

ارزیابی توابع کاهش جذب آب کاهو برگ‌گی (Red Salad Bowl) تحت تنش خشکی در شرایط گلخانه‌ای

الهه ذرتی پور^۱ - امیر سلطانی محمدی^{۲*} - ناصر عالم‌زاده‌انصاری^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۸/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۰۹

چکیده

مدل‌های جذب آب اگر بتوانند مسیر حرکت آب و واکنش گیاه به تنش را به‌طور صحیح پیش‌بینی کنند، ابزاری مفید در بهینه‌سازی مصرف آب محسوب می‌گردند. هدف از تحقیق حاضر بررسی مدل‌های جذب آب کاهو برگ‌گی تحت تنش خشکی می‌باشد. برای این منظور آزمایشی در گلخانه دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز، در پاییز ۱۳۹۶ انجام شد. آزمایش با سه تیمار آبی ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه در سه تکرار و در قالب یک طرح کاملاً تصادفی انجام گرفت. برای تعیین زمان آبیاری از روش وزنی استفاده گردید. تعرق نسبی با استفاده از تغییرات رطوبت روزانه خاک محاسبه و مدل‌های کاهش جذب آب فلدس و همکاران (۱۹۷۸)، ون‌گنوختن (۱۹۸۷)، دایرکسن و همکاران (۱۹۹۳) و همایی (۱۹۹۹) مورد ارزیابی قرار گرفتند. از شاخص‌های آماری بیشینه خطای نسبی، ضریب تعیین، ریشه میانگین مربعات خطا، کارایی مدل‌سازی و ضریب جرم باقیمانده استفاده شد. نتایج نشان داد، مدل همایی (۱۹۹۹) نسبت به سایر مدل‌ها برازش بهتری ارائه می‌دهد ($R^2 = 0.96$ و $RMSE = 9/14$). ضمن اینکه مدل‌های فلدس و همکاران (۱۹۷۸) با $R^2 = 0.43$ و $RMSE = 16/46$ ، ون‌گنوختن (۱۹۸۷) با $R^2 = 0.51$ و $RMSE = 8/62$ و دایرکسن و همکاران (۱۹۹۳) با $R^2 = 0.48$ و $RMSE = 12/5$ ، برازش نزدیکی نسبت به هم داشتند.

واژه‌های کلیدی: تنش خشکی، کاهو برگ‌گی، مدل‌های کاهش جذب

مقدمه

اندازه‌گیری‌های صحرائی، می‌توان زمان آبیاری را برای حداکثر رشد، به کمک خصوصیات شیمیایی و فیزیکی آب و خاک و پارامترهای مشخص گیاهی، تعیین کرد (۹). دو گروه گسترده از رویکردهای مدل‌سازی جذب آب وجود دارد که از داده‌های ریشه به روش‌های مختلفی استفاده می‌کنند، مدل‌های میکروسکوپی که شامل شرح مفصلی از گیاه، سیستم ریشه و خاک و تعامل فیزیکی بین این اجزاء می‌باشد، درواقع این مدل‌ها جریان آب را به طرف تک ریشه بررسی می‌کنند. مدل‌های ماکروسکوپی براساس اصول اولیه انتقال انرژی و جرم می‌باشند، که از طریق مشخص کردن ظرفیت آب موجود در منطقه ریشه، تمایل به ساده‌تر کردن خواص ریشه‌ها دارند، این مدل‌ها برداشت آب به وسیله کل ناحیه ریشه را بدون در نظر گرفتن تاثیر تک تک ریشه‌ها بررسی می‌کنند و به‌طور کلی در مدل‌های مدیریت محصول و مدل‌های انتقال خاک-گیاهی-اتمسفر مورد توجه قرار گرفته‌اند. با وجود سادگی و توان بالقوه آن، این رویکرد نیز دارای اشکالاتی می‌باشد، از جمله این‌که اکثر پارامترهای ماکروسکوپی نمی‌توانند به‌طور مستقیم تعیین یا اندازه‌گیری شوند، بنابراین نیاز به واسنجی دارند، که این مرحله نیز دارای محدودیت‌های عمده و غیر

رشد جمعیت، نیاز به غذای بیشتر و محدودیت منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک، نیاز به استفاده از منابع آب با کیفیت پایین و اعمال مدیریت کم‌آبیاری و یا هر دو استراتژی را ضروری می‌سازد (۲). کمبود آب و شوری خاک دو محدودیت مهم برای تولیدات کشاورزی در مناطق نیمه‌خشک هستند. تنش آبی و شوری جذب آب را کاهش می‌دهند (۱۳). تنش آبی وقتی رخ می‌دهد که از دست دادن آب از برگ‌ها از طریق فرآیند تعرق، از آب موجود در منطقه ریشه فراتر رود (۱۰). مدل‌های شبیه‌سازی جذب آب اگر جریان آب را به سمت ریشه‌ها به‌طور صحیح پیش‌بینی کنند، بدون نیاز به

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد و دانشیار گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز
* نویسنده مسئول: (Email: a.soltani@scu.ac.ir)

۳- دانشیار گروه باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز
DOI: 10.22067/jsw.v33i2.76461

اندازه‌گیری شده نشان دادند. سرائی تبریزی و همکاران (۱۸)، برای ارزیابی برخی توابع کاهش جذب آب در شرایط تنش آبی روی گیاه ریحان، آزمایشی با چهار سطح مختلف آب آبیاری شامل ۱۲۰، ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی با سه تکرار انجام دادند. نتایج نشان داد در برآورد جذب نسبی روزانه، مدل غیرخطی همایی و همکاران (۱۳) برآزش بهتری نسبت به دیگر مدل‌ها ارائه داد، همچنین مدل خطی فدس و همکاران (۱۹۸۷) و مدل‌های غیرخطی ون گنوختن (۱۹۸۷) و همایی و همکاران (۲۰۰۲) در برآورد میزان جذب نسبی تجمعی طی فصل رشد دقت مناسبی داشتند. براد و همکاران (۴)، مدل‌های مختلف جذب آب ریشه را تحت شرایط تنش آبی، بر مبنای تفرق پتانسیل و بیلان انرژی سطحی، با هم مقایسه و ارزیابی کردند. نتایج نشان داد، مدل‌های هیدرولوژیکی بزرگ مقیاس‌تر، که براساس تفرق پتانسیل عمل می‌کنند به دلیل توانمندی بیشتر، برای مدل‌سازی جذب آب مناسب‌ترند. لی و همکاران (۱۵)، برای توسعه مدل‌های جذب آب ریشه تحت شرایط تنش آبی یک مدل نمایی تعدیل یافته ارائه کردند که هم توزیع ریشه و هم تنش آبی را شامل می‌شد. مدل پیشنهادی تابعی از تفرق پتانسیل، قابلیت دسترسی به آب خاک، و تراکم طولی ریشه بود. نتایج نشان داد این مدل میزان آب خاک و جذب آب توسط ریشه را، به ویژه در نیمه دوم فصل رشد، در عمق‌های کم، به طور مناسب شبیه‌سازی کرد. پیترز و همکاران (۱۶)، تابع کاهش تنش فدس اصلاح شده را برای مدل‌سازی جذب آب ریشه با توجه به کاهش پتانسیل آب ارائه دادند. نتایج نشان داد مدل اصلاح شده از لحاظ فیزیکی پایدارتر از مدل فدس بود و به ویژه برای شبیه‌سازی در خاک‌های ناهمگن مرتبط بوده است. همچنین شبیه‌سازی عددی جریان آب و جذب آب ریشه در خاک‌های ناهمگن و همگن نشان‌دهنده تأثیر مدل جدید بر جذب آب ریشه و تفرق واقعی بود. بابازاده و همکاران (۲)، اثرات توام تنش شوری و خشکی را روی الگوی جذب آب ریشه گیاه ریحان مورد بررسی قرار دادند و از هفت معادله جذب آب ماکروسکوپی استفاده کردند. نتایج نشان داد که از بین مدل‌های ارائه شده، مدل همایی و همکاران (۲۰۰۲) بهترین توافق را با داده‌های تجربی داشت و افزایش شوری و خشکی باعث کاهش پتانسیل جذب آب توسط ریشه گردید. عزیزیان و همکاران (۱)، در مطالعه خود به اصلاح مدل شبیه‌سازی شده تحت سطوح مختلف آب، نیتروژن و شوری روی گیاه ذرت پرداختند، نتایج نشان داد که مدل همایی و فدس (۱۹۹۹) نسبت به سایر توابع جذب آب، برآورد بهتری داشت. همایی و همکاران (۱۳)، به منظور بررسی اثر مقادیر مختلف پتانسیل آب خاک و سطوح مختلف شوری روی الگوی جذب آب گیاه یونجه، آزمایشی انجام دادند و یک مدل جذب آب تحت تنش آبی و شوری ارائه کردند. نتایج نشان‌دهنده توافق بالای مدل پیشنهادی با داده‌های تجربی بود و تابع کاهش جذب ارائه

انحصاری پارامترهای مدل است، همچنین با استفاده از توزیع ریشه یا تراکم توده، این مدل‌ها اثر ساختار و خواص هیدرولیکی ریشه را نادیده می‌گیرند (۵). مزیت روش‌های ماکروسکوپی در هندسه جریان آسان‌تر نسبت به روش‌های میکروسکوپی و همچنین اجتناب از مشکلات روش‌های میکروسکوپی برای شبیه‌سازی جذب ریشه‌های انفرادی در سیستم ریشه‌هاست (۱۸). از مهم‌ترین مدل‌های جذب آب ماکروسکوپی می‌توان به مدل فدس و همکاران (۱۹۷۸)، مدل ون-گنوختن (۱۹۸۷)، مدل دایرکسن و همکاران (۱۹۹۳) و مدل همایی (۱۹۹۹) اشاره کرد.

