

## مدل سازی پاسخ گیاه ریحان به تنش آبی در سطوح متفاوت رطوبتی

مهدی سرائی تبریزی<sup>۱</sup>، مهدی همایی<sup>۲\*</sup>، حسین بابازاده<sup>۳</sup>، فریدون کاوه<sup>۴</sup>، مسعود پارسی نژاد<sup>۵</sup>

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

۲. استاد گروه خاک شناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس

۳. استادیار گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

۴. دانشیار دانشگاه آزاد اسلامی گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی واحد علوم و تحقیقات تهران

۵. دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۵/۱۰ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۱۰/۱۳)

### چکیده

جذب آب گیاه را در شرایط تنش آبی می توان با برخی توابع ریاضی، به صورت کمی، شرح داد. این توابع، در صورتی که بتوانند پیش بینی درستی از واکنش گیاه به تنش آبی ارائه دهند، ابزاری سودمند برای برنامه ریزی آبیاری و مدیریت بهینه آب در مزرعه به شمار می آیند. هدف این پژوهش ارزیابی برخی توابع کاهش جذب آب در شرایط تنش آبی بود. به همین منظور، آزمایشی با چهار سطح مختلف آب آبیاری شامل ۱۲۰، ۱۰۰، ۸۰، و ۶۰ درصد نیاز آبی با سه تکرار روی گیاه ریحان انجام شد. تیمارهای تنش آبی در مرحله سه برگی شدن گیاه اعمال شد. پتانسیل ماتریک روزانه به کمک دستگاه تترابوب و ترسیم منحنی مشخصه رطوبتی خاک اندازه گیری شد. تفرق نسبی با استفاده از تغییرات رطوبت روزانه خاک محاسبه شد. مقایسه آماره های بیشینه خطای نسبی، ریشه میانگین مربعات خطا، کارایی مدلسازی، ضریب جرم باقی مانده، و ضریب تبیین مدل ها نشان داد همه مدل ها مقدار جذب روزانه را کمی بیشتر از مقدار واقعی برآورد می کنند. در برآورد جذب نسبی روزانه، مدل غیر خطی *Homae et al.* (2002) برآزش بهتری نسبت به دیگر مدل ها ارائه داد. همچنین نتایج نشان داد مدل خطی *Feddes et al.* (1987) و مدل های غیر خطی *van Genuchten* (1987) و *Homae et al.* (2002) در برآورد میزان جذب نسبی تجمعی طی فصل رشد دقتی مناسب دارند.

کلیدواژگان: تنش آبی، ریحان، مدل های جذب، مدیریت آبیاری

### مقدمه

نیاز روزافزون به فرآورده های کشاورزی از یک سو و کمبود منابع آب در بیشتر نقاط کشور، به ویژه در مناطق خشک، از سوی دیگر سبب شده بهینه سازی مصرف آب سرلوحه کار برنامه ریزان و سیاست گذاران قرار گیرد. مقدار آب برای تولید فرآورده های کشاورزی نقشی بارز دارد و کمیّت و کیفیت محصول به کمیّت و کیفیت آن وابسته است. با رشد جمعیت، نیاز به استفاده از آب افزایش می یابد و منابع آب به طور فزاینده تهدید می شود. بنابراین، چگونگی حفظ این منبع حیاتی و بهره برداری بهینه از آن یکی از چالش های بسیار مهم قرن حاضر است (Kiani et al., 2004; Karimi et al., 2006; Karimi et al., 2007). از طرف دیگر، بیش از ۹۲ درصد منابع آبی کشور به مصرف بخش کشاورزی می رسد. بنابراین، مدیریت بهینه مصرف آب در بخش کشاورزی اهمیت مضاعف دارد. بهینه سازی مصرف آب از طریق

واکنش گیاه به میزان آب در دسترس موضوعی است که در تحقیقات مختلف، از جمله تحقیق حاضر، بدان پرداخته شده است. مبنای بهینه سازی مصرف آب آبیاری توابع تولید محصولات کشاورزی است. میزان عملکرد محصولات با میزان جذب آب رابطه مستقیم دارد (Karimi et al., 2004; Karimi et al., 2007). با کاهش پتانسیل ماتریک، جذب آب گیاه کاهش می یابد. تخمین مقدار آب جذب شده از ریشه گیاهان برای پیش بینی چگونگی پاسخ محصولات زراعی به کمیّت و کیفیت آب آبیاری بسیار مهم است (Homae and Schmidhalter, 2008; Huston et al., 1990; Homae et al., 2002b). جذب آب توسط ریشه عامل مهمی در چگونگی توزیع جریان آب و املاح در خاک، به ویژه در شرایط غیر اشباع، به شمار می رود. مدل های شبیه سازی جذب از آن جهت اهمیت دارد که اگر این مدل ها بتوانند جریان آب را به سمت ریشه ها به درستی پیش بینی کنند، بدون نیاز به اندازه گیری های صحرایی، می توان زمان آبیاری را برای حداکثر رشد، به کمک خصوصیات شیمیایی و فیزیکی آب و خاک و پارامترهای

Feddes *et al.* (1978) آن را ارائه کرد در رابطه ۲ مشاهده می‌شود:

(رابطه ۲)

$$S = \alpha(h) \times S_{\max} = \alpha(h) \frac{T_p}{Z_r}$$

$\alpha(h)$  تابع بدون بعد پاسخ به تنش آبی است.

