

توسعه مدل مفهومی تعدیل شده پاسخ گیاهان به تنش توأمان خشکی و شوری (مطالعه موردی: گیاه ریحان)

حسین بابازاده^۱، حمزه علی علیزاده^{۲*}، مهدی سرائی تبریزی^۳

۱. استادیار، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران

۲. استادیار، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه ایلام

۳. استادیار، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۵/۵ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۱۰/۶)

چکیده

در مناطق خشک و نیمه خشک علاوه بر کمیت آب، کیفیت آن هم محدودکننده توسعه محصولات کشاورزی می باشد. در چنین شرایطی گیاه به طور توأمان تحت تأثیر تنش های آبی و شوری قرار می گیرد. مدل سازی واکنش گیاهان زراعی به تنش های هم زمان آبی و شوری می تواند به مدیریت بهره برداری از منابع آب محدود کشور کمک شایانی بنماید. هدف از این مطالعه مدل سازی پاسخ گیاهان زراعی به تنش توأمان آبی و شوری می باشد. برای این منظور ابتدا مهم ترین توابع کاهش جذب آب با استفاده از داده های گلخانه ای ریحان در جنوب شرقی تهران در سال ۱۳۹۲ مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج ارزیابی مدل ها نشان داد که در هیچ یک از مدل های ریاضی ارائه شده ارتباط بین پتانسیل ماتریک در رطوبت سهل الوصول (h_3) و پتانسیل اسمزی ارائه نشده است. این در حالی است که با افزایش شوری پتانسیل کل آب (مجموع پتانسیل ماتریک و اسمزی) کاهش می یابد. در این مقاله با اصلاح نیاز تبخیری (بازوی h_3) مدل مفهومی همایی و همکاران یک مدل ریاضی جدید برای بررسی واکنش گیاهان زراعی به تنش های هم زمان شوری و کم آبی ارائه شد. نتایج ارزیابی مدل با داده های مشاهده ای ریحان نشان داد که به استناد شاخص های آماری محاسبه شده، مدل ارائه شده قادر است واکنش گیاه به تنش شوری، کم آبی و تنش هم زمان شوری و کم آبی را با دقت بسیار مناسب ($R^2=0.97$ ، $MAE=0.8/5$ و $NRMSE=0.12/4$) شبیه سازی نماید.

واژه های کلیدی: تابع کاهش جذب، تنش هم زمان، نیاز تبخیری (h_3)

مقدمه

وجود سهم هر یک از این تنش ها در کاهش جذب آب به روشنی مشخص نمی باشد. بدیهی است که اجزای انرژی آب در خاک جمع پذیرند و کل انرژی عبارت از جمع جبری اجزای آن است، ولی رفتار گیاه به ازای افزایش یک سانتی متر فشار اسمزی با کاهش مکش ماتریک به اندازه یک سانتی متر یکسان نیست. یکی از دلایل این موضوع مربوط به آن است که به هنگام وجود شوری، گیاه می تواند خود را تا حدی با جرم اضافی موجود در سیستم (املاح محلول) سازگار کند که به آن سازگاری اسمزی^۱ گویند و یا این که نفوذپذیری ریشه ها نسبت به آب شور افزایش می یابد. حال آن که کم آبی (پتانسیل ماتریک کم) به مفهوم نبود جرم (آب) در سیستم است و گیاه در چنین شرایطی سازگاری چندانی بروز نمی دهد. بنابراین، هر چند که فشار اسمزی و پتانسیل ماتریک هر یک به نوعی انرژی آب در خاک را دستخوش تغییر می کنند ولی وجود یکی ناشی از فراوانی جرم در محیط ریشه و دیگری به معنای نبود آن است بنابراین پاسخ گیاه به این

افزایش جمعیت، نیاز به غذای بیش تر و محدودیت منابع آب در مناطق خشک و نیمه خشک، لزوم استفاده از منابع آبی با کیفیت کم و اعمال مدیریت های کم آبیاری را اجتناب ناپذیر کرده است. استفاده از کم آبیاری به منظور حفاظت از آب و عدم اعمال حداقل ضریب آبیاری در طول فصل آبیاری و یا حتی در سراسر چندین فصل آبیاری باعث انباشته شدن نمک در منطقه ریشه می شود. در نتیجه وقتی از آب های با کیفیت کم مثل هرز آب ها و یا آب های نامتعارف استفاده می شود وضع بدتر هم خواهد شد. بنابراین در این مناطق در اغلب موارد گیاهان به طور توأمان تحت تأثیر تنش آبی و شوری قرار می گیرند (Huston et al., 1990; Dudley and Shani, 2003). بدیهی است که وجود هر یک از تنش های آبی و شوری، جذب آب را کاهش می دهد و وجود توأمان این دو تنش، کاهش جذب آب را تشدید می کند. با این

شوری و جذب آب و به تبع آن بر روی عملکرد محصولات در یک مکان خاص به نوع گیاه، تناوب آبیاری، خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک، اقلیم و کیفیت آب آبیاری وابسته است (Homaei, 1999; Homaei et al., 2002b; Dudley and Shani, 2003).

دو یکسان نخواهد بود. تأثیر توأم تنش شوری و کم‌آبی بر روی جذب آب و به تبع آن بر روی عملکرد محصولات در یک مکان خاص به نوع گیاه، تناوب آبیاری، خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک، اقلیم و کیفیت آب آبیاری وابسته است (Homaei, 1999; Homaei et al., 2002b; Dudley and Shani, 2003).

Alizadeh et al., (2009) در مطالعات گلدانی بر روی گوجه‌فرنگی در منطقه کرج با ۸ سطح شوری و سطوح آبی که به صورت تغییرات پتانسیل ماتریک اعمال گردید. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که در شوری‌های کم مدل Homaei et al. (2002b) و در شوری‌های زیاد مدل Skaggs et al., (2006)، مدل Homaei et al. (2002b) و مدل van Genuchten (1987) نتایج قابل قبولی در مدل کردن جذب آب و بررسی واکنش گیاه گوجه فرنگی به تنش توأم آن را با کم‌ترین خطای مطلق و حداقل RMSE به خود اختصاص دادند.

ریحان (*Ocimum basilicum*) یکی از گیاهان مهم متعلق به خانواده نعناع (*Lamiaceae*) است که به‌عنوان گیاهی دارویی، ادویه‌ای و همچنین به‌صورت سبزی تازه مورد استفاده قرار می‌گیرد. ریحان در درمان برخی از بیماری‌ها و نیز در صنایع غذایی، آرایشی، بهداشتی و عطرسازی استفاده می‌شود. علی‌رغم آن‌که کشت ریحان در اکثر مناطق جهان رایج است با این حال اطلاعات بسیار اندکی در رابطه با مدیریت آبیاری و پاسخ آن به شرایط تنش‌زا نظیر تنش آبی، تنش شوری و تنش‌های توأم آبی و شوری وجود دارد (Ekren et al., 2012; Omidbaigi, 2012).

پژوهش حاضر، با هدف مدل‌سازی پاسخ گیاه ریحان به تنش توأم آبی و شوری انجام شد. در این مطالعه، ابتدا توابع کاهش جذب آب کلان شامل van Genuchten (1987) (جمع‌پذیر و ضرب‌پذیر)، Dirksen and Augustijn (1988)، Van Dam et al. (1997)، Skaggs et al. (2006) و Homaei et al. (2002b) با استفاده از داده‌های گلخانه‌ای ریحان مورد ارزیابی قرار گرفت. در مرحله بعد مدل مفهومی Homaei et al. (2002b) به‌عنوان بهترین مدل نسبت به h_3 اصلاح شد.

مواد و روش‌ها

الف) تئوری پژوهش

گیاهان برای فتوسنتز و تعرق، به آب نیاز دارند. با افزایش شوری و کاهش پتانسیل ماتریک، جذب آب توسط گیاه کاهش می‌یابد. مناسب‌ترین روش کمی کردن جذب آب توسط ریشه گیاهان، استفاده از معادله کلی جریان یا معادله ریچاردز است. تقریباً

توابع کاهش عملکرد گندم را در شرایط توأم شوری و کم‌آبی مورد ارزیابی قرار دادند. برای این منظور از داده‌های صحرایی یک طرح پژوهشی که به مدت دو سال زراعی (۸۰ و ۸۱) در شمال گرگان اجرا شده بود استفاده شد. تیمارهای آبی در چهار سطح ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد نیاز آبیاری کامل و سطوح شوری در سه سطح ۸/۵، ۱۱/۵، ۱۴/۲ به کار رفت. نتایج ارزیابی مدل‌های مورد بررسی نشان داد که مدل Homaei et al. (2002b) و مدل ضرب‌پذیر van Genuchten (1987) بهتر از سایر مدل‌ها کاهش عملکرد نسبی را پیش‌بینی می‌کنند. همچنین نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که اثر کمی تنش‌های شوری و کم‌آبی بر عملکرد یکسان نیست بلکه وزن اثر کمبود رطوبت بیش‌تر از اثر تنش شوری و اثر توأم شوری و کم‌آبی کمتر از مجموع اثرات هر یک از تنش‌های فوق می‌باشد.

