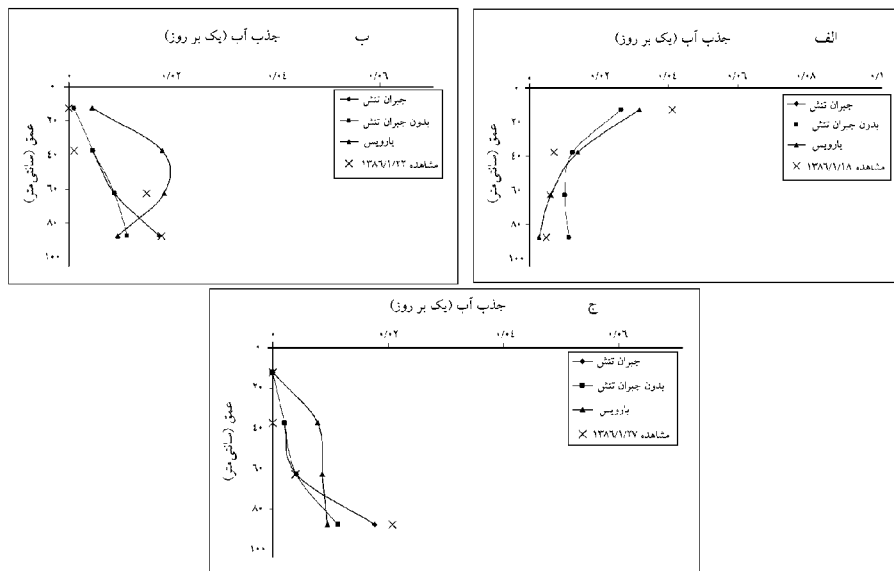
از لایه‌ها نبود. بنابراین نیم‌رخ جذب آب با و بدون در نظر گرفتن تنش آبی در تاریخ ۱۸ فروردین ماه سال ۱۳۸۶ با یکدیگر تفاوتی نداشت (شکل ۱۰). به‌طورکلی عامل عمده تفاوت در جذب در عمق‌های مختلف وجود تراکم ریشه متفاوت در آنها است.

در اوایل دوره (۱۸ فروردین ماه سال ۱۳۸۶) به دلیل رطوبت مناسب و تقریباً یکنواخت در نیم‌رخ، مقدار جذب در لایه‌های مختلف رابطه‌ای مستقیم با کسر ریشه‌های موجود در آنها داشته و به این دلیل مقادیر جذب آب در لایه‌های سطحی بیشتر از لایه‌های تحتانی است. در اواسط دوره (۲۲ فروردین ماه سال ۱۳۸۶) با کاهش رطوبت خاک در لایه‌های فوقانی مقدار جذب در آنها به شدت کاسته شده و جبهه حداکثر جذب به اعماق متوسط منتقل

شده است. با توجه به آن که مقادیر کسر ریشه‌های موجود در این اعماق متوسط بیشتر از مقادیر آن در لایه‌های تحتانی بود، مقدار جذب در آنها بیشتر از اعماق پایین‌تر شده است. در انتهای دوره (۲۷ فروردین ماه سال ۱۳۸۶) با پیش‌روی تنش رطوبتی از لایه‌های سطحی به لایه‌های میانی، جبهه حداکثر جذب با وجود کسر ریشه‌های کمتر در اعماق بیشتر، به سمت آنها سوق یافته، زیرا با وجود ریشه‌های کمتر در این لایه‌ها، رطوبت در آنها در حد سهل‌الوصول بوده است. به عبارت بهتر تعداد ریشه کم‌تراکم در لایه‌های تحتانی، آب بیشتری را نسبت به ریشه‌های سطحی جذب نموده و تنش رطوبتی لایه‌های سطحی را به این طریق جبران نموده است.



شکل ۹- نیم‌رخ رطوبت در طول دوره برای لایسمتر ۴.



شکل ۱۰- مقایسه مقادیر جذب شبیه‌سازی شده با روش جبران تنش ارایه شده، روش جارویس با داده‌های جذب اندازه‌گیری شده به ترتیب در تاریخ‌های الف- ۱۸ فروردین ماه سال ۱۳۸۶، ب- ۲۲ فروردین ماه سال ۱۳۸۶، ج- ۲۷ فروردین ماه سال ۱۳۸۶ برای لایسمتر ۴.