مزیت روش‌های ماکروسکوپی در هندسه جریان آسان‌تر نسبت به روش‌های میکروسکوپی و همچنین اجتناب از مشکلات روش‌های میکرو برای شبیه‌سازی جذب ریشه‌های انفرادی در سیستم ریشه‌هاست (Homaei *et al.*, 2002a; Homaei *et al.*, 2002b; Homaei *et al.*, 2002c; Skaggs *et al.*, 2006). در زمینه پاسخ گیاه به تنش آبی دو نظریه وجود دارد؛ واکنش خطی (مدل خطی تکه‌ای Feddes *et al.* (1978)) و واکنش غیر خطی (مدل سیگموئیدی van Genuchten (1987) و Homaei *et al.* (2002b)).

پژوهشگران مدل‌های جذب ارائه‌شده را ارزیابی و اصلاح کرده‌اند و توسعه داده‌اند. Homaei *et al.* (2002b) به منظور بررسی اثر مقادیر مختلف بار فشاری آب خاک روی الگوی جذب آب گیاه یونجه آزمایشی را با استفاده از دو سطح کم‌آبی و یک سطح بدون تنش انجام دادند و یک مدل جذب آب تحت تنش آبی ارائه کردند. نتایج این مطالعه نشان داد تابع کاهش جذب آب غیر خطی، که Homaei *et al.* (2002b) پیشنهاد داده‌اند، نسبت به مدل‌های خطی Feddes *et al.* (1978) و غیر خطی van Genuchten (1987) و Dirksen *et al.* (1993)، به دلیل در نظر گرفتن دو حد آستانه برای مدل به منزله یک ابتکار عددی مؤثر، همخوانی بیشتری با داده‌های اندازه‌گیری شده دارد.

Li *et al.* (2001) برای توسعه مدل‌های جذب آب ریشه تحت شرایط تنش آبی یک مدل نمایی تعدیل‌یافته ارائه کردند که هم توزیع ریشه و هم تنش آبی را شامل می‌شد. مدل پیشنهادی تابعی از تعرق پتانسیل، قابلیت دسترسی به آب خاک، و تراکم طولی ریشه بود. این مدل جذب آب در مدل آگروهیدرولوژیکی SWAP<sup>1</sup> اضافه شد و مقابل داده‌های اندازه‌گیری شده در آزمایش‌های بلندمدت آزموده شد. نتایج نشان داد این مدل میزان آب خاک و جذب آب توسط ریشه را، به‌ویژه در نیمه دوم فصل رشد، در عمق‌های کم، به طور مناسب شبیه‌سازی می‌کند.

Braud *et al.* (2005) مدل‌های مختلف جذب آب ریشه را تحت شرایط تنش آبی، بر مبنای تعرق پتانسیل یا بیلان انرژی سطحی، با هم مقایسه و ارزیابی کردند. نتایج نشان داد

مشخص گیاهی، تعیین کرد (Kiani *et al.*, 2002; Kiani *et al.*, 2005; Green *et al.*, 2006). مناسب‌ترین روش کمی کردن جذب آب توسط ریشه گیاهان استفاده از معادله کلی جریان یا معادله ریچاردز است. تقریباً همه مدل‌های ریاضی حرکت آب و املاح در خاک از راه حل عددی معادله ریچاردز - داریسی 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، باید آن را در معادله ریچاردز لحاظ کرد. شکل معادله ریچاردز، پس از لحاظ کردن ترم جذب آب توسط گیاه (رابطه ۱)، در ادامه می‌آید (Richards, 1931; Homaei, 1999):

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

$\theta$  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 معادله ۱ تابعی از پتانسیل ماتریک، پتانسیل اسمزی، ویژگی‌های ریشه، و شرایط آب‌وهوایی - همچون نیاز تبخیری - است (Homaei, 1999; Homaei *et al.*, 2002a).

مدل‌های جذب آب بر اساس چگونگی به‌کاربردن ترم جذب آب در معادله عمومی جریان به دو گروه تقسیم می‌شوند؛ مدل‌های میکروسکوپی که جریان آب را به طرف تک‌ریشه بررسی می‌کنند و مدل‌های ماکروسکوپی که برداشت آب به وسیله کل ناحیه ریشه را، بدون در نظر گرفتن تأثیر تک‌تک ریشه‌ها، مطالعه می‌کنند (Nimah and Hanks, 1973).

مبنای کار مدل‌های میکروسکوپی معادله Gardner (1964) است که در آن فرض شده جذب آب در واحد طول ریشه متناسب با ضریب آب‌گذری خاک و تفاوت بار هیدرولیکی بین خاک و گیاه است. هر ریشه مجزا استوانه‌ای صاف و یکنواخت، با طول بی‌نهایت، در نظر گرفته می‌شود. فاصله و شعاع همه ریشه‌ها یکسان است. همه مکان‌های جذبی در سطح ریشه یکنواخت و جریان آب نیز ماندگار است. حرکت آب به سمت ریشه فقط به صورت شعاعی صورت می‌گیرد. درصد رطوبت اولیه خاک مقداری یکنواخت دارد؛ در نتیجه پتانسیل ماتریک اولیه در حجم خاک یکسان است.