کاهو از محبوب‌ترین سبزیجات، با بالاترین میزان مصرف و اهمیت اقتصادی در سراسر جهان است. عدم انجام آبیاری منظم، ایجاد محیط غرقابی یا خشکی خاک در زمان برداشت موجب از دست رفتن کیفیت محصول کاهو می‌شود. به‌طور کلی وجود تنش‌های زیستی و غیر زیستی سبب کاهش کیفیت و کمیت محصول نهائی خواهد شد (۳).

همایی و همکاران (۱۲)، اثر مقادیر مختلف پتانسیل آب خاک را روی الگوی جذب آب گیاه یونجه، در شرایط تنش آبی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که توابع کاهش جذب آب خطی رضایت‌بخش نبوده و اکثر توابع کاهش جذب آب غیر خطی تنها برای نیمی از داده‌ها مناسب بودند، که براین اساس تابع غیرخطی پیشنهادی همایی و همکاران (۱۲)، نسبت به دیگر مدل‌های جذب آب به دلیل در نظر گرفتن دو حد آستانه برای مدل، همخوانی بیشتری با داده‌های اندازه‌گیری شده داشت. الهی کیا (۷)، به منظور ارزیابی چهار مدل جذب آب ماکروسکوپی فدس و همکاران (۱۹۷۸)، ون گنوختن (۱۹۸۷)، دایرکسن و همکاران (۱۹۹۳)، و همایی (۱۹۹۹) در شرایط تنش خشکی برای گیاه کاهو، پژوهشی در مزرعه تحقیقاتی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز انجام داد، نتایج نشان داد مدل همایی، با در نظر گرفتن دو حد آستانه برای مدل، برآزش خوبی روی کل محدوده داده‌های اندازه‌گیری شده تفرق نسبی در مقابل قدرمطلق پتانسیل ماتریک، برای تیمارهای تحت تنش دارد. حسینی و همکاران (۱۴)، به ارزیابی توابع کاهش جذب آب گیاه فلفل در شرایط تنش همزمان خشکی و شوری در محیط کشت گلخانه پرداختند و پنج تابع کاهش جذب آب ماکروسکوپی وان گنوختن (جمع‌پذیر و ضرب‌پذیر)، دایرکسن و آگوستیچن، وان دم و همکاران و همایی و همکاران را با استفاده از داده‌های کشت گلدانی گیاه فلفل دلمه‌ای مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که از میان مدل‌های ضرب‌پذیر، مدل دایرکسن در سطوح شوری ۴/۵ دسی‌زیمنس بر متر نزدیکی بیشتری با نتایج اندازه‌گیری‌ها داشت. در سطوح شوری بالاتر (۶/۵) دسی‌زیمنس بر متر، مدل همایی و مدل وان دام برآزش بهتری را با داده‌های

ریشه، پتانسیل آب و هدایت هیدرولیکی خاک کنترل می‌شود (۹). مدلی که فدس و همکاران (۱۹۷۸) در شرایط تنش آبی برای گیاهان ارائه کردند به صورت زیر است:

$$S = \alpha(h) \times S_{max} \quad (2)$$

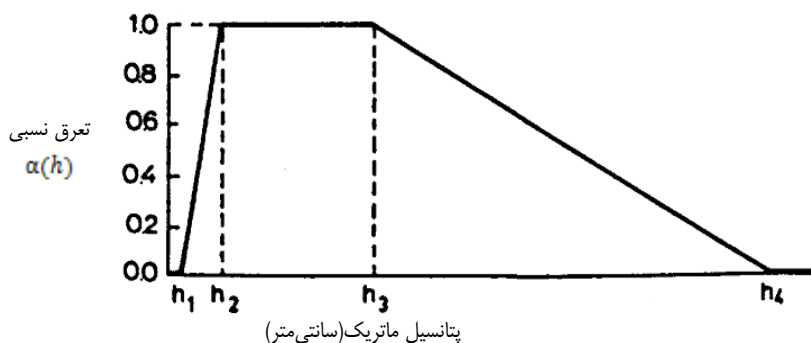
$$S_{max} = \frac{T_P}{Z_r} \quad (3)$$

$$S = \alpha(h) \times S_{max} = \alpha(h) \times \frac{T_P}{Z_r} \quad (4)$$

$\alpha(h)$: تابع کاهش بدون بعد پاسخ به تنش آبی است، S : میزان جذب آب گیاه، S_{max} : حداکثر میزان جذب آب گیاه، T_P : تعرق پتانسیل و Z_r : عمق توسعه ریشه می‌باشند، همچنین اعلام کردند ضریب تابع کاهش تنش آبی به صورت یک تابع خطی تکه‌ای است که با چهار مقدار مشخص پتانسیل ماتریک پارامتری می‌شود (رابطه ۵):

$$\alpha(h) = \begin{cases} \frac{h - h_4}{h_3 - h_4} & , h_3 > h > h_4 \\ 1 & , h_2 \geq h \geq h_3 \\ \frac{h - h_1}{h_2 - h_1} & , h_1 > h > h_2 \\ 0 & , h \leq h_4 \text{ or } h \geq h_1 \end{cases} \quad (5)$$

حداکثر مقدار جذب آب توسط ریشه‌ها زمانی رخ می‌دهد که $h > h_3$ باشد و هنگامی که $h > h_2$ یا $h < h_3$ باشد جذب آب به‌طور خطی کاهش می‌یابد. همچنین، زمانی که $h \leq h_4$ یا $h \geq h_1$ باشد مقدار جذب صفر می‌گردد. مقدار h_3 نیز تابعی از نیاز تبخیری اتمسفر است (شکل ۱) (۸). در شکل مقادیر پتانسیل ماتریک بدون در نظر گرفتن علامت قدر مطلق می‌باشند.



شکل ۱- نمایی از تابع کاهش جذب آب (فدس و همکاران، ۱۹۷۸)

Figure 1- A view of the water uptake reduction function (Feddes et al., 1978)

شده قادر بود به‌همراه هر تابع غیرخطی دیگر استفاده گردد. هدف از تحقیق حاضر ارزیابی چهار تابع کاهش جذب آب ماکروسکوپی فدس و همکاران (۱۹۷۸)، ون‌گنوختن (۱۹۸۷)، دایرکسن و همکاران (۱۹۹۳) و همایی (۱۹۹۹) در پیش‌بینی جذب آب توسط ریشه گیاه کاهو در شرایط تنش آبی و تعیین مناسب‌ترین مدل برای پیش‌بینی کاهش جذب آب توسط کاهو در شرایط تنش آبی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

تئوری مدل‌های مورد استفاده:

مناسب‌ترین روش کمی کردن جذب آب توسط ریشه گیاهان از معادله ریچاردز به‌دست می‌آید. تقریباً همه مدل‌های ریاضی حرکت آب و املاح در خاک از راه حل عددی معادله ریچاردز-دارسی با در نظر گرفتن قسمت جذب آب برای جریان در بعد عمودی معرفی گشته‌اند. با توجه به اینکه جذب آب توسط گیاهان در رطوبت‌های غیراشباع صورت می‌گیرد، باید آن را در معادله ریچاردز لحاظ کرد. شکل معادله ریچاردز، پس از لحاظ کردن قسمت جذب آب توسط گیاه به صورت رابطه (۱) می‌باشد (۱۷):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = c(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k(h) \frac{\partial h}{\partial z} + k(h) \right) - s(h) \quad (1)$$

θ : درصد رطوبت حجمی خاک (درصد)، h : بار فشاری آب خاک (متر)، t : زمان (ساعت)، C : دیفرانسیل ظرفیت رطوبت خاک (معکوس متر) که برابر با شیب منحنی آب خاک است. z : گرادیان بار عمودی خاک (متر)، $K(h)$: هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک (متر بر ساعت)، $S(h)$: میزان جذب آب توسط ریشه گیاهان (معکوس ساعت)، که تابعی از پتانسیل ماتریک، پتانسیل اسمزی، ویژگی‌های ریشه و شرایط آب و هوایی (همچون نیاز تبخیری) است (۱۱). آبیاری زمانی لازم است، که خاک قادر به تأمین نیاز آبی گیاه نباشد. تنش آبی هنگامی اتفاق می‌افتد که میزان تعرق بیشتر از مقدار جذب آب باشد. جذب آب توسط سرعت تعرق، انتشار و کارایی سیستم‌های