در ابتدای دوره (۱۸ فروردین ماه سال ۱۳۸۶) با وجود رطوبت کمتر لایه دوم نسبت به لایه سوم (به ترتیب ۰/۲۰ و ۰/۲۵)، به خاطر تراکم بیشتر ریشه در این لایه و از طرفی بالاتر بودن رطوبت آن از حد سهل الوصول (۱۸/۹) درصد در جدول ۲) مقدار جذب در لایه دوم بیشتر از لایه سوم و نیز لایه چهارم شده است (به ترتیب ۰/۰۰۷ در برابر ۰/۰۰۶ و ۰/۰۰۴۸ با واحد یک بر روز یا  $day^{-1}$ ).

روش جبران تنش و نیز روش بدون جبران تنش در این تاریخ به دلیل وجود شرایط رطوبتی سهل الوصول نتایج مشابهی داشتند (شکل ۱۰-الف). روش جارویس در این روز برآورد نسبتاً مناسبی از جذب در نیم رخ نشان داد. از آنجا که شدت جذب در لایه‌های سطحی به دلیل تراکم بیشتر ریشه‌ها در روزهای قبل از تاریخ ۲۲ فروردین ماه سال ۱۳۸۶ بالاتر بود، سرعت کاهش رطوبت در آنها نیز نسبت به لایه‌های تحتانی بیشتر بود، به این دلیل در این تاریخ رطوبت لایه سطحی به ۰/۱۲ رسیده در حالی که رطوبت لایه دوم به ۰/۱۵ و رطوبت لایه سوم و چهارم به ۰/۲۲ و ۰/۲۳ رسیده است. در همین دوره شدت جذب آب در لایه‌های یاد شده به ترتیب ۰/۰۰۰۱، ۰/۰۰۰۱، ۰/۰۱۵ و ۰/۱۷۹ شده است. در لایه سوم و چهارم مقدار جذب نسبت به ابتدای دوره افزایش قابل توجهی داشته است (مقدار جذب در لایه سوم و چهارم در تاریخ ۱۸ فروردین ماه سال ۱۳۸۶ به ترتیب ۰/۰۰۴۸ و ۰/۰۰۰۶) (یک بر روز) و در تاریخ ۲۲ فروردین ماه سال ۱۳۸۶ به ترتیب ۰/۰۱۵۱ و ۰/۱۷۹ (یک بر روز) بوده است. با توجه به تراکم ریشه کمتر در لایه سوم، چنین افزایشی در مقدار جذب جز با افزایش فعالیت ریشه‌ها و بالاتر بردن ظرفیت جذب در آنها امکان‌پذیر نیست، زیرا اگرچه رطوبت در آنها در حد سهل الوصول قرار داشت (به ترتیب ۰/۲۲ و ۰/۲۳) اما نسبت به اوایل دوره به ترتیب ۱۳ و ۸ درصد کاهش داشته است. بر این اساس افزایش جذب در این لایه‌ها جز با در نظر گرفتن امکان افزایش ظرفیت جذب نسبت به اوایل دوره برای آنها توجیه نمی‌شود. در این دوره تنش واقع شده در لایه سطحی توسط جذب رو به

ازدیاد آب در لایه‌های عمقی جبران شده است. پیش‌بینی روش جبران تنش ارایه شده در سه لایه فوقانی (تا عمق ۶۰ سانتی‌متر) مناسب بود. در حالی که روش بدون جبران تنش مقدار جذب در لایه تحتانی را کمتر از حد و روش جارویس مقدار جذب را در اعماق میانی بیشتر از حد و در لایه تحتانی مقادیر جذب را کمتر از حد برآورد نمود (شکل ۱۰-ب). در اواخر دوره (۲۷ فروردین ماه سال ۱۳۸۶) مقدار جذب در دو لایه فوقانی ۱۰۰ درصد کاهش و به صفر نزدیک شده، زیرا مقدار رطوبت در این دو لایه به حد نقطه پژمردگی دائمی رسیده است. اما گیاه با توجه به مرطوب بودن لایه سوم و چهارم آب مورد نیاز خود را از طریق این لایه‌ها جذب می‌نمود. اگرچه مقدار رطوبت در این لایه‌ها نیز نسبت به دوره قبلی (۲۲ فروردین ماه سال ۱۳۸۶) به ترتیب ۳۵ و ۱۵ درصد کاهش یافته، اما این کاهش رطوبت باعث کاهش جذب در لایه سوم به میزان ۷۳ درصد شده است. با این حال لایه چهارم به دلیل مناسب بودن رطوبت (به دلیل اتصال لوله متخلخل به مخزن آب) و از طرفی خشکی لایه‌های فوقانی فعالیت خود را بیش از گذشته افزایش داده به طوری که نسبت به تاریخ ۲۲ فروردین ماه سال ۱۳۸۶، ۱۶ درصد به شدت جذب آن افزوده شده و از مقدار ۰/۱۷۹ به ۰/۲۰۸ (یک بر روز) رسید (شکل ۱۰-ج). مقایسه مقادیر جذب آب مشاهده‌ای با روش جبران ارایه شده و روش جارویس در تاریخ ۲۷ فروردین ماه سال ۱۳۸۶، بیانگر آن است که در لایه‌های سطحی روش جبران ارایه شده در این تحقیق مقادیر جذب را بهتر پیش‌بینی نمود. روش جبران تنش در مقایسه با روش جارویس و نیز روش بدون جبران تنش، پیش‌بینی مناسب‌تری از جذب برآورد نمود.