دومین تیپ مدل‌های جذب آب توابع تجربی‌اند که جذب آب توسط گیاه را بر مبنای پاسخ گیاه به پتانسیل توصیف می‌کنند. در حال حاضر این مدل‌ها بیشتر به کار می‌روند (Kiani *et al.*, 2002; Homaei, 2002; Homaei *et al.*, 2002d). شکل عمومی مدل‌های ماکروسکوپی که اولین بار

آورد، به اندازه  $\alpha(h)$ ، موسوم به تابع کاهش جذب، از میزان جذب آب به وسیله ریشه های گیاه کاسته می شود ( Homae and Feddes, 2002; Homae *et al.*, 2002a; Homae *et al.*, 2002b) (رابطه ۴).

$$S = \alpha(h) \times S_{max} \quad (\text{رابطه ۴})$$

با کم شدن رطوبت خاک، پتانسیل ماتریک کاهش می یابد و گیاه برای برداشت مقدار معینی آب باید انرژی حیاتی بیشتری مصرف کند. اما، اغلب، گیاه این توانایی را ندارد و در نتیجه جذب آب کاهش می یابد (Homae and Feddes, 2002) (رابطه ۵).

$$T_a = T_p \times \alpha(h) \Rightarrow S = S_{Max} \times \alpha(h) \quad (\text{رابطه ۵})$$

*Feddes et al.* (1978) اعلام کردند ضریب تابع کاهش

تنش آبی به صورت یک تابع خطی تکه ای است که با چهار مقدار مشخص پتانسیل ماتریک پارامتری می شود (رابطه ۶):

$$\alpha(h) = \begin{cases} \frac{h - h_f}{h_r - h_f}, & h_r > h > h_f \\ 1, & h_r \geq h \geq h_r \\ \frac{h - h_l}{h_r - h_l}, & h_l > h > h_r \\ 0, & h \leq h_f \text{ or } h \geq h_l \end{cases} \quad (\text{رابطه ۶})$$

مقدار جذب آب هنگامی که  $h_r < h < h_r$  باشد بیشینه و هنگامی که  $h > h_r$  یا  $h < h_r$  باشد به صورت خطی کاهش می یابد. همچنین، زمانی که  $h \leq h_f$  یا  $h \geq h_l$  باشد مقدار جذب صفر می شود. مقدار  $h_r$  تابعی از نیاز تبخیری<sup>۳</sup> است (شکل ۱).

یکی دیگر از مدل های معروف، که برای تعیین ضریب کاهش جذب در هنگام تنش آبی وجود دارد، تابع کاهش سیگموییدی شکلی است که van Genuchten (1987) پیشنهاد کرده است (رابطه ۷).

$$\alpha(h) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h}{h_\delta}\right)^p} \quad (\text{رابطه ۷})$$

$h_\delta$  پتانسیل ماتریکی است که به ازای آن عملکرد ۵۰ درصد کاهش می یابد و معمولاً از طریق آزمون و خطا به دست می آید و  $P$  یک ضریب تجربی است که معمولاً مقدار آن ۳ در نظر گرفته می شود. ضریب تجربی  $P$  را می توان به کمک رابطه ۸ نیز محاسبه کرد (Homae *et al.*, 2002b):

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

مدل هایی که بر اساس بیلان انرژی سطحی اند، بر خلاف مدل هایی که بر اساس تعرق پتانسیل اند، به ویژگی های هیدرولیکی خاک حساس اند. بنابراین، مدل های هیدرولیکی بزرگ مقیاس تر، که بر اساس تعرق پتانسیل عمل می کنند، به دلیل توانمندی بیشتر، برای مدل سازی جذب آب مناسب ترند. همچنین، نتایج نشان داد تعرق واقعی و تبخیر و تعرق به طور کلی نسبت به مقادیر محاسبه شده استاندارد FAO در مدل هایی که بر مبنای بیلان انرژی سطحی بودند کم برآوردی دارد. بهرغم آنکه در زمینه اثر تنش آبی بر محصولات زراعی تحقیقات وسیع و جامعی انجام گرفته و درباره پاسخ های این گونه محصولات در محیط های خشک و کم آب اطلاعات مفصلی در دسترس است، متأسفانه، رفتار گیاهان دارویی و معطر تحت این شرایط به خوبی مطالعه نشده است. گیاهان دارویی مخازن غنی از مواد مؤثر و اولیه در ساخت بسیاری از داروها به شمار می روند. ریحان<sup>۱</sup> گیاهی دارویی و از سبزیجات مفید و عامه پسند است که تقریباً در سراسر دنیا کشت می شود. از این رو، مطالعه اثر تنش های محیطی، به ویژه تنش آبی، به منزله یکی از عوامل مهم و مؤثر بر رشد و عملکرد اقتصادی محصول، حائز اهمیت است (Hassani *et al.*, 2004; Omidbaigi, 2009). هدف این پژوهش ارزیابی چهار تابع کاهش جذب آب ماکروسکوپیک *Feddes et al.* (1978)، *van Genuchten* (1987)، *Dirksen et al.* (1993) و *Homae et al.* (2002b) با استفاده از داده های گلخانه ای ریحان بود.