Green et al., (2006) ضمن مرور مدل‌های جذب ارائه شده تا آن زمان به بررسی نقاط ضعف و قوت هر یک از آن‌ها پرداختند. همچنین با استفاده از وسایل آزمایشگاهی دقیق میزان جذب آب توسط گیوی را اندازه‌گیری کرده و با مدل‌های میکروسکوپی و ماکروسکوپی مورد ارزیابی قرار دادند. ایشان مهم‌ترین چالش‌های مدل‌های ریاضی میکروسکوپی را اندازه‌گیری مقاومت ریشه بر شمرند. مهم‌ترین ضعف هم‌مدل‌های ارائه شده را نداشتن پاسخی برای جذب شبانه آب، ترکیب نمک‌های موجود در آب و جریان معکوس در آبیاری بخشی منطقه ریشه PRD^۱ دانستند. میزان جذب شبانه آب در مورد گیوی حدود ۲۰ درصد کل جذب آب می‌باشد که هیچ مدلی آن را لحاظ ننموده است. مدل‌های ضرب‌پذیری نتایج بهتری نسبت به مدل‌های جمع‌پذیر ارائه می‌نمایند.

Skaggs et al., (2006) جذب آب توسط ریشه یونجه را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیقات ایشان نشان داد که مدل‌های ضرب‌پذیری عملکرد بهتری نسب به مدل‌های جمع‌پذیر ارائه می‌دهند. نتایج آن‌ها همچنین نشان داد که استفاده از مدل Maas and Hoffman (1977) به‌جای مدل van

1. Partial Root Zone Drying

به صفر می‌رسد (رابطه ۴).

$$\alpha(h) = \begin{cases} \frac{h-h_4}{h_3-h_4}, & h_3 > h > h_4 \\ 1 & h_2 \geq h \geq h_3 \\ \frac{h-h_1}{h_2-h_1}, & h_1 > h > h_2 \\ 0, & h \leq h_4 \text{ or } h \geq h_1 \end{cases} \quad (\text{رابطه ۴})$$

مقدار جذب آب هنگامی که $h_2 < h < h_3$ باشد بیشینه و هنگامی که $h > h_2$ یا $h < h_3$ باشد مقدار جذب به صورت خطی کاهش می‌یابد. همچنین زمانی که $h \geq h_1$ یا $h \leq h_4$ باشد مقدار جذب صفر می‌شود. مقدار h_3 تابعی از نیاز تبخیری^۲ می‌باشد.

یکی دیگر از معروف‌ترین مدل‌هایی که برای تعیین ضریب کاهش جذب در هنگام تنش آبی وجود دارد، تابع کاهش سیگموییدی شکلی که توسط van Genuchten (1987) پیشنهاد شده است، می‌باشد (رابطه ۵).

$$\alpha(h) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h}{h_{50}}\right)^{p_1}} \quad (\text{رابطه ۵})$$

که در آن h_{50} پتانسیل ماتریکی که به ازای آن عملکرد ۵۰ درصد کاهش می‌یابد و معمولاً از طریق آزمون و خطا بدست می‌آید و p_1 یک ضریب تجربی است که معمولاً مقدار آن ۳ در نظر گرفته می‌شود.

مهم‌ترین ایرادی که می‌توان به مدل سیگموییدی van Genuchten (1987) وارد کرد این است که بر اساس این مدل بیشترین مقدار جذب آب در رطوبت اشباع اتفاق می‌افتد. بدیهی است که مدل van Genuchten (1987) به صورت فوق برای رطوبت‌های نزدیک به رطوبت اشباع فاقد اعتبار است.

van Dirksen and Augustijn (1988) معادله^۶ van Genuchten (1987) را نسبت به مقدار پتانسیل ماتریک در آستانه^۶ کاهش جذب h^* تعدیل کرده و آن را به صورت رابطه^۶ ارائه کردند.

$$\alpha(h) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h^* - h}{h^* - h_{50}}\right)^{p_1}} \quad (\text{رابطه ۶})$$

نتایج تحقیقات پژوهشگران مختلف نشان می‌دهد که پاسخ گیاهان به تنش آبی در پتانسیل‌های ماتریک کم، خطی نیست. از طرف دیگر مدل Dirksen and Augustijn (1988) در پتانسیل‌های ماتریک نزدیک به صفر مقدار $\alpha(h)$ را زیاد برآورد

همه مدل‌های ریاضی حرکت آب و املاح در خاک به وسیله حل عددی معادله ریچاردز- دارسی با در نظر گرفتن ترم جذب آب برای جریان در بعد عمودی ارائه شده‌اند. از آنجا که جذب آب توسط گیاهان در رطوبت‌های غیر اشباع صورت می‌گیرد، بنابراین باید آن را در معادله ریچاردز لحاظ کرد. شکل معادله ریچاردز پس از لحاظ کردن ترم جذب آب توسط گیاه به صورت Richards, 1931; Homae et al., 2002a; Homae et al., 2002c (رابطه ۱):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial z} - K(h) \right] - S \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن θ درصد رطوبت حجمی خاک، $h(L)$ بار فشاری آب خاک، $t(T)$ زمان، $Z(L)$ عمق خاک، $K(LT^{-1})$ هدایت هیدرولیکی غیر اشباع و $S(T^{-1})$ منبع مصرف آب است. ترم جذب آب S توسط ریشه در رابطه^۱ تابعی از پتانسیل ماتریک، پتانسیل اسمزی، ویژگی‌های ریشه و شرایط آب و هوایی همچون نیاز تبخیری می‌باشد (Richards, 1931; Homae et al., 2002c).

تنش آبی زمانی اتفاق می‌افتد که میزان تعرق بیش از مقدار جذب آب باشد. هنگامی که هیچ‌گونه محدودیت آبی در خاک وجود نداشته باشد، مقدار آب جذب شده توسط گیاه معادل تعرق پتانسیل^۱ بوده و معادله کلی آن به صورت زیر است (Alizadeh et al, 2009; Kiani et al, 2006) (رابطه ۲).

$$S = S_{\max} = \frac{T_p}{Z_r} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن S میزان جذب آب به وسیله گیاه، Z_r عمق توسعه ریشه و S_{\max} حداکثر میزان جذب آب به وسیله گیاه می‌باشد. حال اگر خاک نتواند نیاز آبی گیاه را برای حداکثر تعرق فراهم آورد، به اندازه $\alpha(h)$ موسوم به تابع کاهش جذب، از میزان جذب آب به وسیله ریشه‌های گیاه کاسته می‌شود (Dirksen and Augustijn, 1988) (رابطه ۳).

$$S = \alpha(h) \times S_{\max} \quad (\text{رابطه ۳})$$

Feddes et al. (1978) پیشنهاد کردند که تابع کاهش جذب در تنش آبی به صورت یک تابع خطی تکه‌ای است که در آن مقدار جذب آب در پتانسیل اشباع صفر، با کاهش پتانسیل ماتریک از صفر تا ظرفیت زراعی مقدار جذب به صورت خطی افزایش و به مقدار پتانسیل می‌رسد، سپس مقدار جذب تا پتانسیلی که مقدار آن تابع نیاز تبخیری گیاه است ثابت می‌ماند و با کاهش بیشتر رطوبت مقدار جذب به صورت خطی کاهش و

می‌کند. *Homaee et al.* (2002b) برای برآورد تنش آبی رابطه زیر را ارائه نمودند.

$$\alpha(h) = \frac{1}{1 + (1 - \alpha_0) / \alpha_0 \left[\frac{h^* - h}{h^* - h_{\max}} \right]^{P_1}} \quad (\text{رابطه ۷})$$

کاهش در 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 که در $h > h_{\max}$ گیاه هنوز زنده بوده و در سطحی بسیار اندک به فعالیت‌های حیاتی خود ادامه می‌دهد. سپس مقدار P با توجه به h_{\max} به صورت زیر تعریف شد (Homaee, 1999) (رابطه ۹):

$$P_1 = \frac{h_{\max}}{h_{\max} - h^*} \quad (\text{رابطه ۸})$$

اگر به جای $\alpha(h)$ ضریب کاهش به صورت تابعی از پتانسیل اسمزی محلول خاک $\alpha(h_0)$ قرار گیرد معادله جذب آب از خاک‌های شور به صورت زیر خواهد شد (Feddes *et al.*, 1978) (رابطه ۹):

$$S = \alpha(h_0) S_{\max} \quad (\text{رابطه ۹})$$

در این معادله $\alpha(h_0)$ تابع کاهش جذب آب در اثر تنش شوری است. مدل شیب آستانه Maas and Hoffman (1977)، مدل سیگموییدی van Genuchten and Hoffman (1984) و Homaee *et al.* (1988) Dirksen and Augustijn (2002a) معروف‌ترین مدل‌های شبیه‌سازی جذب آب در خاک‌های شور می‌باشند.