مقادیر پارامترهای مختلف از جمله رطوبت حد پایین سهل الوصول  $\theta_c$ ، رطوبت نقطه پژمردگی  $\theta_{pwp}$  و ضریب فعالیت گیاهی برای لایسیمترهای مختلف در جدول ۲ ارایه شده و همچنین مقدار رطوبت  $\theta_c$  و  $\theta_{pwp}$  در هر ۴ لایسیمتر مناسب برآورد شده است.

مقایسه ضریب فعالیت گیاهی ( $\phi_{(i)}$ ) برآورد شده در لایسیمترهای مختلف نشان می‌دهد که با افزایش شدت تنش (به صورت کاهش تعداد لایه‌های تحت آبیاری زیرسطحی)، مقدار این ضریب نیز رو به افزایش است. در لایسیمتر ۱ و ۲ بیشترین مقدار برآورد شده برای ضریب فعالیت گیاهی ( $\phi_{\max(i)}$ ) به ترتیب ۱/۱ و ۱/۸۷ برآورد شد. در حالی که در لایسیمتر ۳ مقدار آن ۲/۲۳ و در لایسیمتر ۴ به ۲/۳۸ برآورد شده است. در لایسیمتر ۴ با بیشترین شدت تنش در بین لایسیمترها (سه لایه فوقانی  $a$ ،  $b$  و  $c$  دارای رطوبتی نزدیک به نقطه پژمردگی بوده و فقط لایه  $d$  در آن تحت آبیاری زیر سطحی قرار داشت) بیشترین مقدار برای ضریب فعالیت گیاهی ( $\phi_{\max(i)}$ ) محاسبه گردید. بنابراین در شرایطی که گیاه با تنش مواجه می‌گردد (افزایش تعداد لایه‌های تحت تنش) این پتانسیل در گیاه وجود دارد که آب بیشتری را از لایه‌های با رطوبت مناسب جذب نماید. در لایسیمتر ۴ رطوبت کل نیم‌رخ خاک در ابتدای دوره (شکل ۹) در شرایط سهل‌الوصول قرار داشت، بنابراین در این لایسیمتر گیاه با بالا بردن سطح فعالیت خود در جذب آب از لایه مرطوب تحتانی حداکثر تلاش خود را برای جذب آب از آن لایه به‌کار برد. از این رو مقدار ضریب  $\phi_i$  به دلیل شدت یافتن تنش (افزایش تعداد لایه‌هایی که رطوبت در آنها به پایین‌تر از حد سهل‌الوصول نزول می‌یافت)، به ترتیب از ۱/۱ در ابتدای دوره به ۱/۲۵ در اواسط و در نهایت به بیشترین مقدار خود در انتهای دوره (۲/۳۸) افزایش یافت.

### نتیجه‌گیری

با تفکیک لایه‌های خاک در لایسیمترها امکان تبادل رطوبت از لایه‌های مرطوب به لایه‌های تحت تنش حذف گردید. در واقع این عمل برای اطمینان از آن بود که ریشه‌های موجود در لایه‌های با رطوبت مناسب مسئول اصلی جذب آب برای گیاه شده و در نتیجه همه تغییرات رطوبتی در هر لایه به دلیل مصرف آب در همان لایه باشد. با مقایسه مقادیر جذب آب در لایسیمترهای مختلف