کاهش مقدار α در تنش‌های آبی بیشتر از h^* ادامه می‌یابد تا به یک تنش آبی معین (h_{max}) برسد. در پتانسیل‌های ماتریک بیشتر از h_{max} افزایش تنش آبی نمی‌تواند با همان روند قبلی در مقدار α کاهش ایجاد کند. این واقعیت نشان می‌دهد در $h > h_{max}$ گیاه هنوز زنده است و در سطحی بسیار اندک به فعالیت‌های حیاتی خود ادامه می‌دهد. همایی (۱۹۹۹) شاخص بدون بعد P را با توجه به h_{max} به صورت رابطه (۱۱) تعریف کرد، که بستگی به محصول، خاک و شرایط آب و هوایی دارد:

$$P = \frac{h_{max}}{h_{max} - h^*} \quad (11)$$

که در آن h_{max} (مقدار آستانه دوم) بار فشار آب خاک است که فراتر از آن تغییرات h بر تخرق نسبی به طور معنی‌دار تأثیر نمی‌گذارد و α_0 ، تخرق نسبی وابسته به h_{max} است (۱۰، ۱۲ و ۲). روش اجرای تحقیق:

این پژوهش در گلخانه دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز، در پاییز ۱۳۹۶ انجام شد. خاک مورد استفاده از مزرعه تحقیقاتی دانشکده مهندسی علوم آب برداشت گردید که دارای بافت متوسط بود. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک شامل، بافت خاک و درصد ذرات تشکیل‌دهنده خاک (به روش هیدرومتری)، شوری و پ‌هاس خاک با تهیه عصاره اشباع، جرم مخصوص ظاهری با استفاده از استوانه فلزی با حجم مشخص و تعیین رطوبت در نقطه ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی با استفاده از دستگاه صفحات فشاری تعیین گشت، که نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است. در جدول ۲ نیز خصوصیات کیفی آب آبیاری نشان داده شده است.

کشت به صورت غیر مستقیم (کاشت نشاء) درون گلدان‌هایی به قطر ۲۲ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر صورت گرفت. دوره رشد گیاه مورد نظر در حدود ۷۰ روز بود. پس از ریختن فیلتر در ته گلدان‌ها و پرکردن آن‌ها از مقدار معینی خاک خشک، انتقال نشاءها به گلدان‌ها انجام و اعمال تیمار صورت گرفت. آزمایش با سه تیمار آبی I_1 ، I_2 و I_3 به ترتیب ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه در سه تکرار و در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام گرفت. به همین جهت ۹ گلدان مورد استفاده قرار گرفت و با توجه به اینکه اندازه‌گیری وزن بوته‌ها به صورت روزانه امکان‌پذیر نبود، ۱۲ گلدان نیز به‌عنوان گلدان‌های تخریبی برای اندازه‌گیری وزن بوته، در نظر گرفته شدند و هر ده روز یکبار با خارج کردن بوته از یکی از این گلدان‌ها، وزن بوته اندازه‌گیری شد. شکل ۲ نحوه قرارگیری تیمارها را نشان می‌دهد.

در نهایت فوس و همکاران (۱۹۷۸)، در شرایط تنش خشکی تابع خطی ساده زیر را پیشنهاد دادند که توسط h_4 و h_3 کنترل می‌گردد:

$$\alpha(h) = \frac{h - h_4}{h_3 - h_4} \quad (6)$$

که در آن h : مقادیر پتانسیل ماتریک اندازه‌گیری شده، h_3 : مقدار آستانه کاهش پتانسیل ماتریک و h_4 : پتانسیل ماتریک در نقطه پژمردگی است. فوس و همکاران (۱۹۷۸) پیشنهاد کردند که مقدار آستانه تنها وابسته به تقاضای تبخیر می‌باشد در حالی که به نظر می‌رسد وابسته به خاک نیز باشد (۱۰).

یکی دیگر از مدل‌های معروف، که برای تعیین ضریب کاهش جذب در هنگام تنش آبی وجود دارد، تابع کاهش سیگموئیدی شکلی است که ون‌گونختن (۱۹۸۷) پیشنهاد کرده است (رابطه ۷):

$$\alpha(h) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h}{h_{50}}\right)^P} \quad (7)$$

h_{50} : پتانسیل ماتریکی است که به ازای آن عملکرد ۵۰ درصد کاهش می‌یابد و معمولاً از طریق آزمون و خطا به دست می‌آید و P : یک ضریب تجربی است که معمولاً مقدار آن ۳ در نظر گرفته می‌شود. ضریب تجربی P را می‌توان به کمک رابطه (۸) زیر محاسبه کرد:

$$P = \frac{h_{50}}{h_{50} - h^*} \quad (8)$$

h^* : پتانسیل ماتریک در حد آستانه کاهش عملکرد محصول در شرایط تنش آبی است. مهمترین ایراد مدل سیگموئیدی ون‌گونختن (۱۹۸۷) این بود که براساس این مدل بیشترین مقدار جذب آب در رطوبت اشباع اتفاق می‌افتد. بدیهی است که این مدل به صورت فوق برای رطوبت‌های نزدیک به رطوبت اشباع فاقد اعتبار است. دایرکسن و همکاران (۱۹۹۳)، معادله ون‌گونختن (۱۹۸۷) را نسبت به مقدار پتانسیل ماتریک در آستانه کاهش جذب (h^*) تعدیل و با این فرض که جذب آب ریشه، مقدار آستانه بار فشار آب خاک را کاهش نمی‌دهد رابطه زیر را ارائه دادند:

$$\alpha(h) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h^* - h}{h^* - h_{50}}\right)^P} \quad (9)$$

نتایج تحقیقات پژوهشگران مختلف نشان می‌دهد پاسخ گیاهان به تنش آبی در پتانسیل ماتریک‌های کم خطی نیست. از طرف دیگر مدل دایرکسن و همکاران (۱۹۹۳) در پتانسیل ماتریک‌های نزدیک به صفر مقدار $\alpha(h)$ را زیاد برآورد می‌کرد. همایی (۱۹۹۹)، برای برآورد تنش آبی رابطه (۱۰) را ارائه داد:

$$\alpha(h) = \frac{1}{1 + \left(\frac{1 - \alpha_0}{\alpha_0}\right) \left[\frac{h^* - h}{h^* - h_{max}}\right]^P} \quad (10)$$

جدول ۱- خصوصیات خاک مورد آزمایش
Table 1- Experimental soil properties

بافت خاک Soil texture	درصد رس Clay percent	درصد سیلت Silt percent	درصد شن Sand percent	θ_{vFC} (%)	θ_{vPWP} (%)	ρ_b (g/cm ³)	ECe (dS/m)	pH
لوم رسی شنی Sandy clay loam	24.4	28	47.6	24	13	1.4	2.15	7.86

جدول ۲- خصوصیات کیفی آب آبیاری
Table 2- Characteristics quality of irrigation water

تیمار Treatment	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	CL ⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	pH	EC
	(meq/lit)								(dS/m)
S ₁	1.65	0.04	1.91	0.5	0.4	3.75	0.025	8	0.5

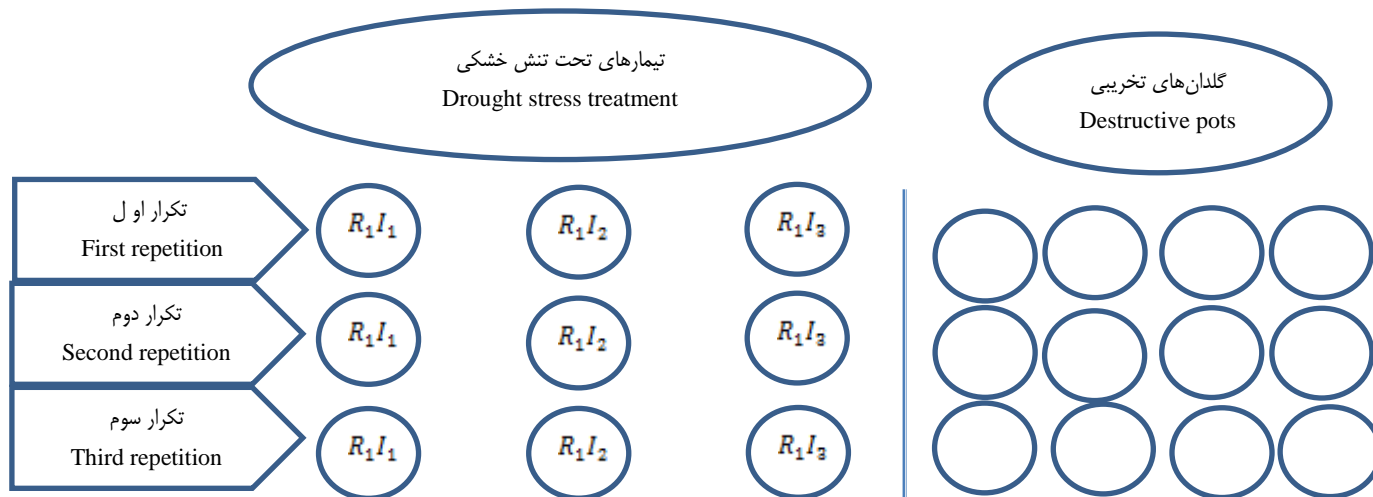


Figure 2- Schematic map of experimental design

اندازه‌گیری شد. برای تعیین زمان آبیاری از روش وزنی استفاده گردید، به این صورت که با وزن کردن روزانه گلدان‌های شاهد (بدون تنش) و با کسر وزن خشک خاک و وزن گیاه (که از طریق گلدان‌های تخریبی به دست آمد)، مقدار آب موجود در گلدان تعیین و با تقسیم بر وزن خشک خاک مقدار رطوبت خاک گلدان محاسبه شد:

$$\theta_{vi} = \frac{(\text{جرم خاک خشک} + \text{جرم پسته} + \text{جرم گلدان خالی}) - \text{جرم گلدان و خاک مرطوب}}{\text{جرم خاک خشک}} \times \rho_b \quad (12)$$

زمانی که رطوبت سهل الوصول توسط گیاه مورد استفاده قرار می‌گرفت، به همین اندازه آبیاری می‌شد تا رطوبت گلدان دوباره به حد ظرفیت زراعی ارتقاء داده شود. کوددهی (NPK) به صورت محلول در طول دوره رشد اعمال شد. قابل توجه است که، مصرف بیش از اندازه کود آسیب جدی به گیاه وارد می‌کند، لذا غلظت استفاده شده کود در این آزمایش، یک گرم در هر لیتر آب بود و به صورت یک در میان در

آبیاری به صورت دستی و به کمک پیمانانه مدرج انجام شد. حجم آب آبیاری نیز براساس مرحله رشد و نیاز آبی گیاه باتوجه به توسعه عمق ریشه در طی فصل رشد متغیر بود. در طول فصل رشد گیاه، پانزده بار آبیاری صورت گرفت و حجم آب مصرفی برای تیمارهای I₁، I₂ و I₃ به ترتیب ۷۹۲، ۱۰۵۵ و ۱۳۲۰ متر مکعب بر هکتار به دست آمد، که این مقادیر باتوجه به نیاز آبی گیاه در هر مرحله از رشد گیاه برای تیمار شاهد (نیاز آبی ۱۰۰ درصد) و در نظر گرفتن ضریبی از آن برای دو تیمار دیگر لحاظ گردید.

برای اندازه‌گیری پتانسیل ماتریک، ابتدا منحنی مشخصه رطوبتی خاک با استفاده از دستگاه صفحات فشاری و نرم افزار RETC تعیین و سپس با جایگزینی مقادیر رطوبت‌های روزانه اندازه‌گیری شده در منحنی مشخصه رطوبتی خاک قدرمطلق پتانسیل ماتریک محاسبه شد. درصد رطوبت حجمی در مکش‌های ۰/۳، ۱، ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ بار

خاک با استفاده از دستگاه صفحات فشاری و وارد کردن درصد رطوبت حجمی خاک به‌ازای نقاط پتانسیل ماتریک مهم، در نرم‌افزار RETC حاصل گردید (شکل ۳). سپس با استفاده از داده‌های به‌دست آمده از آزمایش، مدل‌های جذب آب در شرایط تنش خشکی مورد بررسی قرار گرفتند.

به‌منظور بررسی توابع کاهش جذب آب در شرایط تنش خشکی، از تعرق نسبی (ضریب کاهش جذب آب واقعی) حاصل از تقسیم مقادیر اندازه‌گیری تعرق روزانه تیمارهای تحت تنش خشکی بر تیمار شاهد (بدون تنش) استفاده گردید. لازم به ذکر است، $\alpha(h)$ (ضریب کاهش جذب آب) برای تیمار شاهد، برابر با یک می‌باشد. شکل ۴ نمودار تعرق نسبی $(\alpha(h) = \frac{T_a}{T_p})$ در برابر رطوبت حجمی روزانه، مربوط به تیمارهای تحت تنش، از زمان اعمال تیمار تا پایان آزمایش را نشان می‌دهد.

با داشتن درصد رطوبت حجمی برای تیمارها و با استفاده از منحنی مشخصه رطوبتی خاک، میزان پتانسیل ماتریک متناظر با رطوبت حجمی برای تمامی تیمارها از طریق درونیابی تعیین شد. شکل ۵، نشان داد که رابطه غیرخطی بین مقادیر تعرق نسبی $(\frac{T_a}{T_p})$ اندازه‌گیری شده و قدرمطلق پتانسیل ماتریک وجود دارد.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود بیشترین پراکنش داده‌ها در محدوده $4000 < |h| < 800$ سانتی‌متر قرار گرفت. حد آستانه h (جایی که مقادیر قدر مطلق پتانسیل ماتریک به یک باره کاهش یافته‌اند) در حدود 800 تا 1400 سانتی‌متر است. همایی (۱۹۹۹) حد آستانه h را در حدود 800 تا 1000 سانتی‌متر برای گیاه یونجه در نظر گرفت.

هر بار آبیاری، به صورت محلول با آب به گلدان‌ها داده شد. به منظور ارزیابی مدل‌های جذب آب در شرایط تنش خشکی، تعرق نسبی $(\frac{T_a}{T_p})$ در مقابل قدرمطلق پتانسیل ماتریک رسم شد و با برازش مدل‌های فلدس و همکاران (۱۹۷۸)، ون‌گنوختن (۱۹۸۷)، دایرکسن و همکاران (۱۹۹۳) و همایی (۱۹۹۹)، بهترین مدل انتخاب گردید. برای این منظور از شاخص‌های آماری بیشینه خطای نسبی (ME)، ضریب تعیین (R^2) ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، کارایی مدل‌سازی یا راندمان مدل (EF) و ضریب جرم باقیمانده (CRM) استفاده شد:

$$ME = \max |P_i - O_i|_{i=1}^n \quad (13)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2} \quad (14)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \times \frac{100}{\bar{O}} \quad (15)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (16)$$

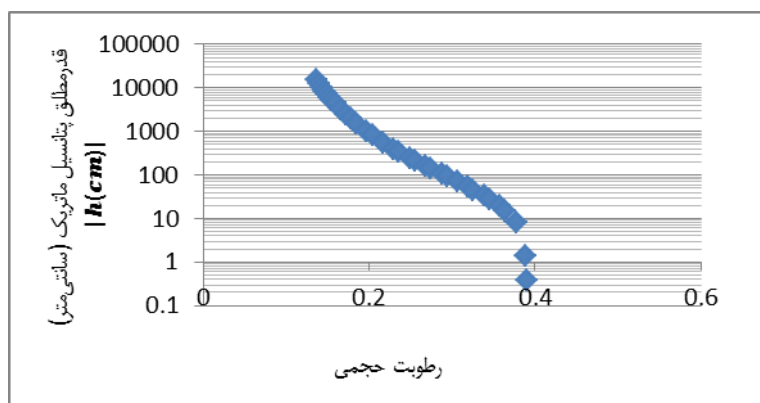
$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (17)$$

P_i : مقادیر برآورد شده، O_i : مقادیر اندازه‌گیری شده، n : تعداد مشاهدات و \bar{O} : میانگین مقادیر O_i است (۲ و ۱۰). برای تجزیه و تحلیل آماری از نرم‌افزار SPSS و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون چند دامنه‌ای دانکن (در سطح پنج درصد) استفاده گردید.