در زمینه چگونگی پاسخ گیاهان به تنش هم‌زمان آبی و شوری و سهم هر یک از آن‌ها در کاهش جذب آب نظریات و مدل‌های ریاضی متعددی وجود دارد که بر مبنای این نظریات مدل‌های جذب آب به سه دسته کلی جمع‌پذیری، ضرب‌پذیری و مدل‌های مفهومی تقسیم می‌شوند. در مدل‌های جمع‌پذیر فرض شده که جذب آب در اثر مجموع وزنی فشار آب خاک و فشار اسمزی به وجود می‌آید. حال آن‌که در مدل‌های ضرب‌پذیر ضرایب کاهش مربوط به کم‌آبی و شوری به طور جداگانه محاسبه و در هم دیگر ضرب می‌شوند. یکی از معروف‌ترین مدل‌های جمع‌پذیر تحت شرایط تنش توأمان آبی و شوری، مدل جمع‌پذیر van Genuchten (1987) به صورت زیر می‌باشد (رابطه ۱۰):

$$\alpha(h, h_0) = \frac{1}{1 + \left[\frac{ah + a_2 h_0}{h_{050}} \right]^{P_2}} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

که در آن h_0 پتانسیل اسمزی، h_{50} و h_{050} به ترتیب پتانسیل ماتریک و پتانسیل اسمزی که به ازای آن میزان جذب ۵۰ درصد کاهش می‌یابد و P_2 پارامتری تجربی وابسته به گیاه، خاک و اقلیم است. ضرایب a_1 و a_2 در مدل جمع‌پذیر ساده برابر یک می‌باشند.

مدل‌های ضرب‌پذیر اولین بار توسط van Genuchten (1987) پیشنهاد شدند و در بسیاری از مدل‌های شبیه‌سازی شده عددی جذب آب به وسیله گیاه به کار گرفته شده‌اند. معادله عمومی مدل‌های ضرب‌پذیر به صورت رابطه ۱۲ می‌باشد.

$$\alpha(h, h_0) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h}{h_{50}} \right)^{P_1}} \times \frac{1}{1 + \left(\frac{h_0}{h_{050}} \right)^{P_2}} \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

که در آن P_1 و P_2 پارامترهای تجربی وابسته به گیاه، خاک و اقلیم می‌باشند.

Dirksen and Augustijn (1988) مضرهای تابع کاهش van Genuchten and Hoffman (1984) و (1987) را نسبت به آستانه کاهش شوری (h_0^*) و آستانه کاهش آبی (h^*) تعدیل و به صورت رابطه ۱۳ ارائه کردند. (رابطه ۱۲)

$$\alpha(h, h_0) = \frac{1}{1 + \left[\frac{h - h^*}{h^* - h_{50}} \right]^{P_1}} \times \frac{1}{1 + \left[\frac{h_0 - h_0^*}{h_0^* - h_{050}} \right]^{P_2}}$$

Van Dam *et al.* (1997) از تلفیق شاخه نزولی تابع کاهش Feddes *et al.* (1978) برای تنش آبی و تابع کاهش Maas and Hoffman (1977) برای تنش شوری، تابع کاهش زیر را برای شرایط وجود تنش‌های توأمان آبی و شوری ارائه کردند.

$$\alpha(h, h_0) = \frac{h - h_4}{h_3 - h_4} \times \left[1 - \frac{b}{360} (h_0^* - h_0) \right] \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

که در آن ضریب b درصد کاهش محصول به ازای افزایش واحد شوری می‌باشد.

مدل Skaggs *et al.* (2006) از تلفیق مدل van Genuchten (1987) برای تنش آبی و مدل Maas and Hoffman (1977) برای تنش شوری به دست آمده است (رابطه ۱۵).

$$\alpha(h, h_0) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h}{h_{50}} \right)^P} \times \left[1 - \frac{b}{360} (h_0^* - h_0) \right] \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

Homaee *et al.* (2002b) مدل ضرب‌پذیر زیر را ارائه کردند (رابطه ۱۶).

متر از سطح دریا در جنوب شرقی تهران قرار گرفته است. برای مدل سازی پاسخ گیاه ریحان به تنش های توأمان آبی و شوری و همچنین ارزیابی توابع کاهش جذب آب تحت شرایط تنش های توأمان آبی و شوری، یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک های کامل تصادفی با ۳ تکرار انجام شد (شکل ۱). سطوح آبی شامل چهار سطح آبیاری ۱۲۰٪ (W₁)، ۱۰۰٪ (W₂)، ۸۰٪ (W₃) و ۶۰٪ (W₄) نیاز آبی گیاه و سطوح شوری شامل چهار سطح شوری شامل شوری ۱/۲ (تیمار شاهد) (S₁)، ۳ (S₂)، ۵ (S₃) و ۸ (S₄) دسی زیمنس بر متر بود. برای اعمال تیمار شوری از آب شور رودخانه شور واقع در شهرستان ورامین در استان تهران استفاده شد. تیمارهای شوری با استفاده از اختلاط آب رودخانه شور با آب شرب تهیه شد. به ترتیب نتایج تجزیه شیمیایی آب مورد استفاده در این پژوهش و مشخصات هواشناسی محل اجرای طرح در جدول های (۱) و (۲) ارائه شده است.

(رابطه ۱۵)

$$\alpha(h, h_o) = \frac{1}{1 + ((1 - \alpha_{01}) / \alpha_{01}) [(h^* - h) / (h^* - h_{\max})]^{P_1}} \times \frac{1}{1 + ((1 - \alpha_{02}) / \alpha_{02}) [(h_o^* - h_o) / (h_o^* - h_{o, \max})]^{P_2}}$$

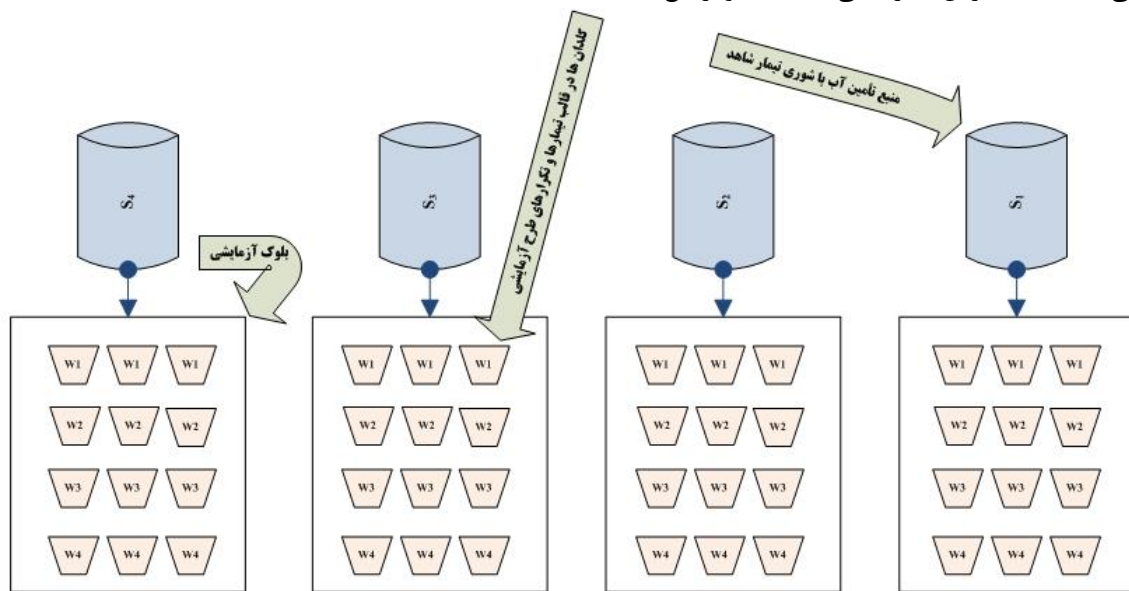
همچنین Homae et al. (2002b) مدل مفهومی زیر را ارائه کردند.

$$\alpha(h, h_o) = \frac{h - (h_4 - h_o)}{h_3 - (h_4 - h_o)} \times \left[1 - \frac{b}{360} (h_o^* - h_o) \right] \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

مدل مذکور در شرایطی که $h < h^*$ و $h_4 - h_0 \leq h \leq h_3$ باشد، صادق است.