مشخص شد که هرگاه رطوبت در لایه‌های تحتانی در حد مطلوب قرار داشته باشد، گیاه در مواجهه با تنش آبی در لایه‌های فوقانی، توانایی آن را داراست که با افزایش فعالیت ریشه‌های تحتانی، آب مورد نیاز خود را جذب نماید. با بر شمردن محدودیت معادلات فعلی جذب در شرایط تنش آبی، معادله جذب آب توسط ریشه با اعمال فاکتور جبران تنش اصلاح شد. معادله اصلاحی در شرایط وقوع تنش آبی غیریکنواخت در نیم‌رخ، مقادیر جذب آب را در بیشتر موارد نسبت به معادلات دیگر مناسب‌تر پیش‌بینی نمود. به خصوص زمانی که تنش آبی در بخش بیشتری از نیم‌رخ خاک توسعه یافته بود، پیش‌بینی‌های انجام شده توسط روش اصلاحی از روابط بدون جبران تنش و جارویس بهتر بود. با استفاده از روش تخمین معکوس مقدار ضریب فعالیت گیاهی جبران تنش ( $\phi_i$ ) در معادله اصلاحی، به کمک داده‌های جذب آب توسط ریشه در لایسیمترهای مختلف تعیین شد. در لایسیمتر ۱، با ۴ لایه تحت آبیاری مقدار ضریب فعالیت گیاهی برابر ۱/۱، در لایسیمتر ۲ با ۱ لایه تحت تنش آبی مقدار ضریب برابر ۱/۸۷، در لایسیمتر ۳ با ۲ لایه تحت تنش مقدار ضریب فعالیت گیاهی برابر ۲/۲۳ و در نهایت در لایسیمتر ۴ با ۳ لایه تحت تنش و فقط ۱ لایه ( $d$ ) تحت آبیاری زیرسطحی، مقدار ضریب فعالیت گیاهی برابر با ۲/۳۸ محاسبه گردید. با توجه به آن‌که لایه‌های خاک در همه لایسیمترها توسط لایه‌های شن و واکس، تفکیک شده بنابراین تبادل رطوبت بین لایه‌ها حذف شده بود. بر این اساس با خشک شدن لایه‌های فوقانی گیاه بیشترین تلاش خود را برای جذب آب از لایه‌های مرطوب تحتانی به‌کار می‌گرفت. از این رو مقدار ضریب فعالیت گیاهی در این لایسیمترها به حداکثر مقدار خود رسیده است. در بسیاری از حالات معادله اصلاحی جدید نسبت به معادلات موجود، پیش‌بینی بهتری از تغییرات رطوبت خاک در لایه‌های مختلف در شرایط وقوع تنش آبی در برخی لایه‌ها داشت.

جدول ۲- مقادیر پارامترهای معادلات جذب با بهینه‌سازی معکوس در لایسیمترهای ۱، ۲، ۳ و ۴.

$\theta_{pwp}$	$\theta_c$	$\phi_{max}$	لایسیمتر
(سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب)	(سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب)	-	
۱۲/۶	۲۰/۳	۱/۱	۱
۱۰/۲	۱۸/۵۵	۱/۸۷	۲
۱۱/۳۹	۱۹/۲۷	۲/۲۳	۳
۱۱/۳۶	۱۸/۹	۲/۳۸	۴