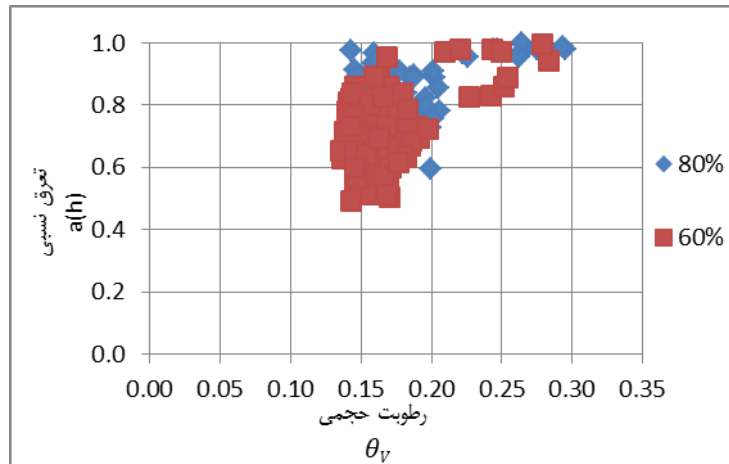
نتایج و بحث

ارزیابی مدل‌های کاهش جذب آب تحت تنش خشکی:

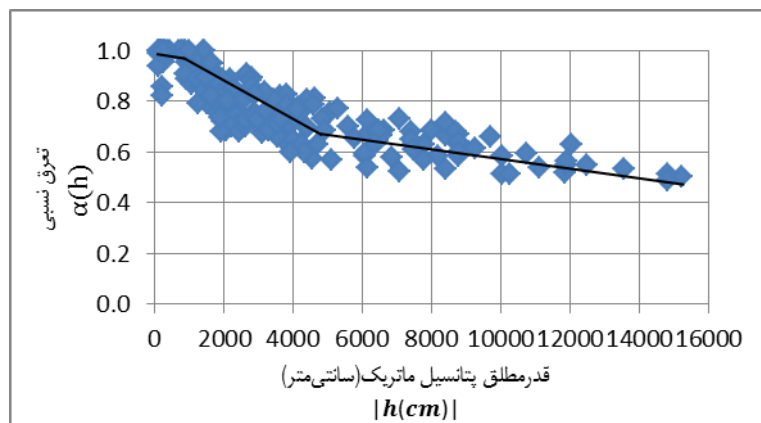
برای ارزیابی مدل‌های جذب آب، ابتدا منحنی مشخصه رطوبتی



شکل ۳- منحنی مشخصه رطوبتی خاک
Figure 3- Soil moisture characteristic curve



شکل ۴- تعرق نسبی اندازه‌گیری شده در برابر رطوبت حجمی روزانه مربوط به تیمارهای تحت تنش
Figure 4- Measured relative transpiration against daily moisture content of treatments under stress



شکل ۵- تعرق نسبی اندازه‌گیری شده در برابر قدر مطلق پتانسیل ماتریک مربوط به تیمارهای تحت تنش
Figure 5- The measured relative transpiration against the absolute value of the matric potential of treatments under stress

با توجه به پارامترهای موجود در جدول ۳ و براساس نتایج حاصل از مقایسه تعرق نسبی اندازه‌گیری شده با تعرق نسبی به‌دست آمده از مدل فدس و همکاران (۱۹۷۸) که هر دو تابعی از قدر مطلق پتانسیل ماتریک هستند، شکل ۶ ارائه گردید. براساس شکل ۶ و استفاده از معیارهای آماری ضریب تعیین و ضریب همبستگی (جدول ۳) می‌توان پی برد بهترین برازش مربوط به معادله a بود که در آن $|h_3|$ برابر ۱۰۰۰ و $|h_4|$ برابر ۱۷۰۰۰ سانتی‌متر است، لذا با داده‌های اندازه‌گیری شده مطابقت بیشتری دارد. یک تابع خطی نمی‌تواند همه محدوده داده‌های اندازه‌گیری شده را شامل گردد و از نقطه نظر تولید محصول، مهم‌ترین قسمت داده‌های اندازه‌گیری شده در بازه $|h| < 4000$ cm قرار می‌گیرند، بنابراین مقادیر تعرق نسبی بزرگتر از آن را می‌توان نادیده گرفت (همایی، ۱۹۹۹).

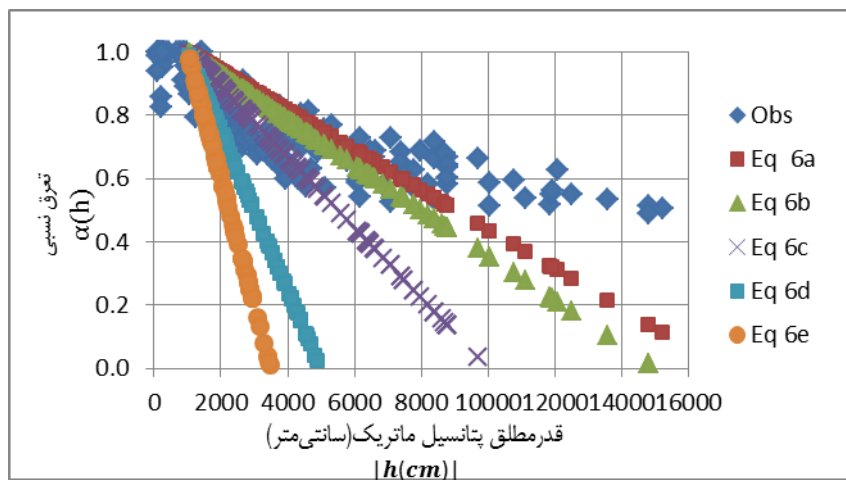
پارامترهای مدل‌های مورد استفاده

پارامترهای مدل‌های مورد استفاده تحت شرایط تنش خشکی با توجه به شکل‌های ۴ و ۵ تخمین و در جدول ذیل آمده است، براین اساس با توجه به شکل‌های مذکور و پارامترهای مدل‌های پیشنهادی توسط ون‌گنوختن (۱۹۸۷) و همایی (۱۹۹۹)، مقادیری برای هر کدام از پارامترها در نظر گرفته شد، سپس حالت‌های مختلف از قرارگیری مقادیر پیشنهادی برای هر پارامتر مورد آزمایش قرار گرفت، هر ردیف از حالت‌ها با یک حرف انگلیسی معین گشت، سپس برای مشخص نمودن بهترین مقادیر پیشنهادی پارامترها برای هر مدل، از شاخص‌های آماری ضریب تعیین (R^2) و ضریب همبستگی (r) استفاده شد. به عنوان مثال، در مدل فدس و همکاران (۱۹۷۸)، معادله (۶)، h_3 برابر ۱۰۰۰- و برای h_4 مقادیر ۳۵۰۰-، ۵۰۰۰-، ۱۰۰۰۰-، ۱۵۰۰۰- و ۱۷۰۰۰- پیشنهاد شد و در نهایت با استفاده از معیارهای آماری (R^2) و (r) بهترین پارامترهای پیشنهادی انتخاب شد و به عنوان پارامترهای مدل مذکور مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۳- پارامترهای مورد استفاده در مدل‌های کاهش جذب آب تحت تنش خشکی و معیارهای آماری برای هر مدل

Table 3- Parameters used in water uptake reduction models under drought stress and statistical criteria for each model

معادله Equation	h_3 or h^* (cm)	h_4 (cm)	h_{50} (cm)	h_{max} (cm)	p	α_0	R^2	r
6a	-1000	-17000	-	-	-	-	0.69	0.83
6b	-1000	-15000	-	-	-	-	0.68	0.83
6c	-1000	-10000	-	-	-	-	0.66	0.81
6d	-1000	-5000	-	-	-	-	0.63	0.79
6e	-1000	-3500	-	-	-	-	0.56	0.75
7a	-	-	-8000	-	1.14	-	0.67	0.82
7b	-	-	-9000	-	1.15	-	0.54	0.73
7c	-	-	-10000	-	1.08	-	0.63	0.79
7d	-	-	-14000	-	1.07	-	0.66	0.81
7e	-	-	-12000	-	0.9	-	0.78	0.68
7f	-	-	-15000	-	1.05	-	0.67	0.82
9a	-1000	-	-	-8000	1.14	-	0.66	0.82
9b	-1200	-	-	-9000	1.15	-	0.67	0.82
9c	-800	-	-	-10000	1.08	-	0.68	0.83
9d	-1000	-	-	-14000	1.07	-	0.65	0.81
9e	-1200	-	-	-12000	1.11	-	0.59	0.77
9f	-800	-	-	-15000	1.05	-	0.67	0.82
10a	-1000	-	-	-7000	0.88	0.59	0.67	0.82
10b	-1200	-	-	-10000	1.36	0.58	0.59	0.77
10c	-800	-	-	-13000	1.06	0.53	0.68	0.82
10d	-1000	-	-	-7000	0.64	0.59	0.70	0.84
10e	-1200	-	-	-10000	0.82	0.58	0.59	0.77
10f	-800	-	-	-13000	0.56	0.53	0.71	0.84
10g	-1400	-	-	-15000	1.10	0.51	0.63	0.79



شکل ۶- برازش خطی بر داده‌های تعرق نسبی اندازه‌گیری شده ($\frac{T_a}{T_p}$) در مقابل قدرمطلق پتانسیل ماتریک $|h|$ با استفاده از مدل فدس و همکاران

(۱۹۷۸) و پارامترهای ارائه شده در جدول ۳

Figure 6- Linear fit on the measured relative transpiration data ($\frac{T_a}{T_p}$) in comparison with the matric potential $|h|$ using Feddes et al., (1978) and the parameters presented in table 3

می‌دهد، که بهترین مقادیر برای h_{50} و p در نظر گرفته شده است. بنابر نتایج، بهترین برازش مربوط به معادله ۷e بود (جدول ۵) که در آن $|h_{50}|$ برابر ۱۲۰۰۰ سانتی‌متر و p برابر ۰/۹ است و تقریباً مابقی

شکل ۷ برازش غیرخطی روی داده‌های تعرق نسبی اندازه‌گیری شده ($\frac{T_a}{T_p}$) در مقابل $|h|$ را توسط مدل ون‌گنوختن (۱۹۸۷) نشان

(۱۹۹۹) می‌باشد. مقدار پارامترهای موردنیاز برای این مدل شامل α_0 ، α_{00} و p می‌باشند، که نسبت به مدل‌های قبل دارای مقدار آستانه دوم و تعرق نسبی متناظر با آن می‌باشد و به همین دلیل در مقایسه با مدل‌های قبل برتری دارد. همان‌گونه که از شکل پیداست، این مدل بهترین برازش را نسبت به مدل‌های دیگر داشت و کل محدوده داده‌های اندازه‌گیری شده را پوشش داد. همچنین با توجه به نتایج حاصل و ضریب تعیین به‌دست آمده (جدول ۳) بهترین برازش را معادله $f = 10$ با مقادیر $\alpha_0 = 0.53$ ، $\alpha_{00} = 13000$ ، $h^* = 800$ و $p = 0.56$ شامل گردید.