## مواد و روش ها

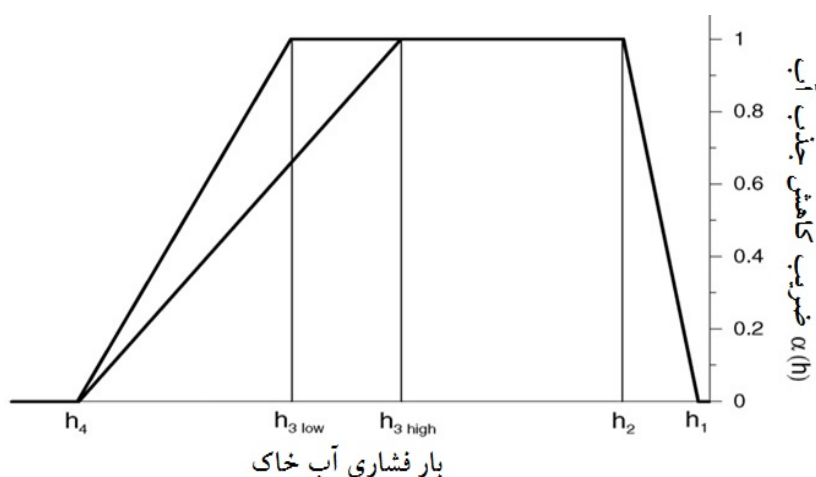
### تئوری مدل های استفاده شده

تنش آبی هنگامی اتفاق می افتد که میزان تعرق بیشتر از مقدار جذب آب باشد. جذب آب توسط سرعت تعرق، انتشار و کارایی سیستم های ریشه، پتانسیل آب، و هدایت هیدرولیکی خاک کنترل می شود. هنگامی که هیچ گونه محدودیت آبی در خاک وجود نداشته باشد، مقدار آب جذب شده گیاه معادل تعرق پتانسیل<sup>۲</sup> و معادله کلی آن به صورت رابطه ۳ است (Gardner, 1964; Green *et al.*, 2006):

$$S + S_{max} + \frac{T_p}{Z_r} \quad (\text{رابطه ۳})$$

$S$  میزان جذب آب گیاه،  $Z_r$  عمق توسعه ریشه، و  $S_{max}$  حداکثر میزان جذب آب گیاه است. اگر خاک نتواند نیاز آبی گیاه را برای حداکثر تعرق فراهم

1. Ocimum basilicum  
2. Potential evapotranspiration (Tp)



شکل ۱. نمایی از تابع کاهش جذب آب (Feddes et al., 1978)

فعالیت‌های حیاتی خود ادامه می‌دهد. سپس، مقدار  $P$  با توجه به  $h_{max}$  به صورت رابطه ۱۱ تعریف شد (Homaei et al., 2002b; Homaei et al., 2002c; Homaei et al., 2002d):

$$P = \frac{h_{max}}{h_{max} - h^*} \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

#### آزمایش مزرعه‌ای

آزمایش با چهار تیمار آبی شامل ۱۲۰، ۱۰۰، ۸۰، و ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه در سه تکرار انجام شد. برای برنامه‌ریزی دقیق آبیاری از دستگاه تتاپروب (Theta Probe, Delta-T Devices, Houston, Tex. 3118-ML2, Dynamax, Inc., Houston, Tex.) استفاده شد و روش وزنی نیز، به منزله یک روش کنترلی برای واسنجی دستگاه تتاپروب، به کار رفت. دستگاه تتاپروب از چهار میله هم‌اندازه، به طول ۶۰ میلی‌متر و قطر ۳ میلی‌متر، یک محفظه ضد آب (بدنه پروب)، و کابلی که سیگنال‌های ورودی و خروجی را به صفحه نمایش‌دهنده داده‌ها وصل می‌کند تشکیل شده است. از مزایای این روش اندازه‌گیری سریع، دقت زیاد، اندازه‌گیری مستقیم در صحرا و در شرایط طبیعی، و قابلیت اندازه‌گیری رطوبت خاک از حد رطوبت پژمردگی تا رطوبت اشباع است. در این مطالعه دستگاه تتاپروب با روش‌های مختلف (خطی، غیر خطی، روش ویژه) واسنجی شد (Miller and Gaskin, 1997; Robinson et al., 1999). نتایج نشان داد روش واسنجی غیر خطی، که سازندگان دستگاه پیشنهاد کرده‌اند، بیشترین دقت را در برآورد رطوبت دارد ( $RMSE = 0.023$  و  $R^2 = 0.935$ ). بنابراین، در این مطالعه از روش سازندگان دستگاه برای برآورد رابطه بین رطوبت و ثابت دی‌الکتریک استفاده شد. به منظور اندازه‌گیری پتانسیل ماتریک، ابتدا منحنی مشخصه رطوبتی خاک، با استفاده از دستگاه صفحات فشاری (Pressure

$h^*$  پتانسیل ماتریک در حد آستانه کاهش عملکرد محصول در شرایط تنش آبی است.

مهم‌ترین ایراد مدل سیگموییدی van Genuchten (1987) 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.

Dirksen et al. (1993) معادله van Genuchten (1987) را نسبت به مقدار پتانسیل ماتریک در آستانه کاهش جذب  $h^*$  تعدیل و آن را به صورت رابطه ۹ ارائه کرد:

$$\alpha(h) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h^* - h}{h^* - h_0}\right)^p} \quad (\text{رابطه ۹})$$

نتایج تحقیقات پژوهشگران مختلف نشان می‌دهد پاسخ گیاهان به تنش آبی در پتانسیل ماتریک‌های کم خطی نیست. از طرف دیگر مدل Dirksen et al. (1993) در پتانسیل ماتریک‌های نزدیک به صفر مقدار  $\alpha(h)$  را زیاد برآورد می‌کند. Homaei et al. (2002b) برای برآورد تنش آبی رابطه ۱۰ را ارائه کردند:

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

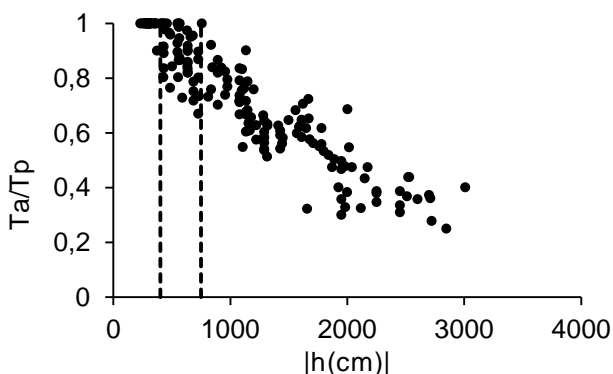
کاهش مقدار  $\alpha$  در تنش‌های آبی بیشتر از  $h^*$  ادامه می‌یابد تا به یک تنش آبی معین ( $h_{max}$ ) برسد. در پتانسیل‌های ماتریک بیشتر از  $h_{max}$  افزایش تنش آبی نمی‌تواند با همان روند قبلی در مقدار  $\alpha$  کاهش ایجاد کند. این واقعیت نشان می‌دهد در  $h > h_{max}$  گیاه هنوز زنده است و در سطحی بسیار اندک به