(ب) روش تحقیق

این پژوهش در گلخانه سایت پژوهشی دوشان تپه تهران در سال ۱۳۹۲ انجام شد. منطقه مورد مطالعه در موقعیت طول جغرافیایی ۴۲° ۳۵'، عرض جغرافیایی ۲۸° ۵۱' و ارتفاع ۱۲۰۹



شکل ۱. تصویر شماتیک طرح آزمایش های کشاورزی در شرایط تنش همزمان کم آبی و شوری

جدول ۱. نتایج آزمایش تجزیه شیمیایی نمونه آب رودخانه شور

| T.D.S (mg/lit) | EC (dS/m) | pH | milliequivalent/liter | | | | مجموع آنیون ها | milliequivalent/liter | | | | مجموع کاتیون ها | SAR* | Na % |
|-------------------|--------------|------|------------------------------|-------------------------------|-----------------|------------------------------|-------------------|-----------------------|------------------|-----------------|----------------|--------------------|-------|-------|
| | | | CO ₃ ⁻ | HCO ₃ ⁻ | Cl ⁻ | SO ₄ ⁻ | | Ca ⁺⁺ | Mg ⁺⁺ | Na ⁺ | K ⁺ | | | |
| ۷۵۲۰ | ۱۰/۴۹ | ۷/۸۸ | ۰/۰۴ | ۴ | ۷۰ | ۴۹/۱ | ۱۲۳/۱ | ۱۰/۴ | ۳۱/۶ | ۷۶/۵ | ۰/۱۷ | ۱۱۸/۶۷ | ۱۶/۶۹ | ۶۴/۶۱ |

SAR* برحسب (milliequivalent/liter)^{۱/۲}

جدول ۲. وضعیت مشخصات هواشناسی محل اجرای طرح (ایستگاه هواشناسی سینوپتیک دوشان تپه)

| ماه سال | تبر | | | | مرداد | | | | شهریور | | | |
|------------|------|----------------|------------------|------------------|-------|----------------|------------------|------------------|--------|----------------|------------------|------------------|
| | RW | T _m | T _{max} | T _{min} | RW | T _m | T _{max} | T _{min} | RW | T _m | T _{max} | T _{min} |
| | ۱۳۹۲ | ۲۴/۹ | ۲۹/۸ | ۳۴/۶ | ۲۴/۹ | ۲۷ | ۳۰/۱ | ۳۶/۵ | ۲۴/۹ | ۲۸ | ۲۱/۸ | ۲۷/۶ |

T_{min}: دمای حداقل (بر حسب درجه سانتی گراد)، T_{max}: دمای حداکثر ماهانه (بر حسب درجه سانتی گراد)، T_m: دمای میانگین ماهانه (بر حسب درجه سانتی گراد)، RW: میانگین رطوبت نسبی ماهانه (بر حسب درصد)

مقادیر اندازه‌گیری شده است. اگر تمامی داده‌های برآورد شده و اندازه‌گیری شده یکسان باشند، نتایج آماره‌ها به صورت ME، CRM و NRMSE برابر صفر و EF برابر یک است (Loague and Green, 1991).

نتایج و بحث

ارزیابی مدل‌های موجود

به‌منظور مقایسه منطقی بین مدل‌های موجود ابتدا این مدل‌ها با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای واسنجی شده و پارامترهای این مدل‌ها برآورد شد. جهت برآورد ضرایب h_0^* ، $h_{0.50}$ ، b ، P_2 و α_{02} از ۱۳ سطح شوری مجزای از آزمایش‌های اصلی شامل شوری‌های ۱/۱۷۵ (تیمار شاهد)، ۱/۸، ۲، ۲/۲، ۲/۵، ۲/۸، ۳، ۳/۵، ۴، ۵، ۶، ۸ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر استفاده شد. همچنین پارامترهای h^* ، h_{max} ، h_{50} ، h_4 ، h_3 ، P_1 و α_{01} با استفاده از مقادیر تعرق نسبی روزانه و پتانسیل ماتریک متناظر (۲۰۰ تا حدود ۴۰۰۰ سانتی‌متر) اندازه‌گیری شده ۱۲ گلدان (بدون تنش شوری) برآورد شد.

در جدول (۳) پارامترهای مدل‌های مختلف پس از واسنجی ارائه شده است. این ضرایب با استفاده از گزینه Solver نرم‌افزار Excel و برازش مدل‌های مختلف بر داده‌های اندازه‌گیری شده مورد بحث در پاراگراف بالا برآورد گردید. بر این اساس آستانه کاهش عملکرد ریحان نسبت به تنش آبی (h_3) و در همه مدل‌ها ۵۰۰ سانتی‌متر، h_0^* (پتانسیل اسمزی آستانه کاهش عملکرد) در همه مدل‌ها ۶۱۲ سانتی‌متر، b شیب خط کاهش عملکرد در همه مدل‌ها ۸/۱ درصد بر دسی‌زیمنس بر متر، h_{50} (تنش آبی که در آن عملکرد ۵۰ درصد کاهش می‌یابد) در همه مدل‌ها ۱۸۴۵ سانتی‌متر و $h_{0.50}$ (پتانسیل اسمزی که در آن عملکرد ۵۰ درصد کاهش می‌یابد) در همه مدل‌ها ۲۸۳۳/۲ سانتی‌متر محاسبه شد. مقدار پارامترهای P_1 و P_2 مدل‌های جمع‌پذیر van Genuchten (1987) و ضرب‌پذیر Dirksen and Genuchten (1987) و مدل حد آستانه Augustijn (1988) به ترتیب برابر ۲/۲۶ و ۲/۱ محاسبه شد. ضرایب h_3 و h_4 در مدل Homae et al. (2002b) به ترتیب ۳۱۸۴ و ۵۰۰ سانتی‌متر، میزان h_{max} برابر ۳۶۰۰ سانتی‌متر و مقادیر پارامترهای α_{01} و α_{02} در مدل Homae et al. (2002b) برابر ۰/۲۴ و ۰/۲۶ محاسبه شد. مقدار پارامتر P_2 مدل van Genuchten and Hoffman (1984) و مدل Homae et al. (2002b) در توابع کاهش جذب به ترتیب ۲/۱ و ۱/۳۱ محاسبه شد.

در این پژوهش، برنامه‌ریزی آبیاری با استفاده از دستگاه تتاپروپ^۱ انجام شد. تعرق نسبی با استفاده از تغییرات رطوبت روزانه خاک محاسبه شد. برای کاهش تبخیر از سطح خاک گلدان‌ها، یک لایه شن به ضخامت دو سانتی‌متر روی سطح گلدان‌ها ریخته شد. در پایان آزمایش عملکرد ماده خشک در تیمارهای مختلف اندازه‌گیری و عملکرد نسبی از تقسیم عملکرد ماده خشک تیمارها بر عملکرد ماده خشک تیمار بدون تنش (تیمار شاهد) محاسبه شد.

مقایسه کمی مدل‌های مورد استفاده با محاسبه آماره‌های بیشینه خطای نسبی (ME)^۲، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده ($NRMSE$)^۳، کارایی مدل‌سازی (EF)^۴ و ضریب جرم باقی‌مانده (CRM)^۵ برای هر کدام از مدل‌ها انجام شد. بیان ریاضی آماره‌های یاد شده به‌صورت زیر است:

$$ME = \max |P_i - O_i| \times \frac{100}{O} \quad (\text{رابطه ۱۷})$$

$$nRMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \times \frac{100}{O} \quad (\text{رابطه ۱۸})$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (\text{رابطه ۱۹})$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (\text{رابطه ۲۰})$$

که در آن‌ها P_i مقادیر برآورد شده، O_i مقادیر اندازه‌گیری شده، n تعداد مشاهدات و \bar{O} میانگین مقادیر O_i می‌باشد.