### منابع

1. Albert, S., Hunter, S., and Kelley, O.J. 1980. The extension of plant roots into dry soil. *Plant Physiol.*, 25: 120-130.
2. Braud, I., Varado, N., and Olioso, A. 2005. Comparison of root-water-uptake modules using either the surface energy balance or potential transpiration. *J. Hydrol.*, 301: 267-286.
3. Dirksen, C. 1985. Relationship between root uptake-weighted mean soil water salinity and total leaf water potentials of alfalfa. *Irrig. Sci.*, 6: 39-50.
4. Feddes, R.A., Kowalik, P.J., and Zaradny, H. 1978. *Simulation of Field Water Use and Crop Yield. Simulation Monographs*, Pudoc, Wageningen, The Netherlands, 180p.
5. Feddes, R.A., and Raats, P.A.C. 2004. Parameterising the soil-water-plant-root system. In: Feddes, R.A., et al. (Eds.), *Unsaturated Zone Modeling: Progress, Challenges and Applications*. Wageningen Frontis Series, 6: 95-141.
6. Hendrickson, A.H., and Veihmeyer, F.J. 1931. Influence of dry soil on root extension. *Plant Physiol.*, 6: 567-576.
7. Herkelrath, W.N., Miller, E.E., and Gardner, W.R. 1977. Water uptake by plants: I. divided root experiments. *Soil Sci Soc. Am. J.*, 41: 6. 1033-1037.
8. Homae, M. 1999. Root water uptake under non-uniform transient salinity and water stress. Ph.D. Thesis. Agricultural University Wageningen, The Netherlands, 169p.
9. Hunter, A.S., and Kelley, O.J. 1946. A new technique for studying the absorption of moisture and nutrients from soil by plant roots. *Soil Sci.*, 62: 441-450.
10. Jarvis, N.J. 1989. A simple empirical model of root water uptake. *Jornal of Hydrol.*, 107: 57-72.
11. Kleidon, A., and Heimann, M. 1998. Optimized rooting depth and its impacts on the simulated climate of an atmospheric general circulation model. *Geophys. Res. Lett.*, 25: 3. 345-348.
12. Lai, C.T., and Katual, G. 2000. The dynamic role of root-water uptake in coupling potential to actual transpiration. *Adv. Water Resour.*, 23: 427-439.
13. Li, K.Y., Boisvert, J.B., and De Jong, R. 1999. An exponential root-water-uptake model. *Can. J. Soil Sci.*, 79: 333-343.
14. Li, K.Y., De Jong, R., and Boisvert, J.B. 2001. An exponential root-water-uptake model with water stress compensation. *Jour of Hydrol.*, 252: 1-4. 189-206.
15. Li, K.Y., De Jong, R., Coe, M.T., and Ramankutty, N. 2006. Root-water-uptake based upon a new water stress reduction and an asymptotic root distribution function. *Earth. Intera.*, 10: 14. 1-22.
16. Philips. J.G., and Riha, S.J. 1994. Root growth, water uptake and canopy development in eucalyptus viminalis seedlings. *Austr Jour of Plant Physiol.*, 21: 1. 69-78.
17. Prasad, R. 1988. A linear root water uptake model. *J. Hydrol.*, 99: 297-306.
18. Richards, L.A. 1931. Capillary conduction of liquids in porous mediums. *Physics*, 1: 318-333.
19. Scott, H.D. 2000: *Soil Physics Agricultural and Environmental Application*. Iowa State University Press, 421p.
20. Van Genuchten, M.Th. 1987. A numerical model for water and solute movement in and below the root zone. U. S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, CA.
21. Weaver, J.E., Jean, F.C., and Crist, J.W. 1922. *Development and activities of roots of crop plants*. Carnegie Inst. Wash. Pub, 316p.
22. Zeng, X., Dai, Y.J., Dickinson, R.E., and Shaikh, M. 1998. The role of root distribution for climate simulation over land. *Geophys Res Lett.*, 25: 24. 33-65.

---

---

## **Root uptake compensation factor for non-uniform soil moisture conditions**

**\*M. Zakerinia<sup>1</sup>, T. Sohrabi<sup>2</sup>, F. Abbasi<sup>3</sup>, M.R. Neyshaboori<sup>4</sup> and M. Shahabifar<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources,

<sup>2</sup>Professor, Dept. of Irrigation Engineering, University of Tehran, <sup>3</sup>Assistant Prof., Agriculture Technique and Engineering Institute of Karaj, <sup>4</sup>Professor, Dept. of Soil Science, University of Tabriz,

<sup>5</sup>Assistant Prof., Soil and Water Institute Research

---

---

### **Abstract**

In this study, with measuring water uptake in different soil layers, the role of different parts of root system in crop water supply during water stress conditions is characterized. Four cylindrical lysimeters with 25 cm diameter and 100 cm height were filled with clay loam soil. Soil columns were separated to 4 layers with 3 cm sand layers. Subsurface irrigation was applied with water stress patterns (decreasing number of layers which were irrigated from subsurface). Sand layers in each column which were preventing soil moisture exchange, could characterize the real role of each sub-layer root in water uptake when surface layers were under water stress. In this study root water uptake equation is corrected for water stress condition with presenting a compensation factor. With this corrected equation root water uptake in soil layers under water stress condition is investigated. The results showed that corrected equation determined root water uptake better than other equations in some conditions. Compensation factor is dependent on a plant factor ( $\phi_i$ ), that was determined with inverse optimization technique from root water uptake data in each lysimeter (it is calculated as 1.1, 1.87, 2.23 and 2.38 for lysimeters 1, 2, 3 and 4, respectively). This factor increased with increasing water stress severity.

**Keywords:** Lysimeter; Root water uptake; Subsurface irrigation; Water stress

---

\*- Corresponding Author; Email: a\_zakerinia@yahoo.com