انحراف مقادیر اندازه‌گیری شده از مقادیر میانگین است. مقدار  $EF$  بین  $-\infty$  تا  $+1$  متغیر است. هر چه مقدار آن به ۱ نزدیک‌تر باشد مدل کارتر است؛ در حالی که مقدار  $CRM$  نشان‌دهنده تمایل مدل برای بیش‌برآوردی<sup>۵</sup> یا کم‌برآوردی<sup>۶</sup> در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده است. اگر همه داده‌های برآورد شده و اندازه‌گیری شده یکسان باشند، نتایج آمارها به صورت  $ME$ ،  $CRM$ ، و  $nRMSE$  برابر صفر و  $EF$  برابر ۱ خواهد بود (Loague and Green, 1991).

پارامترهای مدل‌ها با روش بهینه‌سازی حداقل مجموع مربعات خطا تعیین شد. نرم‌افزارهای آماری استفاده شده در این پژوهش SPSS و Excel بودند.

### یافته‌ها و بحث

بر اساس شکل ۲، حد آستانه کاهش عملکرد در شرایط تنش آبی بین مکش ۴۵۰ تا ۷۵۰ سانتی‌متر است. این دامنه به نتایج *Homae et al.* (1978)، *Feddes et al.* (1993)، *Dirksen et al.* (2002b) نزدیک است. با توجه به اینکه اعمال تنش‌های آبی، که به کاهش بیش از ۸۰ درصد عملکرد محصول منجر شود، از دیدگاه آبیاری و تحلیل‌های اقتصادی مدنظر نیست، پتانسیل‌های بیشتر از ۳۰۰۰ سانتی‌متر مدنظر قرار نگرفت.



شکل ۲. تغییرات تعرق نسبی به منزه تابعی از پتانسیل ماتریک

همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، پارامترهای مدل‌ها با روش بهینه‌سازی حداقل مجموع مربعات خطا تعیین شد. در جدول ۱ پارامترهای مدل‌های استفاده شده ارائه می‌شود. بر این اساس، متوسط آستانه کاهش عملکرد ریحان در شرایط تنش آبی معادل مکش ۵۰۰ سانتی‌متر و مقادیر  $h_3$  و  $h_4$  به ترتیب ۵۰۰ و ۳۱۸۴ سانتی‌متر به دست آمد. بدین ترتیب، گیاه ریحان جزء گیاهان حساس به تنش آبی است. تنش آبی، که در آن

(Plate) و نرم‌افزار RETC، تعیین و سپس، با جایگزینی مقادیر رطوبت‌های روزانه اندازه‌گیری شده در منحنی مشخصه رطوبتی خاک، قدر مطلق پتانسیل ماتریک محاسبه می‌شد. به منظور اندازه‌گیری رطوبت حجمی خاک، رطوبت همه گلدان‌ها هر روز با دستگاه تترپروب اندازه‌گیری می‌شد.

تعرق نسبی با استفاده از تغییرات رطوبت روزانه خاک محاسبه شد. برای کاهش تبخیر از سطح خاک گلدان‌ها، از یک لایه شن به ضخامت ۲ سانتی‌متر استفاده 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 مطالعه شده با استفاده از آماره‌های بیشینه خطای نسبی ( $ME$ )<sup>۱</sup>، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده ( $nRMSE$ )<sup>۲</sup>، کارایی مدل سازی ( $EF$ )<sup>۳</sup>، و ضریب جرم باقی مانده ( $CRM$ )<sup>۴</sup> برای هر یک از مدل‌ها انجام شد. بیان ریاضی آماره‌های یاد شده به صورت رابطه‌های ۱۲ تا ۱۵ است:

$$ME = \max |P_i - O_i|_{i=1}^n \times \frac{100}{\bar{O}} \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

$$nRMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{1/2} \times \frac{100}{\bar{O}} \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

$P_i$  مقادیر برآورد شده،  $O_i$  مقادیر اندازه‌گیری شده،  $n$  تعداد مشاهدات، و  $\bar{O}$  میانگین مقادیر  $O_i$  است.

آماره  $nRMSE$  مقادیر کلی یا میانگین انحراف مقادیر برآورد شده از مقادیر اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد که نمایش‌دهنده عدم اطمینان مطلق مدل است. 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. ضریب  $EF$  بیان‌گر نسبت انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده از اندازه‌گیری شده به

1. Maximum Error
2. normalized Root Mean Square Error
3. Modeling Efficiency
4. Coefficient of Residual Mass

5. Overestimate  
6. Underestimate

(2002b) به ترتیب در توابع کاهش جذب ۲٫۴ و ۱٫۳۵ محاسبه شد. ضریب  $\alpha_0$  در مدل Homae et al. (2002b)، ۰٫۲۴ محاسبه شد.