آماره NRMSE مقادیر کلی یا میانگین انحراف مقادیر برآورد شده از مقادیر اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد که نمایش‌دهنده عدم اطمینان مطلق مدل می‌باشد. هر چه NRMSE به صفر نزدیک‌تر باشد عملکرد شبیه‌سازی مدل بهتر است. کمترین مقدار برای ME و NRMSE صفر است. مقدار زیاد ME نمایانگر بدترین حالت برآورد مدل است. مقدار EF بین $-\infty$ تا $+\infty$ متغیر است. هر چه مقدار آن به یک نزدیک‌تر باشد مدل کارتر است. در حالی که مقدار CRM نشان‌دهنده تمایل مدل برای بیش‌برآوردی^۶ و یا کم‌برآوردی^۷ در مقایسه با

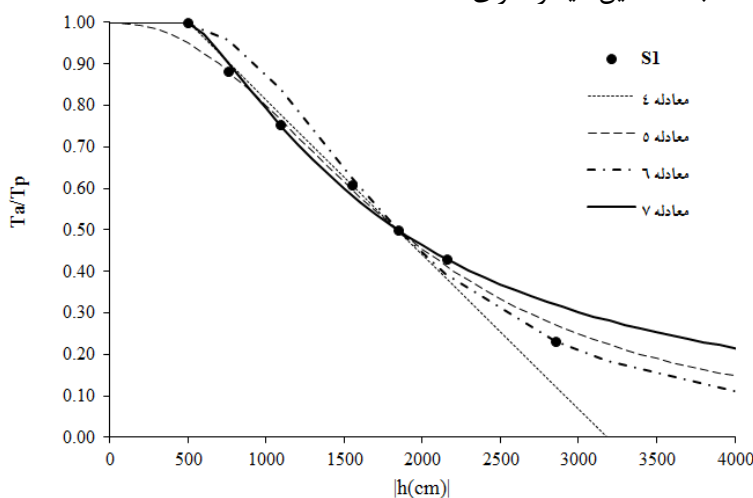
1. Theta Probe (Delta-T Devices, 3118-ML2, Dynamax, Inc., Houston, Tex)
2. Maximum Error
3. normalized Root Mean Square Error
4. Modeling Efficiency
5. Coefficient of Residual Mass
6. Overestimate
7. Underestimate

جدول ۳. پارامترهای مدل‌های برآورد واکنش گیاه ریحان به تنش‌های توأمان آبی و شوری

| شماره مدل | h^* | $h_{o, max}$ | h_o^* | h_{o50} | h_{max} | h_{50} | h_4 | h_3 | b (%) | P_1 | P_2 | α_{01} | α_{02} |
|-----------|-------|--------------|---------|-----------|-----------|----------|-------|-------|---------|-------|-------|---------------|---------------|
| ۵ | - | - | - | - | - | - | ۳۱۸۴ | ۵۰۰ | - | - | - | - | - |
| ۶ | - | - | - | - | - | ۱۸۴۵ | - | - | - | ۲/۲۶ | - | - | - |
| ۷ | ۵۰۰ | - | - | - | - | ۱۸۴۵ | - | - | - | ۲/۲۶ | - | - | - |
| ۸ | ۵۰۰ | - | - | - | ۳۶۰۰ | - | - | - | - | ۱/۳۵ | - | ۰/۲۴ | - |
| ۱۱ | ۵۰۰ | - | ۶۱۲ | ۲۸۳۳/۲ | - | ۱۸۴۵ | - | - | - | - | - | ۲/۲۶ | - |
| ۱۲ | ۵۰۰ | - | - | ۲۸۳۳/۲ | - | ۱۸۴۵ | - | - | - | ۲/۱ | ۲/۲۶ | - | - |
| ۱۳ | - | ۴۹۸۶ | ۶۱۲ | ۲۸۳۳/۲ | - | ۱۸۴۵ | - | - | - | ۲/۱ | ۲/۲۶ | - | - |
| ۱۴ | - | - | ۶۱۲ | - | - | - | ۳۱۸۴ | ۵۰۰ | ۸/۱ | - | - | ۲/۲۶ | - |
| ۱۵ | - | - | ۶۱۲ | - | - | - | - | - | ۸/۱ | - | - | ۲/۴ | - |
| ۱۶ | ۵۰۰ | ۴۹۸۶ | ۶۱۲ | - | ۳۶۰۰ | - | - | - | - | ۱/۳۵ | ۱/۳۱ | - | ۰/۲۴ |
| ۱۷ | - | - | ۶۱۲ | - | - | - | ۳۱۸۴ | ۵۰۰ | ۸/۱ | - | - | - | - |

سطح تنش آبی می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد در شرایط عدم تنش شوری، از بین مدل‌های جذب آب در شرایط تنش آبی مدل Feddes *et al.* (1978) دارای بیش‌ترین دقت و مدل Dirksen and Augustijn (1988) دارای کم‌ترین دقت می‌باشد.

در شکل (۲) برازش توابع کاهش عملکرد شبیه‌سازی شده در شرایط تنش آبی بر داده‌های اندازه‌گیری شده (تقرق نسبی) تجمعی در مقابل پتانسیل ماتریک برای سطح شوری S_1 ارائه شده است. از آنجا که پارامترهای h_4 و h_{50} با استفاده از تیمارهای بدون تنش شوری محاسبه شد این تیمار دارای γ



شکل ۲. تغییرات تابع کاهش جذب تحت شرایط تنش توأمان آبی و شوری در مقابل پتانسیل ماتریک در سطح شوری S_1

جدول ۴. آماره‌های محاسبه شده برای مقایسه مدل‌های مختلف برآورد توابع کاهش عملکرد ریحان به تنش‌های توأمان آبی و شوری S_1

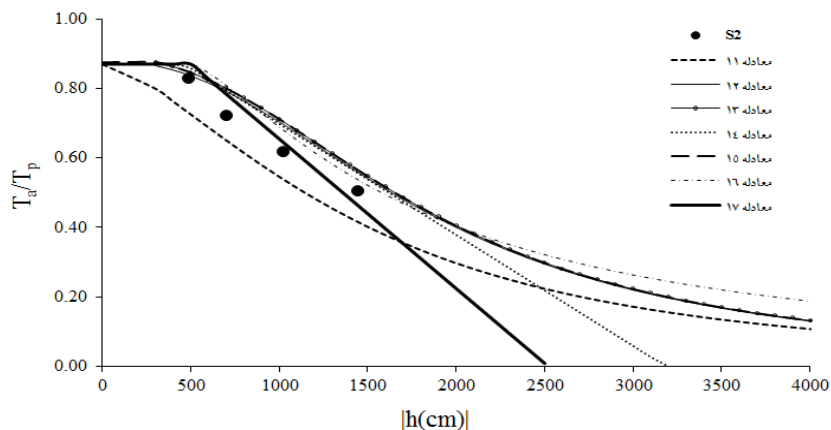
| شماره معادله | R^2 | NRMSE (%) | EF (%) | ME (%) | CRM (%) |
|--------------|-------|-----------|--------|--------|---------|
| ۴ | ۰/۹۹۵ | ۲/۱۶ | ۰/۹۹ | ۳/۴۰ | -۰/۰۲ |
| ۵ | ۰/۹۷۳ | ۳/۱۷ | ۰/۹۷ | ۵/۱۳ | -۰/۰۲ |
| ۶ | ۰/۹۵۹ | ۱۷/۳۹ | ۰/۰۶ | ۲۷/۶۴ | -۰/۱۳ |
| ۷ | ۰/۹۹۳ | ۴/۵۹ | ۰/۹۳ | ۹/۰۲ | ۰/۰۳ |

تجمعی در مقابل پتانسیل ماتریک) در سطح شوری S_2 ارائه شده است. همچنین در جدول (۵) آماره‌های ارزیابی مدل‌ها

در شکل (۳) برازش توابع کاهش جذب شبیه‌سازی شده در شرایط تنش آبی بر داده‌های اندازه‌گیری شده (تقرق نسبی)

بهترین برازش بر داده‌های اندازه‌گیری شده به ترتیب توسط مدل‌های مفهومی *Skaggs et al.* (2002b)، *Homaee et al.* (2006) و *Skaggs et al.* (2003) و *Dudley and Shani* (2006) مطابقت دارد. نتایج همچنین نشان می‌دهد که در شوری S_2

ارائه شده است. نتایج به طور کلی نشان از برتری همه مدل‌های ضرب‌پذیر نسبت به مدل جمع‌پذیر دارد که از این حیث با نتایج تحقیقات *Dudley and Shani* (2003) و *Skaggs et al.* (2006) مطابقت دارد. نتایج همچنین نشان می‌دهد که در شوری S_2