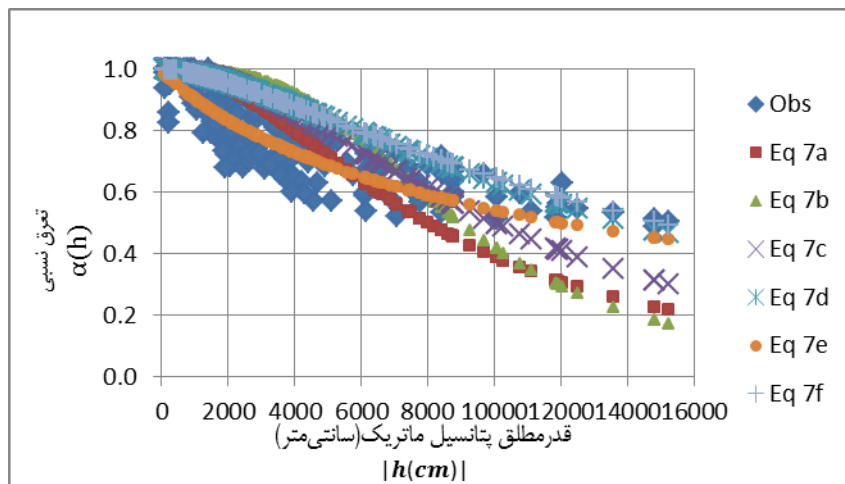
همایی (۱۹۹۹، ۲۰۰۲a)، مقدار h_3 یا h^* را ۸۰۰ و ۱۰۰۰- سانتی‌متر برای گیاه یونجه در نظر گرفت که بیشتر مقادیر در نظر گرفته شده در این تحقیق نیز همین مقدار می‌باشند. هر دو پارامتر h^* و h_{50} وابسته به خصوصیات خاک هستند (همایی، ۱۹۹۹). علت اختلاف جزئی بین کلیه مقادیر در نظر گرفته شده توسط همایی (۲۰۰۲a) و تحقیق حاضر را می‌توان تفاوت در نوع خاک، نوع و رقم گیاه، حساسیت و واکنش گیاه به تنش، شرایط کشت و نیاز آبی گیاه دانست.

منحنی‌ها برازش خوبی روی کل محدوده داده‌های اندازه‌گیری شده نداشتند. با توجه به نتایج دریافتی از سایر معادلات و بنا بر نتایج همایی (۱۹۹۹)، مقادیر پارامترهایی که بهترین نتیجه را برای $|h|$ ‌های پایین به‌دست می‌دهند برای $|h|$ ‌های بالا نتیجه خوبی ارائه ندادند و این یک نقطه ضعف برای این مدل است علاوه بر آن، مدل مذکور مقدار آستانه‌ای به‌عنوان پارامتر ورودی نداشت.

مدل دایرکسن و همکاران (۱۹۹۳) برازش غیرخطی دیگری را روی داده‌های تعرق نسبی اندازه‌گیری شده $(\frac{T_a}{T_p})$ در مقابل $|h|$ نشان

داد. بهترین برازش در گستره $0.45 \leq \alpha(h) \leq 1$ قرار داشت و مربوط به معادله ۹c بود (جدول ۳)، ولی در پتانسیل ماتریک‌های بالا برازش خوبی ارائه نداد. به طور کلی در این مدل نیز، باوجود تعریف مقدار آستانه، هیچ‌یک از منحنی‌ها تمام گستره‌ی داده‌های آزمایشی را پوشش ندادند و برای بهبود آن به تعریف نقاط کنترلی دیگر (مقدار آستانه دوم) لازم بود. در شکل ۸ نتایج مدل دایرکسن و همکاران (۱۹۹۳) نشان داده شده است.

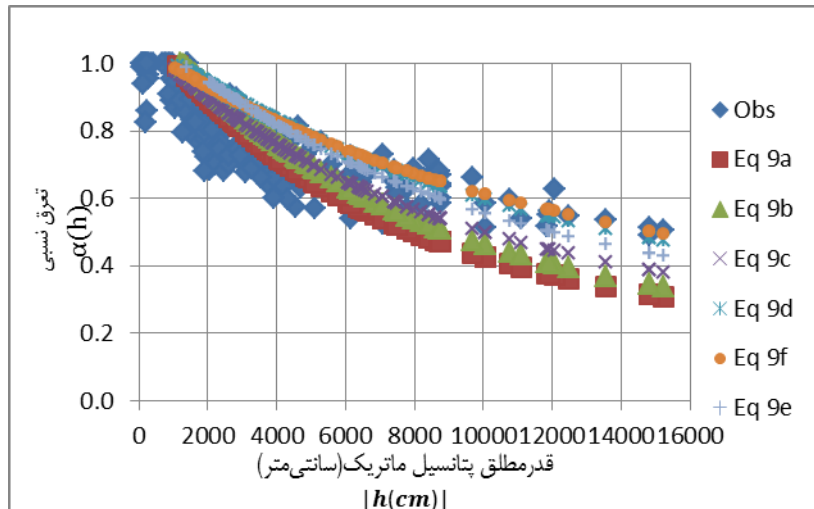
شکل ۹ نیز نشان‌دهنده برازش غیرخطی روی داده‌های تعرق نسبی اندازه‌گیری شده $(\frac{T_a}{T_p})$ در مقابل $|h|$ توسط مدل همایی



شکل ۷- برازش غیر خطی بر داده‌های تعرق نسبی اندازه‌گیری شده $(\frac{T_a}{T_p})$ در مقابل قدر مطلق پتانسیل ماتریک $|h|$ با استفاده از مدل ون‌گنوختن و

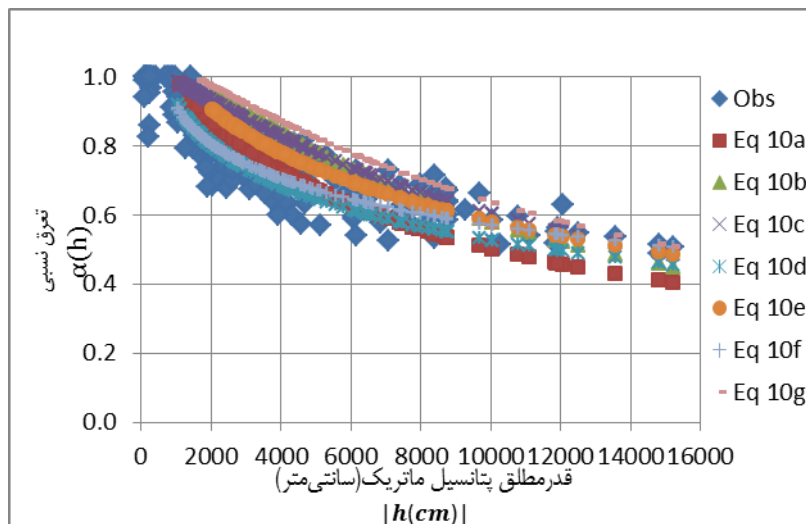
همکاران (۱۹۸۷) و پارامترهای ارائه شده در جدول ۳

Figure 7- Non-linear fit on the measured relative transpiration data $(\frac{T_a}{T_p})$ in comparison with the matric potential $|h|$ using Van Genuchten (1987) and the parameters presented in table 3



شکل ۸- برازش غیرخطی بر داده‌های تعرق نسبی اندازه‌گیری شده ($\frac{T}{T_0}$) در مقابل قدر مطلق پتانسیل ماتریک $|h|$ با استفاده از مدل دایرکسن و همکاران (۱۹۹۳) و پارامترهای ارائه شده در جدول ۳

Figure 8- Non-linear fit on the measured relative transpiration data ($\frac{T}{T_0}$) in comparison with the matric potential $|h|$ using the Dirksen et al., (1993) and the parameters presented in table 3



شکل ۹- برازش غیرخطی بر داده‌های تعرق نسبی اندازه‌گیری شده ($\frac{T}{T_0}$) در مقابل قدر مطلق پتانسیل ماتریک $|h|$ با استفاده از مدل همایی (۱۹۹۹) و پارامترهای ارائه شده در جدول ۳