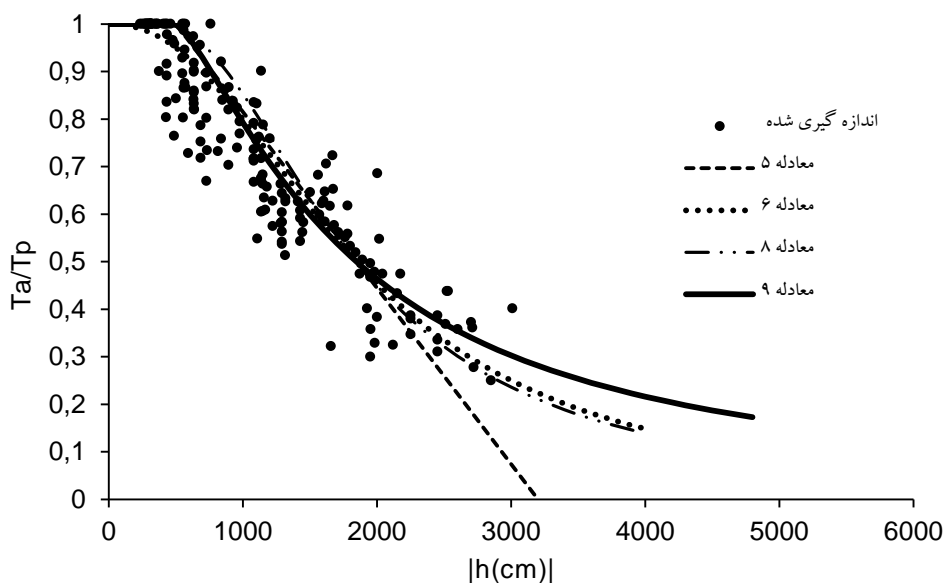
عملکرد ۵۰ درصد کاهش می‌یابد ( $h_{50}$ )، در مدل‌های van Genuchten (1987) و Dirksen et al. (1993) در واکنش عملکرد به تنش آبی ۱۸۴۵ سانتی‌متر محاسبه شد. مقدار پارامتر  $P$  مدل van Genuchten (1987) و مدل Homae et al.

جدول ۱. پارامترهای مدل‌های ۴، ۵، ۷، و ۸ برای برآورد واکنش گیاه ریحان به تنش آبی

نام مدل	شماره معادله	$h^*$	$h_{max}$	$h_{50}$	$h_4$	$h_3$	$P$	$\alpha_0$
Feddes et al.	۵	-	-	-	۳۱۸۴	۵۰۰	-	-
van Genuchten	۶	-	-	۱۸۴۵	-	-	۲٫۴	-
Dirksen et al.	۸	۵۰۰	-	۱۸۴۵	-	-	۲٫۴	-
Homae et al.	۹	۵۰۰	۳۶۰۰	-	-	-	۱٫۳۵	۰٫۲۴

در شکل ۳ برازش توابع کاهش جذب شبیه‌سازی شده در شرایط تنش آبی بر داده‌های اندازه‌گیری شده تعرق نسبی روزانه در مقابل پتانسیل ماتریک ارائه می‌شود. همچنین، در جدول ۲ مقایسه آماری این مدل‌ها می‌آید. نتایج نشان داد همه مدل‌های جذب مقدار جذب روزانه را اندکی بیشتر از مقدار واقعی برآورد می‌کنند (CRM منفی). مدل Homae et al. (2002b)، با در نظر گرفتن دو حد آستانه برای مدل، به مثابه یک ویژگی عددی اثربخش، با داده‌های اندازه‌گیری شده همخوانی بیشتری داشت. مدل Feddes et al. (1978) در رتبه بعدی قرار گرفت و نتایجی پذیرفتنی در همه پتانسیل‌های ماتریک ارائه داد. هر چند مقدار آماره nRMSE در مدل van Genuchten (1987) کمتر از مدل Feddes et al. (1978) است، مقدار ME آن بیشتر از مدل

Feddes et al. (1978) است. از آنجا که در این مطالعه پاسخ گیاه به پتانسیل‌های ماتریک تا  $h_{80}$  (پتانسیلی که در آن مقدار جذب ۸۰ درصد کاهش یابد) اندازه‌گیری شده است، نمی‌توان به طور قطع پاسخ گیاه را به پتانسیل‌های کمتر پیش‌بینی کرد؛ هر چند اعمال پتانسیل‌های کمتر از  $h_{50}$  از لحاظ اقتصادی توجیه‌پذیر نیست. به هر حال، با توجه به انحراف مقادیر جذب نسبی در پتانسیل‌های کمتر از  $h_{50}$  نسبت به معادله خطی Feddes et al. (1978)، می‌توان انتظار داشت مدل‌های غیر خطی در پتانسیل‌های کمتر برازش بهتری داشته باشند. از این حیث، نتایج این پژوهش با نتایج Homae et al. (2002b)، Kiani et al. (2005) و Green et al. (2006) مطابقت دارد.



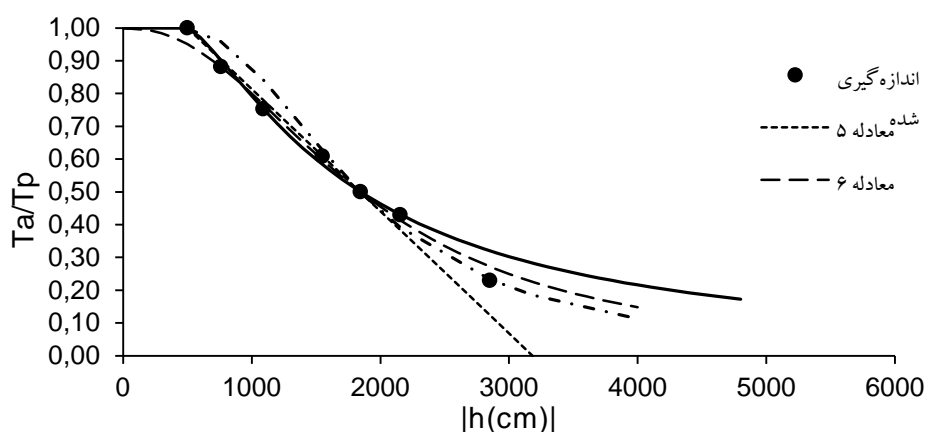
شکل ۳. تعرق نسبی روزانه اندازه‌گیری شده در مقابل قدر مطلق پتانسیل ماتریک