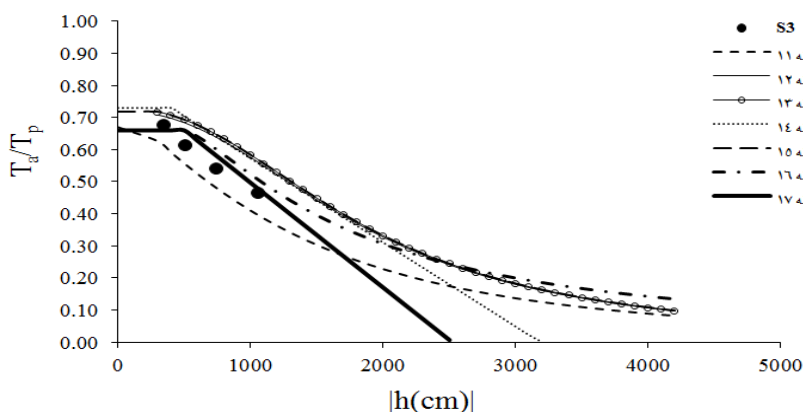
شکل ۳. تغییرات تابع کاهش جذب تحت شرایط تنش توأمان آبی و شوری در مقابل پتانسیل ماتریک در سطح شوری S_2

جدول ۵. آماره‌های محاسبه شده برای مقایسه مدل‌های مختلف بر آورد توابع کاهش جذب ریحان به تنش‌های توأمان آبی و شوری در سطح شوری S_2

| شماره معادله | R^2 | NRMSE (%) | EF (%) | ME (%) | CRM (%) |
|--------------|-------|-----------|--------|--------|---------|
| ۱۱ | ۰/۶۹ | ۳۲/۳۸ | ۰/۶۵ | ۳۷/۰۹ | ۰/۷۵ |
| ۱۲ | ۰/۹۴ | ۱۲/۲۹ | ۰/۸۴ | ۱۶/۱۴ | -۰/۰۱ |
| ۱۳ | ۰/۸۰ | ۱۸/۵۸ | ۰/۹۲ | ۲۴/۰۱ | ۰/۶۸ |
| ۱۴ | ۰/۹۷ | ۱۰/۱ | ۰/۸۲ | ۱۵/۹۶ | -۰/۰۲ |
| ۱۵ | ۰/۹۴ | ۱۲/۸۶ | ۰/۸۲ | ۱۶/۷۵ | -۰/۰۲ |
| ۱۶ | ۰/۹۶ | ۱۳/۳۹ | ۰/۶۸ | ۱۳/۲۷ | -۰/۰۱ |
| ۱۷ | ۰/۹۷ | ۹/۵۷ | ۰/۹۰ | ۱۳/۲۱ | ۰/۰۱ |

در شکل (۴) برازش توابع کاهش عملکرد شبیه‌سازی شده در شرایط تنش آبی بر داده‌های اندازه‌گیری شده (تغرق نسبی) در مقابل پتانسیل ماتریک در سطح شوری S_3 ارائه شده است. همچنین در جدول (۶) آماره‌های ارزیابی مدل‌ها ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در شوری S_3 مدل مفهومی *Homaee et al.* (2002b) دارای بیش‌ترین دقت (کمترین

در شکل (۴) برازش توابع کاهش عملکرد شبیه‌سازی شده در شرایط تنش آبی بر داده‌های اندازه‌گیری شده (تغرق نسبی) در مقابل پتانسیل ماتریک در سطح شوری S_3 ارائه شده است. همچنین در جدول (۶) آماره‌های ارزیابی مدل‌ها ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در شوری S_3 مدل مفهومی *Homaee et al.* (2002b) دارای بیش‌ترین دقت (کمترین



شکل ۴. تغییرات تابع کاهش جذب تحت شرایط تنش توأمان آبی و شوری در مقابل پتانسیل ماتریک در سطح شوری S_3

جدول ۶. آماره‌های محاسبه شده برای مقایسه مدل‌های مختلف برآورد توابع کاهش عملکرد ریحان به تنش‌های توأمان آبی و شوری S_3

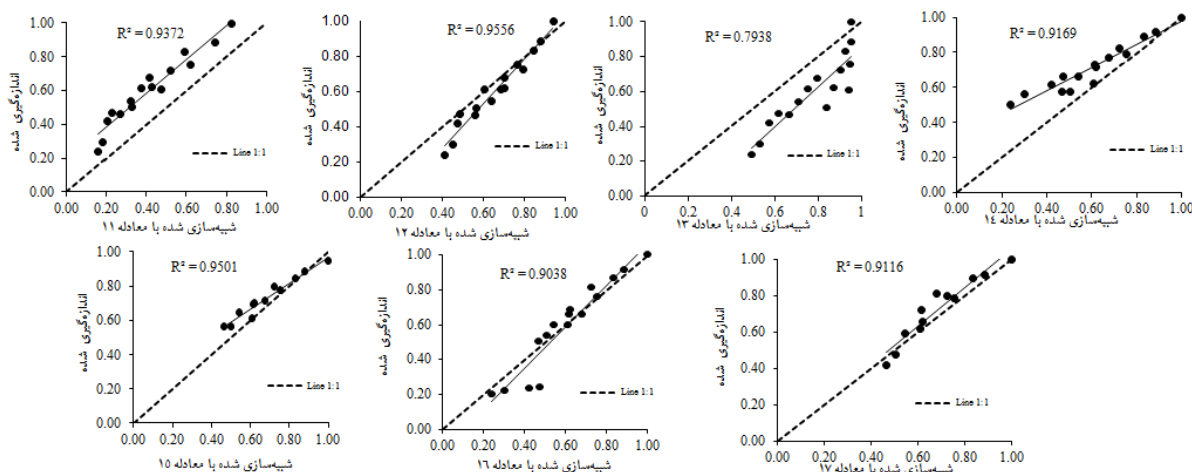
| شماره معادله | R^2 | NRMSE (%) | EF (%) | ME (%) | CRM (%) |
|--------------|-------|-----------|--------|--------|---------|
| ۱۱ | ۰/۷۱ | ۴۷/۰۰ | ۰/۲۶ | ۵۴/۴۸ | ۰/۷۵ |
| ۱۲ | ۰/۹۱ | ۱۴/۰۳ | ۰/۷۹ | ۱۷/۶۵ | -۰/۰۱ |
| ۱۳ | ۰/۸۱ | ۱۸/۷۹ | ۰/۹۲ | ۲۸/۳۵ | ۰/۶۷ |
| ۱۴ | ۰/۷۸ | ۳۳/۳۱ | ۰/۴۱ | ۳۴/۴۳ | -۰/۰۲ |
| ۱۵ | ۰/۹۳ | ۱۵/۲۹ | ۰/۵۹ | ۱۸/۸۶ | -۰/۰۲ |
| ۱۶ | ۰/۸۹ | ۱۸/۳۲ | ۰/۶۴ | ۸/۵۶ | -۰/۰۱ |
| ۱۷ | ۰/۹۶ | ۱۵/۱۱ | ۰/۸۲ | ۱۶/۹۲ | ۰/۱ |

که ملاحظه می‌شود مدل مفهومی *Homae et al.* (2002b) نسبت به سایر مدل‌ها با داده‌های کمتری مورد ارزیابی قرار گرفته است (۱۲ داده در مقابل ۱۶ داده). مهم‌ترین دلیل این مسئله را می‌توان در عدم وجود شرط $(h_4 - h_0) < h < h_3$ ، در تیمارهای چهارگانه S_4 جستجو نمود.

همچنین کارایی مدل‌های مختلف برای تنش‌های ترکیبی ۱۶ گانه در جدول (۷) و شکل (۵) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در مجموع مدل مفهومی *Homae et al.* (2002b) بهترین برازش بر داده‌های اندازه‌گیری شده را به همراه دارد که از این حیث با نتایج پژوهش *Homae et al.* (2002b)، *Green et al.* (2006) و *Skaggs et al.* (2006) مطابقت دارد. همان‌طور

جدول ۷. آماره‌های محاسبه شده برای مقایسه مدل‌های مختلف برآورد توابع جذب ریحان به تنش‌های توأمان آبی و شوری

| شماره معادله | R^2 | nRMSE (%) | EF (%) | ME (%) | CRM (%) |
|--------------|-------|-----------|--------|--------|---------|
| ۱۱ | ۰/۹۴ | ۲۹/۳۹ | ۰/۶۲ | ۵۴/۴۷ | -۰/۲۶ |
| ۱۲ | ۰/۹۵ | ۱۰/۹۰ | ۰/۹۷ | ۱۷/۲۵ | -۰/۳۸ |
| ۱۳ | ۰/۸۰ | ۱۹/۵۸ | ۰/۹۶ | ۴۴/۸۹ | ۰/۰۵ |
| ۱۴ | ۰/۹۲ | ۱۴/۸۶ | ۰/۷۶ | ۳۱/۹۲ | ۰/۱ |
| ۱۵ | ۰/۹۵ | ۱۱/۶۹ | ۰/۹۶ | ۱۸/۴۳ | -۰/۲۵ |
| ۱۶ | ۰/۹۰ | ۱۹/۵۴ | ۰/۷۹ | ۱۷/۱۲ | ۰/۰۹ |
| ۱۷ | ۰/۹۱ | ۸/۶۴ | ۰/۹۸ | ۱۶/۵۳ | -۰/۳۱ |