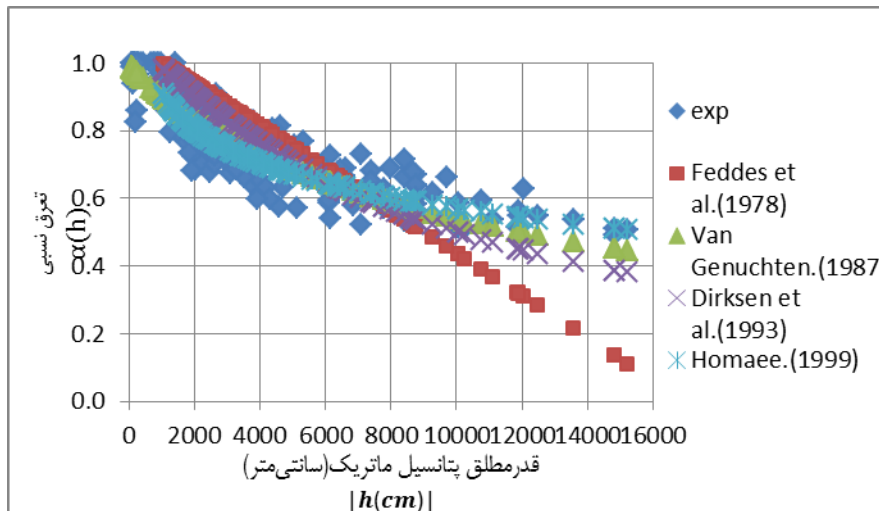
Figure 9- Non-linear fit on the measured relative transpiration data ($\frac{T}{T_0}$) in comparison with the matric potential $|h|$ using Homaei (1999) and the parameters presented in table 3

نظر گرفتن h_3 برابر -1000 و برای h_4 برابر 17000 ، مربوط به معادله (۶a)، بهترین پارامترهای مدل شناخته شدند. شکل ۱۰ برازش مدل‌های کاهش جذب آب شبیه‌سازی شده در شرایط تنش آبی را بر داده‌های اندازه‌گیری شده تعرق نسبی روزانه در مقابل قدر مطلق پتانسیل ماتریک، نشان می‌دهد، براین اساس می‌توان پی برد که مدل همایی (۱۹۹۹) برازش بهتری نسبت به مدل‌های دیگر داشته است.

باتوجه به نتایج دریافتی از بررسی داده‌های آزمایشی و مدل‌های پیشنهاد شده، مقادیر مربوط به پارامترهای بهترین برازش برای هر مدل در جدول ۴ ارائه شد. براین اساس پارامترهای هر کدام از حالت‌های پیشنهاد شده در جدول ۳ مورد آزمون قرار گرفت و برای هر مدل پارامتری که بهترین برازش را به وجود آورد، انتخاب گشت و در ارزیابی مدل‌های جذب آب مورد استفاده قرار گرفت. به عنوان مثال در معادله فدس و همکاران (۱۹۷۸)، معادله (۶)، بهترین پارامترها با در

جدول ۴- بهترین پارامترهای مورد استفاده در مدل های کاهش جذب آب تحت تنش خشکی
 Table 4- The best parameters used in water uptake reduction models under drought stress

معادله Equation	h_3 or h^* (cm)	h_4 (cm)	h_{50} (cm)	h_{max} (cm)	p	α_0
6a	-1000	-17000	-	-	-	-
7e	-	-	-12000	-	0.9	-
9c	-800	-	-10000	-	1.08	-
10f	-800	-	-	-13000	0.56	0.53



شکل ۱۰- برازش بر داده های تعرق نسبی اندازه گیری شده ($\frac{T}{T_0}$) در مقابل قدر مطلق پتانسیل ماتریک |h| با استفاده از بهترین مدل های پیشنهادی

و تحلیل آماری جدول ۳

Figure 10- Fit to measured relative transpiration data ($\frac{T}{T_0}$) in comparison with the matric potential |h| using the best proposed models and statistical analysis, table 3

جدول ۵- معیارهای آماری محاسبه شده جهت مقایسه عملکرد مدل های مختلف در برآورد تعرق نسبی روزانه با داده های اندازه گیری شده

Table 5- The statistical measures calculated to compare the performance of different models in estimating daily relative transpiration with measured data

مدل Model	ME	R ²	RMSE	EF	CRM
فدس و همکاران (۱۹۷۸) Feddes et al.(1978)	0.39	0.43	16.46	0.18	-0.05
ون گنوختن و همکاران (۱۹۸۷) Van Genuchten.(1987)	0.15	0.51	8.62	0.77	0.01
دایرکسن و همکاران (۱۹۹۳) Dirksen et al.(1993)	0.22	0.48	12.5	0.4	-0.02
همایی (۱۹۹۹) Homae.(1999)	0.14	0.96	9.14	0.67	0.02

مدل همایی (۱۹۹۹)، بهترین برازش را روی کل محدوده داده های اندازه گیری شده داشت و بعد از آن، مدل ون گنوختن (۱۹۸۷) در رتبه دوم قرار گرفت. سپس مدل دایرکسن و همکاران (۱۹۹۳) و در نهایت مدل فدس و همکاران (۱۹۷۸) در رتبه های بعدی قرار گرفتند. ضمن

در جدول ۵ مقایسه آماری نتایج حاصل از داده های اندازه گیری شده تعرق نسبی و داده های حاصل از بهترین مدل های مختلف کاهش جذب، در شرایط تنش خشکی ارائه شد. باتوجه به نتایج حاصل از شکل ۱۰ و جدول ۵ می توان پی برد که

دو حد آستانه برای مدل، همخوانی بیشتری با داده‌های اندازه‌گیری شده داشت.

نتیجه‌گیری

هدف از تحقیق حاضر، بررسی توابع کاهش جذب آب کاهوبرگی تحت تنش خشکی، کارایی این توابع در پیش‌بینی جذب آب توسط ریشه و تعیین مناسب‌ترین مدل برای پیش‌بینی کاهش جذب در شرایط تنش خشکی بود. براین اساس پارامترهای موردنیاز توابع تعیین و بر مبنای بهترین آن‌ها مدل‌های جذب آب بررسی شدند. با توجه به نتایج یافته شده و تجزیه و تحلیل آماری، مدل همایی (۱۹۹۹) نسبت به سایر مدل‌ها برآزش بهتری ارائه داد البته در مکش‌های کوچکتر از ۸۰۰۰ سانتی‌متر، مدل‌های فدس و همکاران (۱۹۷۸)، ون‌گنوختن (۱۹۸۷)، دایرکسن و همکاران (۱۹۹۳) برآزش بسیار خوب و نزدیکی نسبت به هم داشتند. همچنین، در شبیه‌سازی مقادیر جذب آب، مدل‌های فدس و همکاران (۱۹۷۸) و دایرکسن و همکاران (۱۹۹۳)، اندکی بیش‌برآوردی و مدل‌های ون‌گنوختن (۱۹۸۷) و همایی (۱۹۹۹) اندکی کم‌برآوردی از خود نشان دادند.

این‌که در $h|h$ های کوچکتر از ۸۰۰۰ سانتی‌متر، مدل‌های فدس و همکاران (۱۹۷۸)، ون‌گنوختن (۱۹۸۷)، دایرکسن و همکاران (۱۹۹۳) برآزش بسیار خوب و نزدیکی در مقایسه با یکدیگر داشتند. بابازاده و همکاران (۲۰۱۷)، در بررسی اثرات توام تنش شوری و خشکی روی الگوی جذب آب ریشه گیاه ریحان، به این نتیجه رسیدند که از بین مدل‌های ارائه شده، مدل همایی و همکاران (۲۰۰۲b) بهترین توافق را با داده‌های تجربی داشت و افزایش خشکی باعث کاهش پتانسیل جذب آب توسط ریشه گردید. نتایج سرائی تبریزی و همکاران (۱۳۹۴) نیز حاکی از آن است که، مدل همایی (۱۹۹۹) بهترین برآزش را بر داده‌های اندازه‌گیری شده داشته و با نتیجه تحقیق حاضر هم‌خوانی دارد. قابل ذکر است، در شبیه‌سازی مقادیر جذب آب، مدل‌های فدس و همکاران (۱۹۷۸) و دایرکسن و همکاران (۱۹۹۳)، اندکی بیش‌برآوردی و مدل‌های ون‌گنوختن (۱۹۸۷) و همایی (۱۹۹۹) اندکی کم‌برآوردی داشته‌اند، همایی (۲۰۰۲b, ۱۹۹۹) نیز برای تیمار ۷۰ درصد نیاز آبی یونجه نشان داد که مدل فدس و همکاران (۱۹۷۸) بیش‌برآوردی و سه مدل دیگر کم‌برآوردی داشته‌اند که نزدیک به نتایج دریافتی می‌باشد و تابع غیرخطی پیشنهادی همایی و همکاران (۲۰۰۲b)، نسبت به دیگر مدل‌های جذب آب به دلیل در نظر گرفتن