جدول ۲. آماره‌های محاسبه شده برای مقایسه مدل‌های مختلف در برآورد تعرق نسبی روزانه در شرایط تنش آبی

نام مدل	شماره معادله	R <sup>2</sup>	nRMSE (%)	EF (%)	ME (%)	CRM (%)
Feddes <i>et al.</i>	۵	۰٫۹۹۵	۱۱٫۴۹	۰٫۸۴	۲۹٫۰۵	-۰٫۰۲
van Genuchten	۶	۰٫۹۷۳	۱۱٫۳	۰٫۸۵	۳۲٫۸	-۰٫۰۲
Dirksen <i>et al.</i>	۸	۰٫۹۵۹	۱۴٫۲۳	۰٫۷۶	۳۸٫۷۵	-۰٫۰۶
Homaee <i>et al.</i>	۹	۰٫۹۹۳	۱۰٫۷۹	۰٫۸۶	۲۸٫۲۲	-۰٫۰۱

از آنجا که تعرق نسبی فصل رشد مبنای محاسبه میزان جذب نسبی و به تبع آن عملکرد نسبی است، کارایی مدل‌ها در برآورد تعرق نسبی تجمعی ( $\sum T_a/T_p$ ) نیز آزمایش شد. در شکل ۴ برازش توابع کاهش جذب آب بر داده‌های اندازه‌گیری شده تعرق نسبی تجمعی در مقابل میانگین قدر مطلق پتانسیل ماتریک در سطوح مختلف تنش آبی ارائه می‌شود. همچنین، در جدول ۳ آماره‌های ارزیابی مدل‌ها می‌آید. بر این اساس، مدل *Feddes et al.* (1978) و *Homaee et al.* (2002b) در شبیه‌سازی تابع کاهش جذب ریحان به تنش آبی بیشترین همخوانی و بهترین برازش (کمترین مقدار  $nRMSE$  و  $ME$ ) را نسبت به داده‌های اندازه‌گیری شده داشتند. در مجموع، با توجه به نتایج ارائه شده، به نظر می‌رسد بین مدل‌های جذب آب نسبت به تنش آبی مدل‌های *Feddes et al.* (1978)، *van Genuchten* (1987)، و *Homaee et al.* (2002b) نسبت به مدل

Dirksen *et al.* (1993) دقت بیشتری دارند؛ که از این حیث با نتایج پژوهش *Homaee et al.* (2002b)، *Kiani et al.* (2005)، و *Skaggs et al.* (2006) مطابقت دارد. درک و مدل‌سازی چگونگی واکنش گیاهان زراعی و باغی به تنش آبی نقشی مهم در برنامه‌ریزی آبیاری، ارتقای بهره‌وری آب، و افزایش تولید محصولات کشاورزی دارد. از آنجا که مدل‌های جذب مانند توابع تولید آب- عملکرد محصول عمل می‌کنند، مدل‌سازی واکنش گیاه به کم‌آبی را می‌توان نخستین گام در تجزیه و تحلیل اقتصادی کم‌آبیاری و برنامه‌ریزی آبیاری برشمرد. در تحقیقات مختلفی از توابع جذب جهت بهینه‌سازی اقتصادی عمق آب آبیاری استفاده شده است؛ از آن جمله می‌توان به تحقیقات *Kiani et al.* (2002) در تعیین اقتصادی‌ترین عمق آب آبیاری برای تولید گندم با استفاده از مدل‌سازی واکنش گیاه به تنش آبی اشاره کرد.



شکل ۴. تعرق نسبی تجمعی اندازه‌گیری شده در مقابل میانگین قدر مطلق پتانسیل ماتریک

جدول ۳. آماره‌های محاسبه شده برای مقایسه مدل‌های مختلف برآورد تعرق نسبی تجمعی در شرایط تنش آبی

شماره مدل	R <sup>2</sup>	nRMSE (%)	EF (%)	ME (%)	CRM (%)
۶	۰٫۹۹۷	۲٫۱۶	۰٫۹۹	۳٫۴۰	-۰٫۰۲
۷	۰٫۹۴۲	۳٫۱۷	۰٫۹۷	۵٫۱۳	-۰٫۰۲
۹	۰٫۹۲۱	۷٫۳۹	۰٫۷۶	۱۷٫۶۴	-۰٫۱۳
۱۰	۰٫۹۹۴	۴٫۵۹	۰٫۹۳	۹٫۰۲	۰٫۰۳

## نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف مدل‌سازی واکنش عملکرد ریحان به تنش آبی و همچنین ارزیابی کارایی مدل‌های ریاضی موجود در برآورد عملکرد نسبی انجام گرفت. ابتدا، مقدار پارامترهای توابع کاهش جذب تحت تنش آبی با استفاده از بهترین برازش توابع بر داده‌های اندازه‌گیری شده یکی از تیمارها، به کمک روش بهینه‌سازی حداقل مجموع مربعات خطا، محاسبه شد. نتایج نشان داد همه مدل‌ها مقدار جذب روزانه را بیشتر از مقدار واقعی برآورد می‌کنند (CRM منفی). در مجموع، به استناد

تجزیه و تحلیل‌های آماری، با استفاده از آماره‌های محاسبه شده در برآورد جذب نسبی روزانه، مدل غیر خطی Homae et al. (2002b) نسبت به سایر مدل‌ها برازش بهتری ارائه می‌دهد. همچنین، نتایج این پژوهش نشان داد بین توابع کاهش جذب، به ترتیب، مدل‌های ریاضی Feddes et al. (1978) و van Genuchten (1987) و Homae et al. (2002b) در شبیه‌سازی میزان جذب نسبی تجمعی ریحان در شرایط تنش آبی طی فصل رشد نسبت به مدل Dirksen et al. (1993) دقت بیشتری دارند.