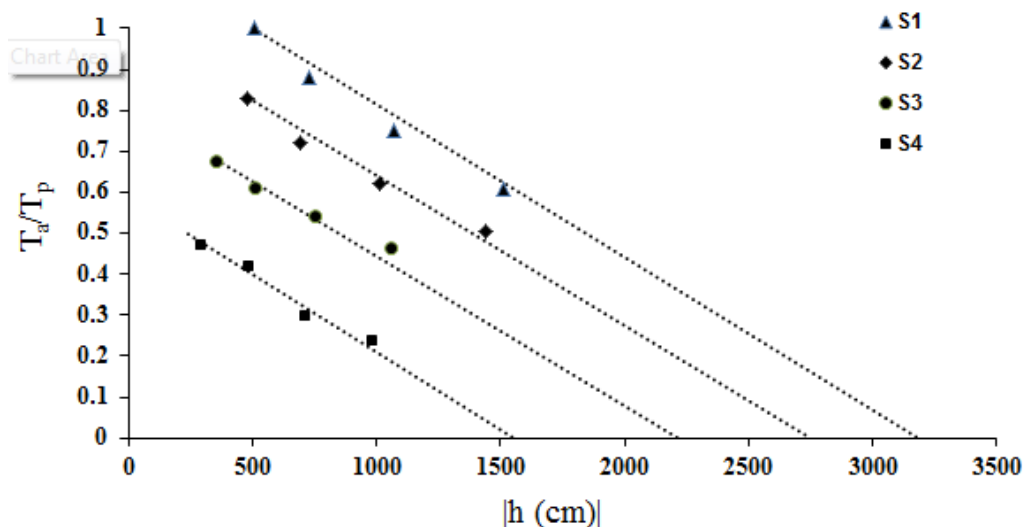


شکل ۵. مقایسه داده‌های شبیه‌سازی شده با مدل‌های جذب در مقابل داده‌های اندازه‌گیری شده

توسعه مدل ریاضی

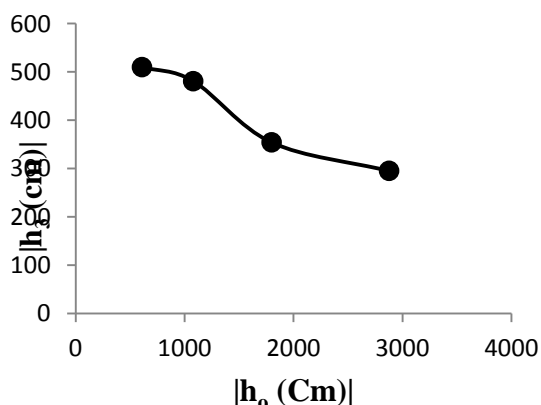
در شکل (۶) مقادیر تعرق نسبی تجمعی ($\sum \frac{T_a}{T_p}$) اندازه‌گیری شده در مقابل قدرمطلق پتانسیل ماتریک در تیمارهای مختلف شوری ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش مقدار مکش رطوبتی و شوری خاک میزان جذب آب کاهش می‌یابد. رابطه بین تعرق نسبی و پتانسیل ماتریک خطی می‌باشد. تعرق نسبی در نقطه شروع تنش آبی (h_3) در هر یک از تیمارهای شوری با تنش شوری ماس و هافمن برابر است. به دلیل حساس بودن گیاه ریحان به تنش آبی و شوری آستانه کاهش جذب (قدرمطلق h_3) پایین می‌باشد. مکش رطوبتی‌ای که در آن مقدار

جذب صفر می‌شود (h_4) با افزایش شوری کاهش می‌یابد. مقادیر h_4 در تیمارهای مختلف شوری S_1 ، S_2 ، S_3 و S_4 به ترتیب ۲۷۵۰، ۲۲۱۵ و ۱۶۵۰ سانتی‌متر برآورد شد. به استثنای تیمار S_1 در مابقی تیمارها h_4 تقریباً از رابطه $h_{\max} - (h_0 - h_0^*)$ پیروی می‌نماید. در تیمار S_1 رابطه $h_{\max} - h_0$ برقرار می‌باشد. این نتایج با نتایج Homaei et al. (2002b) مطابقت دارد. از طرف دیگر نتایج نشان می‌دهد که علاوه بر h_4 پارامتر h_3 نیز متأثر از میزان شوری می‌باشد. مقادیر h_3 در تیمارهای مختلف شوری S_1 ، S_2 ، S_3 و S_4 به ترتیب ۵۱۰، ۴۸۱، ۳۵۴ و ۲۹۵ سانتی‌متر می‌باشد.



شکل ۶. تغییرات تابع کاهش جذب در مقابل پتانسیل ماتریک در سطوح مختلف کیفی و کمی آب آبیاری

بین این دو پارامتر حاکم نیست. همچنین در شکل (۸)، شکل شماتیک مدل مفهومی Homaei et al. (2002b) اصلاح شده ارائه شده است (رابطه ۲۳). بر اساس این شکل با افزایش شوری نه تنها میزان جذب آب کاهش می‌یابد بلکه پارامتر h_3 نیز تغییر می‌کند.



شکل ۷- رابطه بین قدرمطلق h_0 و h_3

رابطه بین h_0 و h_3 در شکل ۷ به تصویر کشیده شده است. نتایج نشان می‌دهد که بین h_0 و h_3 یک رابطه سیگموئیدی به صورت زیر برقرار است:

$$h_3 = \frac{h_3^*}{1 + ((h_0 - h_0^*) / h_{o50})^n} \quad (\text{رابطه } 21)$$

که در آن h_3^* مقدار h_3 در تیمار بدون تنش شوری، h_0^* پتانسیل اسمزی در حد آستانه کاهش جذب و n ضریب ثابت معادله است که به نوع گیاه بستگی دارد. با اعمال اصلاحات فوق مدل مفهومی Homaei et al. (2002b) به صورت زیر اصلاح شد: (رابطه ۲۲)

$$\alpha(h, h_0) = \frac{h - (h_4 - h_0)}{h_3^* - (h_4 - h_0)} \times \left[1 - \frac{b}{360} (h_0^* - h_0) \right]$$

در شکل (۷) رابطه بین قدرمطلق h_0 و h_3 ارائه شده است. بر اساس این شکل رابطه h_0 و h_3 به صورت یک رابطه غیر خطی سیگموئیدی شکل می‌باشد و به هیچ عنوان یک رابطه خطی

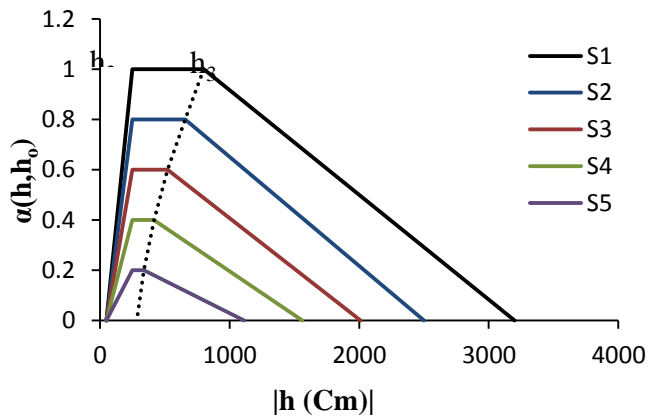
جدول ۸- پارامترهای مدل مفهومی اصلاح شده در برآورد واکنش گیاه ریحان به تنش‌های توأمان آبی و شوری

| شماره معادله | h_0^* | h_4 | h_3^* | $b(\%)$ | n |
|--------------|---------|-------|---------|---------|------|
| ۲۲ | ۶۱۲ | ۳۱۸۴ | ۵۰۰ | ۸/۱ | ۱/۳۳ |

کارایی مدل مفهومی اصلاح شده برای تنش‌های ترکیبی ۱۶ گانه در جدول (۹) و شکل (۹) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در مجموع مدل مفهومی اصلاح شده بهترین برازش بر داده‌های اندازه‌گیری شده نسبت به تمام مدل‌های جذب موجود را به همراه داشت (کمترین ME و NRMSE و همچنین بیش‌ترین ضریب تبیین (R^2)).