منابع

- 1- Azizian A., Sepaskhah A.R., and Zand-Parsa Sh. 2015. Modification of a maize simulation model under different water, nitrogen and salinity levels. *International Journal of Plant Production* 9(4): 609-632.
- 2- Babazadeh H., Sarai Tabrizi M., and Homae M. 2017. Assessing and modifying macroscopic root water extraction basil (*Ocimum basilicum*) models under simultaneous water and salinity stresses. *Soil Physics and Hydrology, Soil Science Society of America Journal*, 5585 Guilford Rd, Madison WI 53711 USA.
- 3- Badavi H., Alemzadeh Ansari N., Mahmudi Servestani M., and Eskandari F. 2015. Effect of drought stress and mycorrhizal fungus on some morpho-physiological characteristics of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Plant Products (Agricultural Science Magazine)* 38(3): 27-39. (In Persian)
- 4- Braud I., Varado N., and Olioso A. 2005. Comparison of root water uptake modules using either the surface energy balance or potential transpiration. *Journal of Hydrology* 301: 267-286.
- 5- Couvreur V., Vanderborgh J., and Javaux M. 2012. A simple three-dimensional macroscopic root water uptake model based on the hydraulic architecture approach. *Hydrology and Earth System Sciences* 16: 2957-2971.
- 6- Dirksen C., Kool J.B., Koorevaar P., and Van Genuchten M.Th. 1993. simulation model of hysteretic water and solute transport in the root zone. *Water Flow and Solute Transport in Soils* 99-122.
- 7- Elahi Kia E. 2018. Evaluating water uptake models under water stress conditions for Lettuce plant. M.Sc. Thesis, Shahid Chamran University of Ahvaz.
- 8- Feddes R.A., Kowalik P., and Zarandy H. 1978. Simulation of field water use and crop yield. the netherlands saline water in supplemental irrigation of wheat and barley under rainfed agriculture. *Agricultural Water Management* 78: 122-127.
- 9- Green S.R., Kirkham M.B., and Clothier B.E. 2006. Root uptake and transpiration from measurements and models to sustainable irrigation. *Agricultural Water Management* 86: 165-176.
- 10- Homae M. 1999. Root water uptake under non-uniform transient salinity and water stress. Ph.D. Thesis, Wageningen Agricultural University.
- 11- Homae M., Dirksen C., and Feddes R.A. 2002a. Simulation of root water uptake I. Non-uniform transient salinity using different macroscopic reduction functions. *Agricultural Water Management* 57: 89-109.
- 12- Homae M., Feddes R.A., and Dirksen C. 2002b. Simulation of root water uptake II. Non-uniform transient water stress using different reduction functions. *Agricultural Water Management* 57: 111-126.
- 13- Homae M., Feddes R.A., and Dirksen C. 2002c. A macroscopic water extraction model for nonuniform transient salinity and water stress. Published in *Soil Sciences* 66: 1764-1772.

- 14- Hoseini Y., Babazadeh H., and khakpour Arablo B. 2015. Evaluation of water uptake reduction functions of pepper plant under simultaneous stress conditions of drought and salinity stress. *Journal of Water Research in Agriculture* 29(4): 509-523. (In Persian)
- 15- Li K.Y., De Jong R., and Boisvert J.B. 2001. An exponential root water uptake model with water stress compensation. *Journal of Hydrology* 252: 189-204.
- 16- Peters A., Durner W., and Iden S. 2017. Modified feddes type stress function reduction for modeling root water uptake, Accounting for limited aeration and low water potential. *Agricultural Water Management* 185: 126-136.
- 17- Richards L.A. 1931. Capillary conduction of liquids in porous mediums. *Physics* 1: 318–333.
- 18- Sarai Tabrizi M., Homae M., Babazadeh H., Kaveh F., and Parsinejad M. 2015. Modeling basil response to water stress under different soil water levels. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 46(2): 163–171. (In Persian)
- 19- van Genuchten M.Th. 1987. A numerical model for water and solute movement in and below the root zone. Research Report, US Salinity Laboratory, Riverside, CA.



Evaluation of Water Uptake Reduction Functions of Lettuce (Red Salad Bowl) under Drought Stress Conditions

E. Zoratipour¹ - A. Soltani Mohammadi^{2*} - N. Alemzadeh Ansari³

Received: 21-11-2018

Accepted: 29-04-2019

Introduction: when the loss of water from the leaves by transpiration process exceeds the water in the root zone, water stress occurs. If water uptake reduction functions can predict the flow of water to the roots properly, with no need to field measurements, it is possible to determine the time of irrigation for maximum yield with the help of chemical and physical properties of water and soil and specific plant parameters. From a conceptual point of view, two main approaches of water uptake modeling exist, which differ in the way they predict the volumetric rate of root water uptake. The microscopic models describe the water flow towards the single root. Macroscopic models are based on the principles of energy and mass transfer and described water uptake by the entire root area, regardless of the impact of individual roots. In general, macroscopic models have been considered in plant growth and soil-plant-atmosphere models. The most important models of macroscopic water uptake can be referred to the model of Feddes et al. (1978), the Van-Genuchten model (1987), the Dirksen et al. (1993) and Homae (1999). Saraei Tabrizi et al. (2015) with an evaluation of the water uptake reduction functions under water stress conditions on basil plant showed that the Homae (1999) model was more suitable than other models. The purpose of the present study is to evaluate the four macroscopic water uptake reduction functions of Feddes et al., (1978), Van Genuchten (1987), Dirksen et al., (1993) and Homae (1999) in order to predict water uptake by lettuce root and determining the most suitable model to predict the reduction of water uptake of lettuce under water stress conditions.

Materials and Methods: The experiment was conducted in a completely randomized design with three replications in 2017 in the research greenhouse of Agriculture Faculty, Shahid Chamran University of Ahvaz. The experiment consisted of irrigation water at three levels (I_1 :100%, I_2 :80% and I_3 :60% of crop water requirement). The soil texture was medium. The cultivation was indirect (seedling) in pots of diameter 22 and height 30 cm. For this purpose, 9 pots were used. The plant's growth period was about 70 days. The irrigation was done by the manual method and by the graduated bushel. During the growing season, treatments were irrigated fifteen times. The volume of water used for treatments I_3 , I_2 and I_1 were respectively 792, 1055 and 1320 ($m^3 \cdot ha^{-1}$). The weighted method was used to determine the time of irrigation and the soil moisture characteristic curve was used to measure the matric potential. 12 pots were considered as destructive ones for measuring plant weight as it was not possible to measure the weight of plants per day. In order to evaluate the water uptake reduction functions, relative transpiration was plotted against the absolute value of matric potential and the best model was determined by fitting them, to the measured data. For this purpose, the statistical indicators of the Maximum Error (ME), coefficient of determination (R^2), Root Mean Square Error (RMSE), modeling efficiency (EF) and Coefficient of Residual Mass (CRM) were used.

Results and Discussion: Based on the results, the model of Homae (1999) and the model of Van Gennuchten (1987) had the best fit on the whole range of measured data, respectively. Then, the model of Dirksen et al. (1993) and, the model of Feddes et al. (1978) were ranked. In addition, in models that $|h|$ was smaller than 8000 cm, like Feddes et al. (1978), Van Gennuchten (1987), Dirksen et al. (1993) showed good fit and proximity to each other. Babaazadeh et al. (2017) in studying the effect of salinity and drought stress on the uptake of root water of basil, concluded that the Homae (1999) model had the best agreement with experimental data and increasing drought stress reduced the potential of water uptake by roots. Also Saraei

1 and 2- M.Sc. Student and Associate Professor of Irrigation and Drainage Department, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

(*- Corresponding Author Email: a.soltani@scu.ac.ir)

3- Associate Professor, Department of Horticulture, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Tabrizi et al. (2015) concluded that the Homae (1999) model had the best fit with the measured data and the results were in accordance with the results of this study. Based on the results of this study, for simulation of water uptake, the models of Feddes et al. (1978) and Dirksen et al. (1993) are slightly overestimated and Van Gennuchten (1987) and Homae (1999) models have slightly underestimated. Homae (1999) in his research was conducted that in treatment of 70% water requirement supply for alfalfa, Feddes et al. (1978) model was overestimated and other models were underestimated which are close to the results. Homae (1999) model was more consistent compared to other water uptake models because of considering two thresholds for the model.

Conclusion: According to the results, Homae (1999) model was better than other models (RMSE=9.14 and $R^2 = 0.96$). The results of the models of Feddes et al. (1978) with $R^2 = 0.43$ and RMSE = 16.46, Van Gennuchten (1987) with $R^2 = 0.51$ and RMSE = 8.62 and Dirksen et al. (1993) with $R^2 = 0.48$ and RMSE = 12.5 were closely related to each other.

Keywords: Lettuce, Uptake reduction functions, Water stress