## REFERENCES

- Braud, I., Varado, N., and Oliso, A. (2005). Comparison of root water uptake modules using either the surface energy balance or potential transpiration. *Journal of Hydrology*, 301, 267-286.
- Dirksen, C., Kool, J. B., Koorevaar, P., and van Genuchten, M. Th. (1993). HYSWASOR: simulation model of hysteretic water and solute transport in the root zone. In: Russo, D., Dagan, G. (Eds), *Water Flow and Solute Transport in Soils*. Springer, Berlin, pp. 99-122.
- Feddes, R. A., 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. *Agricultural Water Management*, 78, 122-127.
- Gardner, W. R. (1964). Relation of root distribution to water uptake and availability. *Agron. Journal*. 56, 41-45.
- Green, S. R., Kirkham, M. B., and Clothier, E. (2006). Root uptake and transpiration: From measurements and models to sustainable irrigation. *Agricultural Water Management*, 86, 165-176.
- Hassani, A. (2004). The effect of water stress induced by polyethylene glycol on the properties of basil seed germination (*Ocimum Basilicum*). *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 21 (4), 535-543 (In Farsi).
- Homae, M. (2002). *Modeling the plants response to salinity*, Iranian National Committee on Irrigation and Drainage (IRNCID) publications, No. 57, 97 pp. (In Farsi).
- 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. and Feddes, R. A. (2002). Modeling the sink term under variable soil water osmotic and pressure heads. *Develop. Water Sci.* 47, 17-24.
- 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.
- Homae, M., Dirksen, C., and Feddes, R. A. (2002b). Simulation of root water uptake. II. Nonuniform transient water stress using different reduction functions. *Agricultural Water Management*, 57(2), 111-126.
- Homae, M., Feddes, R. A., and Dirksen, C. (2002c). Simulation of root water uptake. III. non-uniform transient combined salinity and water stress. *Agricultural Water Management*, 57, 127-144.
- Homae, M., Feddes, R. A., and Dirksen, C. (2002d). A macroscopic water extraction model for non-uniform transient salinity and water stress. *Soil Science Society American Journal*, 66, 1764-1772.
- Homae, M. and Schmidhalter, U. (2008). Water integration by Plants root under non-uniform soil salinity. *Irrigation Sci.* 27, 83-95.
- 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 management*. ASCE manuals and reports on engineering practice No. 71. *Am. Soc. Civil Eng., Irrig. Drain. Div.*, New York.
- Karimi, A., Mazardalan, M., Liaghat, A. M., and Homae, M. (2006). Fertilizer use efficiency for sunflower using drip irrigation tape. *Journal of Soil and Water (Agricultural Sciences and Technology)*, 21 (1), 11-22 (In Farsi).
- Karimi, A., Homae, M., Liaghat, A. M., and Mazardalan, M. (2004). Uniform distribution of water and fertilizer the drip irrigation system-tape. *Agricultural Research Journal*, 5 (2), 53-66 (In Farsi).
- Karimi, A., Mazardalan, M., Homae, M., Liaghat, A. M., and Raissi, F. (2007). Fertilizer use efficiency for sunflower with fertigation system. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 40 (11), 65-77 (In Farsi).
- Kiani, A. R., Mirlatifi, M., Homae, M., and Cheraghi, A. M. (2004). Determining the best water-salinity crop production function. *Journal of Agricultural Engineering Researches*, 25 (6), 1-14 (In Farsi).
- Kiani, A. R., Mirlatifi, M., Homae, M., and Abyar, N. (2002). The economical investigation of wheat



- production under salinity and water stress conditions. *Agricultural Economics and Development*, 11 (44), 163-178 (In Farsi).
- Kiani, A. R., Homaei, M., and Mirlatifi, M. (2005). Evaluating yield reduction functions under salinity and water stress conditions. *Soil and Water Sciences*, 20 (1), 73-83 (In Farsi).
- 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.
- 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.
- Miller, J. D. and Gaskin, G. (1997). The development and application of the theta probes soil water sensor. MLURI. Technical note, 312 pp.
- Nimah, M. N. and Hanks, R. J. (1973). Model for estimating soil, water, the cross indicates the standard deviation. plant and atmospheric interrelations: I. Description and sensitivity. *Soil Science Society American Journal*, 37, 522-527.
- Omidbaigi, R. (2009). *Production and processing of medicinal plants*. Astan Quds Razavi publications, No. 149, 397 pp. (In Farsi).
- Richards, L. A. (1931). Capillary conduction of liquids in porous mediums. *Physics*, 1, 318-333.
- Robinson, D. A., Gardner, C. M. K., and Cooper, J. D. (1999). Measurement of relative permittivity in sandy soils using TDR, capacitance and theta probes: comparison, including the effects of bulk soil electrical conductivity. *Journal of Hydrology*, 223, 198-211.
- Skaggs, 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. *Agricultural Water Management*, 86, 140-179.
- 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.