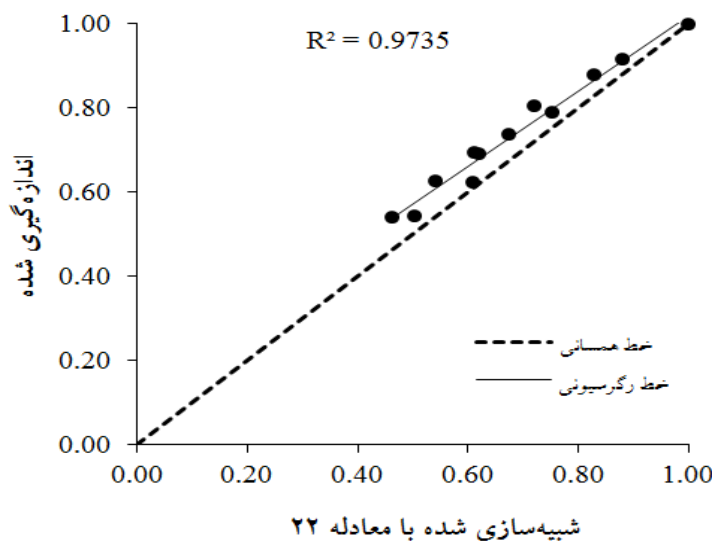
جدول ۹- آماره‌های محاسبه شده برای مدل مفهومی اصلاح شده برای برآورد توابع کاهش جذب ریحان به تنش‌های توأمان آبی و شوری

| شماره مدل | R^2 | nRMSE (%) | EF (%) | ME (%) | CRM (%) |
|-----------|-------|-----------|--------|--------|---------|
| ۲۲ | ۰/۹۷ | ۸/۵۱ | ۰/۸۶ | ۱۲/۴۰ | -۰/۰۷ |



شکل ۸- شکل شماتیک مدل مفهومی اصلاح شده

برای ارزیابی مدل جدید هم ابتدا مدل مشابه مدل‌های قبلی با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای واسنجی شد. در جدول (۸) ضرایب واسنجی مدل مفهومی اصلاح شده ارائه شده است. بر این اساس ضرایب h_3^* ، h_4 و h_0^* در مدل مفهومی اصلاح شده به ترتیب ۵۰۰، ۳۱۸۴ و ۶۱۲ سانتی‌متر، شیب خط کاهش عملکرد ۸/۱ درصد بر دسی‌زیمنس بر متر و ضریب n برای گیاه ریحان برابر ۱/۳۳ برآورد شد.



شکل ۹. مقایسه داده‌های شبیه‌سازی شده با مدل مفهومی اصلاح شده در مقابل داده‌های اندازه‌گیری شده

نتیجه‌گیری
مدل‌سازی واکنش گیاهان زراعی به تنش‌های هم‌زمان آبی و شوری می‌تواند به مدیریت بهره‌برداری از منابع آب محدود کشور کمک شایانی بنماید. پژوهش حاضر، با هدف مدل‌سازی واکنش گیاهان زراعی نسبت به تنش‌های توأمان شوری و کم‌آبی انجام شد. برای این منظور ابتدا مهم‌ترین توابع کاهش جذب آب شامل مدل‌های van Genuchten (1987) (جمع‌پذیر و ضرب‌پذیر)، Dirksen and Augustijn (1988)، Van Dam et al.

al. (1997)، Homaei et al. (2002b) و Skaggs et al. (2006) با استفاده از داده‌های گلخانه‌ای ریحان مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج ارزیابی مدل‌ها نشان داد که هر چند در بین مدل‌های موجود، مدل Homaei et al. (2002b) دارای دقت بیش‌تری می‌باشد، لیکن در هیچ یک از مدل‌های ریاضی ارائه شده ارتباط بین پتانسیل ماتریک در رطوبت سهل‌الوصول (h_3) و پتانسیل اسمزی ارائه نشده است. این در حالی است که با افزایش شوری پتانسیل کل آب (مجموع پتانسیل ماتریک و اسمزی) کاهش

ارائه شده قادر است واکنش گیاه به تنش شوری، کم‌آبی و تنش هم‌زمان شوری و کم‌آبی را با دقت بسیار مناسب ($R^2=0/97$ و $RMSE= ۸/۵\%$) شبیه‌سازی نماید.

می‌یابد. در این مقاله با اصلاح مدل (Homae et al. 2002b) در بازوی h_3 یک مدل ریاضی جدید برای بررسی واکنش گیاهان زراعی به تنش‌های هم‌زمان شوری و کم‌آبی ارائه شد. نتایج ارزیابی مدل با داده‌های مشاهده‌ای ریحان نشان داد که مدل

REFERENCES

- Alizadeh H.A., Liaghat, A.M. and Noorimohamadeh M. 2009. Evaluating water uptake reduction functions under salinity and water stress conditions. *Journal of Water and Soil*, 23 (3):88-97.
- Dirksen, C. and Augustijn, D. C. 1988. Root water uptake function for nonuniform pressure and osmotic potentials. *Agric. Abstracts*, pp. 188.
- Dudley L.M., and Shani U. 2003. Modeling Plant Response to Drought and Salt Stress: Reformulation of the Root-Sink Term. *Vadose Zone Journal*, 2:751-758.
- Ekren, S., Sonmez, C., Ozcalak, E., Kukul Kurttas, Y. S., Bayram, E. and Gurgulu, H. 2012. The effect of different irrigation water levels on yield and quality characteristics of purple basil (*Ocimum basilicum L.*). *Agric. Water Manage.* 57(2): 111-126.
- Feddes RA, Kowalik P and Zarandy H. 1978. Simulation of Field Water Use and Crop Yield. Pudoc. Wageningen. The Netherlands Saline water in supplemental irrigation of wheat and barley under rainfed agriculture. *Agric. Water Manage.* 78: 122-127.
- Homae, M. 1999. Root water uptake under non-uniform transient salinity and water stress. PhD dissertation, Wageningen Agricultural University, The Netherlands, 173 pp.
- Homae, M., Dirksen, C. and Feddes, R. A. 2002a. Simulation of root water uptake. I. Non-uniform transient salinity using different macroscopic reduction functions. *Agric. Water Manage.* 57: 89-109.
- Homae, M., Feddes, R. A. and Dirksen, C. 2002b. Simulation of root water uptake. III. non-uniform transient combined salinity and water stress. *Agric. Water Manage.* 57: 127-144.
- Homae, M., Feddes, R. A. and Dirksen, C. 2002c. A macroscopic water extraction model for non-uniform transient salinity and water stress. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 1764-1772.
- Huston J. L., Dudley, L. M. and Wagenet R. J. 1990. Modeling transient root zone salinity. In K.K. Tanji (ed.) *Agricultural salinity assessment and mangement*. ASCE manuals and reports on engineering practice No. 71. Am. Soc. Civil Eng., Irrig. Drain. Div., New York.
- Kiani A.R., Homae, M. and Mirlatifi, M. 2004. Evaluating yield reduction functions under salinity and water stress conditions. *Soil and Water Sciences*, 20 (1):73-83.
- Loague K., and Green R.E. 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. *Journal of Contaminant Hydrology*, 7: 51-73.
- Maas, E. V. and Hoffman, G. J. 1977. Crop salt tolerance-current assessment. *J. Irrig. and Drainage Div., ASCE*, 103 (IR2): 115-134.
- Omidbaigi R (2009). Production and processing of medicinal plants. *Astan Quds Razavi publications*, No. 149, 397 pp. (In Persian).
- Richards, L. A. 1931. Capillary conduction of liquids in porous mediums. *Physics*. 1: 318-333.
- Sarai Tabrizi, M., Babazadeh, H., Homae, M., Kaveh, F. and Parsinejad, M. 2015. Simulating Basil Response to Irrigation Water Salinity. *Journal of Water Research in Agriculture*, 28 (4): 691-701.
- Sepaskhah, A. R. and Yarami, N. 2010. Evaluation of macroscopic water extraction model for salinity and water stress in saffron yield production. *International Journal of Plant Production*, 4 (3):175-186.
- Skags T.H., van Genuchten M.Th., Shouse P.J., and Poss J.A. 2006. Root uptake and transpiration: From measurements and models to sustainable irrigations. *Agric. Water Manage.* 86, 140-179.
- van Dam J.C., Huygen J., Wesseling J.G., Feddes R.A., Kabat P., Van Walsum P.E.V, Groenendijk P. and Van Diepen C.A. 1997. Theory of SWAP, version 2. Simulation of water flow, solute transport plant growth in the soil-water-atmosphere-plant environment. Report No.71, Dept. of Water Resources, Wageningen Agricultural Univ., 167 P.
- 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.
- van Genuchten, M. Th. and Hoffman, G. J. 1984. Analysis of crop production. In: I. Shainberg and J. Shalhevet (eds), *Soil salinity under irrigation*. pp. 258-271. Springer-Verlag.